



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

A LOS ASISTENTES A LOS CURSOS

Las autoridades de la Facultad de Ingeniería, por conducto del jefe de la División de Educación Continua, otorgan una constancia de asistencia a quienes cumplan con los requisitos establecidos para cada curso.

El control de asistencia se llevará a cabo a través de la persona que le entregó las notas. Las inasistencias serán computadas por las autoridades de la División, con el fin de entregarle constancia solamente a los alumnos que tengan un mínimo de 80% de asistencias.

Pedimos a los asistentes recoger su constancia el día de la clausura. Estas se retendrán por el periodo de un año, pasado este tiempo la DECFI no se hará responsable de este documento.

Se recomienda a los asistentes participar activamente con sus ideas y experiencias, pues los cursos que ofrece la División están planeados para que los profesores expongan una tesis, pero sobre todo, para que coordinen las opiniones de todos los interesados, constituyendo verdaderos seminarios.

Es muy importante que todos los asistentes llenen y entreguen su hoja de inscripción al inicio del curso, información que servirá para integrar un directorio de asistentes, que se entregará oportunamente.

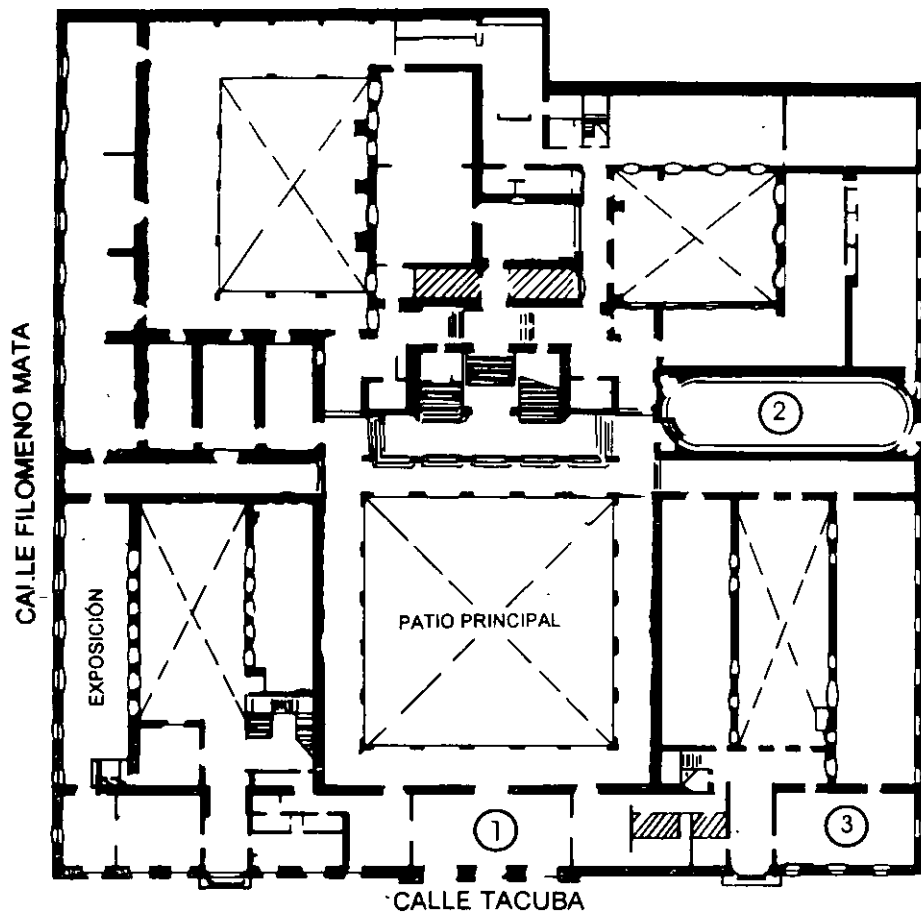
Con el objeto de mejorar los servicios que la División de Educación Continua ofrece, al final del curso deberán entregar la evaluación a través de un cuestionario diseñado para emitir juicios anónimos.

Se recomienda llenar dicha evaluación conforme los profesores impartan sus clases, a efecto de no llenar en la última sesión las evaluaciones y con esto sean más fehacientes sus apreciaciones.

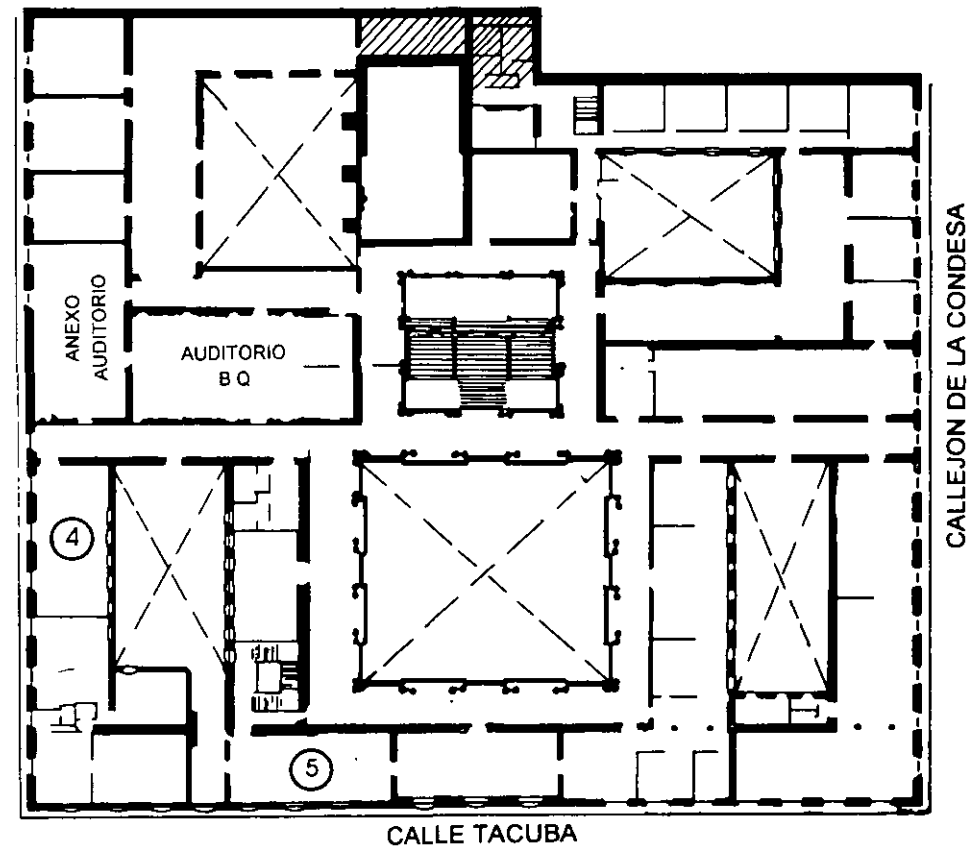
Atentamente

División de Educación Continua.

PALACIO DE MINERIA

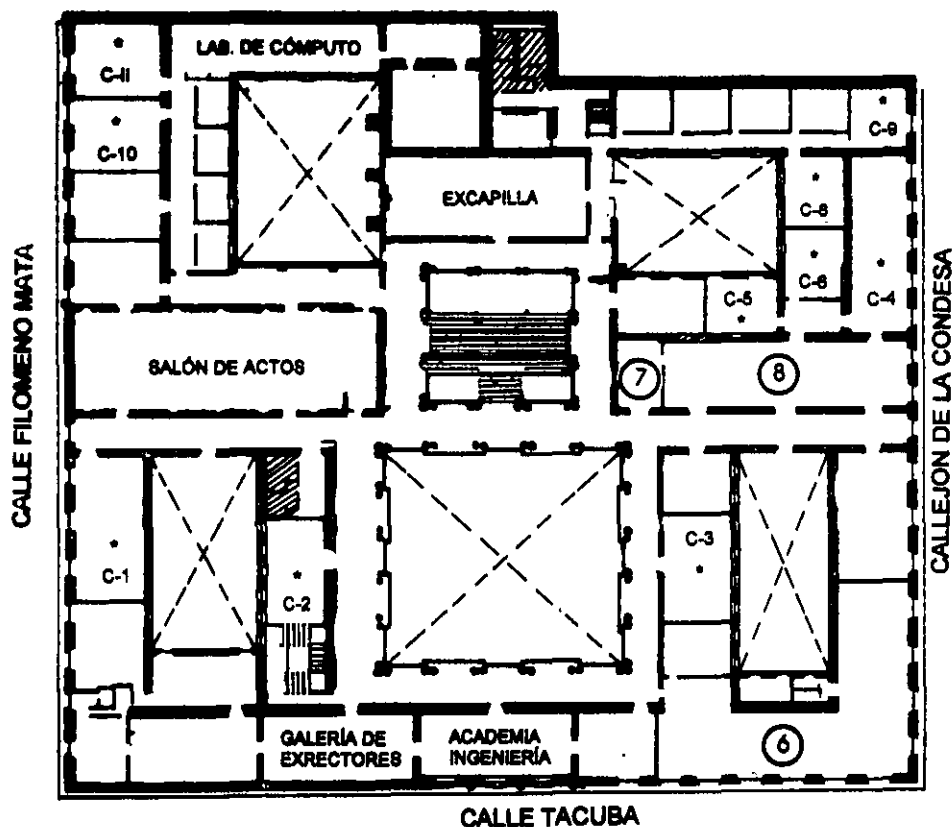


PLANTA BAJA



MEZZANINNE

PALACIO DE MINERIA



GUÍA DE LOCALIZACIÓN

1. ACCESO
2. BIBLIOTECA HISTÓRICA
3. LIBRERÍA UNAM
4. CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN
"ING. BRUNO MASCANZONI"
5. PROGRAMA DE APOYO A LA TITULACIÓN
6. OFICINAS GENERALES
7. ENTREGA DE MATERIAL Y CONTROL DE ASISTENCIA
8. SALA DE DESCANSO

SANITARIOS

* AULAS

1er. PISO



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.
CURSOS ABIERTOS**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA





**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.

GEOHIDROLOGÍA

Piezometría y balance geológico zona metropolitana de la Ciudad de México

Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.

RESUMEN EJECUTIVO

Se realizó la medición de niveles estáticos en 480 pozos piloto ubicados en la zona metropolitana de la Ciudad de México durante el presente año de 1995. Se construyeron configuraciones de la profundidad, elevación y evolución del nivel estático. El nivel estático se encuentra a profundidades que van de 30 a 180 metros. Los valores menores se encuentran hacia la parte central de los valles, mientras que los valores más altos se ubican hacia los flancos de las sierras que circundan al valle. La configuración de la elevación del nivel estático sobre el nivel del mar, permitió marcar la dirección del flujo subterráneo, observándose que el agua subterránea fluye de las elevaciones topográficas hacia la parte central de los valles. La distribución de la red de flujo, permitió diferenciar 3 subsistemas acuíferos correspondientes, el primero, a la Ciudad de México limitado al norte por la Sierra de Guadalupe, al oeste por la Sierra de las Cruces, al sur por la Sierra del Chichinautzin y al oriente por una línea entre el Peñón del Marqués y el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México. El segundo subsistema acuífero corresponde al lago de Texcoco, ubicado al oriente del subsistema de la Ciudad de México y que se extiende al norte hasta el Cerro de Chiconautla al oriente hasta las estribaciones de la sierra nevada y al sur hasta la Sierra de Santa Catarina. El subsistema acuífero de Chalco presenta un flujo que va de las partes altas de las elevaciones topográficas hacia el centro del valle y está limitado al norte por las Sierras de Santa Catarina y el El Pino, al oriente por la Sierra Nevada, al sur por la Sierra del Chichinautzin y al oeste por un parteaguas subterráneo que permite separarlo del subsistema acuífero de la Ciudad de México.

La evolución del nivel estático en los últimos 10 años (1985-1995), presenta máximos de -15 metros, los que se registran hacia las partes centrales de los valles. El abatimiento disminuye hasta perderse en los flancos de las elevaciones topográficas.

La evolución del nivel estático para los últimos 2 años (1993-1995) va de 0 a -3 metros en la mayor parte de la zona estudiada. Una excepción es la zona poniente, que va de Azcapotzalco

hasta Tlalpan, área donde se presentaron recuperaciones de 1 a 2 metros para el período mencionado.

La cuantificación del acuífero se realizó tomando en cuenta la ecuación de balance que indica que las entradas de agua al acuífero son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

La recarga al acuífero por flujo subterráneo, proviene de las infiltraciones que se generan sobre los flancos de las sierras. Para su cálculo se trazó una red piezométrica y sobre ella celdas para la cuantificación de la cantidad de agua que entra al acuífero, utilizando la ecuación de Darcy. El caudal de entrada por flujo subterráneo, en el subsistema acuífero de la Ciudad de México asciende a 257 millones de metros cúbicos por año (Mm³/año), a 154.3 en el valle de Texcoco y a 135.7 Mm³/año en el valle de Chalco.

La salida de agua del acuífero se realiza a través de la extracción por bombeo que se lleva a cabo en prácticamente toda la zona. Existe control sobre las extracciones, las cuales ascendieron para el año de 1994 a 348 Mm³/año en el subsistema acuífero de la Ciudad de México, a 254 en Texcoco y a 168.57 Mm³/año en el valle de Chalco.

Cuando la extracción por bombeo es mayor que la recarga que recibe el acuífero (como es el caso que se presenta en la ZMCM), existe un cambio de almacenamiento negativo que se refleja en un abatimiento de la superficie piezométrica. Se calculó la evolución sufrida en los niveles de alrededor de 400 pozos piloto, obteniéndose un cambio de almacenamiento que ascendió a -12.82 Mm³/año para la Ciudad de México, -23 en Texcoco y -6.47 Mm³/año en el valle de Chalco.

Las características particulares del acuífero de la Ciudad de México, al estar cubierto por una capa de arcillas lacustres saturadas que funcionan como acuitardo, ocasionan un drenado vertical. Este, se produce desde el momento en que existen pozos que extraen agua del subsuelo, debido a que dicha extracción disminuye la presión hidrostática dentro del acuífero permitiendo un flujo vertical descendente. El drenado se calculó a partir de la ecuación de balance, la cual establece que: $E_s + D_v = E_{xt} + A_s$. En la Ciudad de México, la entrada de agua al acuífero por flujo subterráneo asciende a 257 Mm³/año; la extracción por bombeo fue de 348 y el cambio de almacenamiento ascendió a -12.87, de donde se dedujo el drenado vertical el cual fue de 78.18 millones de metros cúbicos anuales; en Texcoco la entrada por flujo subterráneo fue de 154.3 Mm³/año, la extracción por bombeo ascendió a 254 lo cual repercute en un cambio de almacenamiento negativo de 23 Mm³/año. De lo anterior se dedujo un drenado vertical

(infiltración) de 76.7 Mm³/año. En Chalco, la entrada por flujo subterráneo fue de 135.7 Mm³/año; la extracción por bombeo de 168.57 y el cambio de almacenamiento de -6.47 Mm³/año, por lo que la infiltración (drenado de las arcillas) resultó de 26.4 Mm³/año.

La sobreexplotación, en este caso, corresponde al volumen de agua que perdió el acuífero el cual está representado por el cambio de almacenamiento; más el volumen drenado verticalmente del acuitardo, que es también un volumen de agua perdido por el subsuelo. La relación de estos parámetros con la entrada por flujo subterráneo indica el porcentaje de sobreexplotación. Este, ascendió a 35 % en la Ciudad de México, a 65 % en el área de Texcoco y a 24 % en el valle de Chalco.

La recarga artificial al acuífero se dividió de acuerdo al tipo de agua disponible en: recarga con agua residual tratada y recarga con agua pluvial.

Inicialmente, se consideró el volumen de agua residual tratada disponible. Existen 23 plantas de tratamiento en el Distrito Federal de las cuales 13 se encuentran ubicadas en sitios donde se puede realizar la recarga al acuífero a través de pozos. El proyecto aquí presentado incluye un caudal de inyección de 1057 lps a través de 37 pozos.

CONCLUSIONES

La zona estudiada abarca alrededor de 2000 kilómetros cuadrados, incluyó a la Ciudad de México, y se extendió hacia el este hasta Chalco y Texcoco, y al norte hasta Chiconautla.

Se utilizó la información de 1489 pozos, de los cuales 677 son pozos municipales y particulares ubicados en la propiamente Ciudad de México; más 406 pozos del Valle de Texcoco que son utilizados principalmente en la agricultura; 47 pozos al norte del área de Chiconautla, utilizados principalmente en agua potable y 64 pozos al poniente del Caracol de Texcoco. En la porción noroccidental se obtuvieron también datos de 10 pozos de agua potable. Adicionalmente, en el área de Chalco se obtuvo información de 285 pozos que incluyen municipales y particulares.

La extracción de agua del acuífero provoca abatimientos en el nivel tanto estático como dinámico.

La zona con mayor afectación por abatimientos de la superficie piezométrica corresponde a la porción suroccidental, que va del Cerro de la Estrella a Tlalpan.

En los últimos 2 años se observó una recuperación de niveles en la zona poniente de la Ciudad de México.

Se obtuvieron los gastos para cada uno de los pozos, obteniéndose una extracción total en el área estudiada de 864.66 Mm³/año, que equivalen a un caudal instantáneo de 27.42 m³/seg.

La extracción en el subsistema acuífero Ciudad de México, fue de 390.75 Mm³/año; en Texcoco de 286.54 Mm³/año y en Chalco de 187.37 Mm³/año, equivalentes a 12.39, 9.09 y 5.94 m³/seg respectivamente.

La evolución o cambio de almacenamiento anual fue de -12.82 Mm³/año para la Ciudad de México; -23.00 Mm³/año en Texcoco y; de -6.47 Mm³/año para Chalco, correspondientes a -0.41, -0.73 y -0.21 m³/seg respectivamente.

La entrada por flujo subterráneo a la Ciudad de México ascendió a 257 Mm³/año equivalente a 8.15 m³/seg; en el área de Texcoco, ésta fue de 154.3 Mm³/año equivalente a 4.89 m³/seg y; por lo que se refiere a Chalco, ésta ascendió a 135.7 Mm³/año que equivale a 4.30 m³/seg.

Utilizando los datos de entrada por flujo subterráneo, extracción y cambio de almacenamiento mencionados en incisos, se dedujo la recarga por drenado de las arcillas, la cual resultó para la Ciudad de México de 78.18 Mm³/año; para Texcoco de 76.7 Mm³/año y; para Chalco de 26.4 Mm³/año, que equivalen a 2.48, 2.43 y 0.84 m³/seg respectivamente.

La sobreexplotación en la Ciudad de México fue del 35%, en Texcoco del 65% y en Chalco del 24%.

Para efectuar la recarga artificial al acuífero es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes: La existencia de sitios y zonas permeables y, la existencia de volúmenes de agua susceptibles de destinarse para la recarga.

La infiltración puede realizarse a través de pozos o de estanques.

Los volúmenes de agua disponibles para recarga corresponderán a aguas residuales renovadas, provenientes de futuras ampliaciones a planta de tratamiento o bien a eficientización de las mismas.

Otra fuente de agua para recarga es la lluvia, utilizando dispositivos de captación en cuencas sobre áreas tales como estacionamientos o techos de centros comerciales u otros, de tal manera que permitan su captación y tratamiento previamente a su inyección al subsuelo.

La capacidad del acuífero para recarga es muy grande, por lo que ésta se deberá medir en base a la disponibilidad de aguas para recarga.

En una alternativa preliminar se obtuvo la posibilidad de recargar 1057 lps a través de 37 pozos, 12 de los cuales ya se encuentran perforados.

La recarga de agua tratada a través de estanques, actualmente se realiza con un caudal de 600 lps y se tiene en proyecto la ampliación a 1000 lps, la cual será suministrada a partir de ampliaciones de la planta de tratamiento Cerro de la Estrella.

Con agua de lluvia se seleccionaron 6 sitios al pie de la Sierra Nevada, donde podrían perforarse 6 pozos de recarga a través de los cuales se podrían inyectar 20 lps por pozo durante 6 meses del año, lo que da un caudal continuo de 60 lps.

RECOMENDACIONES

Se hace notar que los datos arrojados en la cuantificación del acuífero pueden variar de un año a otro, de acuerdo tanto a la extracción por bombeo como al cambio de almacenamiento, los cuales son variables. Por ello, se recomienda efectuar balances geohidrológicos para los 10 años anteriores, utilizando una metodología consistente que permita comparar la forma como ha evolucionado el déficit del acuífero y poder simular su comportamiento a futuro.

En caso de que el suministro de agua a la ciudad lo permita, disminuir la extracción de agua en el área entre Tlalpan y Xochimilco, zona donde se ha venido incrementando en los últimos años el abatimiento de los niveles.

Aplicar un modelo matemático del acuífero, actualizando los datos de extracción, recarga y niveles, a fin de realizar una calibración adecuada y simular el comportamiento futuro bajo diferentes políticas de extracción.

Continuar con la medición piezométrica en pozos piloto cuando menos una vez por año.

Realizar estudios detallados de sitios para recarga artificial. Programas de recarga y diseños ejecutivos.

Sanear los flancos de las sierras que borden a la zona metropolitana, para procurar la recarga artificial con agua de lluvia, antes de que ésta se contamine a lo largo de los cauces actualmente contaminados.

Monitorear el acuífero para conocer los efectos de la actual recarga artificial a través del estanque de Santa Catarina.

Efectuar estudio de detalle para incrementar la infiltración de agua sobre los flancos de las sierras, mediante reforestación y construcción de presas de gaviones.

ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO 1995

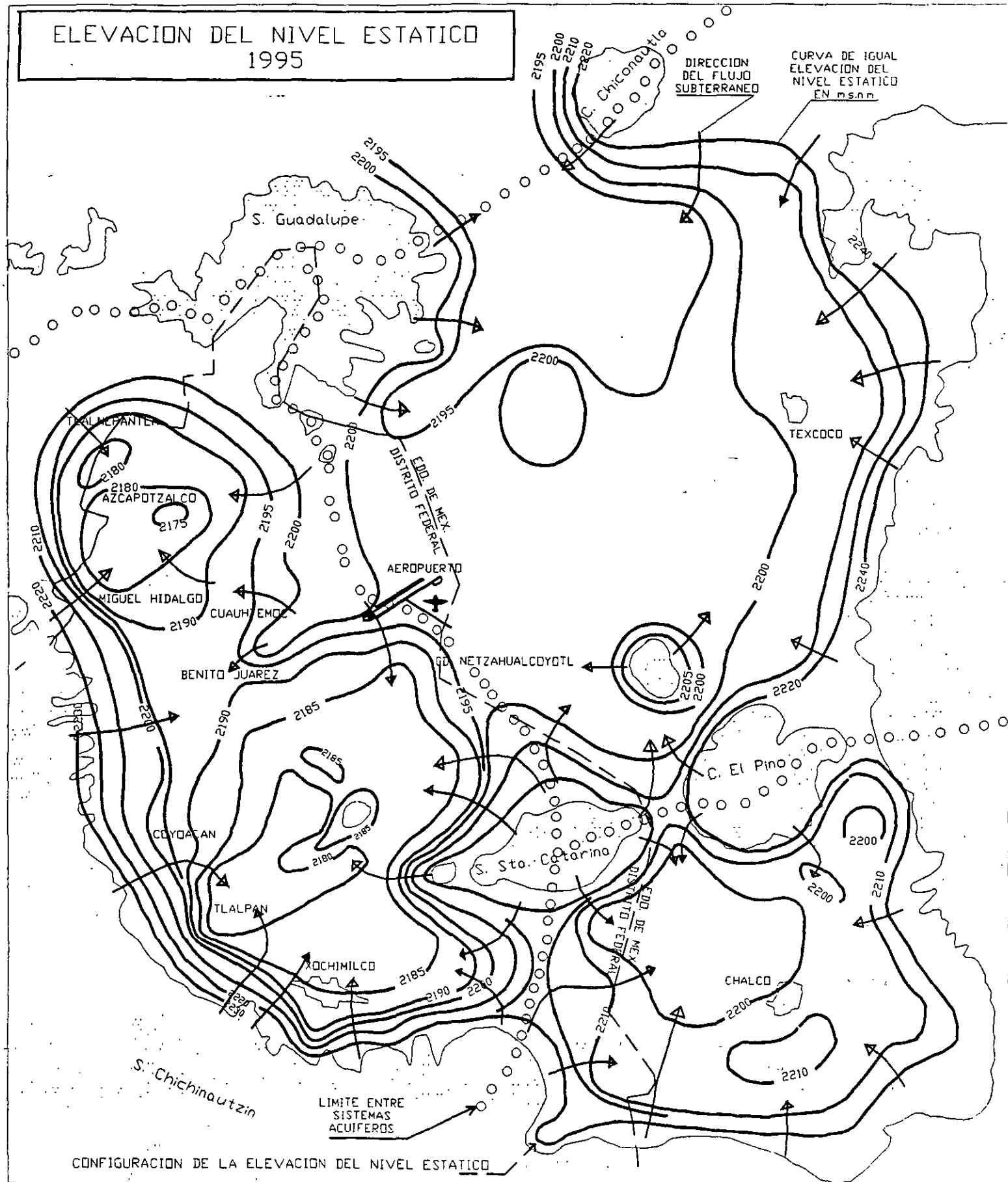


FIGURA 3.2

PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO 1995

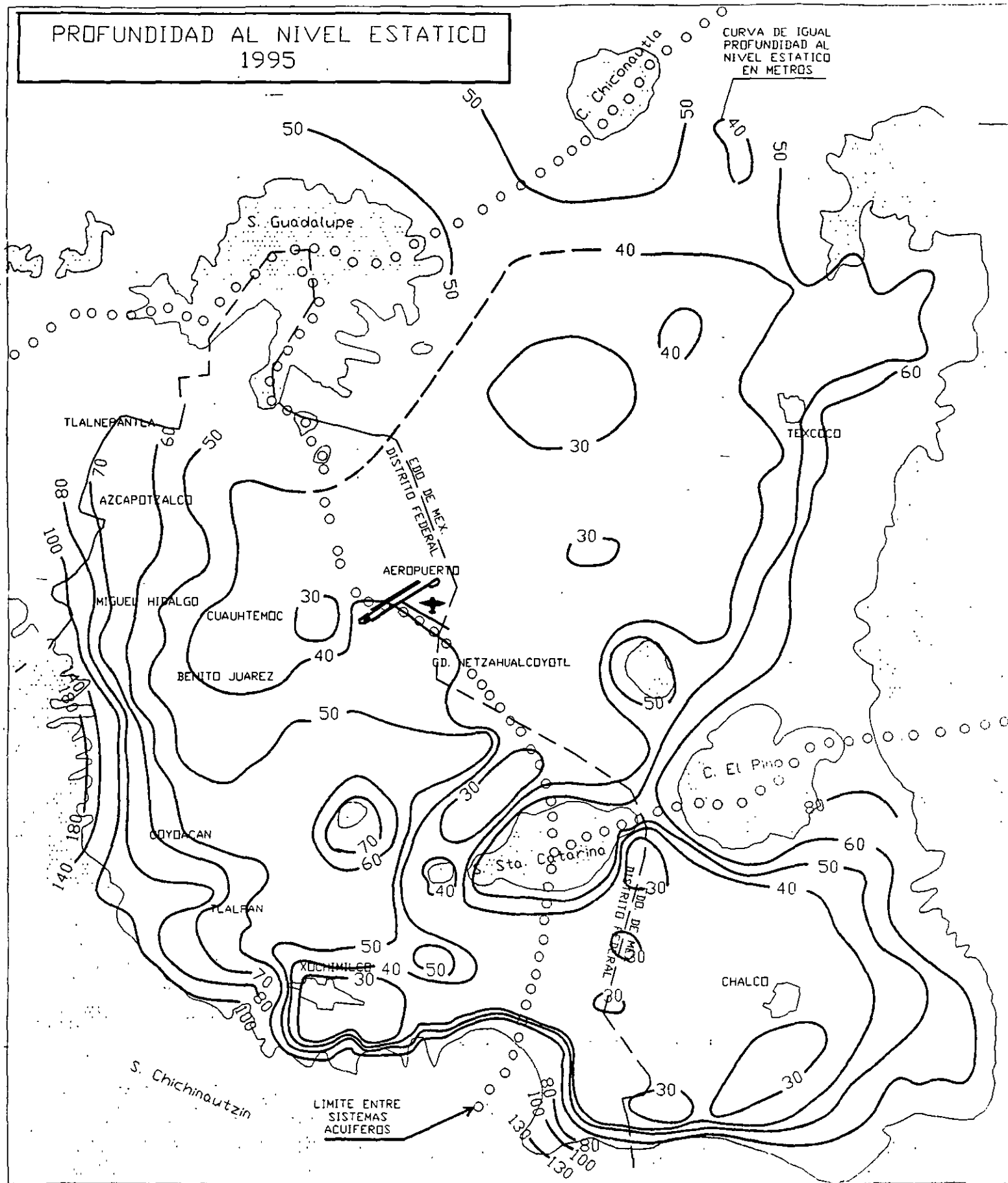


FIGURA 3.1

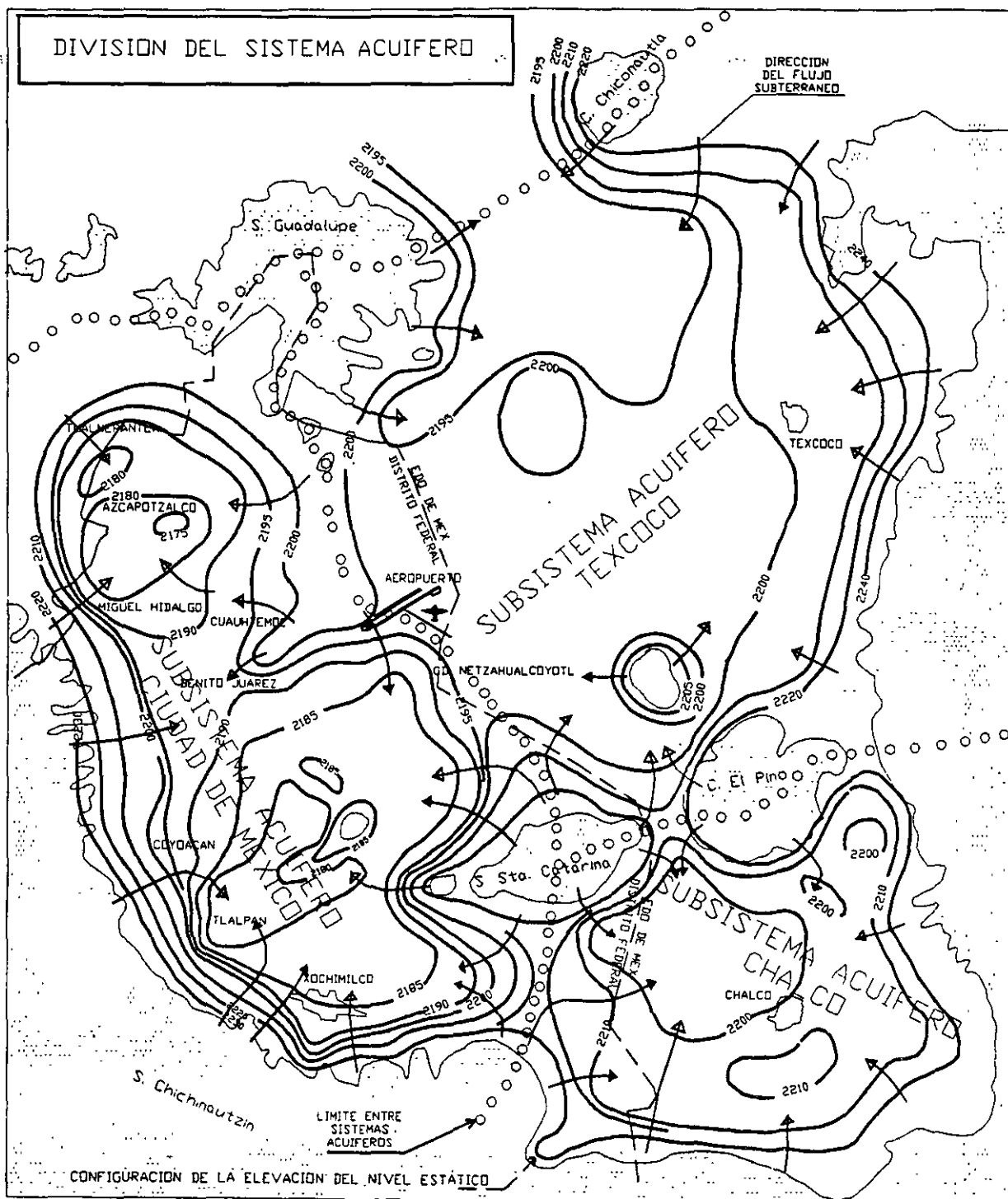


FIGURA 4.2

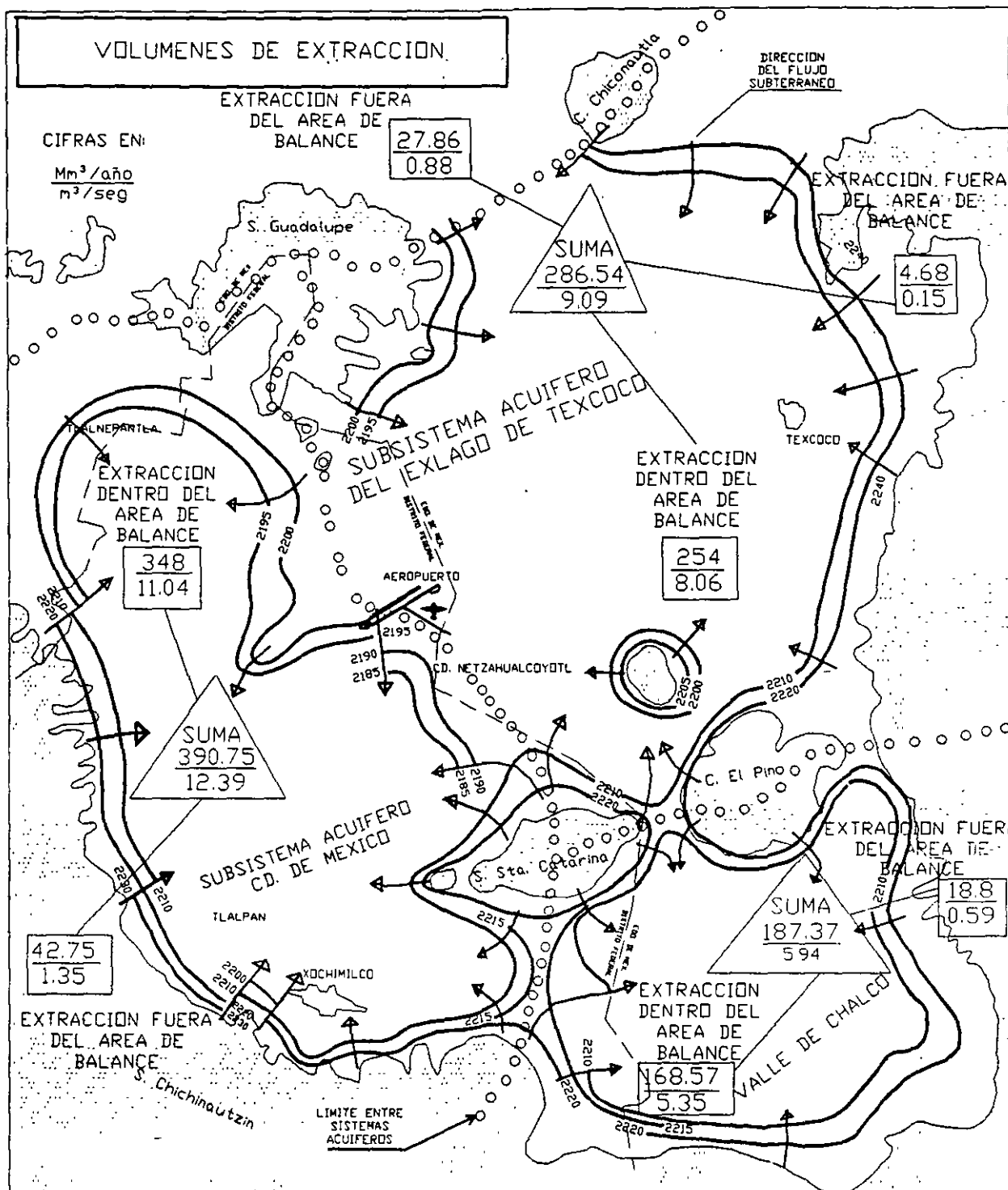


FIGURA 4.3

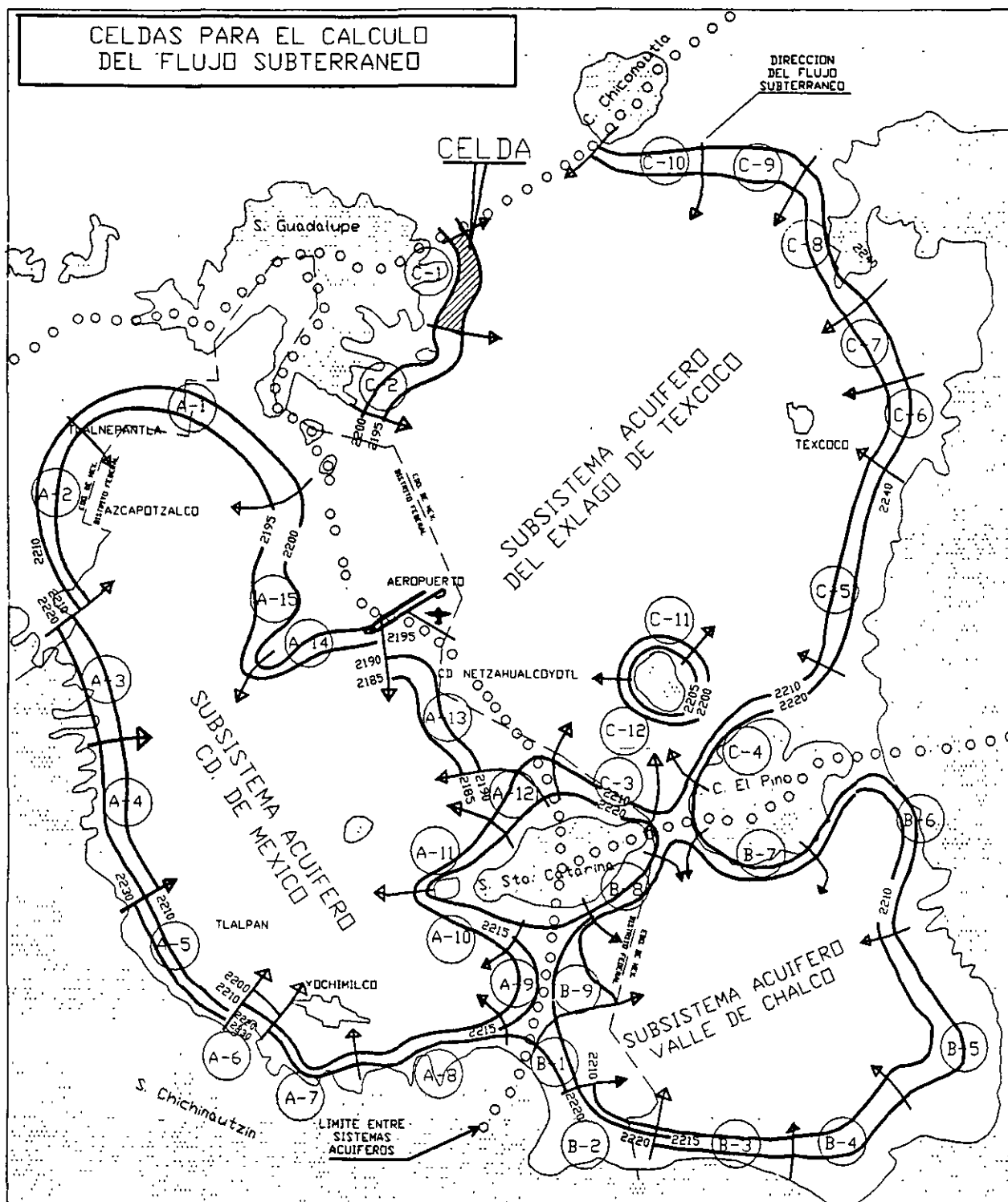


FIGURA 4.5

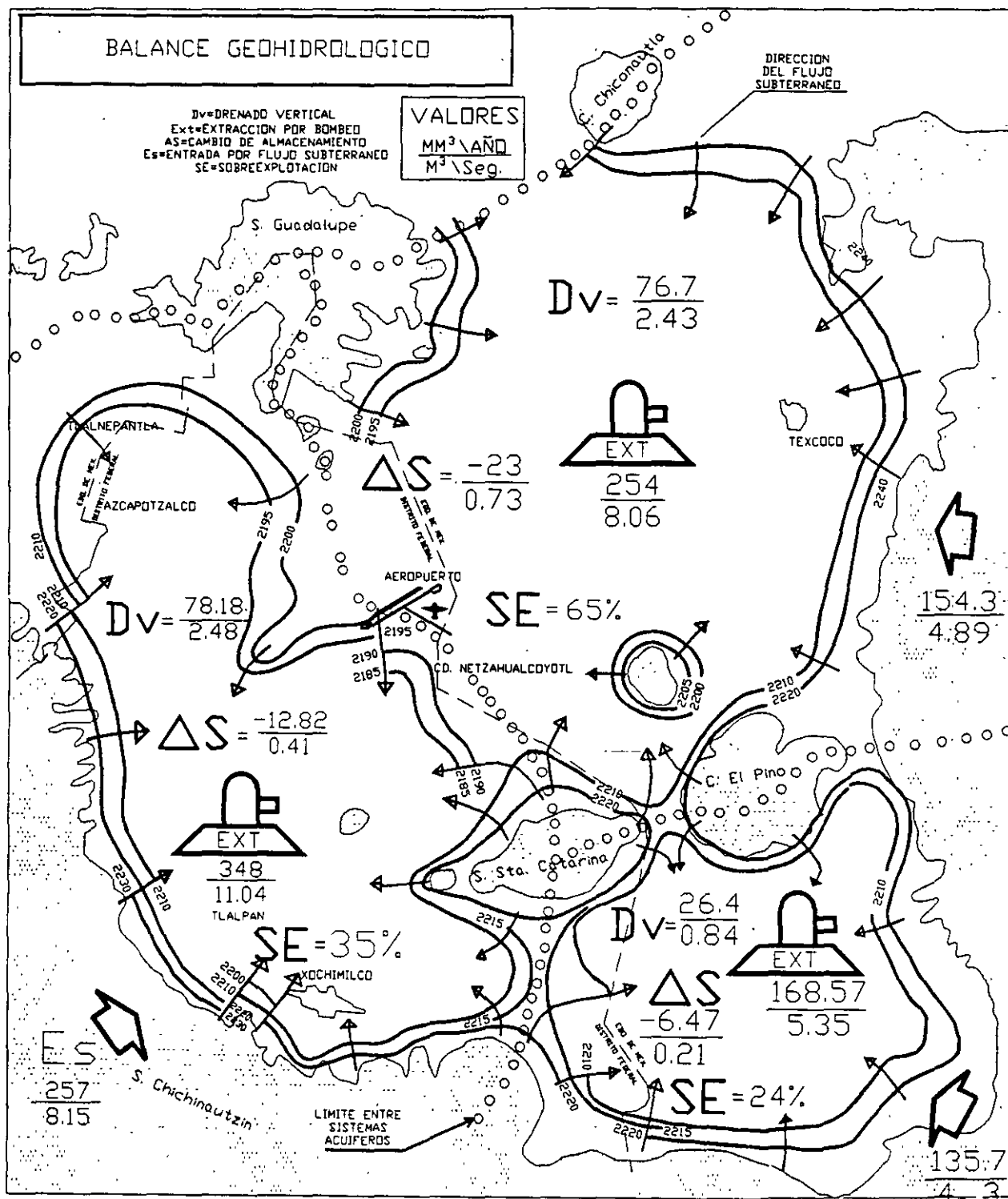


FIGURA 4.6

Recarga artificial de agua residual tratada al acuífero del valle de México

Dirección General de Construcción y Operación
Hidráulica-Secretaría General de Obras-DDF
Lesser y Asociados, S. A. de C. V.

Una de las acciones del Programa de Uso Eficiente del Agua consiste en la recarga artificial al acuífero de la ciudad de México, lo que puede ofrecer beneficios considerables. Sin embargo, existen interrogantes sobre algunos de los efectos que pueda tener dicha recarga, por lo que se determinó que era indispensable llevar a cabo estudios que ayudaran a establecer un proyecto a gran escala. Bajo esta óptica, se formularon los lineamientos para un programa general de recarga al acuífero del valle de México mediante la experimentación en varios pozos, cuyos resultados iniciales se presentan en este trabajo.

La ciudad de México requiere de grandes volúmenes de agua, que actualmente se obtienen tanto de pozos dentro de la ciudad misma, como importando agua de cuencas externas. Los pozos que explotan agua del subsuelo, extraen en conjunto volúmenes tales que sobrepasan la recarga natural del acuífero, lo que ocasiona una explotación reflejada en el abatimiento de los niveles del agua, los cuales alcanzan valores máximos en algunos sitios del orden de 3 metros por año. Los requerimientos de agua para la ciudad han obligado a continuar esta explotación.

Los abatimientos de los niveles del acuífero provocan la compactación de las arcillas y el hundimiento del terreno, lo que a su vez origina diversos problemas, principalmente en el drenaje citadino. En la actualidad, los asentamientos del terreno tienen un valor medio de 10 cm anuales, aunque existen valores extremos de 40 centímetros.

Paradójicamente a la explotación del acuífero, el sistema de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de México no ha operado a su máxima capacidad en virtud de que el número de usuarios de este recurso tradicionalmente no ha sido importante. El reúso es una opción para resolver la problemática del abastecimiento de agua potable y representa un paso importante en la optimización del aprovechamiento de los recursos hidráulicos. A

su vez, la recarga artificial de acuíferos con aguas renovadas representa uno de los alcances más significativos de cualquier programa de reúso, ya que su finalidad es la de preservar los recursos acuíferos.

Por lo anterior, se ha deducido que la recarga artificial del acuífero mencionado presenta grandes beneficios, ya que, por una parte, se podrían atenuar los asentamientos del terreno y con ello, proteger en forma local o regional las obras hidráulicas de la superficie, como drenajes y un gran número de cimentaciones de obras civiles. Por otro lado, sería factible controlar el flujo subterráneo y, entre otras cosas, formar barreras. A la vez, se podría utilizar el acuífero como una zona de almacenamiento de agua para su uso futuro. Sin embargo, existen interrogantes sobre algunos de los efectos que podría causar la recarga y el riesgo potencial de afectar de manera importante e irreversiblemente la calidad del agua subterránea, por lo que se consideró indispensable llevar a cabo estudios que generaran la información necesaria para instrumentar un proyecto a gran escala. Tales estudios deben contemplar todos aquellos factores determinantes en los procesos que afectan la composición físico-química y bacteriológica, tanto del agua de recarga como de la almacenada en el acuífero, a fin de contar con elementos de análisis para evaluar el

impacto que tendría un proyecto de este tipo en la disponibilidad de agua potable en un acuífero sujeto a la recarga.

Geología

La ciudad de México se emplaza dentro de una antigua cuenca lacustre cerrada en la que actualmente el drenaje se lleva a cabo de manera artificial hacia el norte. Los materiales que constituyen el subsuelo del valle corresponden a depósitos de aluviones y sedimentos lacustres cuaternarios. Los primeros provenían de las laderas y fueron transportados hacia el centro del valle por corrientes fluviales. Por su parte, los sedimentos lacustres en general sobreyacen a los aluviones y también se interdigitan con ellos a profundidad. En los flancos del valle limitándolo, básicamente hacia el poniente, sur y oriente, se encuentran elevaciones topográficas constituidas por rocas volcánicas que en su mayor parte se comportan como permeables. En las estribaciones de la sierra de las Cruces se encuentra una serie de antiguos depósitos volcánicos y fluviales conocida como Formación Tarango, que produce las lomas del poniente y está constituida primordialmente por arenas, conglomerados, cenizas volcánicas, piroclásticos y aglomerados de mediana a baja permeabilidad. Los materiales volcánicos, en especial las lavas y piroclásticos de tipo basáltico, forman la parte sur del valle y hacia sus estribaciones se encuentran interdigitados con los materiales aluviales y lacustres.

Geohidrología

Las rocas que constituyen el subsuelo del valle de

México pueden agruparse en tres tipos de acuerdo con sus características o capacidad para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento del agua subterránea: arcillas lacustres, rellenos aluviales, basaltos y piroclásticos (véanse ilustraciones 1 y 2).

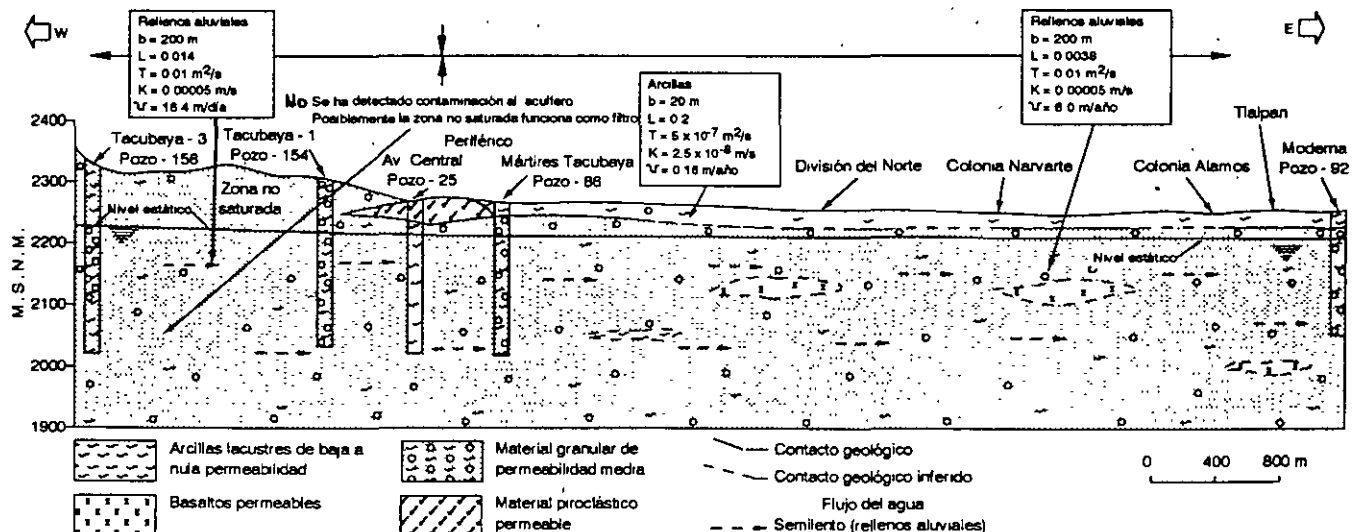
Arcillas lacustres

El primer grupo está formado por arcillas lacustres que cubren la mayor parte del valle. Corresponden a sedimentos finos de permeabilidad reducida, originados por los antiguos lagos del valle de México y tienen espesores que varían de 15 a 60 m. Estudios de mecánica de suelos han identificado, dentro de este grupo, a dos horizontes de arcillas denominadas Formación Arcillosa Superior y Formación Arcillosa Inferior, a las cuales las divide un horizonte arenoso denominado capa dura. Geohidrologicamente este grupo se clasifica como acuitardo. Se encuentra saturado, descansa sobre materiales granulares permeables hacia donde se drena. La pérdida de agua del acuitardo produce la compactación de las arcillas, lo cual es la causa de los hundimientos del terreno. Existen también grietas que se han formado en las arcillas, a través de las cuales se infiltra agua al acuífero a partir de la superficie.

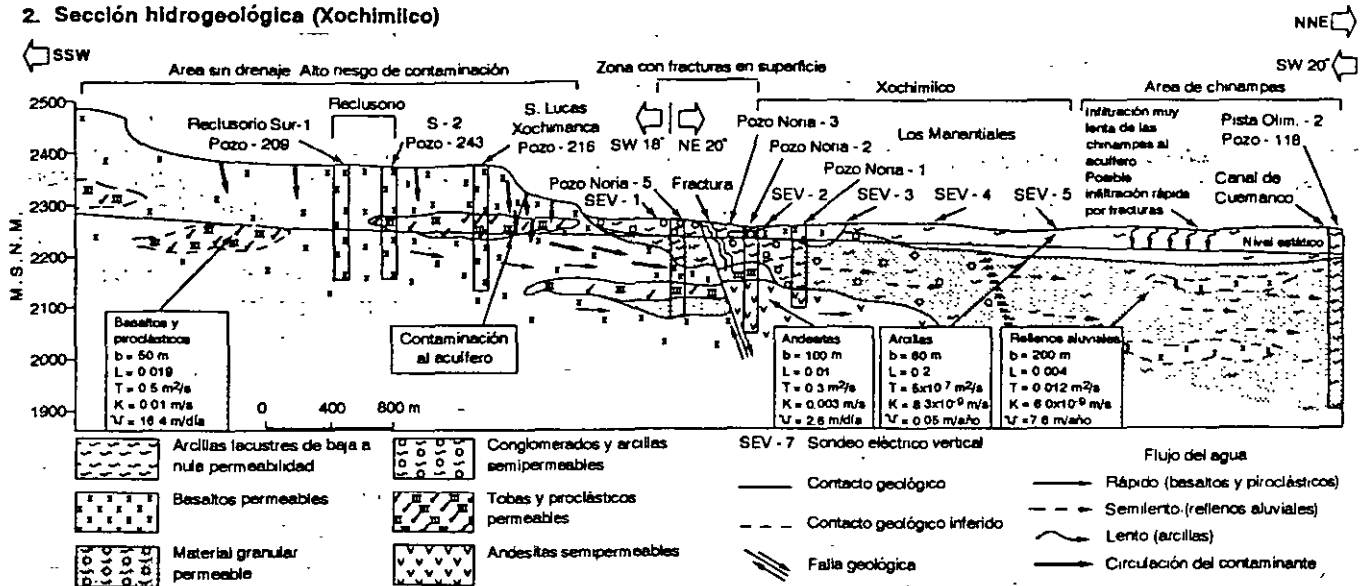
Rellenos aluviales

Las rocas o materiales del segundo grupo corresponden a los rellenos aluviales (gravas, arenas y arcillas). Subyacen a las arcillas lacustres y forman la mayor parte del acuífero de la ciudad; dentro de estos materiales se llegan a encontrar cuerpos tabulares de derrames lávicos de composición basáltica. Tienen

1. Sección hidrogeológica (Nápoles)



2. Sección hidrogeológica (Xochimilco)



una transmisibilidad que varía de 0.001 a 0.012 m²/s; la velocidad del flujo de agua subterránea es de 2.5 a 39.4 m/año.

Basaltos y piroclásticos

El tercer grupo de materiales corresponde a basaltos y piroclásticos, los cuales tienen una alta permeabilidad y permiten el libre flujo del agua a través de ellos. Se encuentran generalmente en las elevaciones topográficas que constituyen las sierras del Chichinautzin y Santa Catarina, y en ocasiones, se prolongan en el subsuelo interdigitados con los aluviones. Su transmisibilidad es de 0.5 m²/s. La velocidad del flujo subterráneo, que varía de 2.3 a 16.4 m/día, depende de la transmisibilidad y del gradiente hidráulico (el cual en ciertos lugares es muy reducido).

Secciones

La sección de la ilustración 1 muestra la geología y geohidrología de la zona central de la ciudad de México. La mayor parte del subsuelo se encuentra constituido por materiales aluviales como arenas, arcillas y gravas, en ocasiones incluyendo tobas; en general, se considera que presentan una permeabilidad media. Llegan a incluir horizontes de materiales piroclásticos y derrames lávicos de composición tanto basáltica como andesítica.

Cubriendo a la mayor parte de la sección y con un espesor aparentemente de 20 m, se encuentra una capa de materiales arcillosos originados por el antiguo lago de México. Estas arcillas presentan de reducida a nula permeabilidad.

En la ilustración 2 se muestra la composición del sur de la ciudad de México. Corresponde a la estratificación de la sierra del Chichinautzin, la que está compuesta por basaltos y materiales piroclásticos de alta permeabilidad, en los que la infiltración es tan alta que prácticamente no existe escorrentía superficial. Los pozos perforados en este tipo de rocas han alcanzado más de 200 m de profundidad. Geológicamente se considera que el espesor de los basaltos en la sierra puede alcanzar varios cientos de metros.

En la zona del valle se encuentran materiales granulares entre los que predominan los finos hacia la superficie; éstos corresponden a arcillas lacustres producto de la sedimentación en el antiguo lago de Xochimilco. Las arcillas tienen un espesor de hasta 60 m y se encuentran cubriendo a los materiales granulares; corresponden a arenas, arcillas y gravas que presentan una permeabilidad media. A la altura del pozo Noria 5, se detectó en la superficie una fractura que podría corresponder a una falla, inferida también por la variación litológica tan notable que presentan los pozos Noria 5 y Noria 2. Estas fracturas o fallas podrían corresponder a zonas de flujo preferente de agua subterránea. En la parte central de la sección, a la altura de los pozos mencionados, se encuentran rocas andesíticas constituyendo parte del subsuelo. Estos materiales se consideran de una permeabilidad media.

Requerimientos para la recarga

La recarga artificial al acuífero de la ciudad de México puede presentar condiciones favorables para la disminución de la subsidencia del terreno; para el

control del flujo subterráneo; para un mejor manejo del acuífero y para el almacenamiento de agua para uso futuro, con lo que a largo plazo se podría reducir la importación de agua de cuencas externas. Para efectuar la recarga es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- Existencia de sitios y zonas permeables que permitan la infiltración de agua al acuífero. Dichos puntos se pueden alcanzar por medio de pozos, estanques y galerías filtrantes, aunque estos dos últimos requieren de una gran superficie de terreno. Conviene anotar que las condiciones geológicas de la cuenca impiden la infiltración del agua a partir de la superficie prácticamente en toda la zona del antiguo lago, por lo que ésta sólo se puede realizar en los flancos de las sierras. Por su parte, los pozos sí son un medio adecuado, ya que permiten la recarga al acuífero a través de ellos y no requieren de gran extensión de terreno.
- Existencia de volúmenes de agua susceptibles de utilizarse para la recarga. Los volúmenes disponibles en la ciudad de México, corresponden a las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento distribuidas prácticamente en toda la ciudad, que se deben someter a un tratamiento adicional para que alcancen la calidad deseable para recarga. Otra posible fuente sería el agua de lluvia.

Sitios seleccionados para la recarga

Se visitaron todos los pozos cancelados o fuera de operación ubicados en la ciudad de México, y se seleccionaron 82 que presentaban condiciones favorables para utilizarlos como puntos para recarga. De éstos, se eligió en primer término el pozo San Luis 15 para un programa inmediato de experimentación.

Pozo de recarga San Luis 15

Se seleccionó el pozo San Luis 15 para realizar la recarga experimental al acuífero, debido a las siguientes características: (1) por encontrarse cercano a la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco; (2) porque actualmente no se utiliza para agua potable y (3) por encontrarse lejano de otros pozos de agua potable, evitando de esta manera, el riesgo de una posible contaminación directa al efectuar la recarga.

El agua seleccionada para la recarga corresponde al efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Luis Tlaxialtemalco, dado que ésta cuenta con tratamiento a nivel terciario.

Características

El pozo San Luis 15 se localiza en la porción sur de la zona urbana del Distrito Federal, junto al poblado de San Gregorio Atlapulco y a 4 km al oeste de la planta de San Luis Tlaxialtemalco (véase ilustración 3). Su nivel estático se encuentra a 30.06 m de profundidad y el nivel dinámico a 30.77 m. Tiene una profundidad total de 64 m y fue perforado con una máquina de percusión a una profundidad total de 66.85 m. Está ademado con tubería ciega hasta los 18 m de profundidad en un diámetro de 18 pulgadas; el resto del pozo se encuentra libre de tubería de ademe. Este pozo fue perforado en 1958 y en el aforo efectuado en esa época se midió un nivel estático de 16.8 m, un nivel dinámico a los 17.10 m con caudal de extracción de 100 l/s y un rendimiento específico de 333 l/s por metro de abatimiento. Dicho pozo se encuentra al pie de la sierra del Chichinautzin, la cual está constituida por materiales volcánicos, basálticos, entre los que predominan los derrames lávicos asociados con piroclásticos, que varían desde cenizas hasta escorias de gran tamaño.

El corte litológico de este pozo indica que en los primeros 9 m se encontraron fragmentos de material basáltico empacados en arcilla y de los 9 a los 66.85 m, basaltos, que varían en compacidad o forma de presentación. Los materiales basálticos que constituyen esta zona tienen un gran número de fracturas que le imprimen una alta permeabilidad, lo cual es notorio al observar los rendimientos específicos de los pozos que se encuentran en esta área.

La velocidad del agua en este tipo de materiales es difícil de cuantificar. La transmisibilidad es alta

3. Plano de localización



y el gradiente hidráulico muy bajo. Por ello, el agua tiene facilidad para circular rápidamente, pero el bajo gradiente ocasiona que ésta se encuentre casi estática. Considerando un espesor de basaltos de 150 m, un gradiente hidráulico de 0.015, una transmisibilidad de 0.05 m²/s y una permeabilidad de 0.0033 m/s, se obtiene que la velocidad de circulación del agua subterránea es de 4.3 m/día.

Calidad del agua de recarga

Se programa utilizar agua tratada proveniente de la planta de San Luis Tlaxialtemalco, cuyas normas establecidas para el efluente se presentan en el cuadro 1.

Caudal de inyección

Debido a que el pozo San Luis 15 se encuentra atravesando materiales basálticos de alta permeabilidad, puede permitir la infiltración de un caudal alto de agua. En la primera etapa del proyecto, se inyectará un caudal de 75 l/s que corresponde al gasto de operación actual de la planta de tratamiento. En el futuro se estudiará la conveniencia de incrementar dicho caudal.

Adaptación del pozo de recarga

Para la recarga a través del pozo San Luis 15, se vertirá el agua por gravedad desde la superficie y se harán mediciones piezométricas, de caudal y de calidad del agua. De acuerdo con las experiencias de recarga artificial que se realizan en la planta Fred Herbey de El Paso, EUA, es conveniente disponer el agua de recarga por medio de un tubo abajo del nivel estático, para evitar la aereación que provoca taponamiento del pozo. Tomando en cuenta lo anterior y el diámetro actual del pozo, se consideró que la forma más apropiada consistía en colocar tres tuberías de inyección de 4 pulgadas de diámetro cada una (véase ilustración 4), para permitir una recarga unitaria (por cada tubo de 4 pulgadas) cercana a los 25 l/s. Además, se tiene la ventaja de que para caudales menores se utilizan sólo una o dos tuberías, según se requiera.

La adaptación realizada consistió en la colocación de una válvula de 10 pulgadas de diámetro que se conecta por medio de una brida a la conducción proveniente de la planta de San Luis Tlaxialtemalco. La válvula mencionada tiene tres salidas de 4 pulgadas que conectan con un codo de tubería de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 32 m de longitud, colocada dentro del pozo.

1. Normas de calidad del efluente de la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco

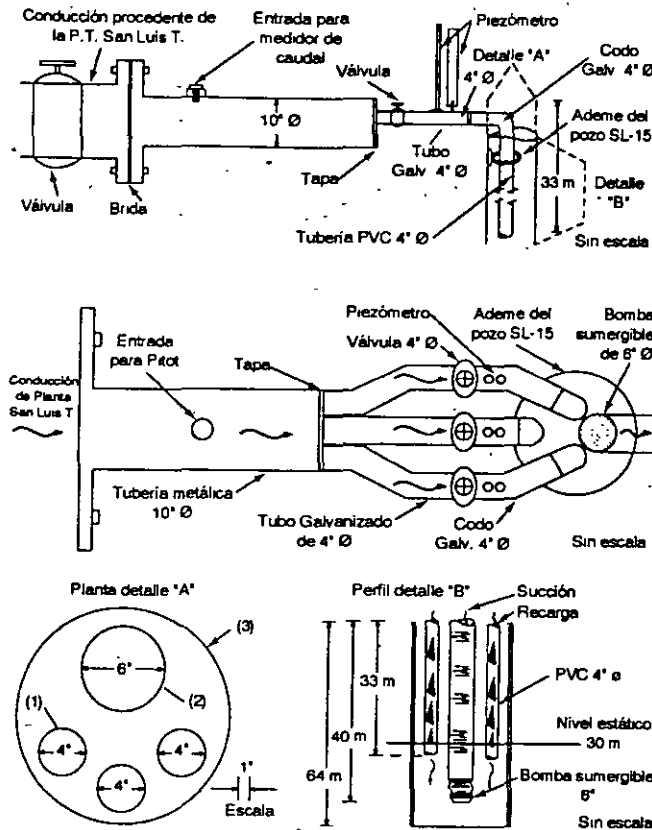
Parámetro	Norma del efluente
Físicos	
pH	6.5
Color	6.0
Conductividad (mmhos/cm)	200
Sólidos totales	3000.0
S.T.F.	1500.0
S.T.V.	1000.0
S.D.I.	500.0
S.D.F.	1000.0
S.D.V.	500.0
S.S.I.	500.0
S.S.F.	500.0
S.S.V.	150
Sólidos sedimentales (ml/l)	10
Químicos orgánicos	
Alcalinidad total	500.0
Alcalinidad a la fenolftaleína	10.0
Carbonatos	10.0
Dureza total	
Bicarbonatos	0.0
Cloruros	500.0
Nitrógeno amoniacal	5.0
Nitrógeno total	10.0
Fósforo total	50.0
Fosfatos totales	
Boro	2.0
Químicos orgánicos	
D.B.D. soluble	20.0
D.Q.O. soluble	40.0
Grasas y aceites	50.0
S.A.A.M.	1.0
Biológicos	
Coliformes totales col/100 ml	4000.0
Metales	
Calcio soluble	150.0
Magnesio soluble	100.0
Sodio soluble	100.0
Potasio soluble	150.0
Calcio total	150.0
Magnesio total	100.0
Sodio total	100.0
Potasio total	150.0
Hierro soluble	0.05
Manganeso soluble	0.05
Plomo soluble	0.05
Cadmio soluble	0.01
Mercurio soluble	1.5 E-4
Arsénico soluble	1.7 E-4
Cromo soluble	0.5
Hierro total	0.30
Manganeso total	0.05
Plomo total	0.05
Cadmio total	0.01
Mercurio total	1.5 E-4
Arsénico total	1.75 E-4
Cromo total	0.05

Concentraciones en mg/l, excepto cuando se indican S.A.A.M. y pH sin unidades.

Infraestructura para el monitoreo

Junto al pozo anterior, se perforaron tres pozos cuyo objetivo es contar con sitios "aguas abajo" del flujo subterráneo del pozo de recarga, a través de los cuales se puedan obtener muestras de agua

4. Adaptación del pozo SL-15 para recarga



del acuífero, así como medir la posición y posibles fluctuaciones del nivel piezométrico al efectuar la recarga artificial.

Colmatación por la recarga

Uno de los problemas que se presenta durante la recarga artificial es la colmatación o taponamiento del pozo y de su entorno, producido por la acumulación de sólidos finos, y reacciones químicas. Para conocer el grado de colmatación en diferentes medios y bajo diferentes recargas y, determinar técnicas de limpieza y eliminación del taponamiento, paralelamente a los trabajos de recarga se construyeron módulos a escala para experimentación de la colmatación.

Conclusiones

- Las características geológicas y geohidrológicas del acuífero de la ciudad de México permiten su recarga.
- Los volúmenes susceptibles de ser utilizados para la recarga corresponden a las aguas residuales renovadas provenientes de plantas de tratamiento.
- Se visitaron todos los pozos cancelados o fuera de operación de los cuales se encontraron 82

como sitios posible de ser incorporados a un programa de recarga. De ellos, se seleccionó el pozo San Luis 15, para un programa inicial a nivel experimental.

- El pozo San Luis 15 fue seleccionado para recarga por: (1) encontrarse cercano a la planta de tratamiento de San Luis Tlaxialtemalco; (2) porque actualmente no se utiliza para agua potable y (3) por encontrarse lejano de otros pozos de agua potable.
- El agua para recarga proviene de la planta de San Luis Tlaxialtemalco, la cual se trata a nivel terciario y cumple con las normas para inyección.
- El Pozo San Luis 15 puede permitir una recarga de 75 l/s que corresponde al gasto de operación actual de la planta.
- La recarga es por gravedad y se dispone mediante tuberías abajo del nivel estático para disminuir la colmatación.
- Se encuentran tres pozos de monitoreo junto al pozo San Luis 15, los cuales se muestrean y analizan periódicamente.
- Se están realizando experimentaciones a escala para definir el grado de colmatación o taponamiento de los pozos durante la recarga, bajo diferentes gastos de inyección y en diferentes litologías.

Referencias

- Aller, Linda et al. *Handbook of suggested practices for the design and installation of ground-water monitoring wells*, National Water Well Association, 398 pp., 1989.
- DDF. *Proyecto de demostración de recarga de aguas residuales tratadas*, elaborado por PLANIMEX, Ingenieros Consultores, S. A. para la DGCOH, 1982.
- DDF. *Construcción y operación de un módulo experimental de recarga artificial en la zona de San Luis Tlaxialtemalco*, elaborado por Lesser y Asociados, S. A. para la DGCOH, 1989.
- FAO. *Recarga de acuíferos. Apoyo de emergencia a la zona lacustre de Xochimilco-Tláhuac*, elaborado por el Ing. Juan Manuel Lesser, 1988.
- Kerr, Robert S. *An introduction to the technology of subsurface wastewater injection*, US Environmental Protection Technology Series, 345 pp., 1981.
- Pettyjohn, Wayne A. *Introduction to artificial ground-water recharge*, NWWA/EPA Series. 44 pp., 1981.
- Scaff, Marion R. et al. *Manual of ground-water sampling procedures*, NWWA/EPA Series. 93 pp., 1981.
- United Nations. *Ground-water storage and artificial recharge*, Natural resources/Water Series No. 2, 269 pp., 1975.

Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México¹

Juan Manuel Lesser Illades
Felipe Sánchez Díaz
David González Posadas

Lesser y Asociados

Bajo el Valle de México se encuentra uno de los acuíferos más importantes del país, tanto por su magnitud como por el destino de sus aguas. De él se extraen alrededor de 500 millones de m³ anuales de agua mediante más de 100 pozos, tanto particulares como municipales. De acuerdo con su constitución y su funcionamiento hidrológico, el valle se divide en tres subsistemas acuíferos: el granular de la zona metropolitana de la ciudad, que incluye la Formación Tarango de las lomas del poniente y los materiales granulares permeables del valle; el localizado en el área de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, que incluye un paquete acuífero de basaltos y aluviones en su parte central, y de basaltos y piroclásticos en las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin; y el correspondiente al Lago de Texcoco donde se cuenta con escasa información; aparentemente, el agua se encuentra estática o con movimiento muy reducido hacia el oeste. La cuantificación del acuífero actualizada hasta octubre de 1987 arrojó los datos siguientes (expresados en millones de metros cúbicos por año): la entrada por flujo subterráneo fue de 384, la infiltración de 83, la salida subterránea por flujo hacia Azcapotzalco ascendió a 24, la extracción por bombeo fue de 476 y el cambio de almacenamiento fue negativo y llegó hasta 33. El abatimiento anual de los niveles estáticos varía de 0 a 3 m y los mayores se localizan en Azcapotzalco y Tlalpan, donde se han formado conos piezométricos. La sobreexplotación de los acuíferos ha ocasionado la deshidratación y compactación de las arcillas que cubren el valle y el asentamiento o hundimiento del terreno, que en ocasiones alcanza hasta 50 centímetros anuales.

Geohidrología de la ciudad de México

La ciudad de México está emplazada dentro de una antigua cuenca lacustre cerrada en la que actualmente el drenaje se lleva a cabo en forma artificial hacia el norte. Los materiales que constituyen el subsuelo corresponden a depósitos de aluviones y sedimentos lacustres. Los primeros provenían de las laderas y fueron transportados hacia el centro de la zona por corrientes fluviales; los segundos a veces sobreyacen a los aluviones y se interdigitan con ellos a profundidad. En los flancos del valle y limitándolo, principalmente hacia el sur, oriente y poniente, se encuentran elevaciones topográficas constituídas por rocas volcánicas que en su mayor parte se comportan como permeables. Por su posición topográfica, estas rocas funcionan como zona de recarga natural del acuífero.

En las estribaciones de la Sierra de Las Cruces hay una serie de antiguos depósitos volcánicos y fluviales conocida como Formación Tarango, que constituye las lomas del poniente, donde primordialmente se encuentran arenas, conglomerados, cenizas volcánicas, piroclásticos y aglomerados de mediana a baja permeabilidad. Los materiales volcánicos, en especial las lavas y los piroclásticos de tipo basáltico, forman la parte sur de la zona, y hacia sus estribaciones están interdigitados con los materiales aluviales y lacustres.

Funcionamiento del acuífero

El acuífero de la ciudad de México se recarga básicamente a partir de la infiltración de agua de lluvia que se precipita sobre los flancos de las sierras del poniente, sur y oriente, de donde fluye hacia

el centro. En los flancos de la Sierra de Santa Catarina, ubicada en la porción central sur del Distrito Federal, también existe una recarga hacia el valle. De acuerdo con la constitución del subsuelo y con el funcionamiento geohidrológico, el valle se puede dividir en tres subsistemas acuíferos.

El primero de ubica en la zona metropolitana. En general, está constituido por materiales granulares de permeabilidad media y baja, y es recargado principalmente por la sierra del poniente y por los alrededores de la Delegación de Tlalpan. En el oriente, a la altura del aeropuerto, hay un flujo subterráneo que corre en dirección este-oeste, hacia el centro de la zona metropolitana. En la parte central de la ciudad existen un cono y un domo piezométrico; el primero corresponde a una salida de agua hacia el área de Azcapotzalco, provocada por la intensa explotación que se hace del acuífero en esa zona; el segundo, se localiza entre las delegaciones Venustiano Carranza y Cuauhtémoc, y aparentemente es el resultado de varios factores como el tipo y la distribución de materiales que constituyen el subsuelo; la extracción diferencial de agua subterránea; las fugas en las redes de distribución de agua potable y la presencia de grietas que facilitan el paso del agua al acuífero.

El segundo subsistema corresponde a la zona sur del Valle de México, entre Xochimilco, Tláhuac y Chalco. Es recargado por la infiltración del agua de lluvia en las estribaciones de las sierras de Santa Catarina y Chichinautzin, mismas que lo limitan al norte y al sur. El flujo subterráneo se establece hacia el centro de los valles de Xochimilco y Chalco, donde antiguamente ocasionaba un nivel freático somero. En la actualidad, el agua se extrae a través de pozos y el nivel ha ido descendiendo.

El último subsistema acuífero corresponde al área del Lago de Texcoco, donde la información geohidrológica es escasa. Existe una recarga procedente de la sierra del oriente, la cual fluye en dirección al vaso del Lago de Texcoco. No hay datos sobre el movimiento del lago, pero aparentemente el agua se encuentra estática. Los materiales que constituyen esta zona son de baja permeabilidad; no existen extracciones considerables y el gradiente es casi nulo. En la porción occidental del vaso, a la altura del Aeropuerto Benito Juárez, se vuelve a detectar el flujo subterráneo en dirección este-oeste, se incrementa el gradiente y se pasa al primero de los subsistemas comentados.

Profundidad del nivel estático

Con los valores de profundidad del nivel estático

en 209 pozos particulares registrados en la zona metropolitana, así como en 249 del Departamento del Distrito Federal y en 242 pozos agrícolas de la porción oriental, se trazó una configuración de la profundidad del nivel estático para septiembre de 1987 (véase ilustración 1). En el poniente de la zona, la profundidad se incrementa hacia la sierra y se detectan valores entre 70 y 180 m. Hacia la parte central de la ciudad, el gradiente es muy suave; la profundidad varía de 20 m en el Aeropuerto Benito Juárez a 50 m en el flanco poniente de la ciudad.

En la porción suroccidental, entre Coyoacán y el Cerro de La Estrella, la profundidad del nivel del agua permanece muy similar, entre 40 y 50 metros.

En la zona sur, entre Xochimilco y Chalco, los niveles son someros; se encuentran profundidades de 10 m al suroeste de Chalco que llegan hasta 40 m en toda la parte plana y baja de la zona. Hacia las sierras, la profundidad al nivel del agua tiende a incrementarse y se registran valores de hasta 70 metros.

En los alrededores del Vaso de Texcoco, el nivel estático está muy cercano a la superficie, 5 m aproximados en la parte central del lago; se profundiza desde la parte central de dicho vaso hasta el aeropuerto, incluyendo ciudad Nezahualcóyotl, con profundidades someras de entre 5 y 20 metros.

Elevación del nivel estático

Actualmente, se cuenta con una red de observaciones piezométricas para la ciudad de México que incluye 320 aprovechamientos; las configuraciones de la elevación del nivel estático abarcan de 1983 a 1987. Con objeto de mostrar la distribución de la superficie piezométrica y comparar su evolución respecto al tiempo, se presentan las configuraciones de octubre de 1985 y marzo de 1987 (véanse ilustraciones 2 y 3).

Zona metropolitana

En la ciudad de México, el acuífero se recarga por el poniente, el sur y el oriente y presenta un flujo radial que, en forma general, tiende a circular hacia el valle. En la parte central norte de la ciudad destacan un cono y un domo piezométrico y en la porción suroccidental, un cono. El cono del norte se ha formado por la extracción de agua que se realiza en esa zona, donde existen numerosas industrias, entre otras, las instalaciones de la Refinería Azcapotzalco de Petróleos Mexicanos, que cuenta con varios pozos que extraen aproximadamente 300 l/s.

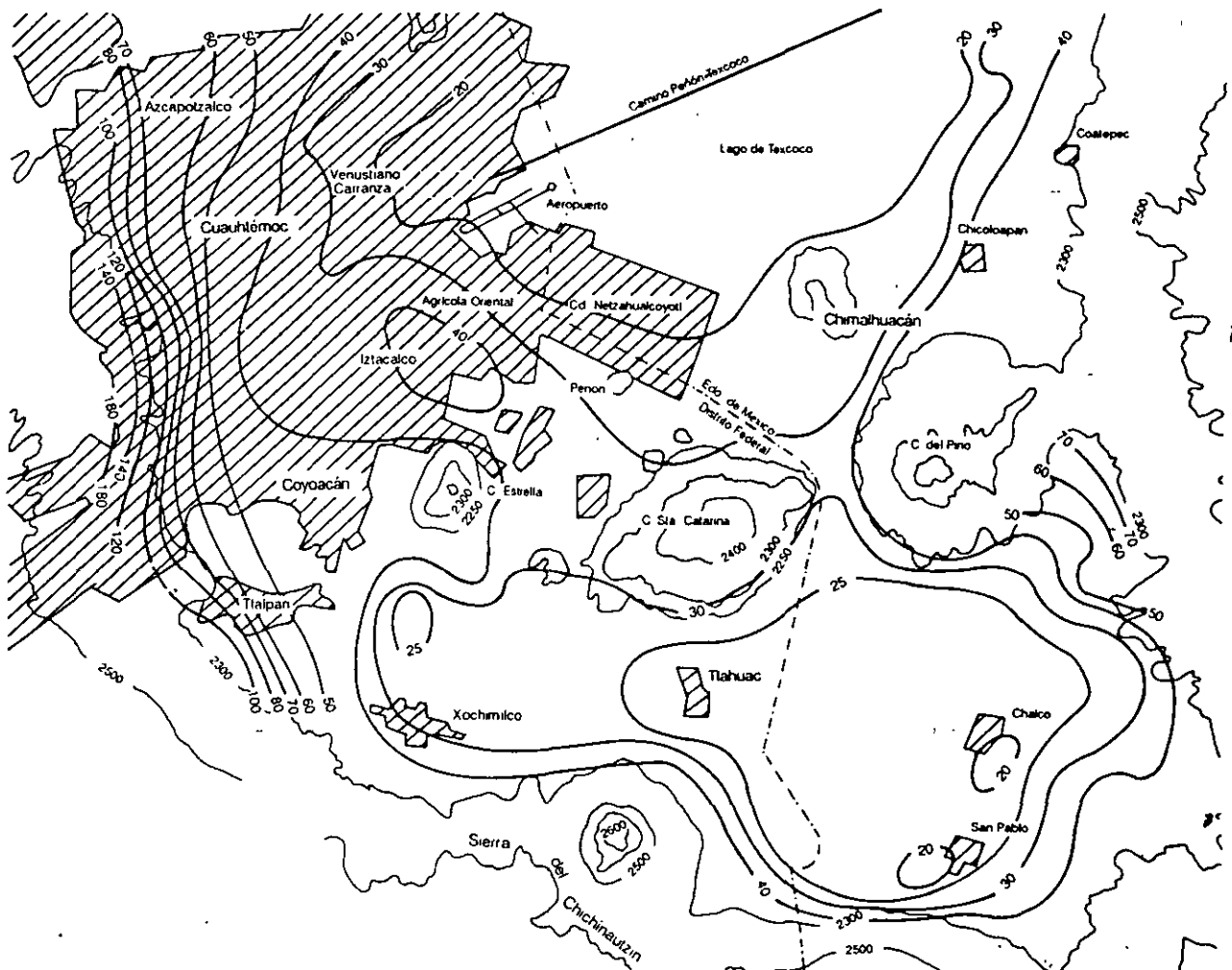
Los principales cambios en las configuraciones, de agosto de 1985 a marzo de 1987, se detectaron en el área de Tlalpan-Xotepingo, donde se observa la aparición de un nuevo cono piezométrico ocasionado por la extracción de agua subterránea en volúmenes mayores a la alimentación natural que recibe el acuífero. Esta área tiene las siguientes características geohidrológicas e hidrogeoquímicas (véase ilustración 4) que incluye la sección oeste-este a lo largo del cono y del domo piezométrico. En la parte A se muestran las características geohidrológicas del subsuelo, observándose que en la porción superior se encuentran arcillas lacustres de reducida permeabilidad, las que funcionan como un acuitardo. Debajo de las arcillas, hay materiales granulares de permeabilidad media, en los cuales se aloja el acuífero que es explotado por medio de pozos para el abastecimiento de la ciudad de

México. El espesor de las arcillas no se conoce con exactitud en toda su extensión, pero fluctúa entre 30 y 70 m. La posición de las superficies piezométricas del acuitardo y acuífero y el espesor de las arcillas pueden tener variaciones.

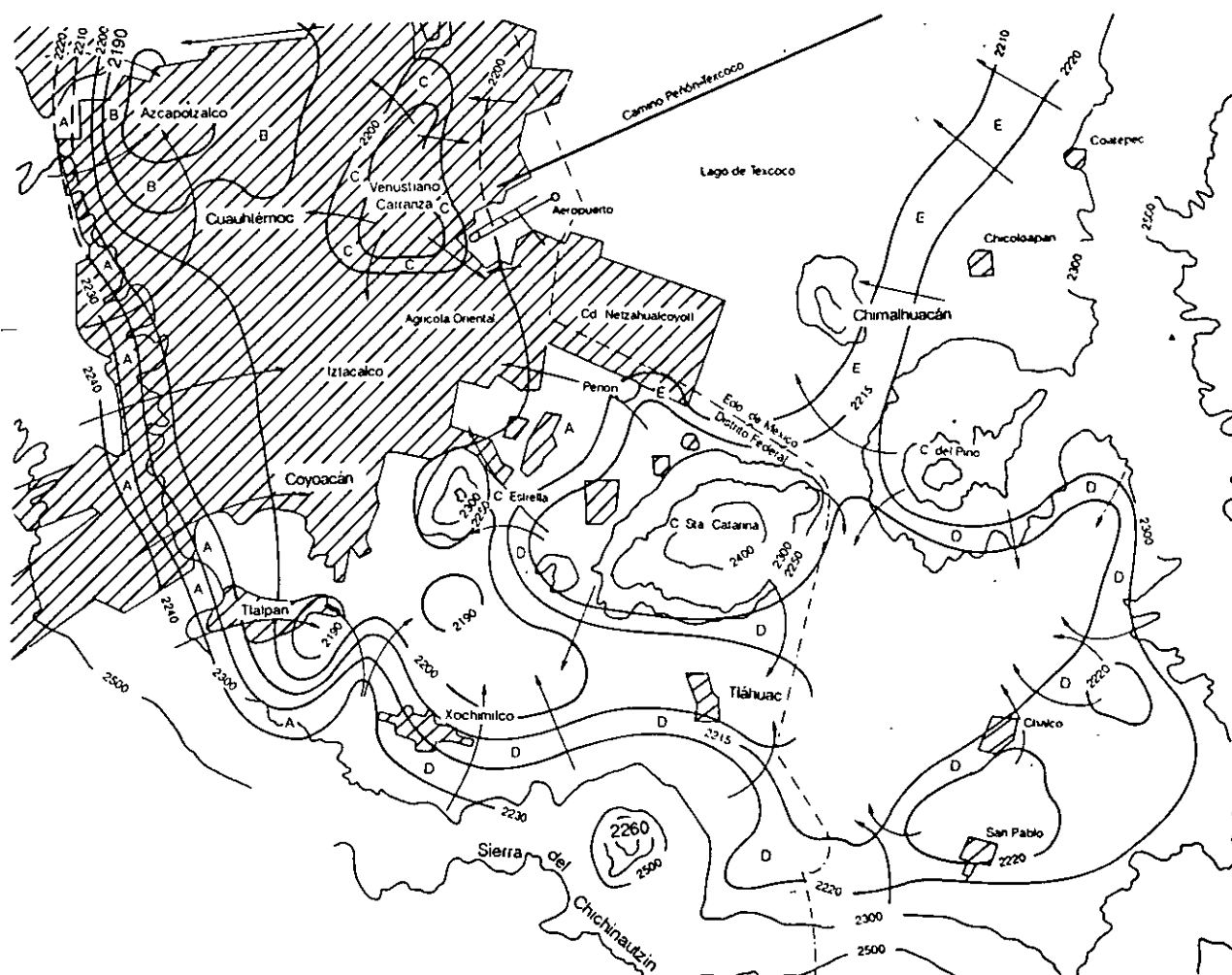
En la parte B, hacia la zona del cono piezométrico, el acuífero está sujeto a una fuerte extracción de agua subterránea; el abatimiento anual de la superficie piezométrica es de hasta 4 m y los asentamientos del terreno son moderados. Hacia la zona donde se ha detectado el domo piezométrico, la extracción es reducida; el abatimiento anual de la superficie piezométrica varía de 2 a 4 m; los asentamientos del terreno son muy reducidos. La transmisibilidad de las arcillas lacustres es de $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que la de los materiales granulares es de $6 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

En la parte C, se observan otros aspectos sobre el funcionamiento geohidrológico y geoquímico de la

1. Profundidad al nivel estático en metros (1987)



3. Elevación del nivel estático en metros (septiembre-1987)



piezométrica.

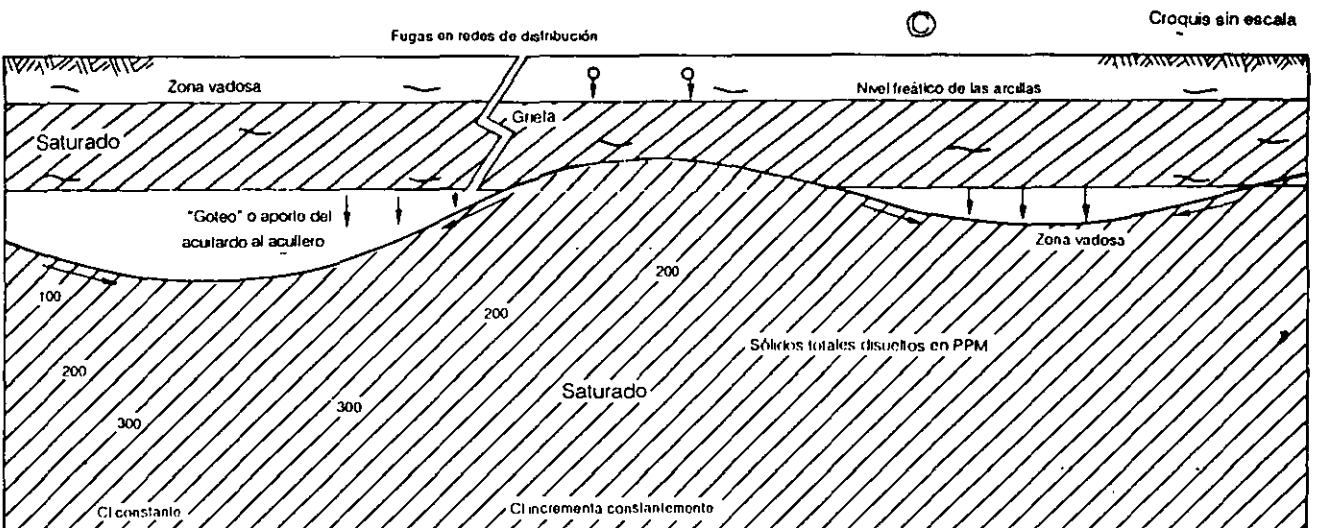
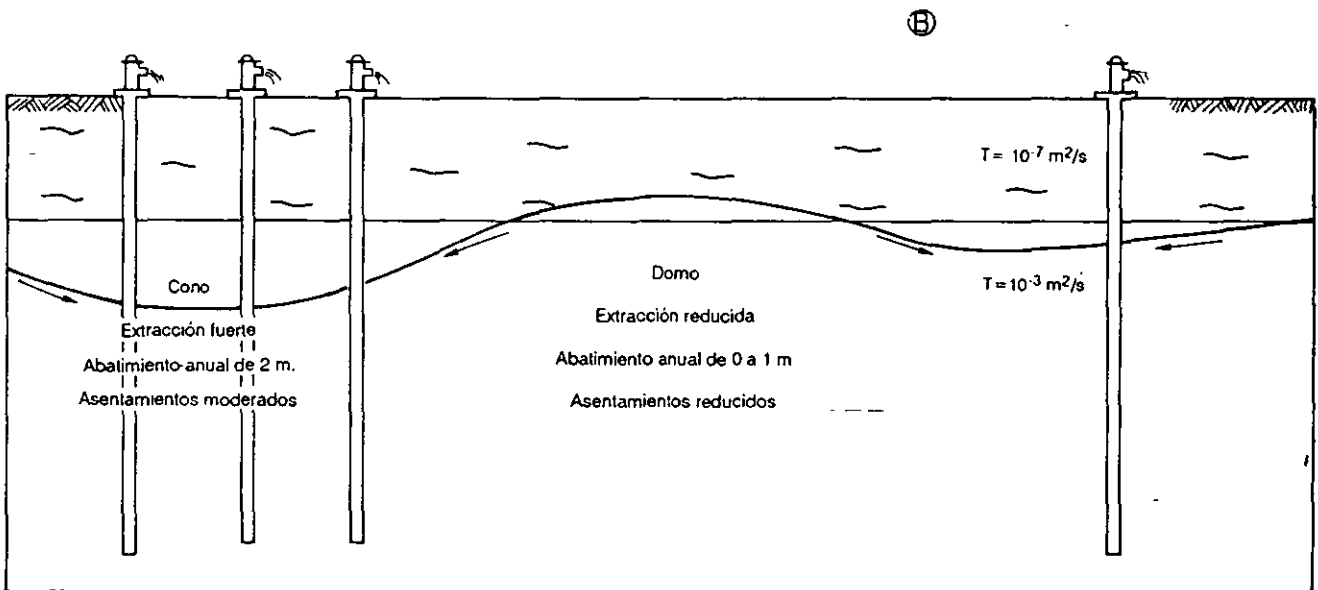
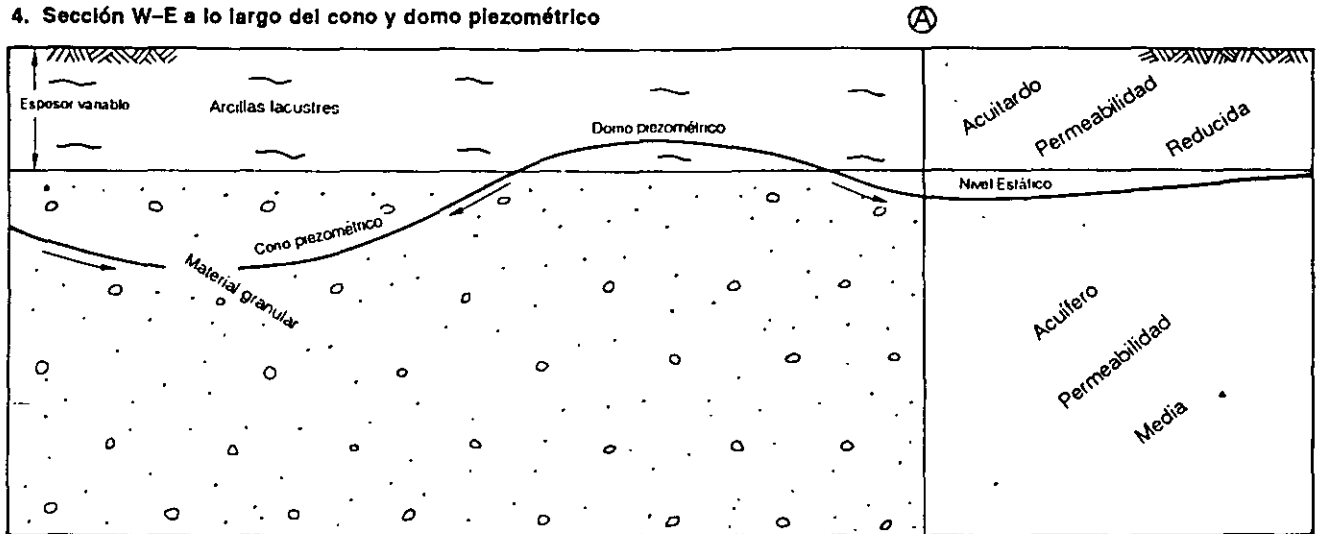
La extracción general de agua subterránea es menor en el área del domo piezométrico, aunque localmente el domo no se encuentra *circundado* por pozos con extracción fuerte. Al tratar de identificar una fuente de recarga con agua de buena calidad, surge la idea de la posible fuga de agua a partir de las redes de distribución; aunque hidráulicamente su funcionamiento no es sencillo, de plantear esto se explicaría la disminución salina. Además, es necesario determinar cuál es la fuente adicional de cloruros en el agua en la zona del domo. La única explicación que se ha podido dar es la recarga al acuífero por fugas en la red de distribución, la cual contiene el cloro que se añade al agua con objeto de desinfectarla. La constante incorporación de este elemento podría constituir la fuente adicional que se ha detectado en los análisis realizados en

los últimos 20 años. Por otro lado, se sabe de la existencia de grietas dentro de las arcillas lacustres, que se han formado por el abatimiento de los niveles piezométricos y los asentamientos del terreno. Estas grietas podrían constituir conductos preferentes de circulación de agua a través de las arcillas hacia el acuífero.

En el Valle de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, el acuífero es recargado desde el noreste, norte y sur; su circulación es hacia el centro del valle, donde cambia su curso rumbo al poniente. Al norte de Xochimilco, este subsistema acuífero descarga hacia el subsistema de la zona metropolitana. El gradiente indica que el aporte de agua es mínimo, tal vez nulo, de un subsistema acuífero a otro.

Por lo que se refiere al subsistema acuífero del Vaso del Lago de Texcoco, se detectó un flujo piezométrico del este al oeste. Existen datos

4. Sección W-E a lo largo del cono y domo piezométrico



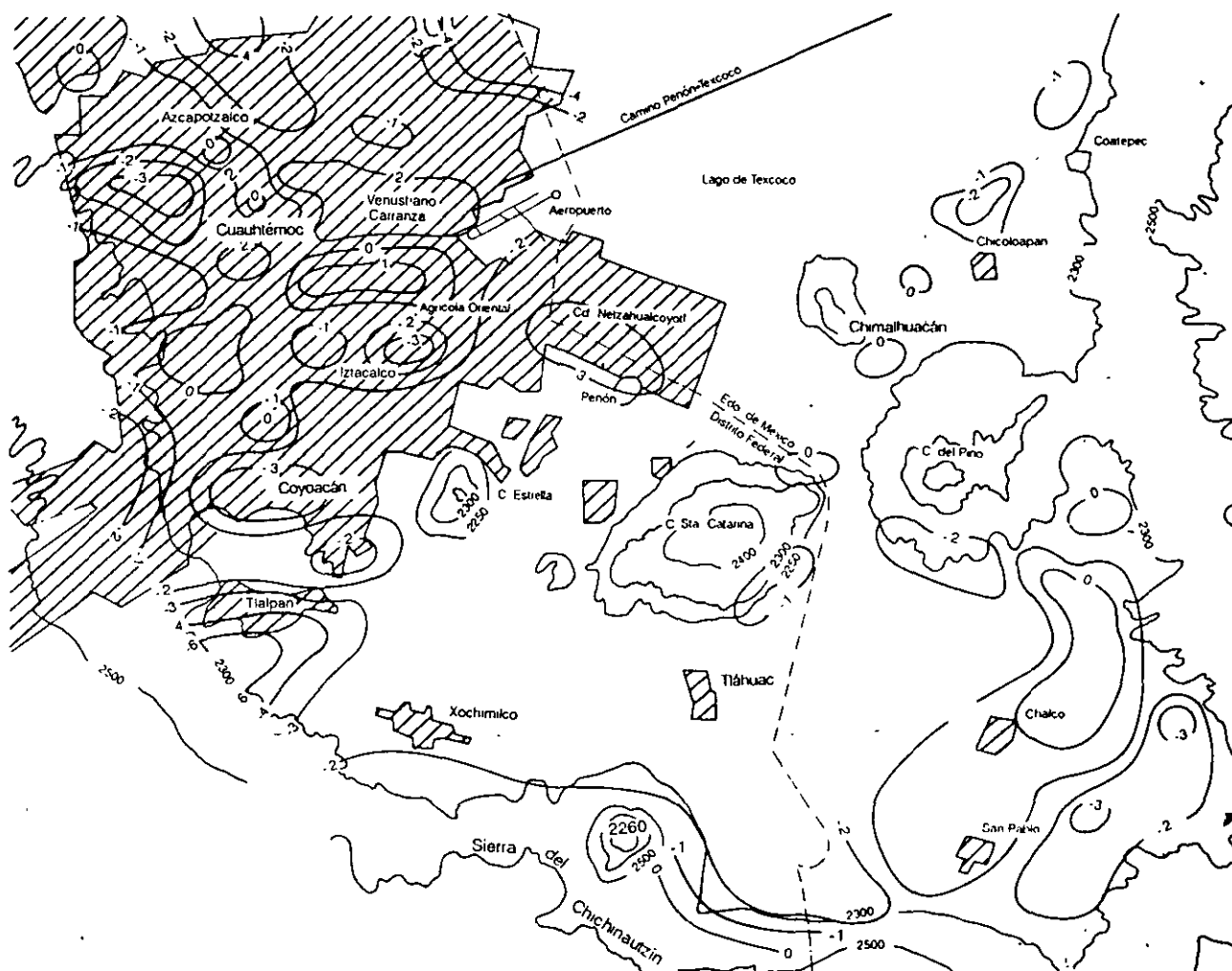
piezométricos en los alrededores de Chicoloapan; sin embargo, hacia el poniente la información geohidrológica es escasa. Se lograron detectar las curvas 2210 en la porción oriental y 2200 metros sobre el nivel del mar en la porción occidental, a la altura del Aeropuerto Internacional, o sea una variación de 10 m en una distancia de 13 km, lo que da un gradiente bajo, de 0.00076, a partir de lo cual se infiere que el agua en esta región tiene un movimiento muy reducido.

Evolución del nivel estático

Con las medidas piezométricas obtenidas en mayo de 1985 y en marzo de 1987, correspondientes a un periodo de prácticamente dos años, se dedujo la evolución del nivel estático y se configuró la evolución de la superficie piezométrica (véase ilustración 5).

En el área de Azcapotzalco, la evolución varía de cero en algunos puntos locales aislados, a menos de 4 m en la porción norte y predominan valores de alrededor de menos 2 m. Esta evolución es el reflejo de la explotación general de agua subterránea en el valle, así como de la fuerte extracción local en la zona industrial de Azcapotzalco, que incluye, entre otras, a las instalaciones de la Refinería de Pemex. En el área de la Delegación Venustiano Carranza, donde se ha formado el domo piezométrico, la evolución del nivel estático para el periodo estudiado, es ligeramente menor que en el resto de la zona metropolitana, con valores que varían de 0 a menos 2 m. En el área de Tlalpan-Xotepingo, la evolución varía de menos 2 a menos 6 m, encontrándose valores de entre menos 4 y -6 en la porción extrema sur (al sur del Anillo Periférico), lo cual ha sido ocasionado por la fuerte extracción de agua subterránea.

5. Evolución del nivel estático en metros (mayo-1984 - marzo-1987)



Extracción de agua subterránea

Se han actualizado las mediciones de las extracciones de agua subterránea que se realizan a través de los diversos pozos existentes, cuyo registro se ha efectuado por medio de tubos de Prandtl y medidores de volumen. La extracción para cada uno de los tres subsistemas acuíferos considerados es como sigue:

Subsistema acuífero	x 10 ⁶ m ³ /año
Zona metropolitana	243
Zona sur	195
Vaso del Lago de Texcoco	38

Cuantificación preliminar del agua subterránea

Se efectuó una cuantificación del flujo subterráneo, basada en la configuración de la elevación del nivel estático de septiembre de 1987 (véase ilustración 3). Sobre el plano se marcaron las celdas y se calculó la cantidad de agua subterránea que pasa a través de ellas. El cálculo se efectuó a partir de la Ley de Darcy, la cual establece que la velocidad de flujo a través de un medio poroso es proporcional a la pérdida de carga e inversamente proporcional a la longitud de la trayectoria del flujo. Matemáticamente, la Ley de Darcy se expresa de la siguiente manera:

$$V = \frac{h}{L} = Ki$$

donde, V es la velocidad media del flujo; h , la pérdida de carga en la distancia L ; i , el gradiente hidráulico y K , el coeficiente de permeabilidad. Considerando tanto la ley de continuidad como la de Darcy, se tiene que el caudal Q es igual a:

$$Q = Tbi$$

donde, T es la transmisibilidad y b , el ancho medio del flujo entre las líneas de corriente de cada celda.

La cuantificación se dividió en los tres subsistemas acuíferos. Se marcaron con la letra A las celdas correspondientes al flujo de entrada de agua subterránea procedente del poniente y surponiente, así como una celda en la parte norte del Cerro de La Estrella. Las celdas marcadas con la letra B corresponden al cono piezométrico de Azcapotzalco y las celdas C, al domo piezométrico del centro de la ciudad.

Zona metropolitana

El flujo subterráneo de entrada de las celdas A resultó de 172 millones de metros cúbicos anuales; la infiltración proveniente del domo piezométrico fue de 16 millones de m³ y la salida subterránea hacia el cono de Azcapotzalco fue de 24 millones. Con los datos anteriores se estableció la ecuación de balance donde las entradas son iguales a las salidas menos el cambio de almacenamiento.

$$E_s + I - S_s - E_x = \pm A_s \quad (1)$$

donde: E_s = Entradas subterráneas

I = Infiltración vertical

S_s = Salidas subterráneas (Hacia Azcapotzalco)

E_x = Extracción por bombeo

A_s = Cambio de almacenamiento

La infiltración vertical puede dividirse en:

- Infiltración en el área del domo a través de grietas o por el aporte por goteo del acuitardo al acuífero e
- Infiltración al acuífero en el resto de la zona metropolitana a través de las grietas.

Se deduce una infiltración de 70 millones de m³ anuales de los cuales 16 corresponden a la zona del domo y 54 al resto del valle.

Zona Xochimilco-Tláhuac-Chalco

Las celdas de entrada de agua subterránea se marcaron con la letra D y arrojaron un valor de 178 millones de m³ anuales. La extracción por bombeo es de 195 millones de m³ anuales lo que da un déficit de 17 millones, el cual es equilibrado por la infiltración vertical de agua de lluvia y por el cambio de almacenamiento que es negativo.

Vaso del Lago de Texcoco

En esta porción se marcaron con la letra E cuatro celdas al pie de la sierra del noreste, las cuales dan un flujo de entrada de agua subterránea de 34 millones de m³ anuales. Por otra parte, la extracción en la franja a lo largo de la carretera a Texcoco y en El Peñón de Los Baños, es de 38 millones, de donde se deduce que esta zona se encuentra cerca del equilibrio hidrodinámico.

Conclusiones

- En la zona metropolitana, el subsuelo corresponde a material granular de permeabilidad media y baja, cuya recarga proviene de la Sierra de Las Cruces; se descarga por medio de bombeo.
- En el área de Xochimilco-Chalco predominan los materiales volcánicos, principalmente lavas y escorias basálticas que forman un acuífero de alta permeabilidad; éste se recarga en la Sierra del Chichinautzin, ubicada al sur y se descarga por el bombeo de pozos ubicados en especial al pie de la sierra.
- En el Ex-Vaso del Lago de Texcoco, la información es escasa. El flujo proviene del oriente y tiene un gradiente casi nulo, por lo que su movimiento es muy reducido.
- La cuantificación del agua subterránea en el Valle de México indica que existe sobreexplotación, aunque ésta no es de gran magnitud. Se midió un cambio de almacenamiento negativo de 33 millones de m³ anuales, con un abatimiento de la superficie piezométrica entre 1 y 3 metros.
- En el esquema del flujo subterráneo, a la altura de la Delegación Venustiano Carranza, se aprecia un domo, que se forma con niveles (no freáticos) del acuífero; se considera que es ocasionado

por la conjunción de diversos factores como: tipo y distribución de materiales en el subsuelo; extracción diferencial de agua subterránea e infiltración a partir de fugas de las redes de distribución de agua potable que se incorporan al acuífero a través de grietas.

¹ El presente trabajo es parte de las actividades geohidrológicas que la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal ha venido realizando en los últimos cinco años para el control del acuífero de la ciudad de México. Manuscrito actualizado a junio de 1988.

Bibliografía

- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal. *Informes de actividades geohidrológicas en el Valle de México*, elaborados por Lesser y Asociados, 1983-1987.
- Drever, J. I. *The Geochemistry of natural waters*, 2a edición, Prentice Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N. J. 07632, EUA, 1988.
- Freeze, R. A. y J. A. Cherry, *Groundwater*, Prentice Hall, Inc., Englewoods Cliffs, N. J. 07632, EUA, 1979.
- Lesser, J. M., Sánchez, F., González, D. "Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México", *Revista de Ingeniería Hidráulica en México*, sept-dic., 1986.

Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México¹

Juan Manuel Lesser Illades
Felipe Sánchez Díaz
David González Posadas

Lesser y Asociados

El agua que forma el acuífero de la ciudad de México proviene fundamentalmente de la lluvia, parte de la cual se infiltra y circula a través de las rocas, con lo que disuelve las sales existentes e incrementa su contenido salino conforme avanza. La cantidad y el tipo de sales disueltas están en relación directa con el tipo y solubilidad de las rocas con las cuales tiene contacto. En el Valle de México las rocas existentes, volcánicas y sedimentarias continentales y lacustres, proporcionan las sales que se encuentran disueltas en el acuífero. Se efectuó una interpretación hidrogeoquímica de éste, analizando 240 pozos y con información de 30 años. Aunque la concentración salina del agua subterránea es en general baja, con sólidos totales disueltos entre 200 y 400 ppm existen puntos aislados con concentraciones mayores, principalmente al centro de la zona. Con el estudio se ratificaron importantes aspectos geohidrológicos, como la recarga de agua al acuífero en el centro del área metropolitana; se delimitaron zonas con agua incrustante y se analizó la variación de la calidad química del agua en relación con el tiempo.

Análisis químicos

La información procesada consistió en los análisis químicos de 240 pozos con información de 1984 y 1985, y de otros 100 con análisis anuales de 1955 a 1985, que incluyen las determinaciones de calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfatos, conductividad eléctrica, potencial hidrogeno, sólidos totales disueltos, alcalinidad total, fierro, manganeso, cuenta estándar, nitritos, nitratos, flúor, arsénico, cadmio, zinc, cobre, cromo, mercurio, plomo y selenio.

Sólidos totales disueltos

Los sólidos totales disueltos corresponden a la suma de elementos en solución que el agua ha incorporado en su trayectoria.

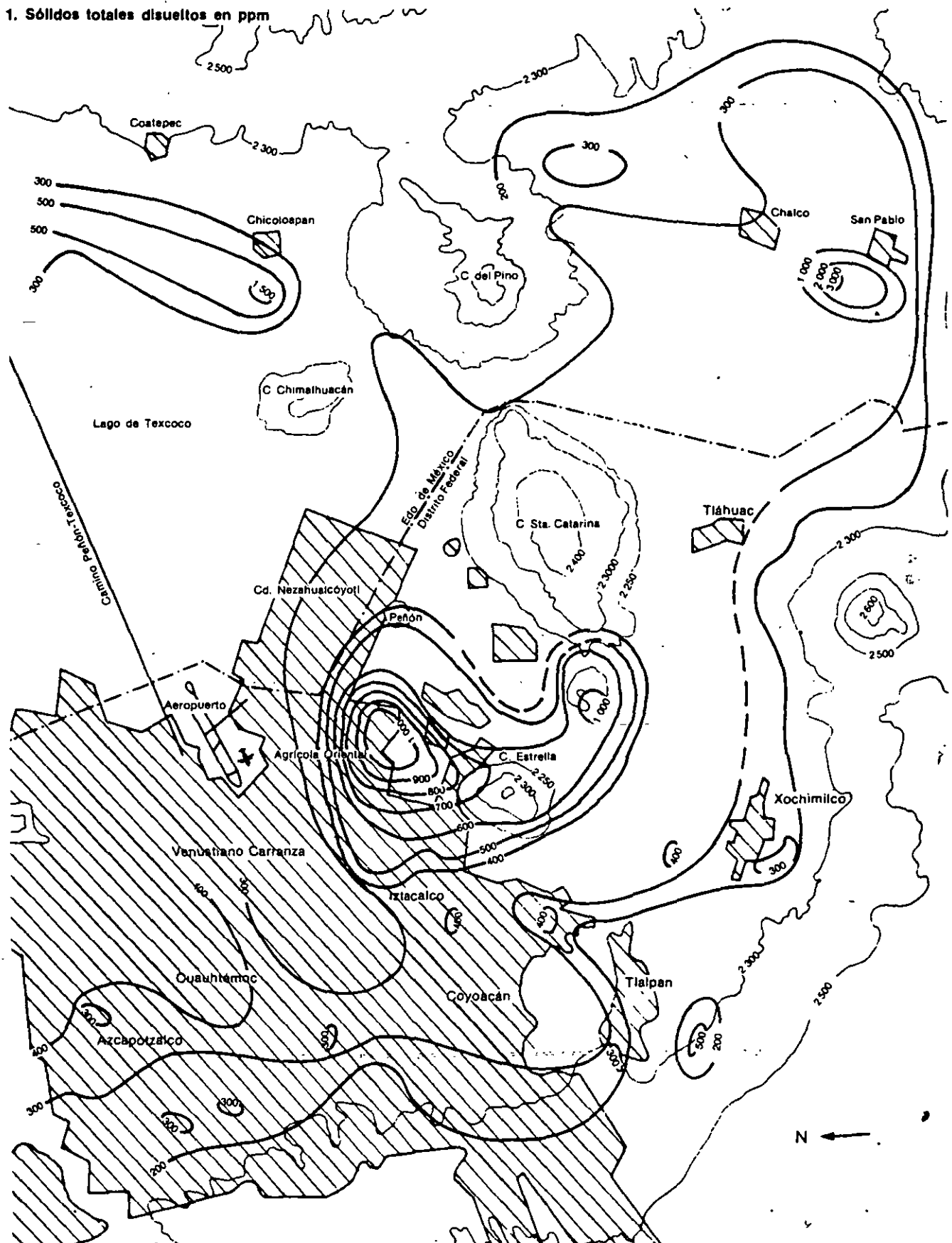
Cuando la lluvia se precipita sobre la corteza terrestre, arrastra una cierta cantidad de partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfe-

ra, además de incorporar gases como el bióxido de carbono; por ello el agua contiene una determinada cantidad de sales disueltas, entre las que predominan el sodio y los bicarbonatos en concentraciones bajas. Al entrar en contacto con la superficie terrestre, el agua, que además posee ácido carbónico, disuelve las sales y minerales que forman las rocas, con lo que incrementa su contenido salino, el cual será mayor conforme el agua circule por el subsuelo o permanezca un mayor tiempo en contacto con las rocas; la cantidad y el tipo de elementos disueltos dependerá de la composición y solubilidad de éstas.

En la ilustración 1 se muestra la distribución de los sólidos totales disueltos en el agua subterránea de la ciudad de México, y se observa que los valores más bajos, menores de 200 ppm, se localizan al poniente, al sur y al surponiente del área, zonas que coinciden con las estribaciones de las sierras, lo que indica que estas áreas corresponden a zonas de recarga del acuífero.

El bajo contenido de sales encontrado en las

1. Sólidos totales disueltos en ppm



estribaciones serranas indica, por una parte, que el agua que recarga al acuífero corresponde a la infiltración de la lluvia, y por la otra, que no deben de existir rocas que incluyan minerales o sales de fácil disolución. Además, los materiales lávicos y piroclásticos que forman las estribaciones de las elevaciones topográficas tienen una permeabilidad alta que permite un flujo rápido, lo que impide que el agua tenga suficiente tiempo para incrementar su contenido salino; esto es especialmente visible en la Sierra del Chichinautzin.

El análisis de los datos manejados demuestra que la concentración salina tiende a incrementarse hacia la parte central del área, lo que indica un flujo de agua en la misma dirección; por ejemplo, de las Lomas de Chapultepec hacia los alrededores de Azcapotzalco, este aumento es gradual.

En esta parte central homogénea se encuentra una zona con una composición química con sólidos totales entre 300 y 400 ppm, de donde se deduce que en el subsuelo no existen sales de fácil disolución. Un aspecto importante detectado en la distribución de estos sólidos, es la disminución en la concentración salina entre las delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza.

Como ya se mencionó, una de las bases de la hidrogeoquímica es que el agua incrementa su contenido salino conforme circula en el subsuelo y que no existen procesos naturales que provoquen el fenómeno inverso (salvo raras excepciones). Por lo tanto, la causa más común que origina la disminución del contenido salino es la dilución debida a una recarga o al aporte de agua con un menor contenido salino. Este efecto fue observado prácticamente en todas las distribuciones de hidrogeoquímica y ratificado por piezometría (Lesser y Sánchez, 1985).

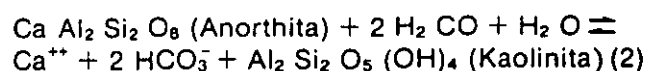
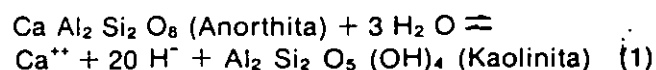
Pero, en contraste con lo anterior, el estudio demostró un incremento notable del contenido salino entre la colonia Agrícola Oriental, el Cerro de La Estrella y la Sierra de Santa Catarina; en los pozos de la colonia mencionada se detectaron hasta 1 200 ppm de sales disueltas —fueron los puntos con mayor salinidad del muestreo total y la fecha de la medición correspondió a julio de 1984. En esta zona el acuífero se localiza entre materiales granulares con algunos horizontes de basalto. Un efecto similar se presentó en la Sierra de Santa Catarina, donde se detectaron 1 400 ppm de sólidos totales disueltos en el pozo SC-12. Esta alta salinidad es ocasionada por dos factores: la influencia de zonas volcánicas, algunas posiblemente activas, que han impregnado las rocas del subsuelo con emanaciones gaseosas y

emplazamientos de sales de tipo hidrotermal y la presencia de horizontes de sedimento lacustres con materia orgánica en descomposición. En la distribución destacan claramente las áreas de la Agrícola Oriental y Santa Catarina como focos locales de contaminación salina natural.

En la porción sur del valle, área de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, los pozos presentan un bajo contenido salino, característico de agua de lluvia de reciente infiltración, que indica que este acuífero debe recargarse sobre la sierra. Aquí, las concentraciones salinas son de 200 a 300 ppm, con excepción de los pozos al norte y oriente de San Pablo Atlazalpan, donde se registraron valores de 3 000 ppm de sólidos totales disueltos, considerándose que corresponden a puntos locales. El incremento salino que se marca en la configuración muestra una distribución general muy similar a la circulación del flujo subterráneo.

Calcio

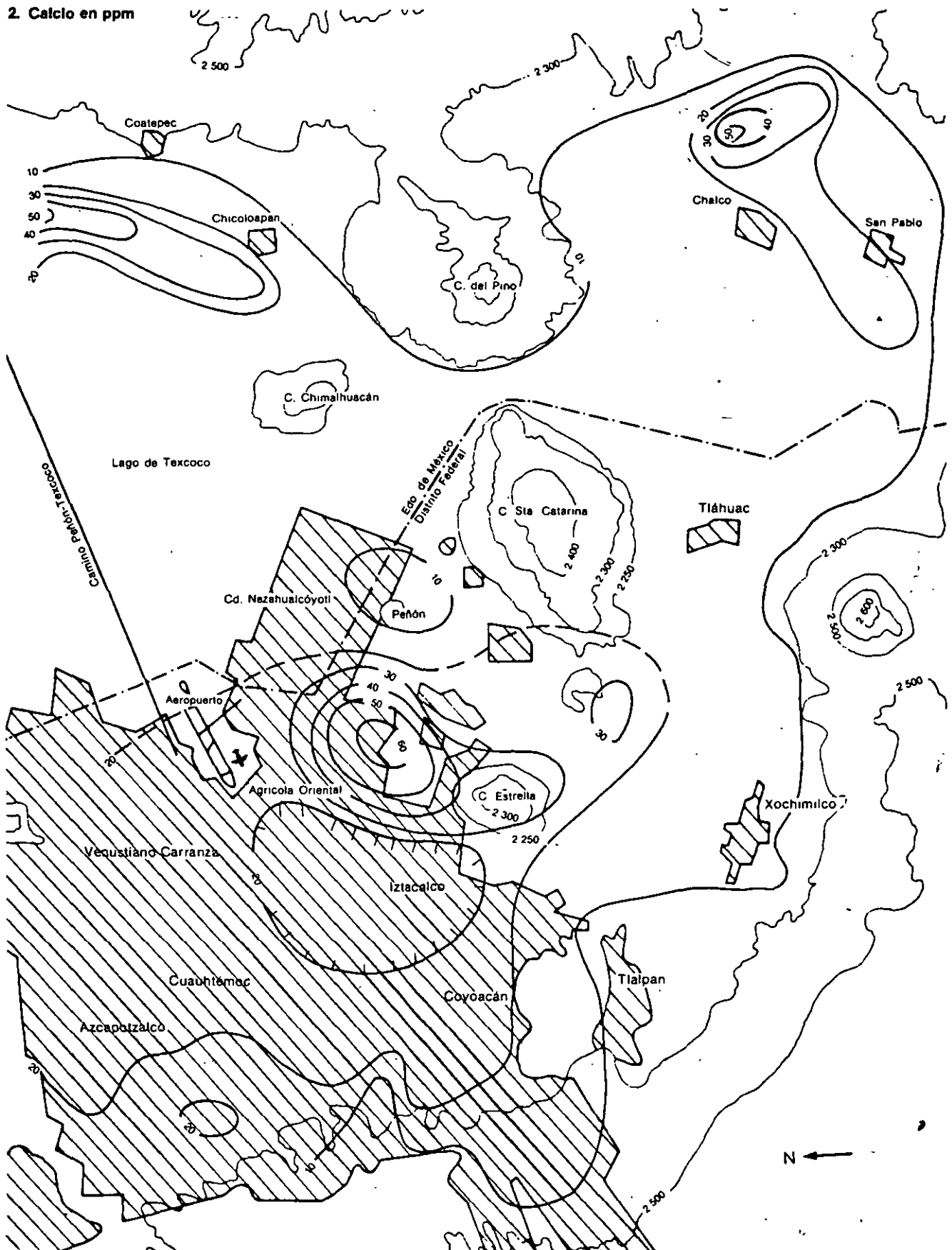
El calcio es un ión divalente de carga positiva que forma parte de la mayoría de las rocas que constituyen la corteza terrestre, por lo que es común encontrarlo disuelto en el agua. Dentro del área estudiada se considera que este elemento proviene de la disolución de los feldespatos cálcicos que conforman las rocas volcánicas. A continuación se mencionan las reacciones químicas características de la disolución de la anorthita.



La distribución de este elemento se muestra en la ilustración 2; las concentraciones más bajas se localizan en las porciones poniente, sur y oriente de la ciudad de México, lo que ratifica la existencia de una importante zona de recarga hacia las sierras. En los pozos de la colonia Agrícola Oriental, se detectaron más de 60 ppm de este material. Al poniente de este sitio, entre las delegaciones de Iztacalco, Benito Juárez y Venustiano Carranza, se encontró una clara disminución en los valores, que corresponde al área donde se ha inferido la existencia de un aporte por infiltración vertical.

En la porción suroriental del valle de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, la concentración de calcio en el agua es muy baja, alrededor de 15 ppm, con excepción de la parte localizada al sureste de

2. Calcio en ppm

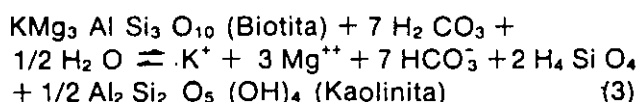


Chalco, donde existen algunos aprovechamientos que incrementan ligeramente su contenido salino a 20 ppm.

Existen tres áreas o subsistemas acuíferos en que se puede dividir a la zona estudiada: el primero corresponde a la zona metropolitana de la ciudad de México, donde las concentraciones de calcio varían de 10 ppm en las estribaciones de la sierra, hasta máximos de 60 ppm al centro, detectándose también una área de valores bajos entre las delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza. El segundo abarca el vaso del Lago de Texcoco donde el agua prácticamente no tiene movimiento y la información geoquímica es reducida. El tercero engloba la zona sur de la capital y presenta una concentración salina muy baja del agua, con cerca de 15 ppm de calcio.

Magnesio

Los basaltos están constituidos por minerales ferromagnesianos entre los que se encuentran los piroxenos y los anfíboles, los cuales son atacados por el agua originando la presencia del magnesio en solución. Este elemento también proviene de la disolución de otros minerales, como la biotita, la cual se transforma en kaolinita como se muestra en la siguiente reacción:

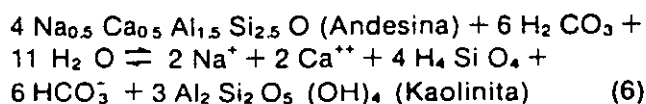
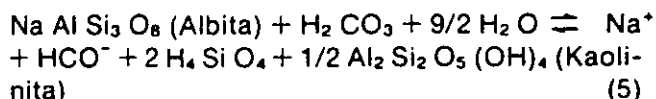
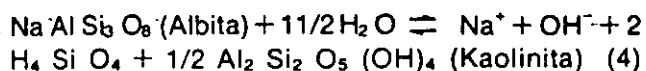


Los valores más bajos de magnesio, menores a 10 ppm, se localizan al pie de las sierras, así como en la porción nororiental del área de trabajo; esto corrobora la existencia de zonas de recarga hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas, y se incrementan hacia la porción central, con lo que se ratifica el flujo subterráneo. Entre las delegaciones Benito Juárez, Iztacalco y Venustiano Carranza, se presenta una disminución en las concentraciones, ocasionada por un aporte vertical de agua hacia el acuífero, el cual aparentemente corresponde a la infiltración de fugas de la red de distribución de agua potable.

Sodio

El sodio, junto con el calcio y el magnesio, corresponde a los principales cationes encontrados en la naturaleza. En el área estudiada los tres provienen de la disolución de los minerales que forman las rocas, como los feldespatos sódicos, que son un constitu-

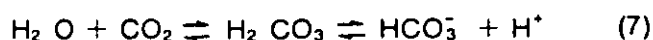
yente de las formaciones volcánicas. A continuación se muestra la reacción de la disolución de la albita y la andesina por el agua.



En la zona de trabajo las concentraciones más bajas, menores de 5 ppm, se encuentran al pie de las sierras que limitan al área en sus porciones oriental, sur y poniente, en tanto que las más altas, alrededor de 20 ppm, se localizan entre El Peñón del Marqués y el Cerro de la Estrella.

Bicarbonatos

A diferencia de los iones analizados, que provienen principalmente de la disolución de las rocas, el bicarbonato se produce a consecuencia de reacciones químicas debidas a la interacción entre el agua, los gases y las rocas. Así, una de las fuentes más comunes de este elemento es la incorporación de bióxido de carbono en el agua, lo cual forma ácido carbónico, que a su vez se disocia en bicarbonatos e hidrógeno como se muestra en la siguiente reacción:



Otras posibilidades para su formación corresponden a la disolución de los minerales de las rocas ígneas, como se indicó en las reacciones químicas anteriores aquí mostradas.

La concentración de bicarbonatos en el agua está sujeta a los cambios de temperatura y presión, así como a procesos biológicos y a la concentración total de sales en solución. Los valores menores de 100 ppm se presentan en las estribaciones de las sierras del poniente, sur y oriente, áreas de recarga por lluvia, en tanto que conforme el agua subterránea circula hacia el centro de la ciudad se incrementa su contenido de bicarbonatos. En la colonia Agrícola Oriental y en Santa Catarina vuelven a aparecer las anomalías comentadas para los elementos tratados anteriormente.

Cloruros

Por lo general, los cloruros se encuentran en concentraciones bajas en terrenos volcánicos, como en el subsuelo de la ciudad de México, con excepción de algunos sitios donde hay horizontes salinos depositados en antiguas cuencas lacustres. Los valores bajos al poniente, sur y oriente ratifican que dichas regiones corresponden a zonas de recarga.

Sulfatos

Los sulfatos forman parte de diferentes minerales que constituyen las rocas ígneas, sin embargo, las concentraciones provenientes de éstas, en general son bajas; otros posibles orígenes corresponden a la descomposición de materia orgánica en los sedimentos lacustres y a la disolución de horizontes de azufre que comúnmente se encuentran asociados a centros eruptivos, que al oxidarse pasan en solución al agua, formando sulfatos.

Respecto a la presencia de sulfatos en el acuífero capitalino se puede decir lo siguiente: las concentraciones más bajas, menores de 10 ppm, se encuentran en las estribaciones de las elevaciones topográficas hacia el poniente, oriente y sur, ratificando la existencia de zonas de recarga por agua de lluvia en esos lugares; hacia el centro de la zona metropolitana existe un incremento en las concentraciones producido principalmente por el flujo de agua subterránea; en los alrededores del Cerro de La Estrella hay concentraciones salinas altas, ocasionadas por la existencia de horizontes salinos dentro de los materiales granulares que constituyen el acuífero; al oriente de Chalco se encuentra una zona con magnitudes que alcanzan hasta 100 ppm posiblemente ocasionados por la utilización de agua en riego que produce evaporación y reconcentración de sales (véase ilustración 3).

Fierro y manganeso

El fierro es un elemento común en rocas y suelos, de donde es fácilmente disuelto o acarreado por las aguas, en especial si son ácidas. Las aguas naturales en general presentan concentraciones inferiores a 1 ppm y rara vez sobrepasan los 5 ppm, pero aquéllas con un pH bajo contienen más fierro que las alcalinas. Las concentraciones altas de este elemento se pueden deber, por otra parte, a la ausencia de oxígeno.

En el agua subterránea este material se disuelve y se convierte en bicarbonato ferroso ($\text{HCO}_3)_2$, estado en el que no tiene coloración alguna. Cuando el líquido se extrae de un pozo, absorbe oxígeno del aire y el bicarbonato en solución se convierte en hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ que es insoluble; en estas condiciones, parte del bióxido de carbono libre escapa y el pH se eleva. El hidróxido férrico tiene un color café rojizo y se encuentra suspendido, o bien se precipita en concentraciones bajas (0.3 ppm), reacción que se lleva a cabo con gran facilidad. Aunque esta concentración ocasiona algunos problemas en el uso y aspecto del agua no llega a ser tóxica, pero si sobrepasa los 0.5 ppm produce incrustaciones visibles en los ademes y tuberías y disminuye el rendimiento de los pozos (véase ilustración 4).

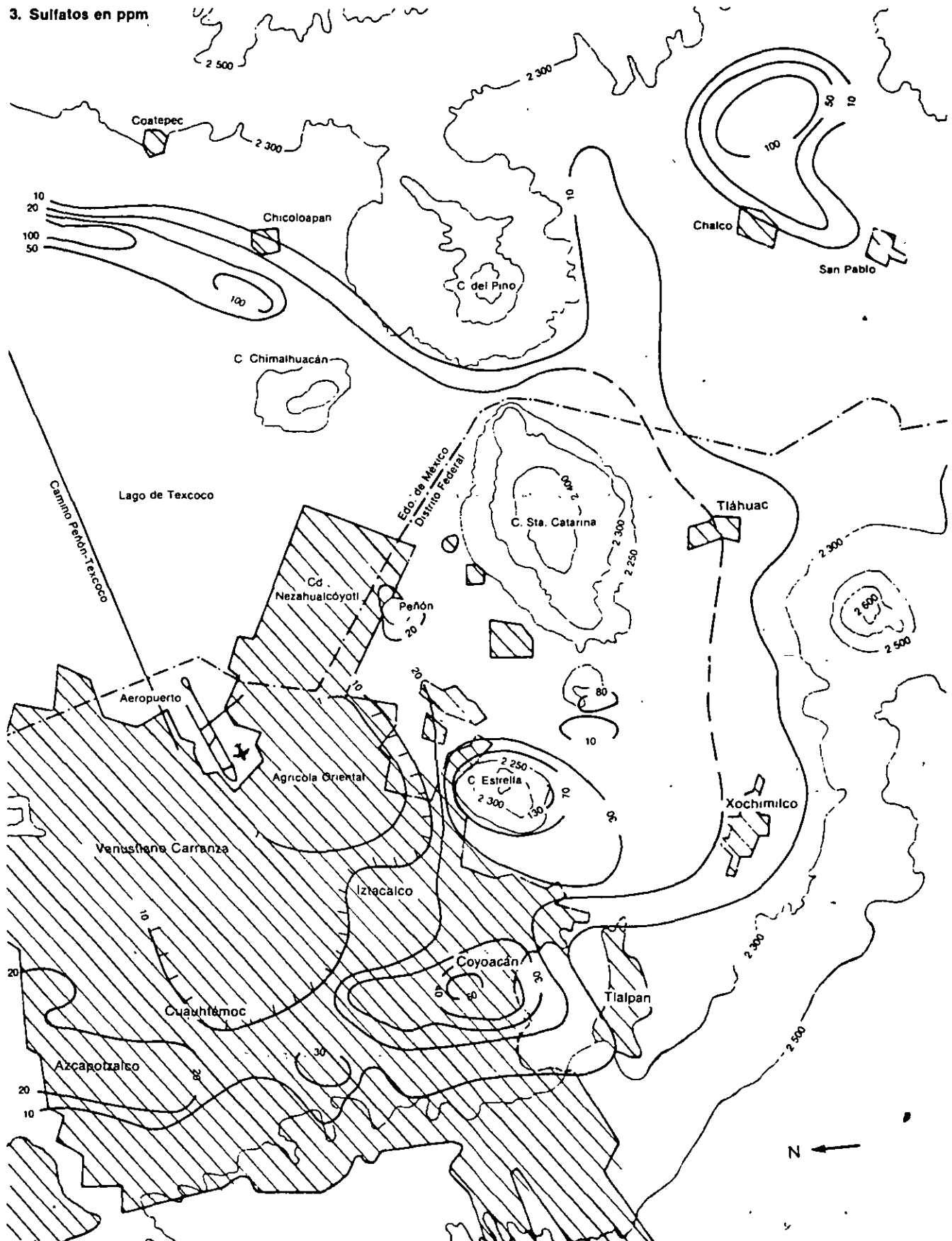
Existen otros compuestos del fierro que actúan como corrosivos incluso cuando no existe oxígeno, como en los acuíferos de cierta profundidad cuya agua ha circulado grandes distancias, como el óxido de fierro (FeO), de color amarillo y con un pH bajo.

Por otra parte, hay bacterias como la *Crenotrix* o la *Gallionella* que utilizan a este mineral en solución como fuente de energía y dan origen a una tonalidad rojiza en el agua. Algunas colonias que crecen y se desarrollan en el interior de los pozos forman costras gelatinosas o lamosas que tapan las ranuras de los ademes y también disminuyen el rendimiento.

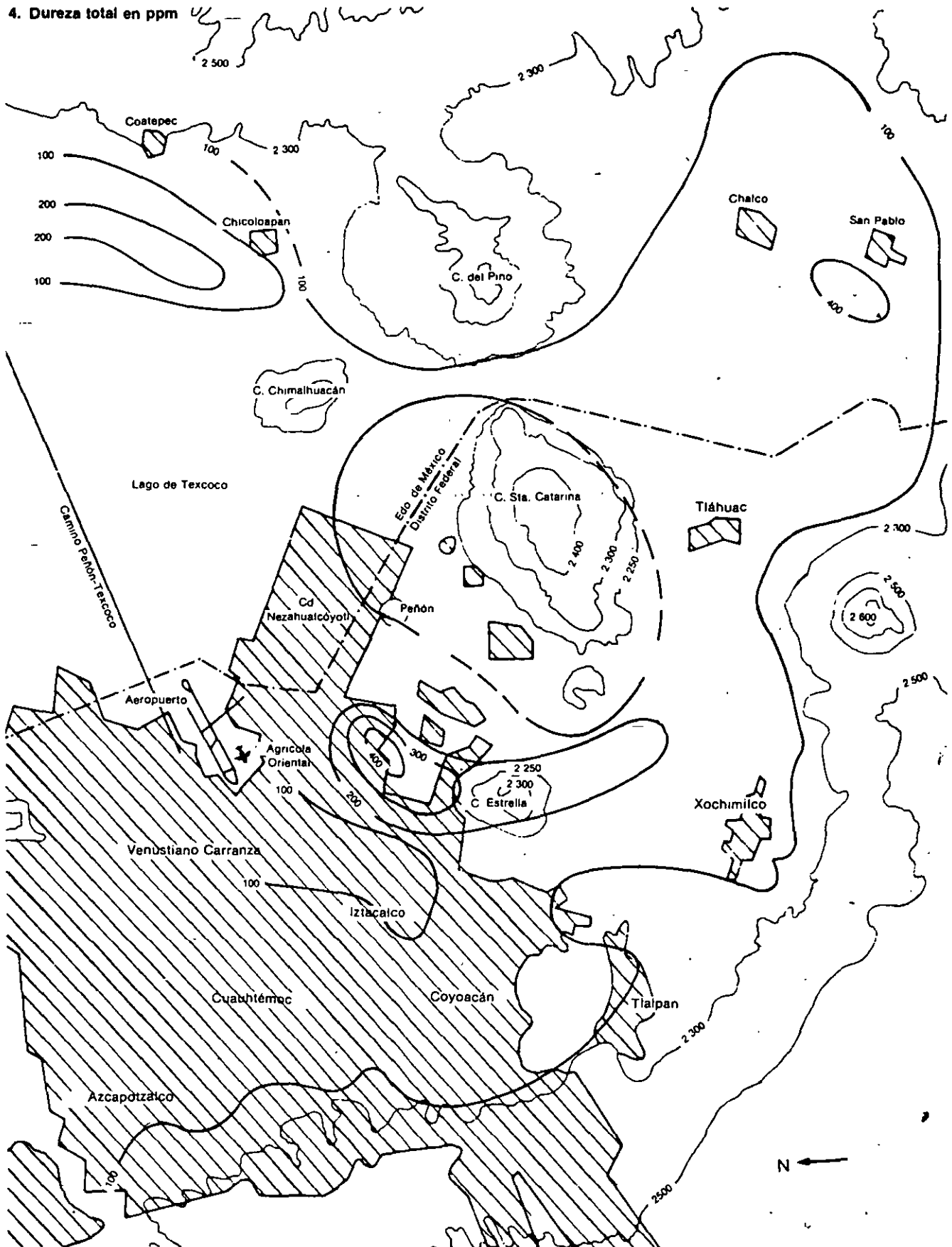
En los análisis químicos del agua se acostumbra reportar al fierro junto al manganeso por las semejanzas que hay entre ellos, pero tienen también grandes diferencias; el segundo también forma parte de rocas y suelos, pero además se encuentra en la materia orgánica ya que es uno de los nutrientes de las plantas. En las aguas naturales la concentración de manganeso es en general inferior a 0.02 ppm y puede circular grandes distancias porque no se oxida con facilidad. Está presente en las aguas que contienen fierro pero en una proporción menor.

En el área estudiada ambos elementos están prácticamente ausentes (véase la ilustración 5), aunque la proporción del fierro sobre la del manganeso es superior. Los puntos donde fueron detectados corresponden a los alrededores de la Delegación Azcapotzalco, a la parte comprendida entre la colonia Agrícola Oriental y la Sierra de Santa Catarina con una prolongación rumbo al poniente y a algunos pozos del sistema sur.

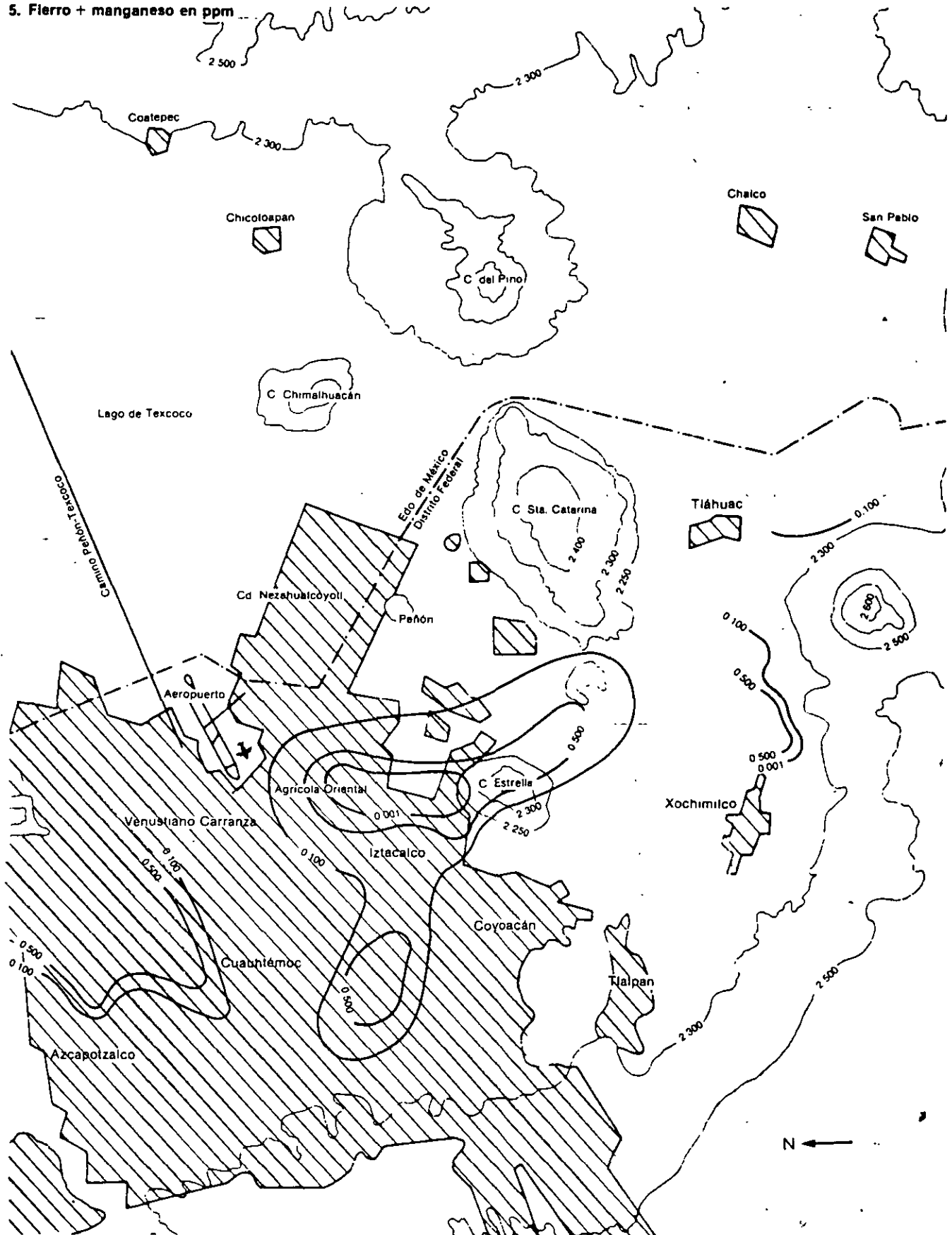
3. Sulfatos en ppm



4. Dureza total en ppm



5. Fierro + manganeso en ppm



Principales procesos químicos en el agua subterránea

Los iones disueltos en el agua subterránea tienen propiedades para entrar en reacción formando compuestos o disociándose; las reacciones químicas producidas se acompañan de un cambio de energía, lo cual a su vez provoca otro tipo de reacciones químicas, en una cadena muy compleja, cuyo cálculo, sin embargo, ya se ha adaptado a programas de computadora que simplifican su aplicación.

Metodología

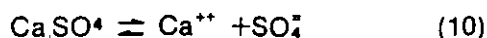
Se utilizaron aquellos recursos que sirven para evaluar las condiciones químicas del agua respecto al equilibrio químico, o sea su capacidad para precipitar o disolver una sal. El trabajo fue complejo y requirió de un largo tiempo, tanto por el índice de muestras de agua como por la cantidad de reacciones por estudiar; para realizarlo se utilizó el programa computarizado denominado WATEQ, que fue elaborado y publicado por el Departamento de Geología de los EUA (U.S. G.S.).

El equilibrio químico se basa en la ley de acción de masas, la cual indica que cuando en una reacción química los reactantes $A + B$ son iguales a los productos $C + D$ y la reacción es reversible, entonces la constante de actividad iónica K_{ai} es igual a las actividades de los productos entre la de los reactantes:

Ley de acción de masas: $A + B \rightleftharpoons C + D$ (8)

$$K_{ai} = \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad (9)$$

Los paréntesis indican la actividad del índice que encierran. Por ejemplo, en el caso de la anhidrita, ésta se disocia de acuerdo con la siguiente reacción:



Aplicando la ley de acción de masas la constante de actividad iónica es:

$$K_{ai} (\text{Anhidrita}) = \frac{[Ca^{++}][SO_4^{--}]}{[CaSO_4]} \quad (11)$$

La actividad de los compuestos es igual a 1, por lo que:

$$K_{ai} (\text{Anhidrita}) = [Ca^{++}][SO_4^{--}] \quad (12)$$

Las actividades iónicas se obtienen multiplicando el coeficiente de actividad " γ " de cada elemento, por su concentración en moles por litro " m ".

$$[Ca^{++}] = \gamma_{Ca} \cdot m_{Ca} \quad (13)$$

$$[SO_4^{--}] = \gamma_{SO_4} \cdot m_{SO_4} \quad (14)$$

El coeficiente de actividad iónica " γ " se calculó mediante la fórmula de Debye-Hückel:

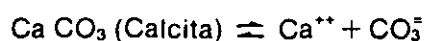
$$-\log \gamma_i = \frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_i \sqrt{I}} \quad (15)$$

donde Z es la carga del ión; A y B son constantes dependientes de la temperatura (en nuestro caso a 25° C, $A = 0.05085$ y $B = 0.3281 \times 10^{-8}$); a es una constante relacionada con el tamaño y carga del ión, e I es la fuerza iónica calculada por la fórmula:

$$I = \sum \frac{m_i z_i^2}{2} \quad (16)$$

Para encontrar el grado de saturación del agua respecto al mineral estudiado se compara la constante de actividad iónica K_{ai} con la constante de equilibrio K_e . Para valores de K_{ai} mayores que K_e , la muestra se encuentra sobresaturada y para valores de K_{ai} menores que K_e , está insaturada; cuando las constantes son iguales entonces se dice que existe equilibrio químico. El hecho de que determinada agua se encuentre sobresaturada de un compuesto implica que existirá precipitación de éste y por lo tanto habrá incrustaciones en ademes y tuberías; cuando está insaturada, tiene la propiedad de disolver una mayor cantidad de sales y se comporta como corrosiva respecto a la sal o mineral estudiados.

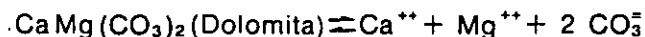
En párrafos anteriores se mostró la reacción química y la constante de actividad iónica de la anhidrita. A continuación se presentan las reacciones de disolución de la calcita, el yeso y la dolomita, por ser las que ocurren en la naturaleza con más frecuencia:



$$K_{ai} (\text{Calcita}) = [Ca^{++}][CO_3^{--}]$$



$$\text{Kai (Yeso)} = [\text{Ca}^{++}] [\text{SO}_4^{--}] \quad (18)$$



$$\text{Kai (Dolomita)} = [\text{Ca}^{++}] [\text{Mg}^{++}] [\text{CO}_3^{--}]^2 \quad (19)$$

Las constantes de equilibrio *Ke* de los minerales anteriores son las siguientes:

$$\text{Ke (Yeso)} = 10^{-4.75} \quad (20)$$

$$\text{Ke (Calcita)} = 10^{-8.47} \quad (21)$$

$$\text{Ke (Dolomita)} = 10^{-17.02} \quad (22)$$

$$\text{Ke (Anhidrita)} = 10^{-4.54} \quad (23)$$

Resultados

El valor de la presión del bióxido de carbono (PCO_2) en el agua que se encuentra en contacto con la atmósfera y en equilibrio es de 0.316×10^{-3} , pero los valores observados para el agua del acuífero de la ciudad de México fueron mayores que el punto de equilibrio, de donde se deduce la existencia de una fuente adicional de bióxido de carbono en el agua.

El grado de saturación de la anhidrita, calcita y yeso se obtuvo comparando el valor calculado para cada muestra (*Kai*) con la constante de equilibrio (*Ke*). Para ello se dividió *Kai/Ke*, y si el cociente resultante es igual a la unidad, se dice que existe equilibrio químico. Si dicho cociente es menor que 1, el agua tiene capacidad para disolver una mayor cantidad de sales, se considera insaturada y se puede clasificar como agua corrosiva. Si el resultado es mayor de 1 entonces se encuentra sobresaturada, y por lo tanto, tiene la propiedad de precipitar la sal por lo que se denomina agua incrustante. Se calculó el grado de incrustación del agua respecto a la anhidrita y al yeso; los resultados indican que se está muy lejos del límite de equilibrio y por lo tanto es una agua con alta capacidad de disolución de anhidrita.

En la zona estudiada, el grado de incrustación del agua respecto a la calcita arrojó valores por arriba de 1 000 milésimas (que en algunos casos llegan incluso a las 5 000 milésimas) en las posiciones central y oriente de la ciudad, entre las delegaciones de Iztacalco e Iztapalapa, en el Cerro de La Estrella y en San Lorenzo Tezonco, por lo que dichas aguas incrustantes de calcita pueden provocar taponamientos en ademes, columnas de bombeo u otros materiales con los que

están en contacto. En el resto del área analizada los valores son menores de 1 000 milésimas, excepto en algunas puntas locales (véase ilustración 6).

Variación de la salinidad respecto al tiempo

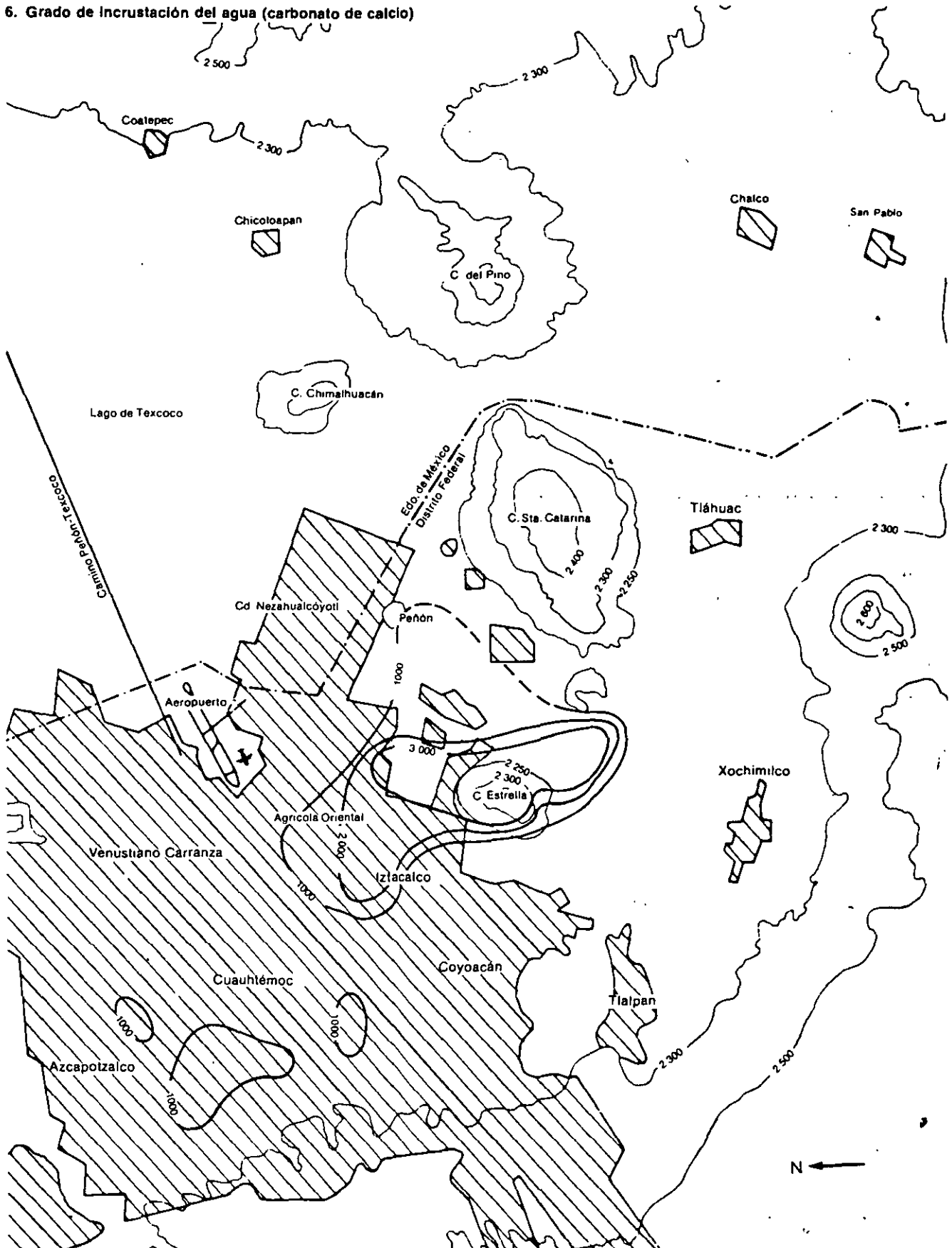
Información disponible

De los análisis químicos efectuados en los pozos municipales durante el periodo de 1955 a 1985 se seleccionaron los parámetros siguientes para su estudio detallado: sólidos totales disueltos, dureza total, cloruros, nitratos, fierro y manganeso. Los sólidos totales disueltos se eligieron porque indican el grado de salinidad del agua; la dureza total por ser un índice de calidad; los cloruros, debido a que se encuentran prácticamente ausentes en rocas volcánicas; los nitratos por indicar la contaminación orgánica; y el fierro y el manganeso, porque se han detectado en concentraciones nocivas en algunos puntos locales.

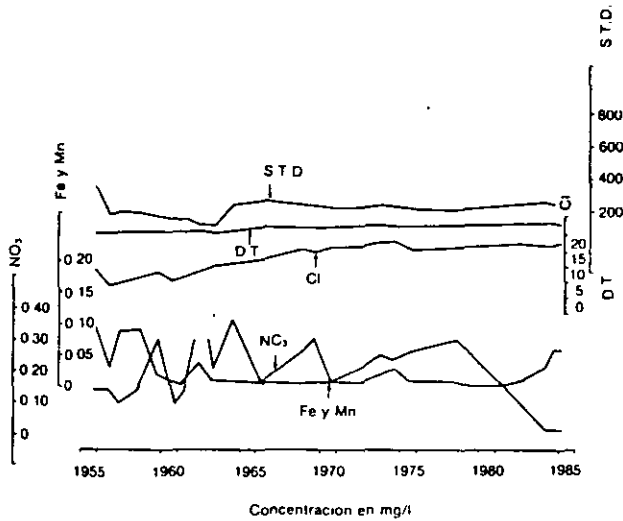
El estudio de la variación de la salinidad respecto al tiempo se efectuó en 100 pozos distribuidos en toda la zona metropolitana, de los cuales 30 no mostraron cambio alguno. A continuación se describen los principales efectos observados:

- Se notaron incrementos notables de cloruro en 17 pozos ubicados en el centro de la ciudad, y que coinciden con la zona donde se ha detectado una recarga al acuífero procedente de fugas de la red de distribución. El incremento se debe al cloro que se aplica al agua potable que se infiltra y alimenta al acuífero, como se muestra en el Pozo No. 15 (véase ilustración 7).
- En los 30 años analizados sólo se registró un aumento de fierro y manganeso en 5 pozos que corresponden a Santa Catarina y a la porción central de la zona urbana (Pozo 42, véase ilustración 8).
- El incremento de nitratos fue evidente en 29 de los 100 pozos graficados que se localizan principalmente en una franja al pie de los lomeríos del poniente de la ciudad. Se considera que ello se debe a la falta de saneamiento de los lomeríos (Pozo 26, véase ilustración 9).
- Los incrementos en casi todos los parámetros mencionados se dieron en 10 pozos; aquéllos más obvios presentan valores que varían entre 0.5 y 4.5 miligramos en el periodo de 30 años, lo que corresponde a un aumento anual entre 0.025 y 0.225 ppm (Pozo 83, véase ilustración 9).

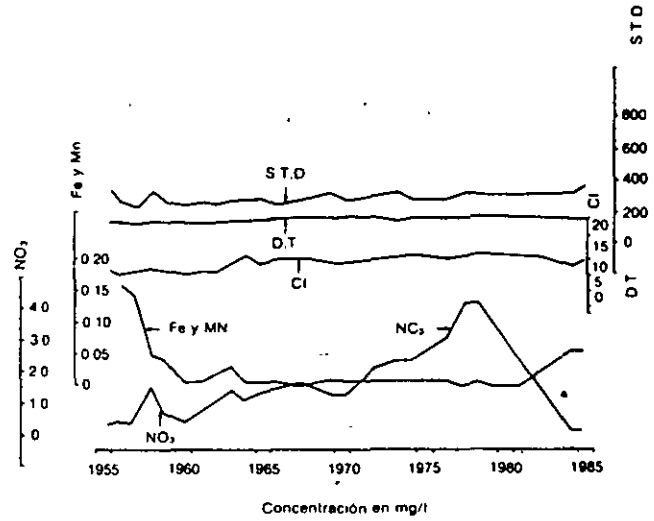
6. Grado de incrustación del agua (carbonato de calcio)



7. Pozo 15 (Albert y Berlin)



9. Pozo 26 (Axotla)



Familias de agua

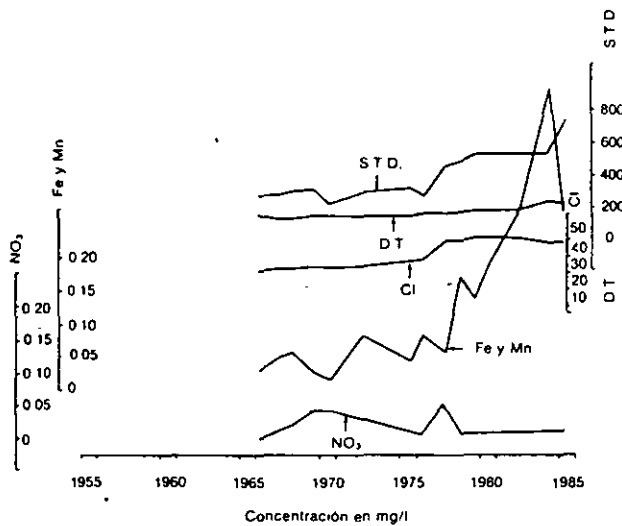
Se denomina familia de agua a la composición química representada por el principal catión y el principal anión en solución. Existen varios métodos para deducir la familia de agua a que pertenece una muestra. En este trabajo se utilizó el denominado de Piper o de Diagramas Triangulares, que consiste en graficar en dos triángulos equiláteros a los aniones y cationes principales y con cuya aplicación se obtuvieron las familias siguientes:

- Mixta sódico-bicarbonatada. Corresponde al agua de lluvia que ha disuelto poca cantidad de sales. El líquido circula a través de materiales de alta permeabilidad, como lavas y piroclásticos,

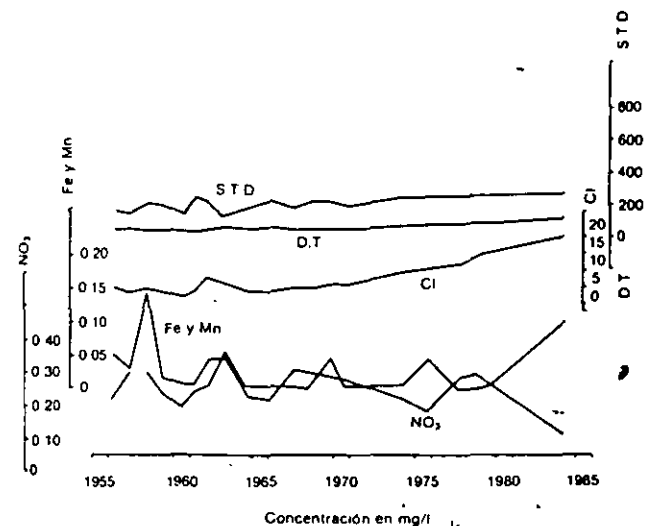
que no permiten la incorporación de cantidades significativas de sales que pudieran modificar su composición química. Esta familia se encontró al poniente, tanto al pie de la Sierra de Las Cruces como en la parte baja.

- Mixta magnesiana-bicarbonatada. Se encontró en el acuífero de tipo basáltico al pie de la Sierra del Chichinautzin. El agua de lluvia, que es sódico-bicarbonatada, modifica ligeramente su composición química al disolver el calcio y el magnesio de los basaltos, para dar origen a la familia que aquí se trata. Se detectó principalmente en la zona de los pedregales, entre Contreras y Ciudad Universitaria, así como en el extremo sur del Distrito Federal entre Xochimilco y San Juan Ixtayopan.

8. Pozo 42 (Granjas Estrella)



10. Pozo 83 (Marina Nacional 1)



- Sódico-bicarbonatada... Este tipo se detectó en las porciones central y oriental de la ciudad, y se origina por dos factores: las arcillas del subsuelo producen un intercambio catiónico mediante el cual el calcio y el magnesio tienden a permanecer dentro de la estructura de la arcilla, mientras que el sodio se incorpora al agua en solución, y la presencia de horizontes de sales de bicarbonato de sodio, que son fácilmente disueltos por el agua en los pozos de la Agrícola Oriental y de Santa Catarina.

Conclusiones

La mayor parte del agua del acuífero contiene bajas concentraciones salinas, con excepción de zonas locales donde se detectan hasta 1,200 ppm, así como en el vaso del Lago de Texcoco donde se registran más de 20 000 ppm.

La alta salinidad es ocasionada por tres factores: a) Existencia de horizontes de sedimentos evaporíticos lacustres; b) influencia de zonas volcánicas, algunas posiblemente activas, que han impregnado las rocas de subsuelo, así como emanaciones gaseosas y el emplazamiento de sales de tipo hidrotermal; c) presencia de material orgánico en descomposición entre los sedimentos lacustres.

Los puntos que destacan como focos locales de contaminación natural en el acuífero corresponden a las áreas de la colonia Agrícola Oriental y de la Sierra de Santa Catarina, así como a la parte central del Vaso de Texcoco, aunque en esta porción la información es escasa.

La salinidad del agua en los últimos 20 años ha permanecido estable con excepción de algunos pozos en ciertas zonas. Se han encontrado incre-

mentos notables de cloruros en los pozos ubicados en la parte central de la ciudad, coincidiendo con la zona en donde se ha detectado un aporte de agua al acuífero procedente de las fugas de la red de distribución. El incremento salino aparentemente es debido al cloro que se añade al agua potable que se infiltra y alimenta al acuífero.

En los pozos localizados alrededor de la Sierra de Santa Catarina y en algunos de la porción central de la zona urbana se han detectado incrementos en fierro y manganeso, efecto que podría estar relacionado con el crecimiento de bacterias que incluyen al fierro dentro de su ciclo evolutivo.

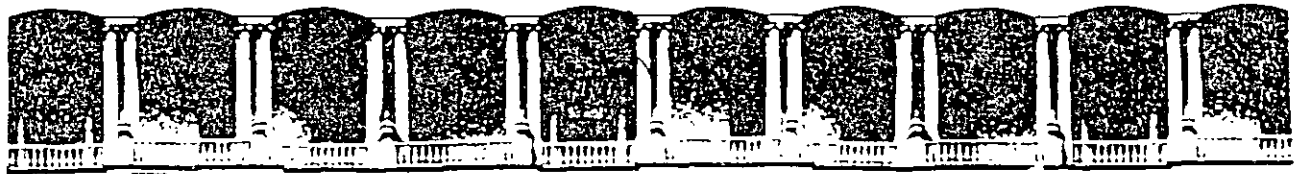
La concentración salina es baja en los alrededores del área y se incrementa hacia la parte central, en forma similar a la dirección del flujo subterráneo. Una excepción se encuentra entre las Delegaciones Benito Juárez y Venustiano Carranza, donde el agua disminuye su contenido salino por dilución con agua de fugas de la red de distribución.

Un incremento notable en nitratos ha sido detectado en pozos ubicados en una franja paralela al pie de la Sierra de Las Cruces, el cual es ocasionado por la falta de drenaje en los lomeríos de esa porción.

Referencias

Lesser y Sánchez, *Informe sobre las actividades geohidrológicas en el Valle de México*, 1985.

¹ Este artículo contiene en forma resumida los trabajos realizados en los dos últimos años por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Departamento del Distrito Federal, al cual se agradecen las facilidades prestadas para su divulgación.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

GEOHIDROLOGÍA

*El hundimiento del terreno en la ciudad de México y sus implicaciones en el
sistema de Drenaje*

**Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

EL HUNDIMIENTO DEL TERRENO EN LA CIUDAD DE MEXICO Y SUS IMPLICACIONES EN EL SISTEMA DE DRENAJE

Juan Manuel Lesser Illades
Lesser y Asociados, S. A. de C. V.

Miguel Angel Cortes Pérez
Dirección General de Construcción
y Operación Hidráulica-DDF

RESUMEN

La Ciudad de México históricamente ha sido una de las áreas más densamente pobladas en el mundo. Actualmente, más de 20 millones de habitantes residen en el área metropolitana, donde se utilizan 60 m³/seg de agua potable, de los cuales 40 m³/seg provienen del acuífero que se encuentra bajo la ciudad. La extracción de agua subterránea causa el abatimiento de la superficie piezométrica y produce una subsidencia del terreno por la consolidación de las arcillas superficiales. Actualmente, la subsidencia del terreno en la mayor parte de la Ciudad de México varía de 5 a 10 centímetros anuales y existen zonas locales con hasta 35 cm/año en el área de Xochimilco.

El Departamento del Distrito Federal a través de su Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DDF-DGCOH) desarrolló un plan maestro de drenaje de la ciudad. Una parte importante de dicho programa, fue el análisis histórico de la subsidencia del terreno y la simulación de su comportamiento para los próximos años (DGCOH-DDF, 1994). La subsidencia acumulada de 1891 a 1995 alcanza máximos en la parte central de la Ciudad de México que van de 8 a 10 metros; la mayor parte del asentamiento fue generado en el período de 1940 a 1960. La explotación de agua subterránea se disminuyó en el centro de la ciudad a partir del año 1960 y el ritmo de subsidencia se redujo. Al mismo tiempo que la explotación de agua subterránea se reducía en el centro, se incrementaba en el sur de la ciudad, causando subsidencia del terreno en esta última región.

Gran parte del sistema de drenaje de la ciudad es fuertemente impactado por la subsidencia, debido a que modifica el gradiente ocasionando, en algunos casos, la inversión del gradiente del sistema drenaje. Se elaboró un análisis histórico y una simulación de la subsidencia, poniendo especial atención en los 17 principales drenes de la ciudad, contándose entre ellos al Gran Canal, al Río Churubusco y otros. Con los resultados del trabajo, se programan actividades de rehabilitación del sistema de drenaje en los sitios más afectados, a fin de evitar inundaciones que, por el hundimiento del terreno, podrían ser más severas cada año.

Palabras clave: acuitardo, acuífero, abatimiento, nivel freático, superficie piezométrica, compresibilidad, subsidencia.

INTRODUCCION

En el subsuelo de la Ciudad de México se encuentran una serie de materiales aluviales constituidos esencialmente por gravas y arenas que se encuentran intercalados con productos volcánicos, principalmente lavas y escorias. Estos materiales forman el acuífero de la ciudad el cual es explotado para el abastecimiento de sus habitantes.

Cubriendo al acuífero, se encuentra una capa de materiales arcillosos que funcionan como acuitardo. Se encuentran saturados y presentan una permeabilidad muy baja, del orden de 10^{-7} a 10^{-9} m/seg. Permiten un muy lento flujo del agua a través de ella.

La mayor parte del área metropolitana de la Ciudad de México presenta hundimientos del terreno los cuales varían de una zona a otra de acuerdo a la constitución del suelo. Los hundimientos, al ser diferenciales, provocan diversos problemas, entre ellos la operación por gravedad de la red de drenaje subsuperficial.

La zona estudiada comprendió el área metropolitana de la Ciudad de México y de los sistemas y áreas tributarias a las salidas del valle. Dentro de esta zona, se marcaron los principales drenes de la ciudad, correspondientes a: Gran Canal del Desagüe; Dren General del Valle; Río de la Compañía; Río Churubusco incluyendo brazo derecho y brazo izquierdo; Colector Churubusco; Colector 15; Colector Iztapalapa; Canal Nacional-Canal Chalco; Río San Buenaventura; Río de los Remedios; Colector Miramontes; Canal de Garay; Río Consulado y Colector Central.

Extracción de Agua Subterránea y Hundimientos del Terreno

La Ciudad de México originalmente se abastecía de agua a partir de los muchos manantiales existentes. Al incrementarse las demandas, se recurrió a la extracción de agua del subsuelo, primeramente con varios cientos de pozos someros (norias) de los que en la literatura se mencionan más de 1000 para el año de 1886 (DDF, 1982). Posiblemente el hundimiento de la ciudad se inició en esas fechas. En nivelaciones de 1891 a 1895 ya registran hundimientos de 5 centímetros por año. En el período de 1936-1944, se perforaron los primeros 93 pozos profundos que provocaron hundimientos en el centro de la ciudad de hasta 18 centímetros por año. Entre 1938 y 1948, continúa la perforación en forma intermitente y extendiéndose su localización a los alrededores del Centro Histórico de la Ciudad de México. El año de 1960 se puede marcar como la frontera en que se inició la disminución de la extracción de agua en el centro de la ciudad y a su vez, el inicio de la explotación acuífera en el sur (Xochimilco-Chalco).

En la ilustración 1 se muestra el hundimiento del terreno y la extracción de agua subterránea en el centro de la Ciudad de México, observándose que la extracción tuvo su mayor nivel en las décadas de 1940-1950, período en el que el hundimiento del terreno se aceleró. A partir de los 60s, la extracción en el centro de la ciudad ha disminuido notablemente; el hundimiento ha continuado aunque en menor grado.

En contraste, hacia el sur del Distrito Federal, en el área de Xochimilco-Chalco, la extracción prácticamente se inició en la década de los 60s, fecha a partir de la cual se ha ido incrementado hasta nuestros días. Por lo que respecta al hundimiento, éste se registra en forma notable a partir de la explotación acuífera de los años 60s (ilustración 2).

Otra observación importante es que la magnitud del hundimiento total del terreno, esta en relación con el espesor de las arcillas. Se formaron secciones geológicas a lo largo de los drenes estudiados, donde se confirmó la relación entre el hundimiento del terreno y el espesor de las arcillas lacustres.

Características de las Arcillas

Las arcillas se encuentran cubriendo la parte plana del Valle de México, corresponden a sedimentos de los antiguos lagos. Tienen un espesor que fluctúa entre 40 y 60 metros en la mayor parte del valle, el cual se acuña hacia las elevaciones topográficas o se incrementa en áreas aisladas.

Las arcillas están saturadas, presentando un nivel freático a entre 2 y 3 metros de profundidad. Bajo ellas, se encuentra un acuífero que originalmente funcionaba como confinado imprimiendo una presión ascendente a la base de las arcillas. Actualmente, en la mayor parte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), la explotación del acuífero ha provocado el abatimiento del nivel piezométrico, modificando el tipo de acuífero, de confinado a libre y eliminando la presión hidráulica ascendente que el acuífero ejercía hacia la base de las arcillas.

Diversas pruebas efectuadas a las arcillas más superficiales, han permitido calcular un coeficiente de compresibilidad que va de 0.11 a 6 cm²/kg (Cruickshank, *et al.*, 1979); una relación de vacíos que varía de 2 a 15 (Cruickshank, *et al.*, 1979) y; una permeabilidad entre 1×10^{-7} y 1×10^{-9} m/seg.

Hundimiento Histórico

Existen varias citas históricas sobre nivelaciones en la Ciudad de México (Hiriart F. y R. Marsal, 1969). Es particularmente interesante el levantamiento topográfico de R. Gayol (Hiriart, *et al.* 1969) realizado a fines del siglo pasado, a partir del cual se ha hecho una reconstrucción de la historia del hundimiento de la Ciudad de México. El primer dato encontrado en la recopilación efectuada en este trabajo, corresponde a A. Humbolt, 1803. Existen también citas del monumento a Enrico Martínez en 1862, del Ingeniero Velázquez y Aldasoro en 1876 y de el Ingeniero Roberto Gayol en 1891.

En relación con los hundimientos medidos, hacia el año de 1925, algunos ingenieros sostenían la teoría de que el Lago de Texcoco se estaba azolvando. Posteriormente empezó a lucubrase sobre el secado del lago como factor determinante del asentamiento de la ciudad. Fue Nabor Carrillo quien llamó la atención en 1947 sobre la verdadera causa del proceso, al analizar la influencia de los pozos de bombeo en el hundimiento (Hiriart *et al.* 1969)..

En la ilustración No. 3 se observa el hundimiento histórico de varios monumentos de la Ciudad de México de 1900 a 1996, en donde hacen notar que hasta el año de 1968 el hundimiento pasó por 3 etapas. En la primera, de 1898 a 1937, el hundimiento es prácticamente lineal de 4 centímetros por año. La segunda fase del proceso se marca de 1937 a 1947, donde también es de tipo lineal con un hundimiento medio de 14 centímetros por año. De 1947 a 1996, se marcó ya una tercera etapa en la que se registran velocidades de hundimiento de 40 centímetros por año o mayores al inicio de la etapa y que tienden a disminuir en forma progresiva hasta llegar al final de la etapa a valores de 10 centímetros por año.

Datos más recientes del hundimiento fueron registrados a través de un gran número de piezómetros por la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México en las últimas tres décadas. Una nueva época de mediciones se inició por parte del Departamento del Distrito Federal y consiste en nivelaciones cada dos años de 1978 a 1994.

Hundimiento 1891-1994

La ilustración 4 muestra el hundimiento acumulado del terreno de 1891 a 1994, observándose máximos de poco más de 10 metros en el centro de la ciudad; hundimientos entre 6 y 7 metros del centro hacia el Aeropuerto Internacional Benito Juárez; hundimientos ligeramente mayores a 6 metros entre el Canal Nacional y el Canal de Chalco en el tramo donde se encuentra la batería de pozos Tlahuac-Neza; y hundimientos ligeramente mayores a 5 metros en el área de Tlahuac.

Los hundimientos tienden a desaparecer hacia las elevaciones topográficas correspondientes a la Sierra de las Cruces al poniente, la Sierra del Chichinautzin al sur y, el Cerro de la Estrella y la Sierra de Santa Catarina en el centro-este de la ciudad.

Hundimiento 1983-1992

Por ser el período con mayor consistencia en nivelaciones diferenciales, la DGCOH-DDF construyó la configuración del hundimiento del terreno para el periodo 1983-1992, la cual se muestra la ilustración 5 donde se observa que los mayores hundimientos se registraron en la zona oriental, alrededor del Aeropuerto Internacional Benito Juárez con entre 150 y 250 centímetros; hacia el centro de la ciudad el hundimiento registrado en el periodo aquí tratado es de alrededor de 100 centímetros. En el sur, entre Xochimilco y Tlahuac, los hundimientos han sido de entre 100 y poco más de 150 centímetros. Se hace notar que esta configuración se construyó con más de 1500 bancos de nivel que se han venido midiendo cada 2 años.

Hundimiento Medio Anual

Tomando en cuenta que la configuración mencionada en el inciso anterior presenta buen control y amplia distribución para un período de 9 años, se consideró que podría tomarse como representativa para la obtención de un hundimiento medio anual.

De esta manera, se dividieron los datos de la configuración entre 9 y se obtuvo el hundimiento medio anual. Observándose valores máximos de 30 centímetros en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcoyotl; entre 20 y 25 centímetros anuales de hundimiento en el Aeropuerto Internacional Benito Juárez; alrededor de 10 centímetros en el centro de la ciudad; entre 2 y 5 centímetros en el área de Azcapotzalco; alrededor de 15 centímetros en los área de Xochimilco y el Canal de Chalco en el tramo donde se ubica la batería de pozos Tlahuac-Neza.

Predicción del Hundimiento

Para la predicción de los hundimientos que se registrarán en los próximos años en la ZMCM, se aplicaron varios métodos de cálculo. Estos, correspondieron a: Un método estadístico lineal; al cálculo de la predicción mediante regresión logarítmica y; a la aplicación de un modelo matemático desarrollado por C. Cruickshank, *et al*, 1979 (DGCOH-DDF, 1992).

Predicción de Hundimientos Sobre los Principales Drenes

De las 25 secciones elaboradas, en el presente trabajo se presenta una de ellas a manera de ejemplo que incluye el hundimiento histórico y predicción al año 2000 a lo largo del Gran Canal de Desagüe, desde su inicio en el kilómetro 0 hasta el túnel del Tequisquiác en el kilómetro 47 (ilustración 6). En los primeros kilómetros del trazo, el hundimiento ha sido considerable y disminuye en dirección al norte. Entre los kilómetros 0 y 18, el hundimiento medio registrado para el período 1963-1993 fue de 2 metros; del kilómetro 18 al 20 el hundimiento fue menor, con una media de 1 metro para el período mencionado. En contraste, en la porción norte del canal entre el kilómetro 20 y el 46, el hundimiento medio fue de 40 centímetros.

Se obtuvo la predicción del hundimiento a lo largo de los principales drenes. Los resultados más sobresalientes, se marcan en la ilustración 7, observándose que existirán asentamientos diferenciales que deberán remediarse a fin de evitar inundaciones.

Conclusiones

La presencia de antiguos lagos en el Valle de México, originó la acumulación de un sedimento arcilloso que actualmente cubre la parte plana de la Zona Metropolitana. Las características de las arcillas y los efectos a que se encuentra sujeta, han sido la causa del hundimiento del terreno.

En secciones geológicas elaboradas a lo largo de los ejes de los principales drenes, se diferenci6 la capa de arcillas que sobreyace al acuífero, observándose que los hundimientos son proporcionales al espesor de las arcillas.

Las arcillas est6n saturadas presentando un nivel freático a entre 2 y 3 metros de profundidad. Bajo ellas se encuentra un acuífero que originalmente funcionaba como semiconfinado, imprimiendo una presi6n ascendente en la base de las arcillas. Actualmente, en la mayor parte de la Zona Metropolitana la explotaci6n del acuífero ha provocado el abatimiento del nivel piezométrico y eliminado la presi6n hidr6ulica que el acuífero ejercía hacia la base de las arcillas modificando el tipo de acuífero, de confinado a libre.

El hundimiento total acumulado de 1891 a 1994, alcanza máximos de poco más de 10 metros en el centro de la ciudad y hundimientos ligeramente mayores de 6 metros en la zona sur del Distrito Federal.

Se obtuvo el hundimiento medio anual, obteniéndose valores máximos de 30 cm/año en los límites entre el Distrito Federal y Ciudad Nezahualcoyotl; entre 20 y 25 cm/año en el Aeropuerto Internacional Benito Juárez; alrededor de 10 cm/año en el centro de la ciudad; entre 2 y 5 centímetros en el área de Azcapotzalco y; alrededor de 15 cm/año en el área de Xochimilco y Canal Chalco.

A lo largo de los 47 kil6metros de longitud del Gran Canal de Desagüe, se observa que prácticamente no existe pendiente entre el cadenamamiento km-0 y el km-18 y, que los hundimientos para el año 2000 ser6n de hasta 100 centímetros. Alrededor del kil6metro 18 prácticamente permanecer6 estable. A partir del cadenamamiento km-18 y hasta su salida hacia el t6nel de Tequisquiac, se presenta una pendiente de 1.5×10^{-4} . El hundimiento al año 2000 (al norte del kil6metro 18), ser6 de 40 a 80 centímetros.

Referencias

Carrillo, Nabor. 1969. *El Hundimiento de la Ciudad de México Proyecto Texcoco*. Secretaria de Hacienda y Crédito público. NAFINSA.

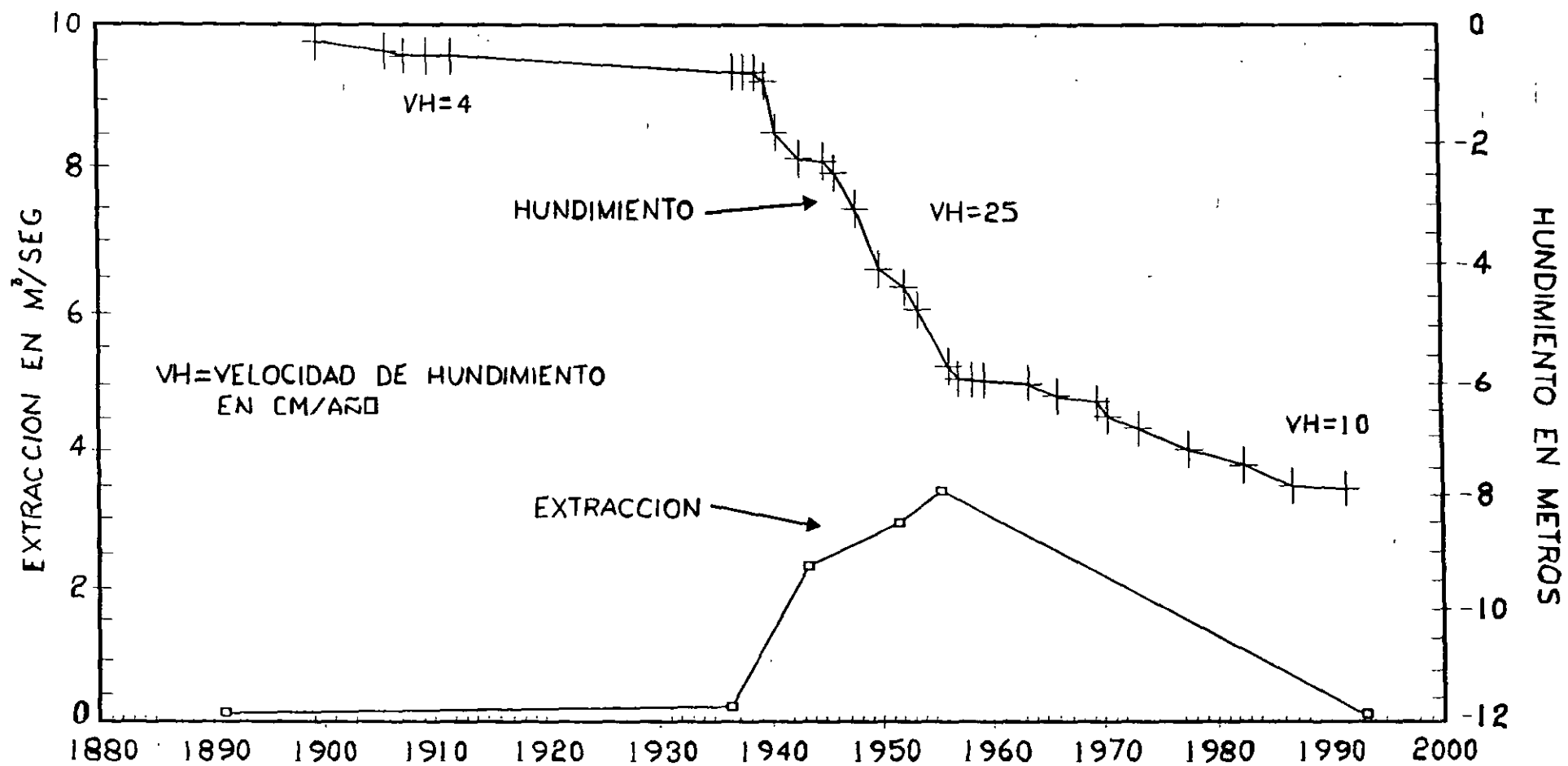
Cruickshank, C., I. Herrera, R. Yates, J.P. Hennart, D.R. Balarezo y R. Magaña, 1979. *Modelo de Predicci6n del Hundimiento del Valle de México*. Estudio elaborado para el D.D.F.

Departamento del Distrito Federal (DDF). 1982. *El Sistema Hidr6ulico del Distrito Federal*. Publicaci6n de la Direcci6n General de Construcci6n y Operaci6n Hidr6ulica.

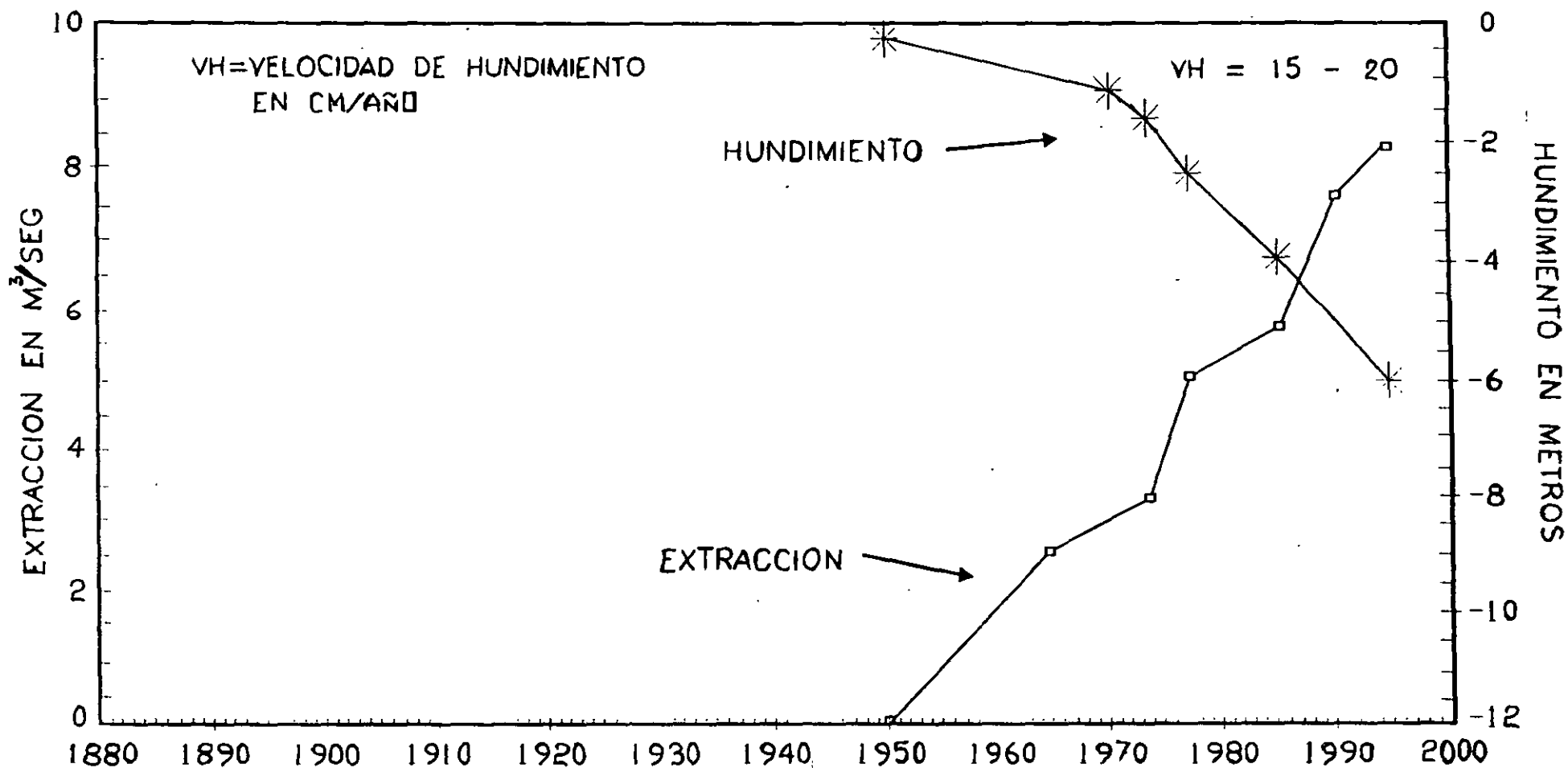
DGCOH-DDF. 1992. *Políticas de Extracci6n de Agua del Subsuelo Mediante el Modelo Matemático de Abatimientos-Hundimientos*. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V.

DGCOH-DDF. 1994. *Evaluación de los Hundimientos*. Elaborado por Lesser y Asociados, S.A. de C.V., como parte del Plan Maestro de Drenaje de la ZMCM.

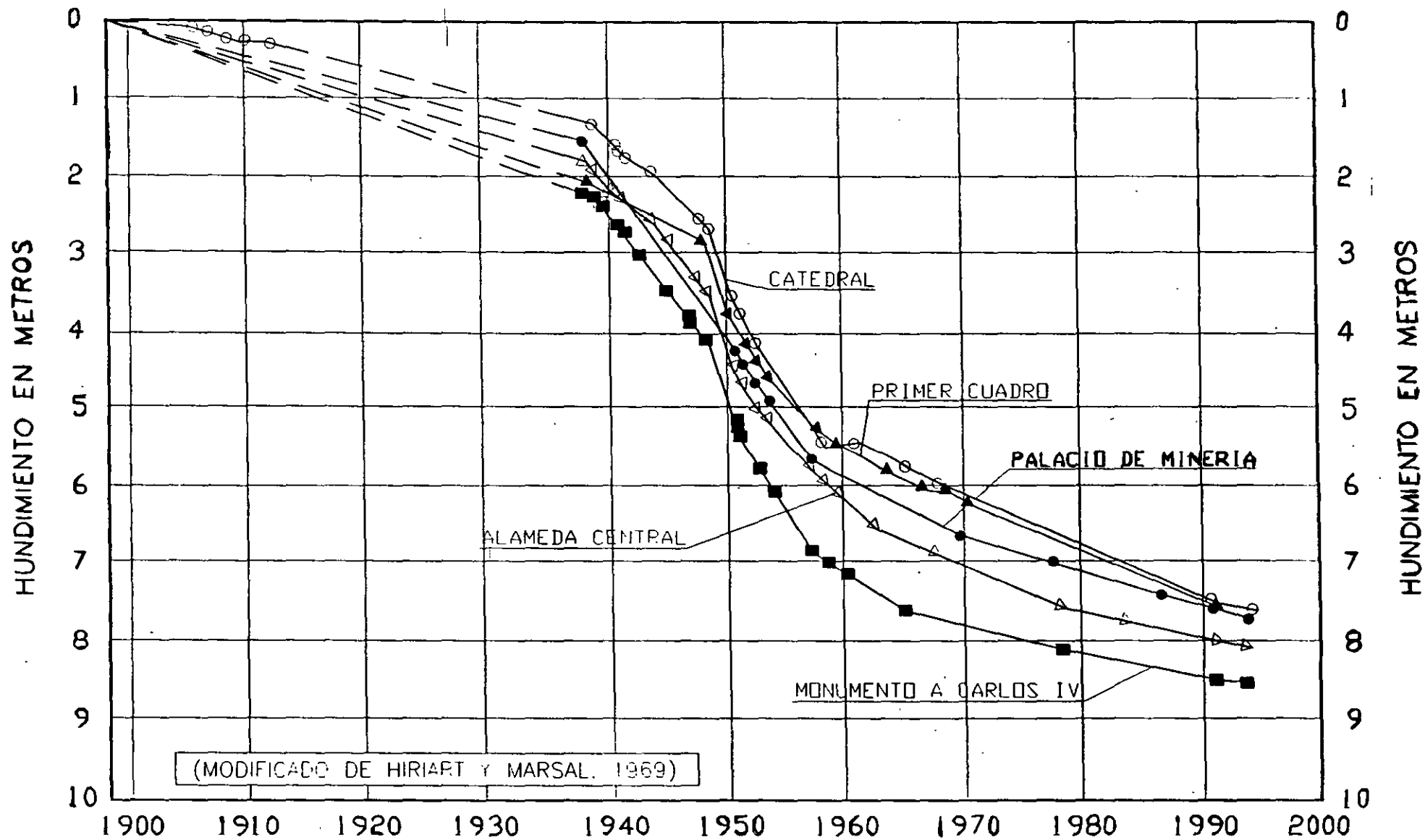
Hiriart, F. y R. Marsal. 1969. *El Hundimiento de la Ciudad de México*. En: *El Hundimiento de la Ciudad de México Proyecto Texcoco*. SHCP, NAFINSA.



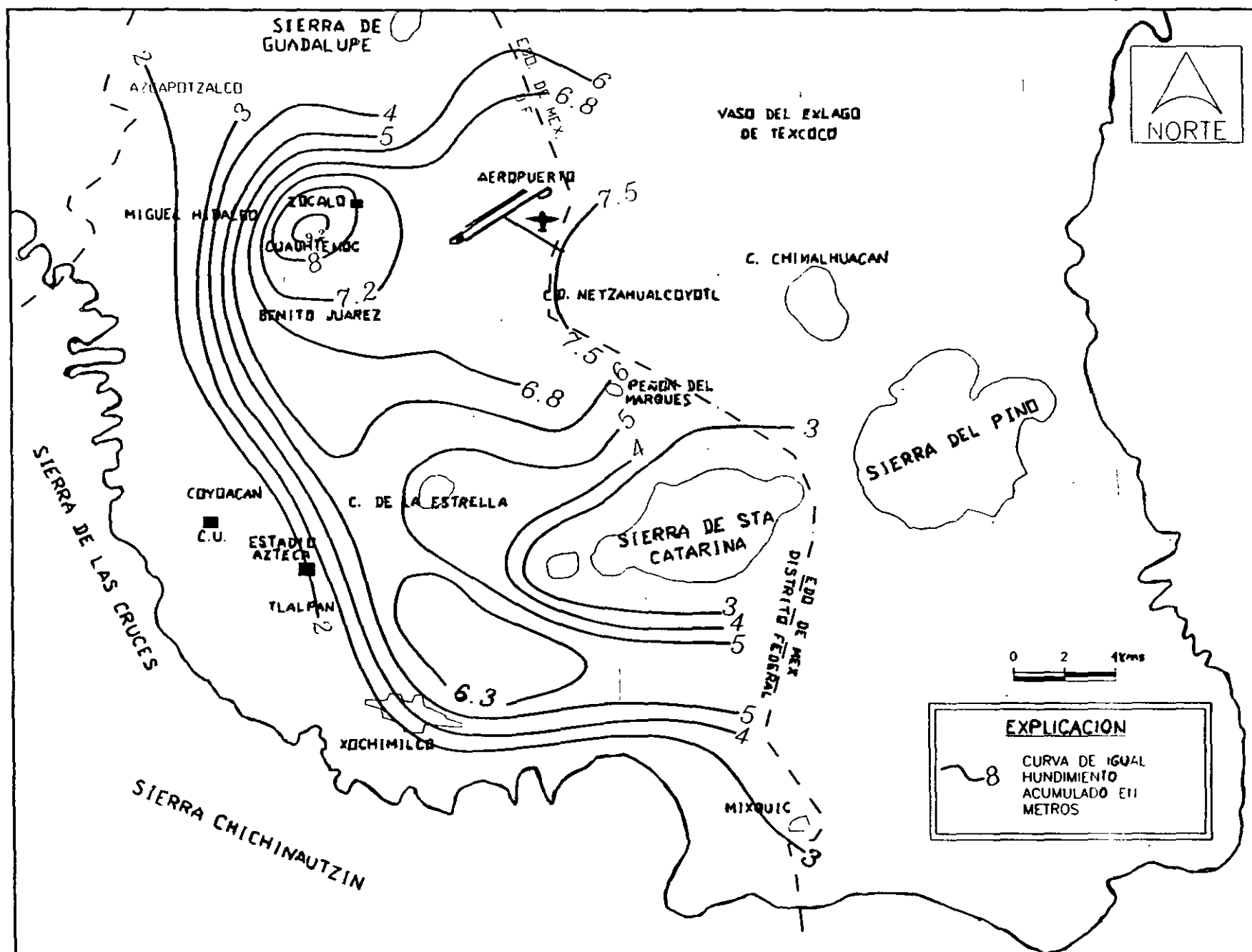
1.- EXTRACCION DE AGUA Y HUNDIMIENTOS EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE MEXICO



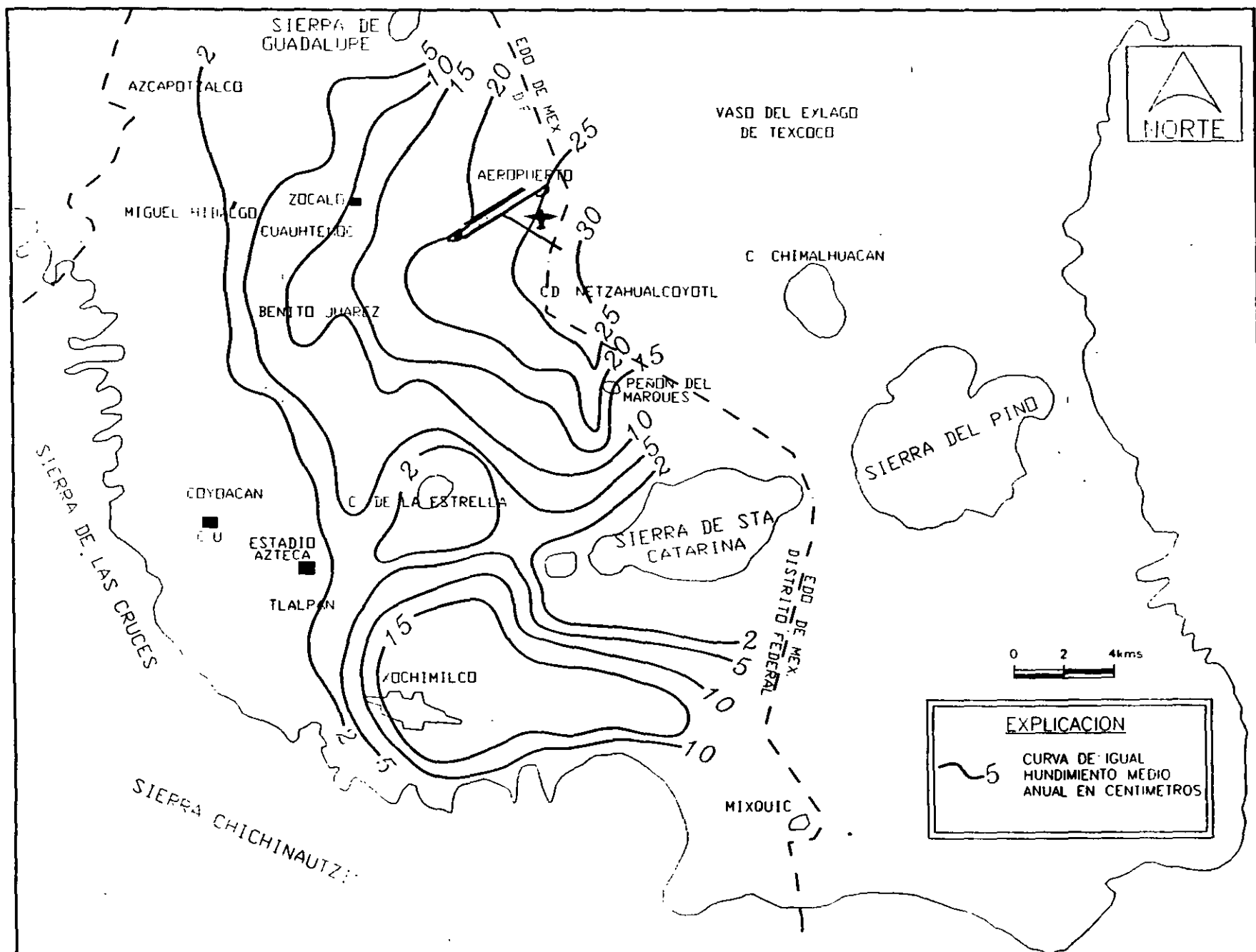
2.- EXTRACCION DE AGUA Y HUNDIMIENTOS EN LA ZONA SUR DEL D.F. (XOCHIMILCO-CHALCO)



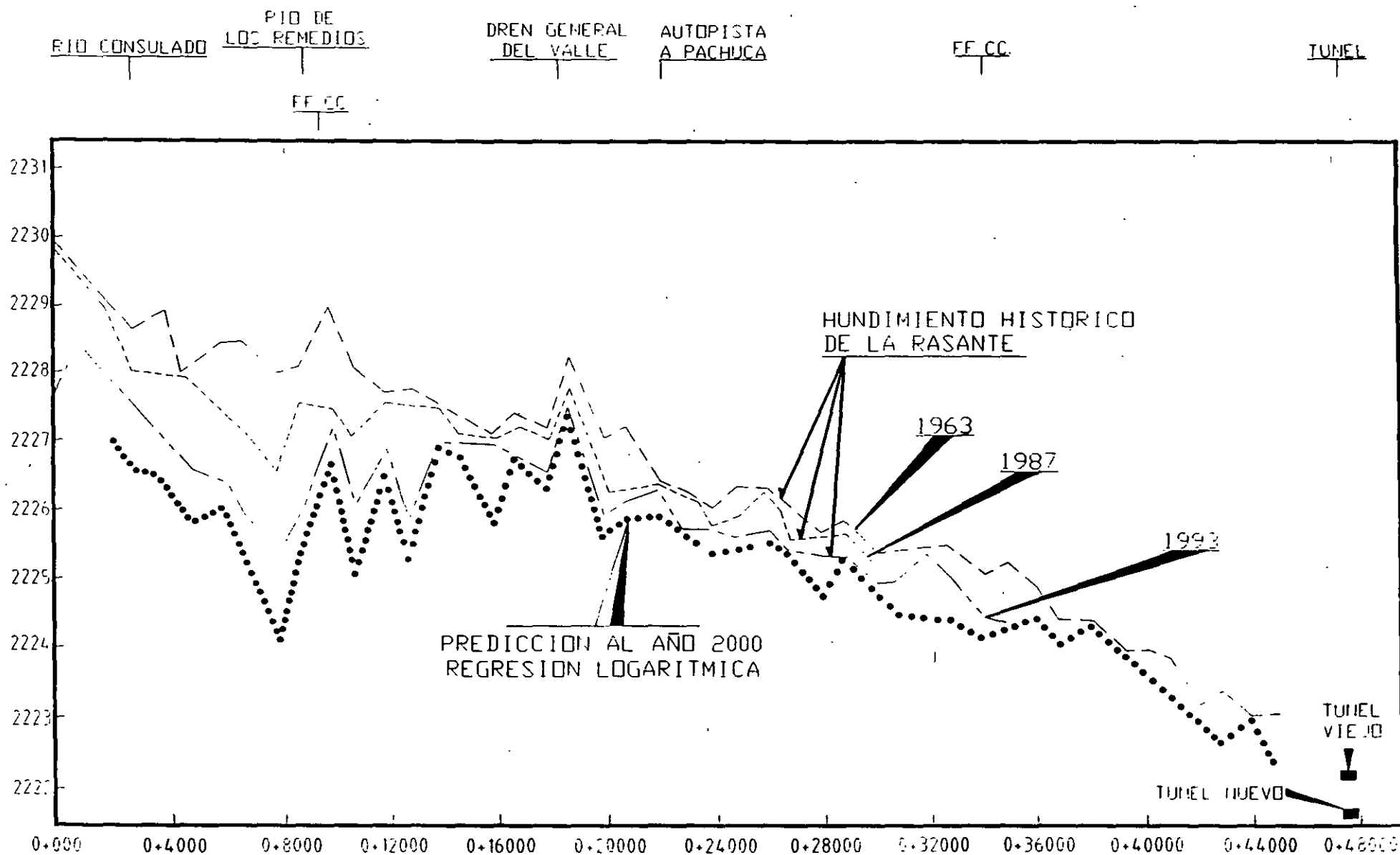
3.- HUNDIMIENTOS EN VARIOS PUNTOS DE LA CIUDAD



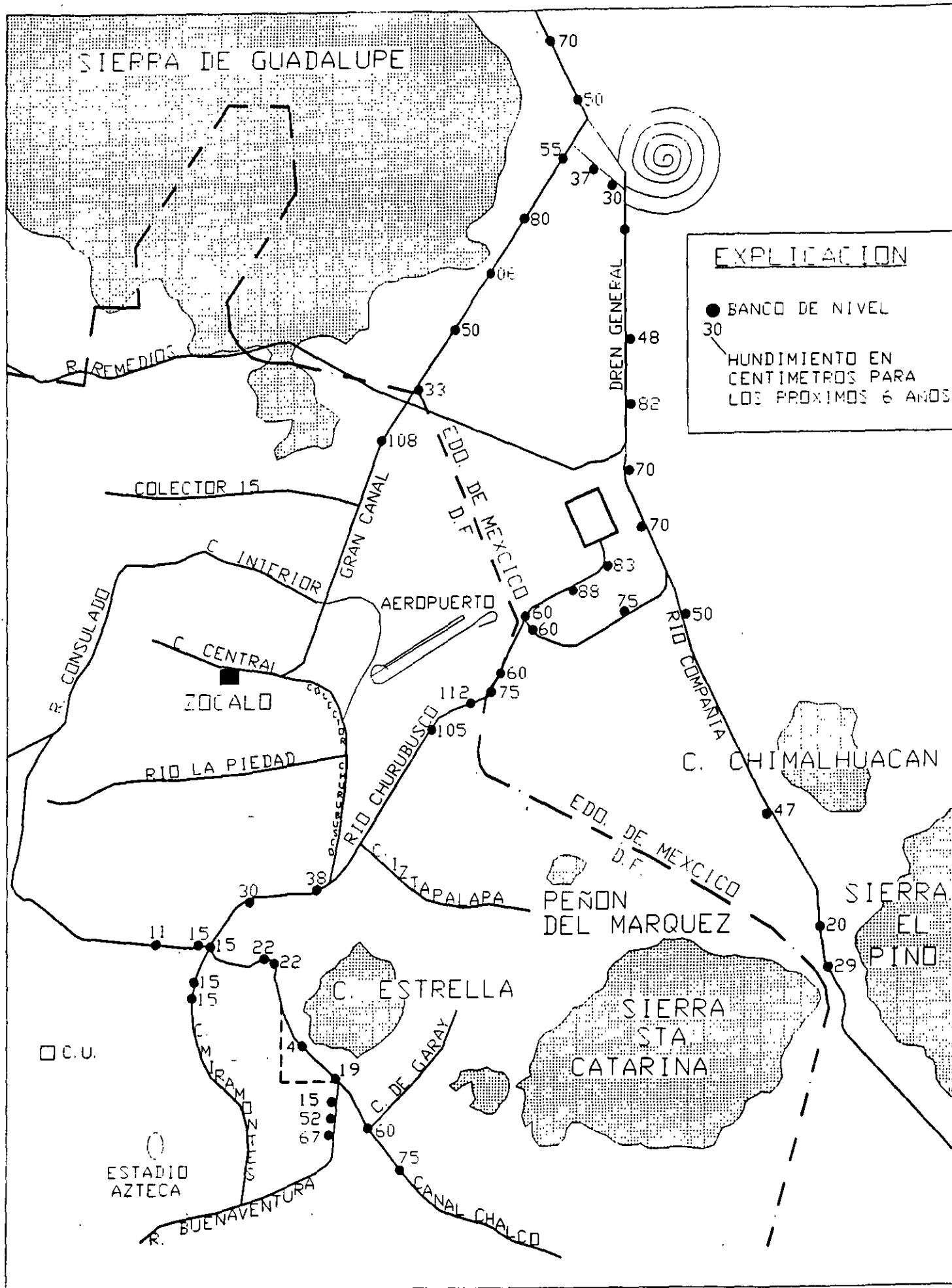
4.— HUNDIMIENTO DEL TERRENO PERIODO 1891-1994



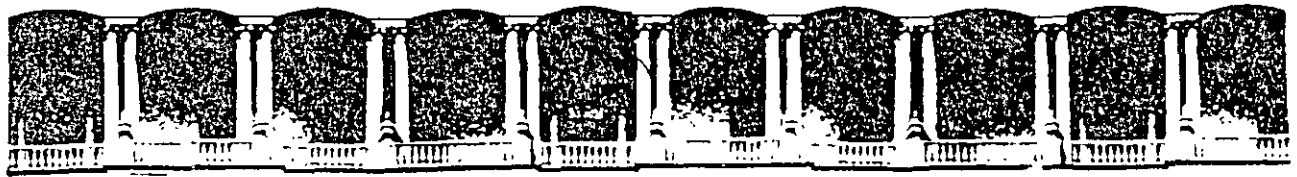
5.- HUNDIMIENTO MEDIO ANUAL 1983-1992



6.- HUNDIMIENTO HISTORICO Y PREDICCIÓN SOBRE EL FONDO DEL GRAN CANAL DEL DESAGÜE



7-4 PREDICION DEL HUNDIMIENTO 1994-2000 EN CENTIMETROS.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.

GEOHIDROLOGÍA

*Definición de flujo regional del agua subterránea, su potencialidad y uso en la
zona de la ciudad de México*

**Fis. Alejandra Cortés Silva
Guanajuato, Guanajuato
1998.**



INSTITUTO NACIONAL
DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

INSTITUTO DE GEOFISICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

DELEGACION DE COYOACAN

CODIGO 04510 MEXICO, D. F.

DEFINICIÓN DEL FLUJO REGIONAL DE AGUA SUBTERRÁNEA, SU POTENCIALIDAD Y USO EN LA ZONA DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES, AGS.

Un estudio geohidrológico de una zona árida como el Valle de Aguascalientes es de suma importancia para la planeación del desarrollo regional debido a que el agua subterránea es la fuente de abastecimiento de agua más importante de la zona, el escaso conocimiento del sistema acuífero y de la hidrodinámica del flujo subterráneo limitan una gestión sustentable.

Una complicante adicional es la presencia de aguas termales en un buen porcentaje de pozos del Valle. No solo la temperatura representa un problema, sino los contenidos relativamente altos de fluoruros que están presentes en algunos pozos de abastecimiento de agua potable. El régimen regional de precipitación no representa volúmenes importantes de recarga, por lo que una estimación de la potencialidad del sistema acuífero representa un elemento indispensable en las agendas de las autoridades encargadas del suministro y administración del vital líquido.

Análisis de resultados isotópicos

Como resultado del análisis de los datos isotópicos de muestras de agua subterránea de pozos de la zona sur del Valle, se ha determinado lo siguiente:

El agua de los pozos muestreados corresponden a una misma familia de agua, considerada dentro del grupo de aguas normales debido a que dentro de la línea meteórica local (LML), determinada por Cortés y Farvolden (1989),

$$\delta D = 7.97 \delta^{18} O + 11.03$$

$$(n=85; r^2=0.97)$$

Se consideran aguas normales a aquellas aguas que no han sufrido ninguna alteración que pueda modificar su relación isotópica posterior al proceso de infiltración, como: evaporación, intercambio con H_2S , hidratación de silicatos, intercambio con CO_2 o

A. Cortés, IGF-UNAM 1997
622-41-31, 622-41-33 y 622-41-35
Fax. 5 50 24 86

modificaciones a través de altas o bajas temperaturas. Por lo anterior podemos decir que con respecto a la muestra tomada en la presa El Niágara esta agua no representa evaporación por lo que su tiempo de residencia es muy corto. Habría que señalar que la presa recibe aguas preferencialmente de la planta de tratamiento la cual se sitúa una docena de kilómetros aguas arriba. Referente a la muestra del Río San Pedro, presenta una ligera variación en oxígeno 18, esto se debe a que en su trayectoria sufre una evaporación igualándose este valor al promedio de los valores encontrados en los pozos. Este resultado podría indicar que el agua de la presa pudiera estar influyendo en la recarga de los pozos en la zona monitoreada. Los volúmenes no parecen ser importantes a este momento, pero de cambiarse las condiciones hidrodinámicas, éstos podrían incrementarse. Aumentos en la extracción de esa zona inducirían aportes de las márgenes, en donde se encuentra la Presa, pudiéndose afectar la calidad del agua.

Por otra parte, utilizando los resultados isotópicos en la ecuación para calcular el efecto de altitud $\delta^{18}\text{O} = -2.13h - 3.3$, determinada por Cortés y colaboradores (1989), obtenemos que esta agua ha sido recargada a una cercana a los 3,000m snmm, y los valores de precipitación local son del orden de -7.1 en oxígeno-18. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en el modelo matemático conceptual para cuencas cerradas planteado por Winter 1975, en el cual se propone que la recarga principal para este tipo de sistemas proviene principalmente de las zonas altas y una parte de la descarga se da hacia el centro y partes laterales. La recarga local contemporánea por infiltraciones de precipitación sobre el Valle no es representativa para la zona de explotación y esto es evidente debido a que la región es considerada como zona semiárida con una precipitación media anual de 600 mm y una alta evapotranspiración.

En caso de existir contribuciones importantes de flujos regionales profundos, la firmas isotópicas para el oxígeno -18 tendrían a hacerse más positivas (lo que no ocurre en el Valle), con respecto al valor original, manteniéndose constante los valores de deuterio.



INSTITUTO DE GEOFISICA

CIUDAD UNIVERSITARIA

DELEGACION DE COYOACAN

CODIGO 04510 MEXICO, D. F.

PROTOCOLO DE MUESTREO PARA ANÁLISIS ISOTÓPICOS DE PRECIPITACIÓN Y AGUA SUBTERRÁNEA.

-FIS. ALEJANDRA CORTÉS S

1.-Características generales del muestreo isotópico a) para precipitación:

-Se deben colocar las estaciones pluviométricas en lugares representativos tomando en cuenta la latitud, factor que produce en la precipitación diferentes valores isotópicos debidos al efecto de latitud.

-Para la colocación de las estaciones se deben seleccionar sitios despejados, procurando la menor desviación de lluvia en su momento (paredes, arboles, antenas, etc.).

-El muestreo se debe de realizar antes de que se llenen los recipientes de cada estación, por lo que es importante checarlas periódicamente, realizando el muestreo de la siguiente manera:

- i) Primero se deben medir el volumen de agua, en litros.
- ii) Se procede a sacar el agua a través de una manguera, teniendo cuidado que uno de los extremos sea colocado a la mitad del volumen total, de tal manera que el agua que se este sacando pertenezca a la centro del colector.
- iii) Inmediatamente se enjuaga mínimo cuatro veces el frasco con la agua de la estación y se procede a llenarlo procurando dejar un 5% de volumen vacío.
- iv) Después se coloco la contratapa o papel doble parafilm, terminando con su tapa, con el fin de evitar evaporación, al contacto con el ambiente.
- v) Finalmente se adhiere la etiqueta correspondiente con los datos de la estación y se sellan los frascos con cera. Debe tenerse la precaución de mantener los frascos en un lugar fresco y oscuro. De preferencia si se cuenta con refrigerador se pueden almacenar hasta su transportación final para ser analizadas.

Correo electrónico del grupo de especialistas de Geoquímica Isotópica a nivel mundial:
isogeochem@list.uvm.edu

A. Cortés, IGF-UNAM 1997
622-41-31, 622-41-33 y 622-41-35
Fax. 5 50 24 86

b) PARA AGUA SUBTERRÁNEA O SUPERFICIAL.

i) Se enjuaga la botella, contratapa y tapa, mínimo cuatro veces con agua del manantial o sitio a muestrear, procurando hacerlo con agua que emerge inmediatamente de la roca, suelo, ó manantial.

ii) La muestra se toma de lo más cerca a la salida inmediata del manantial; en caso del lago, deberá tomarse la muestra a una profundidad de entre 1 y 1.5 mts. de la superficie, llenándose la botella hasta un 95% máximo, evitando con esto los problemas de diferencia de presiones al ser transportadas.

iii) Prosiguiendo a colocar la contratapa y/o papel parafilm doble y luego la tapa correspondiente.

iv) Finalmente se adhiere la etiqueta respectiva y se sella con parafina.

- Las botellas para muestreo isotópico tienen una capacidad de 15 a 20 ml. y son de color ambar, para evitar la proliferación de organismos que puedan alterar el valor isotópico de la muestra.

- Datos meteorológicos.

Deben de recolectarse los datos de la estación meteorológica más cercana a la zona de muestreo, los cuales deberán incluirse de manera importante en los antecedentes e interpretación.

MATERIAL PARA EL MUESTREO Y ESTACIONES PLUVIOMETRICAS:

- TAMBOS DE 20 LITROS CADA UNO. (SEGÚN LA PRECIPITACIÓN LOCAL)
- BOTELLAS PARA MUESTREO ISOTÓPICO.
- EMBUDOS DE 25CM. DE DIAMETRO.
- TELA DE ALAMBRE PARA COLOCARLA EN LOS EMBUDOS.
- RECIPIENTE CON CERA PARA SELLAR LAS MUESTRAS.
- ACEITE NUJOL (PETROLATO LIQUIDO).

Correo electrónico del grupo de especialistas de Geoquímica Isotópica a nivel mundial:
isogeochem@list.uvm.edu

A. Cortés, IGF-UNAM 1997
622-41-31, 622-41-33 y 622-41-35
Fax. 5 50 24 86

ESTUDIO ISOTÓPICO DEL VALLE DESIERTO DE SAMALAYUCA, CHIHUAHUA.

Ante el incremento en la demanda de energía eléctrica en el norte del país, la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) cercana a Ciudad Juárez, Chih., solicitó se realizaran los estudios necesarios para abastecer a la planta termoeletrica en una fase inicial, con 200 lt/seg de agua.

El área se encuentra en una región árida en donde el agua subterránea constituye la única fuente posible de abastecimiento, por lo que se hacía necesario el conocimiento del acuífero ó acuíferos de la región, lo mas completo posible.

δD	$\delta^{18}O$
-71.2	-71.2
-73.6	-73.6
-72.6	-72.6
-73.2	-9.7
-74.0	-9.5
-76.5	-9.6
-88.9	-11.1
-90.6	-11.1
-93.0	-11.2
-82.8	10.4
-84.1	-10.5
-85.4	-10.2
-80.1	-10.4
-61.7	-81.1
-62.7	-8.1
-65.5	-7.7
-67.2	-7.7
-60.9	-7.0
-56.5	-6.9
-56.6	-6.8
-55.5	-6.6
-58.5	-6.4
-61.5	-6.0
-53.8	-6.4
-54.7	-6.2
-58.3	-5.9
-51.9	-6.2
-53.5	-6.2
-55.0	-6.2
-51.0	-6.1
-53.8	-6.1
-53.6	-5.9

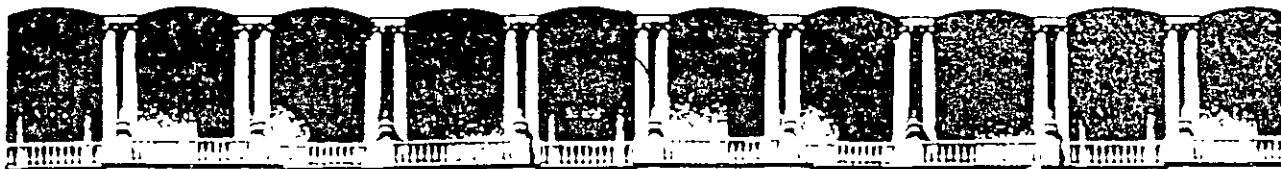
CONTRIBUCIONES DE UN LAGO A LA RECARGA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

LAGO DE CHALA

El lago Chala es un cráter volcánico a una elevación de 840 msnm, entre Kenya y Tanzania. Tiene una área de 4.2 Km² y una profundidad máxima de 100 mts. El problema planteado fue el de conocer si el lago proveía una proporción significativa de agua de recarga a los manantiales que se encuentran en la ladera del cráter las cuales eran utilizadas para abastecimientos local. El agua del cráter se deseaba utilizar como fuente de abastecimiento industrial sin que esto dañara el uso actual de los manantiales.

Composición Isotópica del Lago Chala y el Agua Subterránea

SITIO	$\delta^{18}\text{O}$	δD
Lago Chala, 1967	2.51	7.3
Lago Chala, 1968	2.43	4.9
Manantial Homer	-3.96	-20.5
Manantial Kileo	-4.72	-23.3
Manantial Kitovo	-4.56	-21.9
Manantial Lenonya	-4.11	-17.3
Manantial Litle Lumi	-4.20	-18.3
Manantial Magi ya Waleni	-3.97	-17.2
Manantial Njoro Kubwa	-4.05	-19.4
Manantial Nioro Ndogo	-4.04	-18.6
Latema Borehole	-4.53	-22.1



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

GEOHIDROLOGÍA

Fraccionamiento Isotrópico

Fis. Alejandra Cortés Silva
Guanajuato, Guanajuato
1998.

INTRODUCCION

El interés y desarrollo en el estudio de aguas subterráneas, ha crecido debido a la necesidad de obtener este vital elemento con una mayor disponibilidad y mejor calidad, tanto para el consumo doméstico como para el uso industrial y agrícola.

Una de las disciplinas que ha contribuido al estudio de las aguas subterráneas, ha sido la hidrogeoquímica, la cual adquirió un interés particular cuando los estudiosos en esta área empezaron a utilizar la experiencia química como evidencia para la interpretación de diversos procesos. Antes de esto, el interés principal se había enfocado a clasificar la calidad del agua en función de sus constituyentes básicos, así como la determinación de su trayectoria en el medio geológico por el cual transita.

Actualmente, con el creciente avance tecnológico se ha hecho posible la determinación de nuevos parámetros, que en conjunto aportan una información más clara del comportamiento del agua subterránea a través de los diferentes estratos geológicos.

Dentro de estas "aportaciones científicas" modernas, el descubrimiento de las distintas variedades isotópicas de los átomos que componen el agua y la determinación de su concentración natural, ha hecho posible la utilización de los isótopos como trazadores naturales. Facilitando, de esta manera, el estudio del comportamiento del agua dentro del ciclo hidrológico. Entre las aplicaciones que se pueden señalar, están las siguientes determinaciones: origen de la recarga, intrusión salina, tiempos de residencia, familias de agua y procesos evaporativos, (Fritz and Fontes, 1980).

TRAZADORES

De manera muy general podemos definir a un trazador como "aquellos" que determina o describe una trayectoria de "algo" a través de un medio. Para que un trazador sea considerado como "ideal" en estudios hidrológicos, debe definir una trayectoria fácil de detectar, de manera directa o indirecta, no tóxico, soluble en agua, resistente a cambios

químicos, tener poca capacidad de intercambio iónico, poca capacidad de absorción y económico. (White, 1967; Davis, 1985). Los trazadores mas conocidos y utilizados a la fecha son Fluoriceinas, sales, esporas, colorantes y los isótopos estables y radioactivos (algunos de ellos, mejor conocidos como isótopos ambientales)

En hidrogeología el término isótopos ambientales es generalmente usado para describir isótopos que ocurren naturalmente en el ciclo hidrológico, sin incluir isótopos que son introducidos a los sistemas artificialmente para propósitos de trazado.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS ISOTOPOS

Los isótopos son átomos del mismo elemento cuyo núcleo contiene el mismo número de protones y diferente número de neutrones esto es, son especies que tienen el mismo número atómico pero diferente masa atómica y por lo tanto propiedades químicas prácticamente iguales. Estas especies atómicas pueden ser estables o inestables; las primeras son aquellas que no cambian su concentración en el tiempo y las inestables o radioactivas decaen en isótopos de otro elemento, lo cual significa que una cantidad de un isótopo radioactivo en un sistema cerrado, cambia con el tiempo en forma exponencial. (Hoefs, 1980)

Los isótopos se encuentran como constituyentes de los elementos que existen en la naturaleza. Para la mayoría de los elementos pesados las cantidades relativas entre ellos casi no varían. Sin embargo, para elementos ligeros las pequeñas diferencias en masa, traen como consecuencia variaciones en propiedades físicas como: diferente punto de ebullición y de condensación, así como diferentes velocidades de reacción. La distribución de los isótopos de un elemento ligero entre dos compuestos que reaccionan entre si o coexisten entre dos fases no es uniforme, por tanto, a mayor diferencia relativa de masa entre dos isótopos de un elemento dado, más significativo será su fraccionamiento y en consecuencia el efecto isotópico será más pronunciado.

Algunos de los isótopos radioactivos existentes en la naturaleza, son producidos continuamente por medio de reacciones nucleares que se llevan a cabo en la alta atmósfera, por la interacción entre algunos de

los gases que la componen y rayos cósmicos, como es el caso del Tritio y el Carbono-14.

Para el caso específico del agua, todas las especies isotópicas del hidrógeno y del oxígeno son incorporadas a su molécula. Por lo que las moléculas formadas por la combinación de los respectivos isótopos estarán presentes en cualquier masa de agua. De todas las posibles combinaciones que se pueden formar sólo tres tienen interés práctico, debido principalmente a su abundancia. Tabla I.

Tabla I. Características Generales de los Isótopos

ELEMENTO/ ISÓTOPOS	ABUNDANCIA (%)	ESTANDAR /UNIDADES	VIDA MEDIA (AÑOS)	TIPO DE ANÁLISIS
HIÓGENO				
¹ H	99.984	V-SMOW% (U.T.)	12.35	E.M. ^{••••} C.C.L. ^{••••}
² H	0.015			
³ H	10 ⁻¹⁴ - 10 ⁻¹⁶			
OXÍGENO				
¹⁶ O	99.76	V-SMOW%		E.M. ^{•••}
¹⁷ O	0.037 [•]			
¹⁸ O	0.1 ^{••}			
CARBÓN				
¹² C	98.89	PDB% A.Ox.(pmc)	5730	E.M. ^{••••} C.C.L. ^{••••}
¹³ C	1.11			
¹⁴ C	10 ⁻¹⁰			
AZUFRE				
³² S	95.02	CDT		E.M. ^{••••}
³³ S	0.75 [•]			
³⁴ S	4.21			
³⁶ S	0.02 [•]			

[•]No se utiliza en estudios ambientales.

^{••}Se utiliza también en estudios paleoambientales.

^{•••}Espectrometría de masas.

^{••••}Contador de centelleo líquido.

ESPECTROMETRÍA DE MASAS

Después del importante impulso que hubo en el área de geoquímica y técnicas de espectrometría de masas como consecuencia de las investigaciones científicas posteriores a la II gran Guerra; se determinó que los métodos de espectrometría de masas eran los más efectivos para medir abundancias relativas de los isótopos.

Nier, 1950, fue el primer científico en desarrollar un instrumento

con el cual, logró medir abundancias relativas de elementos ligeros tales como hidrógeno, oxígeno, carbono, nitrógeno, argón, potasio y azufre. Los modernos espectrómetros de masas utilizados actualmente en diversas investigaciones están basados fundamentalmente en el principio del espectrómetro de Nier.

Descripción del Aparato

Un espectrómetro de masas es un aparato diseñado para separar moléculas de acuerdo a su relación carga-masa en base a su movimiento a través de campos eléctricos y/o magnéticos. Esencialmente un espectrómetro de masas opera de acuerdo a los siguientes principios básicos, Fig. 1.

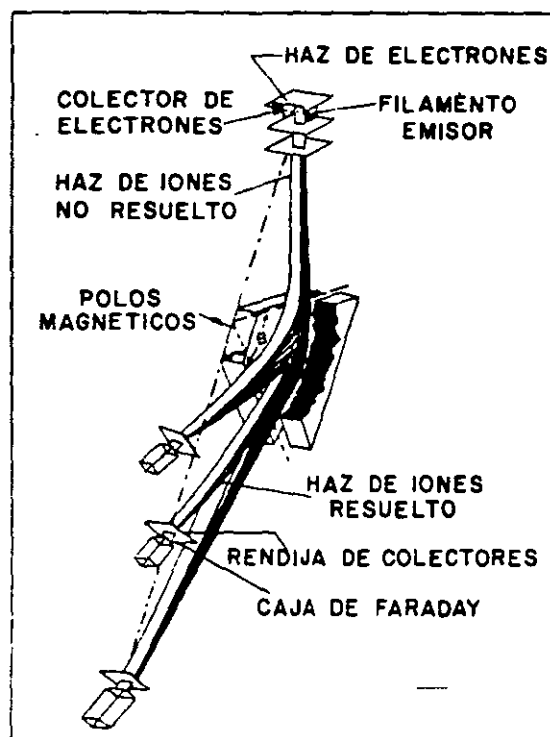


DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN ESPECTROMETRO DE MASAS TIPO NIER.

- I) Admisión del gas y formación de iones
- II) Aceleración y colimación de iones
- III) Analizador Magnético
- IV) Colección y medición de iones

Al introducirse el gas en la fuente de iones, las moléculas neutras son convertidas en iones por bombardeo electrónico. Estos iones son acelerados y colimados por medio de campos eléctricos. Los iones acelerados entran a una región en la que actúa un campo magnético, el cual separa los iones en regiones distintas del espacio, dependiendo de su masa. La colección y medición de iones se realiza colocando cajas de Faraday en posiciones previamente calculadas, al ser colectados los iones producen una corriente la cual pasa a través de resistencias de muy alta impedancia, provocando, de esta manera una caída de potencial la cual será proporcional al número de iones detectados. (McDowell C., 1963).

NOTACION DELTA

Dada la dificultad de medir con suficiente exactitud la abundancia absoluta de cada isótopo, se ha preferido medir abundancias relativas con respecto a una referencia. El valor relativo de abundancia isotópica en una muestra determinada, con respecto a una referencia se reporta en unidades de "δ", que se define como: (Gat J. and Gonfiantini R., 1981):

$$\delta_{m-r} = [(R_m - R_r)/(R_r)] \times 1000$$

donde R, es la razón del isótopo pesado o raro al ligero o abundante, para la muestra, m y para la referencia, r. Debido a que las diferencias entre muestra y referencia son muy pequeñas, es conveniente reportar los resultados en tantos por mil, (‰). Las relaciones para los diferentes isótopos de los elementos más usados se expresan como: ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$), ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), (D/H),...,etc.

Para fines de interpretación, el hecho de que el valor delta sea mayor que cero significa que la muestra se encuentra enriquecida en el isótopo pesado con respecto a la referencia; de igual manera, para deltas menores que cero diremos que la muestra se encuentra empobrecida con respecto a la referencia, (Gonfiantini, 1978).

PATRONES DE REFERENCIA

Uno de los problemas más serios que se presentaron al inicio de la

utilización de los isótopos estables en agua, fue la comparación de resultados obtenidos por los diferentes laboratorios. Es por esto, que se ha aceptado internacionalmente que los datos isotópicos sean referidos a patrones de referencia distribuidos por organismos como el NBS (National Bureau of Standards) y IAEA (International Atomic Energy Agency).

Debido a la imposibilidad de utilizar patrones internacionales en análisis rutinarios, es conveniente que cada laboratorio cuente con un patrón interno de trabajo.

El patrón de referencia que es universalmente aceptado como base para medir las variaciones de abundancias relativas de isótopos estables de oxígeno e hidrógeno en agua, es el llamado SMOW (Standard Mean Ocean Water), que correspondería a un tipo de agua "hipotética" con relaciones isotópicas iguales de oxígeno e hidrógeno; asociando a este valor el de referencia "cero".

Para muestras de agua, se pueden mencionar las siguientes ventajas de usar la referencia SMOW:

i) El océano constituye el punto inicial y final del ciclo hidrológico, por lo que se puede considerar una referencia lógica para la composición isotópica de aguas naturales.

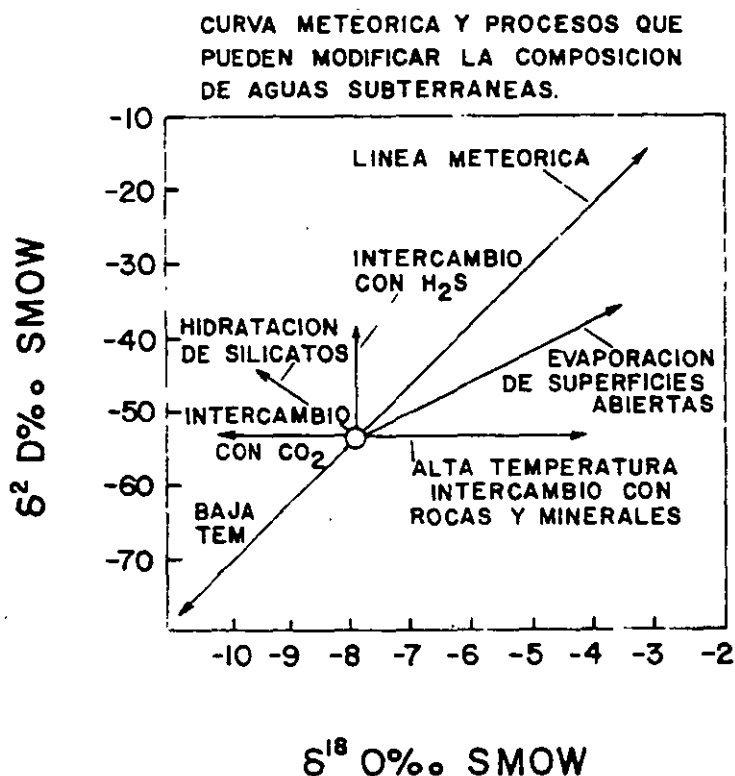
ii) Para agua dulce los valores contra SMOW, representan la evaluación del fraccionamiento isotópico, desde su evaporación en los océanos hasta el momento de la recolección de la muestra, siendo éste el resultado de los procesos físico-químicos que reflejan la historia hidrológica de cada agua.

iii) Los océanos contienen el mayor porcentaje del total de agua contenida sobre la superficie terrestre, conservando además, una composición isotópica uniforme.

LINEA METEORICA MUNDIAL

La concentración de oxígeno-18 expresada como relación isotópica

en la precipitación, se encuentra correlacionada linealmente con la relación isotópica de deuterio, Fig. 2.

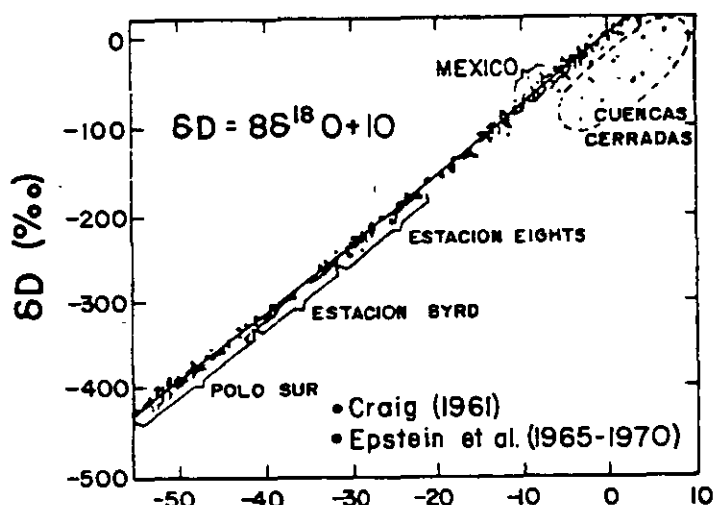


A pesar de los factores que pueden influir en la composición isotópica de aguas meteóricas, la composición media anual de las precipitaciones se mantiene aproximadamente constante dentro de una misma región. Esto se debe a que los factores que deciden el fraccionamiento, actúan de forma reproducible año con año. Esta propiedad es utilizada en estudios de caracterización global de la composición de isótopos estables durante el ciclo hidrológico a nivel mundial.

Debido a que el mayor porcentaje del agua que circula en la litósfera es de origen meteórico, resulta muy importante el estudio de la precipitación mundial, con el fin de obtener una mejor evaluación en investigaciones con isótopos estables, para fines de explotación de los recursos hídricos subterráneos.

Con este objetivo, el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), estableció una red de estaciones meteorológicas alrededor del mundo para determinar el contenido isotópico de Oxígeno-18 y Deuterio en

agua de lluvia. La red quedó formada por un total de 144 estaciones clasificadas como: Isleñas, Costeras y Continentales, de acuerdo a su localización geográfica. Fig. 3.



Una evaluación de los datos recolectados durante los primeros 40 meses de este programa, arrojó la siguiente relación en el contenido de ^{18}O y D en las precipitaciones. (IAEA. 1981):

$$\delta D = (8.17 \pm 0.1)\delta^{18}O + (10.56 \pm 0.64)‰$$

Con un coeficiente de correlación de 0.997. En esta línea se observa gran similitud con respecto a la definida por Craig en 1961 para aguas meteóricas representada por la ecuación:

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10.$$

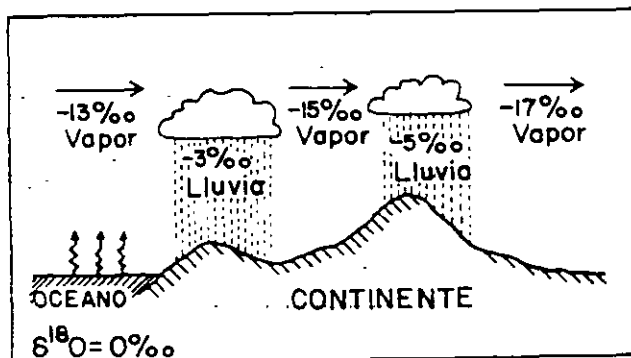
Esta relación lineal se puede explicar por el hecho de que, en el equilibrio, la diferencia de presiones entre el agua y su vapor es aproximadamente 8 veces más grande, en la delta de deuterio que en la de oxígeno-18. La relación entre oxígeno-18 y deuterio suele diferir a nivel regional de los valores mencionados, aun cuando la pendiente de 8 casi siempre se conserva, reflejando los procesos de condensación que ocurren en condiciones de equilibrio termodinámico (vapor y líquido), variando muy poco la ordenada al origen, (Fritz and Fontes, 1980).

De los conceptos mencionados anteriormente, podemos considerar a los isótopos ambientales como trazadores cercanos al "ideal". Además de formar parte intrínseca de la molécula de agua, estos actúan como su memoria, mejor aún, conservan la historia que el agua ha tenido a través del ciclo hidrológico.

La mayoría de las masas de vapor atmosférico que llevan el agua a los continentes se originan en el océano; debido a los diferentes cambios físicos que afectan a los elementos que forman a la molécula de agua, estas masas de vapor estarán empobrecidas en los isótopos pesados ($O-18$ y D), comparadas con el agua oceánica. Esto se debe principalmente a que el proceso de evaporación en los océanos se lleva a cabo en condiciones fuera del equilibrio e involucra efectos cinéticos y además al proceso de condensación que origina las precipitaciones. (Castillo R. 1985).

Por lo anterior, se observa que el contenido de los isótopos pesados del agua en casi todas las precipitaciones será menor que en los océanos. La condensación removerá preferentemente los isótopos pesados de la nube, así el enfriamiento continuo y la condensación progresiva empobrecerán en $O-18$ y D a la masa de vapor. El fraccionamiento isotópico durante la condensación en las nubes es un proceso dependiente fundamentalmente de la temperatura a la cual ocurre, Fig. 4.

Figura 4. Efecto Continental y de fraccionamiento por precipitación.



La presión atmosférica, en el momento de la condensación influye muy poco. Esto se ve reflejado en la relación de la composición

isotópica de la precipitación con respecto a la temperatura media anual del lugar.

VARIACIONES DE DEUTERIO Y OXIGENO-18 EN EL CICLO HIDROLOGICO

Los diferentes tipos de agua pueden ser clasificadas de varias formas. La manera más común de agruparlas es de acuerdo a los diferentes procesos ya sean físicos o químicos esto es, debido a los diferentes procesos termodinámicos y de intercambio que sufren durante su historia.

Refiriéndonos a las aguas meteóricas, consideradas como aquellas que siguen el ciclo hidrológico; evaporación, condensación y precipitación. Podemos expresar en términos "generales" que las aguas continentales caen dentro de esta categoría y por tanto las que más conciernen al estudio de aguas subterráneas, (Cortés, 1985).

Las variaciones, tanto temporales como espaciales del contenido isotópico de las aguas de precipitación, tienen su origen en la redistribución isotópica que existe durante los cambios de fase a través de ciclo hidrológico. El grado de fraccionamiento isotópico depende de varios parámetros tales como: la composición isotópica inicial, la velocidad de reacción y las condiciones termodinámicas en las cuales ocurre el cambio de fase. La intervención de estos factores, esencialmente la temperatura, en forma individual o combinada trae como consecuencia ciertos patrones de fraccionamiento o como usualmente se le llama "efectos" que influyen de manera determinante sobre la composición isotópica de la precipitación.

La aplicación de las técnicas isotópicas está estrechamente ligada a la existencia de los efectos isotópicos, estos estudios han sido derivados de observaciones a largo plazo en los cuales han intervenido varios grupos de investigación a nivel mundial.

- *Efecto de latitud:* La latitud geográfica de un lugar tiene una relación fuerte con la temperatura media anual, por lo que la concentración de isótopos del agua precipitada reflejará el efectos de la latitud. La red mundial establecida por la IAEA reconoció que las

estaciones localizadas a grandes latitudes en los hemisferios sur o norte, presentan valores más negativos que las estaciones localizadas cerca del Ecuador. Para Norteamérica el efecto de latitud es de -0.5 ‰ en oxígeno por grado de latitud.

- *Efecto de altitud:* Experimentalmente, se observa que a medida que las masas de aire suben o bajan, dependiendo de la topografía y el clima local se presenta una variación isotópica, reflejando valores más negativos cuando la altitud aumenta. Las variaciones en relación a la altitud son en promedio de -0.30 ‰/100m para el O-18 y de -3 a -3.5 ‰/100m para el Deuterio. De hecho, las variaciones de $\delta^{18}\text{O}$ y δD con la altitud pueden usarse para estimar la altura de las áreas de recarga de manantiales.

- *Efecto de cantidad:* Existe también una correlación entre la cantidad de lluvia precipitada y el contenido isotópico; pero este efecto se puede observar principalmente en las estaciones localizadas en las islas tropicales.

- *Efecto continental:* Se ha observado que a medida que se toman muestras de agua meteórica partiendo de la costa hacia el centro de los continentes, éstas presentan un empobrecimiento en los isótopos pesados de oxígeno e hidrógeno.

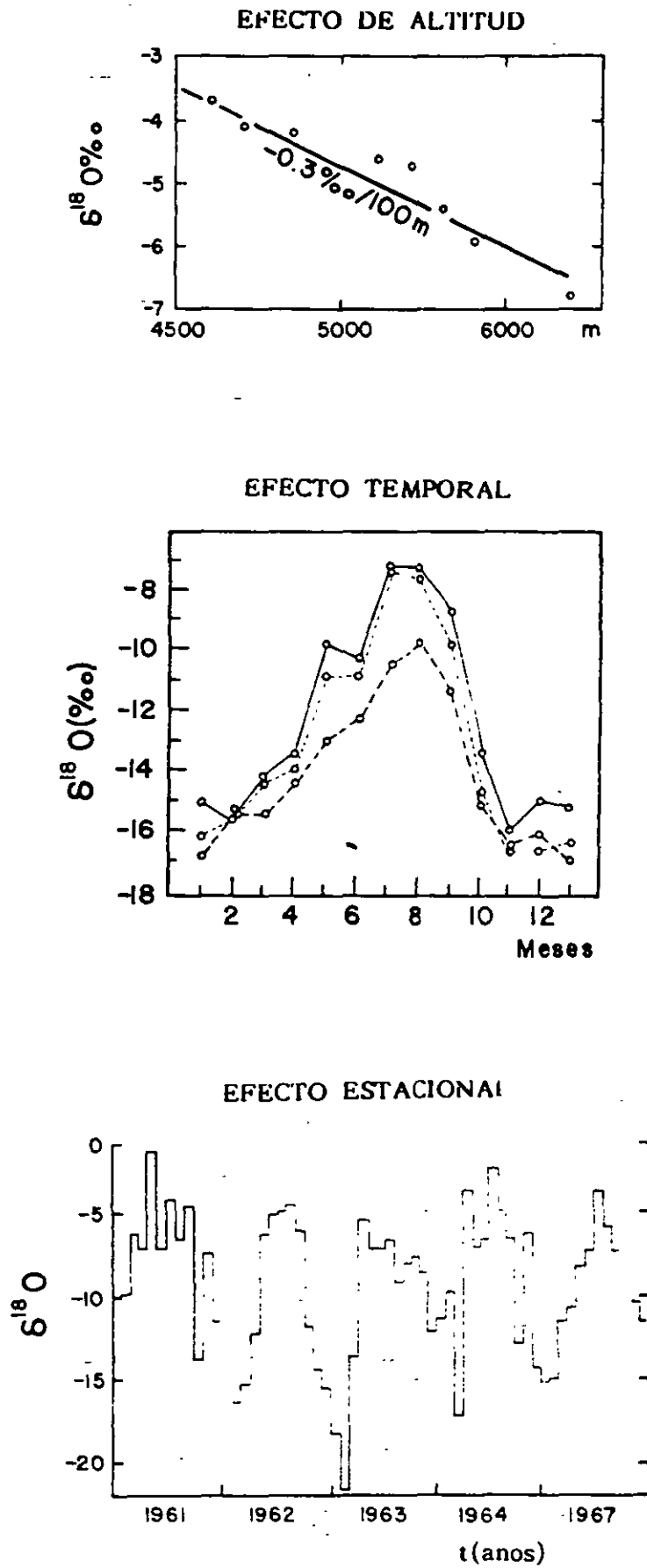
- *Variaciones estacionales:* Las lluvias de invierno, en general, están empobrecidas en isótopos pesados en comparación con las precipitaciones del verano por razones de la temperatura, a la cual ocurre la precipitación, Fig.4 y 5.

CARACTERISTICAS ISOTOPICAS DEL AGUA SUBTERRANEA Y SUPERFICIAL

Agua Subterránea

La forma de determinar el origen geográfico de la recarga y los procesos que pueden sufrir el agua subterránea de alguna región bajo estudio se encuentra en el hecho de que el contenido isotópico del agua infiltrada se conserva y que se puede relacionar con la composición

Figura 5.



isotópica promedio del agua de recarga. En términos generales la interpretación isotópica debe estar acompañada por un análisis hidrogeológico y una evolución geoquímica de la zona de estudio. Idealmente la interpretación de datos isotópicos en aguas subterráneas, se puede plantear con base en los siguientes lineamientos:

1) Es necesario generar una base de datos sobre las concentraciones isotópicas en el agua de lluvia de la región bajo estudio. Los datos isotópicos de la lluvia, deben ser promedios ponderados con respecto a la cantidad de precipitación, debiéndose tomar en cuenta el período en el cual se producen los principales procesos de recarga.

2) Posteriormente se determina la composición isotópica en los diferentes acuíferos de la región y se compara con el contenido isotópico de las precipitaciones. Si éste coincide con el mapeo del agua subterránea de la zona, este análisis podrá determinar la altura de recarga, la existencia de recarga local o la posibilidad de flujos regionales. En caso de que se observen discrepancias entre el contenido isotópico de las lluvias y el de las aguas subterráneas, es necesario tomar en cuenta otros factores tales como:

i) La existencia de un desplazamiento geográfico de las masas de agua por escorrentía superficial produciendo variaciones en el contenido isotópico.

ii) Recarga subterránea por embalses de agua superficial parcialmente evaporada, como son: presas, ríos, etc., ya que a medida de que estas aguas se evaporan se enriquecen isotópicamente, alterándose los valores delta en estas aguas de recarga.

iii) Variaciones en el tiempo de la composición isotópica de la precipitación. Esto ocurre porque la recarga se efectuó en el pasado remoto y por lo tanto, bajo condiciones de precipitación distintas a la actual; esto ocurre especialmente en climas áridos o semiáridos en donde las aguas subterráneas se presentan empobrecidas en isótopos pesados, no pudiendo ajustarse los resultados al contenido isotópico de la precipitación actual.

iv) Mezclado con cuerpos de agua de origen no meteórico como pueden ser salmueras, agua de mar, aguas fósiles o aguas juveniles.

v) Interacción con formaciones geológicas que conducen a intercambio o fraccionamiento isotópico entre los átomos que componen el agua y las especies químicas que forman el terreno. Un ejemplo de esta interacción son las aguas termales, con temperaturas mayores de 100 grados centígrados, en donde se observa un enriquecimiento de $O-18$ por intercambio de oxígeno con las rocas; en este caso se mantiene el valor de la delta de Deuterio original del agua debido a que en las rocas, por lo general, hay poca cantidad de hidrógeno con el cual pudiera existir intercambio Fig.2.

Es importante señalar que en acuíferos confinados, el contenido isotópico no varía incluso en periodos de miles de años, debido al nulo intercambio isotópico. Sin embargo, en lagos y cuencas donde la evaporación es grande, existe un enriquecimiento marcado.

Agua Superficial

El agua superficial puede ser afectada isotópicamente por procesos como los de evaporación a lo largo de su recorrido. Como la composición isotópica de los ríos es función de la altura de las cuencas en que se forman y de los procesos que pueden ocurrir a lo largo de su cauce, éstos se pueden caracterizar por una composición isotópica diferente a la de la recarga local, lo cual permite determinar la contribución de los ríos al agua subterránea de la región.

En el caso de los lagos, éstos presentan variaciones influenciadas principalmente: por la zona geográfica donde se encuentran, la composición isotópica del agua que lo alimenta, así como el régimen de evaporación y precipitación. Los lagos y otras formas similares de agua superficial como son las presas se caracterizan por presentar un enriquecimiento en las especies isotópicas pesadas, con respecto al agua meteórica que las origina, debido a la fuerte evaporación a que están expuestas.

Otro proceso importante es el producido por la evaporación y

evapotranspiración en zonas de cultivo intensivo.

En conclusión, el conocimiento del agua superficial en la región de estudio es de vital importancia, ya que así se podrá estimar con una mayor seguridad su contribución a la recarga

TRITIO

Tritio (T), isótopo radioactivo del hidrógeno, su vida media es de $t_{1/2} = 12.3$ años. La determinación de este elemento se efectúa por medida directa de la radioactividad proveniente de la desintegración del núcleo cuando éste emite radiaciones β ; la unidad usada para reportar la concentración de tritio es UT, que corresponde a una abundancia de 10^{-18} átomos de T por un átomo de hidrógeno. Una unidad de tritio (UT) es equivalente a 7.2 desintegraciones por minuto en un litro de agua. Dentro de los métodos más comunes para la determinación del tritio, se pueden mencionar: centelleo líquido y centelleo gaseoso. A continuación se menciona de manera muy breve los pasos fundamentales de la técnica por centelleo líquido:

- 1.- Destilación de la muestra de agua, con el fin de eliminar gases y sales contenidas en solución.
- 2.- Concentración electrolítica, esta parte se lleva a cabo en un recipiente que contiene celdas tipo Ostlund (placas de hierro y níquel).
- 3.- Separación del electrolito y agua.
- 4.- Después del segundo proceso de destilación el agua es mezclada con un líquido de centelleo para posteriormente realizar la estadística y obtener el valor de la concentración de tritio en la muestra a analizar.

Para el Tritio no existe un patrón de referencia debido a que se reportan concentraciones absolutas determinadas radiométricamente y reportadas como unidades de tritio (U.T.), (Lloyd, J.W., 1985).

Interpretación para Tritio

Se ha podido comprobar experimentalmente a nivel mundial que las concentraciones de tritio en la lluvia aumentan a medida de que la

latitud es mayor, y para una localidad en particular, la máxima concentración es observada en las precipitaciones de primavera. En general son del orden de 3 veces mayor al promedio anual pesado.

El tiempo de tránsito de aire húmedo sobre los continentes o sobre los océanos también tiene un efecto sobre la concentración de tritio debido a la mezcla entre los vapores de agua provenientes de la superficie libre de agua oceánica y el vapor tritiado de la atmósfera. Se puede encontrar sistemáticamente que el tritio en las lluvias del continente presentan una concentración mayor que las lluvias precipitadas sobre el océano.

Para propósitos prácticos al utilizar las medidas de concentración de tritio en estudios hidrológicos se debe tener en cuenta lo siguiente:

i) Los niveles mundiales existentes de tritio antes de 1952 corregidos por decaimiento radiactivo, eran en promedio menores a 5 UT.

~~Para fines de interpretación se pueden presentar los siguientes caso en~~ ---
forma general:

ii) Para una muestra de interés, si el contenido de tritio es menor que una unidad de tritio (1 UT), se puede inducir a pensar que el tiempo de residencia de esta agua dentro del acuífero es mayor que 50 años.

iii) En caso de obtener valores de tritio mayores que una unidad de tritio (1 UT) el agua analizada tendrá una componente que corresponde a aguas meteóricas recientes, después de 1952.

Para la concentración de tritio y la actividad del ^{14}C en las muestras de agua, según Mook (1980), no se tiene una base real para la aplicación de un procedimiento por medio del cual puedan obtenerse las edades absolutas del agua subterránea mediante una combinación de los datos de ^{14}C y tritio. Esto se debe al gran número de variables desconocidas, tales como; la razón de mezcla de agua vieja y joven, el contenido de tritio de la precipitación a la que se refiere la muestra, el contenido de ^{14}C de la capa de humus efectiva que produce el CO_2 del suelo, y otras.

En realidad los datos combinados de ^{14}C y tritio pueden dar ciertos límites en la edad. Bajo estas condiciones se propone el siguiente esquema de interpretación, (Arizavalo y Martinez, 1989).

a) Si $10 < T \leq 30$ y $60 \leq ^{14}\text{C} \leq 120 \rightarrow$
Agua moderna <50 años

b) Si $1 \leq T \leq 10$ y $20 < ^{14}\text{C} < 60 \rightarrow$
Agua de mezcla >50 años

c) Si $0 \leq T < 1$ y $0 \leq ^{14}\text{C} \leq 20 \rightarrow$
Agua de cientos o miles de años

Los seis casos restantes se deducen a partir de las combinaciones posibles entre los incisos. Por ejemplo a) con b) y c). La interpretación propuesta para los casos probables es la siguiente:

a1) Si $10 < T \leq 30$ y $20 < ^{14}\text{C} < 60 \rightarrow$ Agua de mezcla >50 años

a2) Si $10 < T \leq 30$ y $0 \leq ^{14}\text{C} \leq 20 \rightarrow$ Agua de mezcla >50 años

b1) Si $1 \leq T \leq 10$ y $60 \leq ^{14}\text{C} \leq 120$ Agua moderna <50 años

b2) Si $1 \leq T \leq 10$ y $0 \leq ^{14}\text{C} \leq 20 \rightarrow$ Agua de mezcla >50 años

c1) Si $0 \leq T < 1$ y $60 \leq ^{14}\text{C} \leq 120 \rightarrow$ Agua de mezcla >50 años

c2) Si $0 \leq T < 1$ y $20 < ^{14}\text{C} < 60 \rightarrow$ Agua de mezcla >50 años

CARBONO - 14

Fechaiento de Aguas Subterráneas con ^{14}C

Uno de los problemas básicos en el fechaiento de aguas subterráneas radica en el desconocimiento que se tiene de la actividad inicial del ^{14}C que recargó el acuífero. El contenido de ^{14}C inicial con

el tiempo ha sufrido innumerables modificaciones secundarias, por lo que las actividades de carbono-14 del carbonato del agua no se pueden traducir directamente en edades:

Esto ha permitido la elaboración de modelos congruentes que permiten la evaluación de los procesos de dilución del CO₂ del suelo producidas en la zona no saturada. Tal dilución se da básicamente a través de tres mecanismos principales: precipitación de la disolución mineral, introducción de carbón orgánico y volcánico e intercambio isotópico entre el carbono del CO₂ acuoso y el mineral (Fritz y Mozeto, 1980).

-Modelos de Fechamiento

- a) Aproximación de A_o promedio.
- b) Modelo Exponencial
- c) Aproximación Geoquímica
- d) Mezcla Isotópica del ¹³C
- e) Modelo de Disolución-Intercambio

Como se puede observar, estos modelos se fundamentan en consideraciones químicas e isotópicas, (Vogel, 1967; Pearson, 1965). A diferencia del tritio, los contenidos de ¹⁴C se refieren a un estándar que corresponde a una madera que creció durante 1890 en un ambiente libre de CO₂ fósil, es decir, para CO₂ atmosférico anterior al inicio de la combustión masiva de carbono fósil. El contenido de ¹⁴C se define como la actividad (A) que representa el carbono moderno, por lo que todas las muestras medidas se expresan en por ciento de carbono moderno (pmc) (Fritz, P., Fontes, J.Ch., 1980):

$$A = \frac{(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{muestra}}}{(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{estandar}}} \times 1000.$$

Donde el estándar actualmente aceptado es el Ácido Oxálico distribuido por el National Bureau of Standards (NBS) cuya relación con la actividad del carbon moderno es:

¹⁴C ACTIVIDAD DEL CARBONO MODERNO = 0.95 ¹⁴C ACTIVIDAD DEL ACIDO OXALICO
NBS EN 1950.

El $^{14}\text{CO}_2$ atmosférico antes de 1950 tenía una actividad cercana a los 100 pmc, por lo que este valor se utiliza como valor inicial en algunos modelos de datación de agua subterránea. (Mook, 1972, 1976, 1980).

MUESTREO DE LOS ISOTOPOS UTILIZADOS

El muestreo para análisis isotópicos en muestras de agua es un procedimiento muy simple, pero deben guardarse algunas precauciones en el manejo y colección de la muestra.

Para los análisis de TRITIO se requiere una botella de plástico de 1 lt., la cual debe llenarse completamente y sellarse con una tapa y contratapa para evitar contacto con el tritio atmosférico, etiquetándola debidamente con los datos adicionales que se realizan a todas las muestras de agua como número de muestra, localidad, temperatura, pH, conductividad y fecha de muestreo.

Para el caso de los isótopos estables del OXIGENO-18 y DEUTERIO, se requiere una botella de vidrio de 30 ml, de preferencia de color ambar, esto para evitar proliferación orgánica. Como en el caso anterior, debe evitarse la alteración causada por intercambio molecular con el vapor de agua atmosférico. Debido a que los isótopos del oxígeno e hidrógeno se utilizan para estudiar procesos de evaporación, debe tenerse precaución durante la colección de las muestras.

Dado que la concentración de CARBONO-14 está representada en muy pequeñas cantidades, dependiendo de la alcalinidad del agua, se requiere una muestra de alrededor de 60 litros de agua, de la cual se precipitan los carbonatos presentes mediante la adición de 100 ml de una solución de NaOH libre de carbonatos (200 g NaOH/l) y un litro de BaCl_2 saturado (500 g BaCl_2 /l). La adición de estos componentes produce una reacción química que cambia a los compuestos inorgánicos en solución a BaCO_3 . Se necesitan por lo menos 80 g de BaCO_3 precipitado. En el laboratorio este precipitado se acidifica para producir CO_2 y convertirlo luego a Benceno o Metano, (Arizabalo, 1989).

Los análisis de CARBONO-13 se realizan con el CO_2 liberado al

mezclar Acido Fosfórico (H_3PO_4) con el precipitado de $BaCO_3$ que se obtuvo añadiendo $BaCl_2$ a la muestra de agua que previamente se ha aumentado su pH sobre 10. El CO_2 se analiza al igual que los isótopos estables mencionados, en un espectrómetro de masas.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a la Srita. Martha Saucedo L., por su ayuda en la edición y captura. Al Sr. Carlos Sosa, por el diseño gráfico.

REFERENCIAS

Arizabalo, Z. R.D., 1989. "Aplicación de los isótopos ambientales ^{18}O , 2H , 3H , ^{34}S , ^{13}C y ^{14}C en el estudio del agua subterránea de las Cuencas de México, Cuernavaca y Cuautla". Tesis de Maestro en Ciencias (Geofísica). 94p.

Arizabalo, Z. R. D.; Martínez, J. D., 1989. "Programa para la Interpretación de Tritio y Carbono-14 en Estudios Hidrológicos". Memorias del Congreso Anual de la Unión Geofísica Mexicana, Cuernavaca Morelos, México.

Castillo R., 1985. El análisis isotópico y sus aplicaciones. Instituto de Física, UNAM. Reporte Interno

Craig H., 1961. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters, Science 133:1833.

Cortés A., 1985. Aplicación de la espectrometría de masas y técnicas isotópicas para la determinación de oxígeno-18 y deuterio en problemas hidrológicos. Tesis profesional Fac. de Ciencias, UNAM.

Davis, S.N., D.J. Cambell, H.W. Bentley and T.J. Flynn, 1985. Ground Water Tracers. National Water Well Asociation.

Deines, P. 1980. The isotopic composition of reduce organic carbon. En:

- Fritz and J. Ch. Fontes (Eds) Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1- The Terrestrial Environment A, Elsevier, p. 329-393.
- Fritz and J. Ch. Fontes (Eds), 1980. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1- The Terrestrial Environment A, Elsevier.
- Fritz, P. Mozeto, A. A., 1980. Considerations on radiocarbon dating of groundwater. En: C.O. Rodríguez N. y C.B. de Monroy (Eds). Memoria del Simposio Interamericano sobre Hidrología Isotópica, ICNE- OEA- COLCIENCIAS, Bogotá, p. 221-224.
- Gat J. and Gonfiantini R., 1981. "Stable isotope hydrology, deuterium and oxygen-18 in the water cycle". Technical reports series, No. 210 IAEA, Viena, A.
- Gonfiantini R., 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. Nature (London) 271:534.- Fritz, P. and Fontes, J.Ch., (eds) 1980. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Vol. 1. The Terrestrial Environment, A. Elsevier.
- Hoefs J., 1980. "Stable isotope geochemistry". Second Edition. Springer-Verlag Heidelberg, New York.
- IAEA. 1981. Gat J. and Gonfiantini R. Stable isotope hydrology deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Technical reports series, No. 210, Viena, Austria.
- McDowell C., 1963. "Mass Spectrometry". McGraw-Hill Book Co., Inc. New York.
- Mook, W. G., 1980. Carbon-14 in hydrogeological studies. En: P. Fritz and J. Ch. Fontes (Eds) Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1- The Terrestrial Environment A, Elsevier, p. 49-71.
- Nier A., 1950. Redetermination of relative abundances of the isotopes of carbon, nitrogen, oxygen, argon and potassium. Phy. Rev. 77:714.

Pearson, F. J. Jr., 1965. Use of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio to correct radiocarbon ages of materials initially diluted by limestone. En: Radiocarbon and Tritium Dating, Proceedings of the Sixth International Conference on Radiocarbon, P. Washington, p. 357-366.

Vogel, J.C., 1967. Investigation of groundwater flow with radiocarbon. En: Isotopes in hydrology, IAEA, Viena, p. 355-369.

White, W.B., 1967. "Modifications of Fluorescein Dye Ground Water Tracing Techniques". Staier. Steir. Beitr. Z. Hydrogeologie, 18/19 151-158.

MATERIAL DIDACTICO PARA UN CURSO CORTO DE
HIDROLOGIA ISOTOPICA

Alejandra Cortés y Rubén D. Arizabalo
Instituto de Geofísica/UNAM/04510/México, D.F.

GLOSARIO DE TERMINOS UTILIZADOS

ACTIVIDAD: Radiactividad de una sustancia dada en desintegraciones por minuto (dpm), o en becquerel o en curies.

ACTIVIDAD ESPECIFICA: Actividad de un radioisótopo expresado en dpm o en Bq por unidad de masa (gramo) del elemento correspondiente.

BECQUEREL (BQ): La unidad para expresar la radiactividad. El becquerel corresponde a una desintegración por segundo y es equivalente a 2.7×10^{-11} Ci (curies): es por lo tanto una unidad muy pequeña. Los multiples de Bq que normalmente se usan son: megabecquerel (MBq= 10^6 Bq), gigabecquerel (GBq= 10^9 Bq) y terabecquerel (TBq= 10^{12} Bq).

CDT: (Cañón Diablo Troilite). La troilita (FeS) contenida en el Meteorito del Cañón del Diablo, el cual se usa como referencia estándar para las determinaciones $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$. La composición isotópica del azufre de CDT refleja adecuadamente la composición isotópica promedio del azufre terrestre.

ISOTOPOS DEL CARBONO: Existen tres isótopos naturales del carbono. Dos son estables ^{12}C (abundancia promedio 98.89%) y ^{13}C (1.11%). El tercer isótopo, ^{14}C es radiactivo (abundancia, $10^{-10}\%$). El contenido de C^{13} en compuestos naturales varía, en unidades $\delta\text{o}/\text{o}$ vs.PDB, desde +10 (en travertinos) a 0 (valor promedio de la caliza marina) a -25 (materia orgánica), a -80 (metano).

CARBONO-14 (^{14}C): Isótopo radiactivo del carbono producido en la atmósfera por la interacción de los neutrones -producidos por rayos cósmicos- con nitrógeno, de acuerdo a la reacción:



La razón de producción es 2.5 átomos/cm²xs. El ¹⁴C producido es rápidamente oxidado a CO₂ y entra al ciclo del carbono geoquímico.

Desde 1952 se han introducido grandes cantidades de carbono-14 en la atmósfera por las explosiones termonucleares. Otra fuente de ¹⁴C son los reactores nucleares.

CICLOS DE CALVIN Y HATCH-SLACK: (C₃ y C₄) La fijación del carbono en la fotosíntesis de las plantas pueden ocurrir por dos mecanismos que difieren por el número de átomos de carbono del primer compuesto formado en la cadena fotosintética. Estos mecanismos fotosintéticos se conocen como los ciclos de Calvin (C₃) y de Hatch-Slack (C₄). Sin embargo, las plantas con metabolismo tipo crasuláceo, son capaces de fijar el CO₂ atmosférico por ambos ciclos. Las plantas se dividen por su contenido isotópico de la siguiente manera: a) Plantas que siguen el ciclo de Calvin o C₃, con un contenido de ¹³C entre -37 y -24 ‰, y un valor medio aproximado de -27 ‰ b) Plantas que siguen el proceso Hatch-Slack ó C₄, presentan valores de δ¹³C entre -9 y -19 ‰. c) Plantas que siguen el proceso C.A.M. (Crassulacean Acid Metabolism) corresponde a un amplio intervalo en el contenido de ¹³C e incluyen los procesos C₃ y C₄.

RADIACION COSMICA: La radiación cósmica primaria (que se origina en el sol -componente solar- y en las estrellas -componente galáctico) consiste de protones de muy alta energía y partículas- con una pequeña fracción de núcleos más pesados. La radiación cósmica primaria con los componentes de la atmósfera superior. Esta consiste de una gran variedad de partículas nucleares, entre ellas: neutrones protones, hiperones, antipartículas, etc.

El tritio y el ¹⁴C se forman por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera. Otros isótopos formados por rayos cósmicos son: ¹⁰Be (vida media 2.7 x 10⁶a), ⁷Be (53.6 d), ³²Si (100 a) ³⁶Cl(300,000 a), ³⁹Ar (2269 a), ⁸¹Kr(210,000 a), etc.

CONTADOR GEIGER-MULLER: Un instrumento para la detección de sustancias radiactivas y para determinar su concentración. Básicamente consiste de un cilindro metálico lleno de gas que tiene un alambre a lo largo de su eje. El alambre tiene un voltaje positivo de aproximadamente 1000-1500V

con respecto a las paredes del cilindro; la radiación α , β ó γ que entra al cilindro causa una ionización del gas y se produce una descarga entre el alambre y las paredes, la cual se detecta y registra con instrumentación electrónica apropiada.

CONTADOR PROPORCIONAL: Este contador es comunmente usado para la determinación de tritio y ^{14}C . Es esencialmente lo mismo que el contador Geiger-Muller, pero el potencial del alambre central se ajusta de manera que los pulsos producidos por las radiaciones son proporcionales a la energía liberada. Por lo tanto, las radiaciones que tienen diferentes energías pueden ser distinguidas y contadas separadamente.

Para la determinación de tritio y ^{14}C en muestras naturales, el contador se llena con gas (comunmente etano o metano) sintetizado con el hidrógeno o el carbono que va a ser analizado. La medida de conteo de fondo (background) del contador, se reduce con un grueso escudo de plomo o acero y con contadores de coincidencia, arreglados para eliminar la radiación cósmica que afecta a los contadores.

CONTADOR DE CENTELLEO: Este contador utiliza el hecho de que ciertas sustancias emiten brillo durante la interacción con una radiación. Los destellos se detectan por un fotomultiplicador, la cantidad de estos sera proporcional al número de partículas radioactivas incidentes.

Los contadores de centelleo son comunmente usados para detectar los rayos- γ emitidos por isótopos artificiales. El centellador es un cristal de NaI, activado con trazas de Ioduro de Talio. Un medidor de cuentas dá el número de desintegraciones por unidad de tiempo, dando medida inmediata de la concentración.

Los contadores de centelleo líquido son usados para la determinación de tritio y ^{14}C . En estos contadores el líquido centellea por la interacción con una partícula- β que se mezcla con el líquido bajo investigación (comunmente agua en el caso de tritio y benceno en el caso de ^{14}C).

CURIE (Ci): Unidad para expresar radiactividad. Corresponde a la cantidad de cualquier isótopo radiactivo que sufre 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo. Actualmente se utiliza el becquerel.

Los Millicurie ($\text{mCi} = 10^{-3}\text{Ci}$), microcurie ($\text{Ci} = 10^{-6}\text{Ci}$), nanocurie ($\text{nCi} = 10^{-9}\text{Ci}$) y picocurie ($\text{pCi} = 10^{-12}\text{Ci}$) son unidades normalmente utilizadas.

DELTA NOTACION ($\delta^{\circ}/\text{‰}$): Se define como:

$$R_p - x = \{(R_s - R_p)/R_p\} \times 1000$$

donde $R = D/H$, ó $^{18}O/^{16}O$, ó $^{13}C/^{12}C$, ó $^{34}S/^{32}S$, ó $^{15}N/^{14}N$, etc., en la muestra s , respecto a un patrón p .

Los patrones o referencias generalmente adoptados para análisis isotópicos son: de hidrógeno y oxígeno, en muestras de agua, el SMOW (Standrd Mean Ocean Water), el PBD para carbono, CDT para azufre y nitrógeno atmosférico para los isótopos del nitrógeno.

DEUTERIO: Isótopo estable del hidrógeno con masa 2, indica con el símbolo D ó 2H .

ISOTOPOS AMBIENTALES: Aquellos isótopos de origen natural o artificial, que ocurren en el ambiente sobre una escala regional o global. Las variaciones isotópicas en aguas naturales pueden ser usadas en estudios hidrológicos para determinar algunos aspectos importantes de las aguas superficiales y subterráneas, tales como origen, edad, tiempos de residencia, direcciones de flujo, familias de agua, etc.

TRAZADOR AMBIENTAL DEL AGUA: Cualquier sustancia que aparece en las aguas naturales derivada del ambiente, cuya distribución de concentración en el espacio y/o tiempo puede ser usado para diferenciar o "etiquetar" masas específicas de agua, o para identificar su origen.

Los trazadores ambientales comunmente, pasan a formar parte del ciclo hidrológico a través de los procesos atmosféricos, pero también lo hacen por disolución o intercambio con rocas o material orgánico que se encuentran en los estratos geológicos en los cuales se mueve el agua, o por decaimiento radiactivo de rocas a profundidad. Los isótopos que ocurren naturalmente tienen ciertas propiedades únicas que pueden ser aplicadas a la solución de problemas hidrológicos, a diferencia de los trazadores ordinarios.

EVAPORACION LINEA DE: En un driagrama ($\delta^{18}O$, δD), una línea de la ecuación:

$$\delta D = a\delta^{18}O + b$$

que representa la composición isotópica de las aguas que, teniendo las mismas características isotópicas iniciales, han sufrido diferentes grados de fraccionamiento bajo condiciones ambientales similares. Para aguas de evaporación, el valor de la pendiente puede ser aún menor que 4. Una elevada concentración de sal puede afectar este valor considerablemente.

Las líneas de evaporación en un diagrama ($\delta^{18}\text{O}$, δD) se grafican a la derecha de la línea meteórica, la intersección de las dos líneas da los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD del agua antes de la evaporación.

VIDA-MEDIA: El tiempo necesario para reducir la concentración de un isótopo radiactivo dado a la mitad de su valor inicial por decaimiento radiactivo: $C=C_0/2$. La vida media es entonces:

$$T_{1/2} = (\ln 2)/\lambda$$

donde λ es la constante característica de decaimiento del isótopo.

ISOTOPOS DE HIDROGENO: Existen tres isótopos naturales del hidrógeno. Dos son estables: ^1H protio, (abundancia promedio en agua oceánica de 99.98%), ^2H o D Deuterio, (abundancia promedio de 0.0155%) y el tercer isótopo, ^3H o T Tritio, que es radioactivo.

Las variaciones en los valores δD en compuestos naturales son amplias, debido a la gran diferencia de masa (100%) entre D e H. En aguas naturales los valores de δD varían de +100 a -450‰.

ISOTOPOS: Son átomos del mismo elemento químico, por lo tanto con igual número atómico pero con diferente masa atómica. Los isótopos tienen el mismo número de protones en el núcleo pero diferente número de neutrones. Para el caso del oxígeno, como ejemplo, tiene tres isótopos naturales con masas de 16, 17 y 18:

^{16}O : 8 protones + 8 neutrones en el núcleo

^{17}O : 8 protones + 9 neutrones en el núcleo

^{18}O : 9 protones + 10 neutrones en el núcleo

El índice inferior a la izquierda del símbolo químico indica el número de protones en el núcleo (número atómico); el índice superior la

suma de protones y neutrones (numero de masa). Generalmente el número atómico es omitido, por lo que los isótopos son identificados por el símbolo químico del elemento y por su número de masa.

Los isótopos pueden ocurrir naturalmente o ser producidos artificialmente (p. ej. en un reactor), y ser estables o radiactivos.

ISOTOPOS RADIATIVOS: Los isótopos radiactivos tienen núcleos inestables. Cambian a isótopos de otros elementos con el tiempo (decaimiento radiactivo). La razón de decaimiento se expresa generalmente por medio de la vida-media.

La concentración de isótopos radiactivos en un sistema cerrado decrece exponencialmente con el tiempo a que menos que exista producción al mismo tiempo por algunos otros procesos radiactivos.

ISOTOPOS ESTABLES: Los isótopos estables tienen un núcleo con configuración estable. Su concentración en un sistema cerrado no cambia con el tiempo a menos que sean productos por algún elemento radiactivo presente en el sistema.

FACTOR DE ENRIQUECIMIENTO ISOTOPICO:— Es la diferencia entre el factor de fraccionamiento α (ver abajo) y la unidad, indicando con ϵ :

$$\epsilon = \alpha - 1$$

En general, ϵ está en ‰, y es por tanto comparable con los valores δ . Algunas veces, el término factor de enriquecimiento se usa en vez del factor de fraccionamiento indicado por α .

INTERCAMBIO ISOTOPICO: El intercambio de isótopos de un elemento dado entre compuestos químicos o fases. Este proceso permite diferentes composiciones isotópicas de compuestos o fases que co-existen para a un equilibrio característico de las condiciones del sistema. Para propósitos hidrológicos los procesos de intercambio isotópico más importantes son:

- 1.- Intercambio entre agua y rocas (especialmente calizas). En este proceso únicamente la composición isotópica del oxígeno del agua y de la caliza puede ser afectada (el contenido de hidrógeno de las rocas es generalmente pequeño). Este proceso es muy leve a las temperaturas que normalmente ocurren en los acuíferos y puede ser de importancia

únicamente para aguas termales, donde la temperatura elevada aumenta significativamente la razón de intercambio.

2.- El intercambio isotópico del carbono entre bicarbonato disuelto y CaCO_3 sólido en el acuífero, el cual puede modificar los contenidos de ^{13}C y ^{14}C del bicarbonato usado para la determinación de la edad por ^{14}C . Este proceso también, es muy lento a temperaturas normales, pero la cantidad de bicarbonato disuelto, que es relativamente pequeña, puede ser afectada en su composición isotópica. En este caso, la $\delta^{13}\text{C}$ del bicarbonato será desplazado hacia valores más positivos.

FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO: Es la diferencia en la distribución de los isótopos del mismo elemento en dos fases diferentes, que coexisten (Ejemplo; agua-vapor de agua) en mutuo intercambio isotópico. El fraccionamiento isotópico tiene características físicas y químicas ligeramente diferentes, principalmente las físicas, debido a las pequeñas diferencias en masa. Por lo tanto, el fraccionamiento isotópico es, en general, más grande para los elementos ligeros porque la diferencia relativa de masa es mayor.

FACTOR DE FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO: El factor de fraccionamiento entre dos compuestos que interactúan o coexisten en dos fases A y B, generalmente indicado por α , está definido por:

$$\alpha = R_A/R_B$$

donde R_A y R_B representa la razón isotópica para los diferentes elementos, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, D/H , $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$, etc. Si A y B están en equilibrio termodinámico entonces α es el factor de fraccionamiento en equilibrio. Si la reacción de intercambio entre A y B no ha alcanzado el equilibrio, entonces los factores cinéticos prevalecen y el factor de fraccionamiento cinético resultante es generalmente muy diferente del fraccionamiento en equilibrio.

En la ecuación anterior, la razón entre la composición isotópica de los compuestos se elige para producir $\alpha > 1$ a temperatura normal. El valor de α tiende a 1 cuando la temperatura se incrementa. En ciertos casos, cuando la temperatura se eleva α puede pasar desde un valor > 1 a un valor < 1 y viceversa; sin embargo, el valor asintótico de α para $T \rightarrow \infty$ es siempre 1.

La dependencia del factor de fraccionamiento isotópico con la temperatura puede usarse para evaluar, desde la composición isotópica de dos compuestos co-existentes, hasta la temperatura a la cual se han equilibrado.

ESPECTROMETRO DE MASA: Es un instrumento diseñado para separar moléculas de acuerdo a su relación carga-masa en base a su movimiento a través de campos eléctricos y/o magnéticos. Esencialmente -un este instrumento opera de acuerdo a los siguientes principios básicos:

- I.- Admisión del gas y Formación de iones
- II.- Aceleración y Colimación de iones
- III.- Analizador magnético
- IV.- Colección y medición de iones

En un espectrómetro de masas, las moléculas neutras del gas a investigar se ionizan (por impacto de un haz de electrones). Los iones son acelerados a través de un campo eléctrico. Posteriormente entran a un campo magnético normal a su trayectoria, por lo que describen trayectorias circulares, cuyos radios dependen de la masa de los iones.

$$r = \frac{1}{H} \sqrt{\frac{2Vm}{e}}$$

(r= radio, H= intensidad del campo magnético, V= voltaje acelerado, m= masa del ión, e= carga eléctrica del ión).

Los iones, dependiendo de su masa caen en lugares físicos previamente calculados, de modo que pueden colectarse separadamente y medir así su concentración relativa.

VIDA PROMEDIO: El tiempo promedio de vida τ de un átomo radiactivo:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} C dt}{C_0} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\text{vida media}}{\ln 2}$$

LINEA DE AGUA METEORICA (ISOTOPOS ESTABLES): En un diagrama ($\delta^{18}\text{O}$, δD), la línea de la ecuación

$$\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10; \text{ en } \delta\text{o}/\text{oo}$$

que es el mejor ajuste de los puntos que representan la composición de las muestras de precipitación provenientes de diferentes partes del mundo, 144 estaciones colocadas en diferentes puntos del globo terrestre, catalogadas como: Isleñas, Continentales y Costeras; controladas por el Organismo Internacional de Energía Atómica.

En algunas regiones del mundo la línea meteórica que representa la correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y δD está desplazada, generalmente con la misma pendiente 8 pero un valor diferente de la intersección con el eje δD (línea de agua meteórica regional).

Las aguas subterráneas y superficiales siguen en la mayoría de los casos la misma relación $\delta^{18}\text{O}$ - δD a menos que hayan sufrido una fuerte evaporación como ocurre a menudo en los lagos. La evaporación de superficie libre tiende a enriquecer el contenido isotópico del agua pero no en la proporción relativa establecida por la ecuación anterior.

ISOTOPOS DEL NITROGENO: Existen dos isótopos del nitrógeno, ambos estables ^{14}N y ^{15}N . La abundancia del ^{15}N en el aire es 0.3663%. El nitrógeno del aire tiene una composición isotópica uniforme a través del mundo y puede usarse como un estándar de referencia para las determinaciones de $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$. Los valores $\delta^{15}\text{N}$ generalmente varían en compuestos naturales de -10 a +20‰.

ISOTOPOS DEL OXIGENO: Existen tres isótopos estables: ^{16}O (abundancia promedio en material terrestre es 99.76%), ^{17}O (0.04%), ^{18}O (0.2‰). Las variaciones de la razón $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ no son investigadas usualmente, ya que en materiales terrestres es más pequeña que un factor de 2 que la razón $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$.

El valor $\delta^{18}\text{O}$ varía en compuestos naturales de +40 CO₂ atmosférico a -60 ‰ (hielo polar), contra SMOW.

PDB: Es el CaCO₃ obteniendo del rostrum calcáreo de una Belemnitella del Vretácico (Belemnitella Americana) de la Formación Pee Dee de Carolina del Sur. La composición isotópica de su carbono representa un buen promedio del de la caliza marina.

El PDB se utiliza también como una referencia estándar para las determinaciones de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en medidas de paleotemperaturas. El PDB ya no está disponible ahora. Otra muestra de la CaCO₃, cuya composición isotópica con respecto al PDB es conocida, está en disposición para

calibración: el NBS-19, distribuido por el OIEA y por la National Bureau of Standards in Washington, D.C.

LEY DE DECAIMIENTO RADIOACTIVO: El decaimiento radiactivo sigue la ley:

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C$$

donde C es la concentración de un núcleo radiactivo en el sistema al tiempo t, dC/dt es la razón de decaimiento y λ es la constante de decaimiento característico de cada isótopo. Por integración obtenemos:

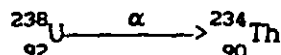
$$C = C_0 e^{-\lambda t}$$

donde C_0 es la concentración del núcleo radiactivo presente al tiempo inicial ($t=0$). Conociendo C_0 , λ y C (la concentración presente) podemos evaluar la edad del sistema:

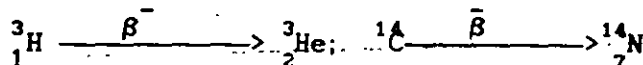
$$t = 1/\lambda \ln \frac{C_0}{C}$$

RADIOACTIVIDAD: El proceso por el cual los isótopos se transforman (decaen en isótopos de otros elementos por procesos nucleares, con la emisión de radiación. Los procesos más comunes de decaimiento radiactivo son:

1.- Decaimiento- α : Una partícula- α , que tiene masa 4 y carga 2 (un núcleo de helio) es emitido por el núcleo del isótopo padre, el cual es así transformado en un isótopo de un elemento diferente que tiene un número de masa menor por 4 unidades y un número atómico menor de 2 unidades. Ejemplo:

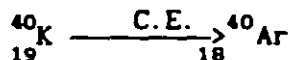


2.- Decaimiento- β : Un electrón es emitido por el núcleo del isótopo padre el cual es transformado en un isótopo de un elemento diferente que tiene el mismo número de masa y un número atómico por 1 unidad. Ejemplo:



3.- Decaimiento C.E. (captura electrónica): El núcleo del isótopo padre captura un electrón y es transformado así en un isótopo de un elemento diferente que tiene el mismo número de masa y un número atómico menor

por 1 unidad. Ejemplo:



El producto del decaimiento está a menudo en un estado excitado. Este regresa al estado base por la emisión de energía en la forma de rayos X ó γ (radiaciones electromagnéticas de energía bien definida). Esas radiaciones, y especialmente los rayos- γ , son las radiaciones más penetrantes, debido a que tienen alta energía pero sin masa ni carga eléctrica, y son por lo tanto las más peligrosas.

SMOW (Standar Mean Ocean Water): Agua de referencia que tiene una composición isotópica cercana a la del agua oceánica promedio. La abundancia de las tres principales especies isotópicas de agua en SMOW son: $\text{H}_2^{16}\text{O} = 99.73 \%$; $\text{HD}^{16}\text{O} = 0.031 \%$; $\text{H}_2^{18}\text{O} = 0.200 \%$.

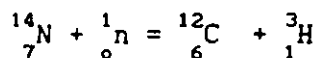
Las ventajas de usar SMOW como patrón de referencia para análisis isotópicos de agua son:

- 1.- El océano sobre la corteza terrestre, y tiene una composición isotópica casi uniforme.
- 2.- El océano constituye el punto inicial y final de cualquier circuito hidrológico importante.

Por definición SMOW tiene δD y $\delta^{18}\text{O}$ igual a cero. El OIEA distribuye muestras de agua llamada V-SMOW, que tienen una composición isotópica prácticamente idéntica a la del SMOW ya definido, para propósitos de medida e intercalibración.

ISOTOPOS DEL AZUFRE: Existen cuatro isótopos estables de este elemento, que son: ${}^{32}\text{S}$ (con una abundancia terrestre promedio de 95.02%), ${}^{36}\text{S}$ (0.02%). Únicamente las variaciones de la razón ${}^{34}\text{S}/{}^{32}\text{S}$ son usadas. Varían generalmente de +40 a -40 ‰ contra CDT.

TRITIO: Isótopo radiactivo del hidrógeno producido por rayos cósmicos en la atmósfera por reacciones de expulsión y/o creación nuclear en la que una partícula incidente causa que el núcleo objetivo emita cierto tipo de partículas y por captura de neutrones rápidos:



La razón de producción es $0.25 \text{ atm/cm}^2 \text{ s}$. El tritio producido es rápidamente oxidado a H_2O e incorporado a la precipitación y el vapor

atmosférico, pasando, de esta manera a formar parte del ciclo hidrológico.

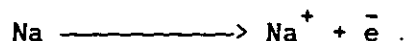
Desde 1952 a 1962 una gran cantidad de tritio artificial producido por pruebas termonucleares realizadas en la atmósfera, a través de la cual es introducido al ciclo del agua. Como un ejemplo, en la precipitación del hemisferio norte el contenido de tritio pasó de 10 U.T. (Unidades de tritio), de 1952 a 10,000 U.T. en 1963. -

La vida media del tritio es de 12.43 años y decae a ^3He por pura emisión β^- con energía máxima de únicamente 18 KeV.

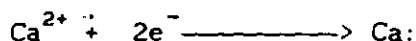
UNIDAD DE TRITIO (U.T.): Unidad usada para expresar la concentración de tritio en muestras naturales. Una U.T. corresponde a una concentración de un átomo de tritio por 10^{18} átomos de hidrógeno. Factores de conversión.

$$1 \text{ U.T.} = 1.182 \times 10^{-4} \text{ bq/ml} = 3.195 \times 10^{-9} \text{ } \mu\text{Ci/ml.}$$

REACCIONES REDOX: Redacción de oxidación-reducción o reacción con transferencia de electrones. La oxidación se refiere a cualquier reacción en la que una sustancia o especie pierde electrones. Ejemplo.



La reducción es una ganancia de electrones. Ejemplo:



La reducción es lo opuesto a la oxidación, y si se invirtieran las reacciones en los ejemplos anteriores tendríamos reducción y oxidación respectivamente.

RADON. - Gas inerte radioactivo que pertenece al grupo de los gases nobles. es parte de la cadena de desintegración del uranio. Ocurre naturalmente y sus características principales son: incoloro, inodoro y químicamente inerte. De los gases nobles el radon es el más pesado, el que tiene más alto punto de: fusión, temperatura crítica y presión crítica.

Debido a que es soluble en agua a baja temperatura, decreciendo ésta cuando aumenta la temperatura, se ha utilizado como trazador en estudios hidrológicos.

FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO

ES LA DIFERENCIA EN LA DISTRIBUCION DE LOS ISOTOPOS DEL MISMO ELEMENTO EN DOS COMPUESTOS O FASES QUIMICAS EN INTERCAMBIO ISOTOPICO MUTUO. EL FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO OCURRE PORQUE LOS ISOTOPOS TIENEN CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS LIGERAMENTE DIFERENTES, DEBIDO A PEQUEÑAS DIFERENCIAS EN MASA. POR LO TANTO, EL FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO ES, EN GENERAL, MAS GRANDE PARA LOS ELEMENTOS LIGEROS PORQUE LA DIFERENCIA RELATIVA DE MASA ES MAYOR.

MECANISMOS PRINCIPALES DE ENRIQUECI- MIENTO ISOTOPICO EN AGUA SUBTERRANEA SUJETA A CONTAMINACION POR UN BASURERO:

- 1).- EVAPORACION DENTRO DEL BASURERO
- 2).- PRODUCCION DE AGUA ISOTOPICAMENTE ENRIQUE-
CIDA DURANTE LA DESCOMPOSICION DE MATERIA
ORGANICA.
- 3).- INTERCAMBIO DE OXIGENO ENTRE EL AGUA Y BIO-
XIDO DE CARBONO.
- 4).- DIFERENCIA EN LA COMPOSICION ISOTOPICA DEL
AGUA DE RECARGA.

FRITZ, 1976.

TABLA II.6.1 Resumen de las características isotópicas

Elemento/ isótopos	Abundancia (%)	Estándar /unidades	vida media (años)	Tipo de Análisis
Hidrógeno ^1H ^2H ^3H	99.984 0.015 $10^{-14}, -16$	V-SMOW % (U. T.)	12.35	Espectrome- tría de masa Contador de centelleo líq.
Oxígeno ^{16}O ^{17}O ^{18}O	99.76 0.037* 0.1**	V-SMOW %		Espectrome-
Carbon ^{12}C ^{13}C ^{14}C	98.89 1.11 10^{-10}	PDB % A. Ox. (pmc)	5730	Espectrome- tría de masa Contador de centelleo líq. de benceno o contador prop. de gas metano
Azufre ^{32}S ^{33}S ^{34}S ^{36}S	95.02 0.75* 4.21 0.02*	CDT		Espectrome- tría de masa

* No se utiliza en estudios ambientales.

** Se utiliza también en estudios paleoambientales.

**SOLUBLE EN
AGUA**

**NO INTERCAMBIO
IONICO**

**TRAYECTORIA
FACIL DE DETECTAR**

**TRAZADOR
"IDEAL"**

**NO
ABSORCION**

**NO CAMBIOS
QUIMICOS**

NO TOXICO

FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO

ES LA DIFERENCIA EN LA DISTRIBUCION DE LOS ISOTOPOS DEL MISMO ELEMENTO EN DOS COMPUESTOS O FASES QUIMICAS EN INTERCAMBIO ISOTOPICO MUTUO. EL FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO OCURRE PORQUE LOS ISOTOPOS TIENEN CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS LIGERAMENTE DIFERENTES, DEBIDO A PEQUEÑAS DIFERENCIAS EN MASA. POR LO TANTO, EL FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO ES, EN GENERAL, MAS GRANDE PARA LOS ELEMENTOS LIGEROS PORQUE LA DIFERENCIA RELATIVA DE MASA ES MAYOR.

BIOLOGIA

GEOLOGIA

HIDROLOGIA
ISOTOPICA

**PROBLEMA
AGUA**

GEOQUIMICA

MODELACION
MATEMATICA

GEOFISICA

A D M I N I S T R A C I O N

HIDROLOGIA

ISOTOPICA

INTRUSION SALINA

EDAD

EVAPORACION

FAMILIAS

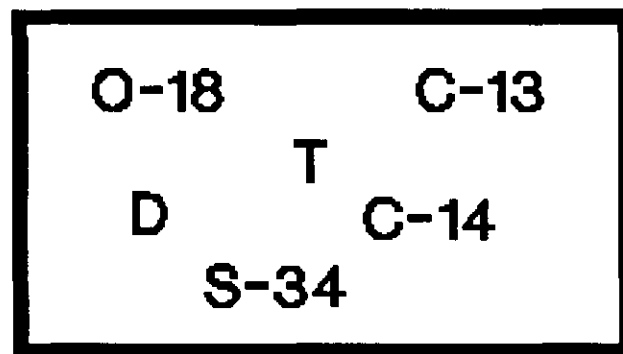
RESIDENCIA

CONTAMINACION

RECARGA

MEZCLA

ORIGEN



ISOTOPOS

SISTEMAS CONSERVATIVOS EN ACUIFEROS
CONFINADOS HASTA POR CIENTOS DE AÑOS

AGUAS SUBTERRANEAS NORMALES

AQUELLAS CUYOS VALORES CAEN DENTRO
DE LA LINEA METEORICA.

VULNERABILIDAD DE LA ZONA LACUSTRE

LOS PRIMEROS ESTUDIOS DETALLADOS DE LA ZONA LACUSTRE SE INICIARON EN LA DECADA DE 1940 PARA ENTENDER LA DINAMICA DE LAS ARCILLAS DESDE EL PUNTO DE VISTA GEOTECNICO Y DE MECANICA DE SUELOS (MARSAL Y MAZARI, 1969). EN ESTUDIOS RECIENTES SE HAN DETECTADO FRACTURAS Y GRIETAS, A TRAVES DE LAS CUALES PUEDE HABER TRANSPORTE DE CONTAMINANTES ALTERANDO LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRANEA, DEPENDIENDO DE:

LA EXTENSION E INTERCONEXION DE FRACTURAS, LOS GRADIENTES HIDRAULICOS DE LAS ARCILLAS, EL TAMAÑO Y LAS PROPIEDADES DEL ACUIFERO, TIPOS Y CANTIDADES DE CONTAMINANTES (MAZARI, 1992).

FUENTES DE CONTAMINACION

EXISTE UNA AMPLIA GAMA DE ACTIVIDADES HUMANAS QUE GENERAN CARGAS CONTAMINANTES (FACTORES CONTROLABLES). EN LO QUE RESPECTA A LA CUENCA DE MEXICO, DICHAS CARGAS CONTAMINANTES PUEDEN AGRUPARSE EN DOS GRANDES RUBROS:

A) PROVENIENTES DE ACTIVIDADES EN CENTROS URBANOS

B) PROVENIENTES DEL DESARROLLO INDUSTRIAL

ACTIVIDADES URBANAS

EL COMPLEJO PANORAMA DE ACTIVIDADES DOMESTICAS QUE SE PRESENTAN EN LOS CENTROS URBANOS, REPRESENTAN FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS, PRINCIPALMENTE POR LA ALTA CONCENTRACION DE MATERIA ORGANICA QUE CONTIENEN SUS DESCARGAS Y POR LA EXISTENCIA DE FOSAS SEPTICAS EN ZONAS VULNERABLES.

OTRAS FUENTES POTENCIALES, ASOCIADAS CON EL DESARROLLO URBANO ESTAN PRESENTES EN LOS LUGARES DE DEPOSITACION DE RESIDUOS SOLIDOS, DEBIDO A QUE ESTOS PERMANECEN POR PERIODOS RELATIVAMENTE LARGOS. EN LOS TIRADEROS A CIELO ABIERTO SE ORIGINAN GRAVES PROBLEMAS SANITARIOS, PUDIENDO LLEGAR A SER UN FOCO DE CONTAMINACION DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEAS POR LA GENERACION DE LIXIVIADOS, CUYA COMPOSICION QUIMICA Y BACTERIOLOGICA LES CONFIERE UN CARACTER CONTAMINANTE.

RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES

LA ACUMULACION DE RESIDUOS SOLIDOS DOMESTICOS E INDUSTRIALES CONSTITUYE, HOY DIA, UN PROBLEMA AGOBIANTE EN LOS PAISES INDUSTRIALIZADOS. EL AUMENTO DE LA POBLACION, AUNADO AL PROCESO DE URBANIZACION Y LA CRECIENTE DEMANDA DE BIENES DE CONSUMO, DETERMINA UN AUMENTO INCESANTE EN CALIDAD Y VOLUMEN DE LOS DESECHOS PRODUCIDOS.

EN MEXICO, AL IGUAL QUE EN OTROS PAISES, LA FORMA TRADICIONAL DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS LA CONSTITUYEN POR LO GENERAL LOS TIRADEROS A CIELO ABIERTO, DONDE ALGUNAS VECES, DESPUES DE LA SELECCION Y RECICLAJE MANUAL, LA BASURA SE COMPACTA Y CUBRE CON ARCILLA. AUN ASI, MAS DEL 70% DE LOS RESIDUOS SOLIDOS QUEDAN SIN SER REUTILIZADOS.

AUNQUE SE HAN INSTALADO DOS RELLENOS SANITARIOS EN EL AMCM, NINGUNO CUMPLE CON TODAS LAS ESPECIFICACIONES REQUERIDAS. EN ESTADOS UNIDOS, A SU VEZ, DE 100,000 DEPOSITOS DE DESECHOS SOLIDOS PROBABLEMENTE NO MAS DEL 10% PUEDEN SER CLASIFICADOS COMO RELLENOS SANITARIOS (EVERETT).

EN LA CIUDAD DE MEXICO SE PRODUCIAN EN EL AÑO 1950 ALREDEDOR DE 370g DE BASURA DIARIOS PER CAPITA. EN 1992, SE ESTIMA QUE EN EL DF SE GENERARON CERCA DE 11 MIL TON/DIA DE BASURA, DE LAS CUALES CADA HABITANTE ES RESPONSABLE DE PRODUCIR ALREDEDOR DE 1,000g DIARIAMENTE.

SI SE CONSIDERA EL TOTAL DEL AMCM, EL VOLUMEN ASCIENDE A 18 MIL TON/DIA, DE LAS CUALES 48% CORRESPONDERAN AL DISTRITO FEDERAL Y 52% A LOS MUNICIPIOS CONURBADOS.

EL VOLUMEN DE BASURA DE 1950 A LA FECHA, SE HA INCREMENTADO CONSIDERABLEMENTE Y TAMBIEN SE HA MODIFICADO SU COMPOSICION PASANDO DE 5% DE DESECHOS NO DEGRADABLES, A 40.5% EN NUESTROS DIAS. EL VOLUMEN DE GENERACION PER CAPITA AUMENTO DE 1950 A 1992 EN 207% Y LA PROPORCION DE RESIDUOS NO BIODEGRADABLES SE INCREMENTO EN ESTE MISMO PERIODO EN 810%.

EN LA DECADA DE 1970, EL SERVICIO DE LIMPIA CONTABA CON 8,000 TRABAJADORES, 600 VEHICULOS RECOLECTORES Y 120 BARREDORAS MECANICAS QUE LIMPIABAN 5 MIL KM DE CALLES AL DIA, A LOS QUE SE SUMABAN MAS DE 4,000 BARRENDEROS Y RECOLECTORES PARA ATENDER A UNA POBLACION QUE GENERABA 7,000 TONELADAS DE BASURA. PARA AUMENTAR SU CAPACIDAD DE RESPUESTA ANTE EL PROBLEMA DE LOS DESECHOS SIN RECOLECTAR, EL GOBIERNO DEL DF HA CONFORMADO UN COMPLEJO EQUIPAMIENTO E INFRAESTRUCTURA PARA EL MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SOLIDOS, CON 25 MIL TRABAJADORES, 240 BARREDORAS, 2 MIL VEHICULOS RECOLECTORES, 11 ESTACIONES DE TRANSFERENCIA, TRES SITIOS DE DISPOSICION FINAL, UNA INSTALACION DE RECUPERACION Y COMPOSTEO Y UNA PLANTA DE INCINERACION.

SE HA PRESTADO ATENCION PRIORITARIA A LA DISPOSICION ADECUADA DE LOS RESIDUOS, POR LO QUE EN LOS ULTIMOS AÑOS SE HAN CLAUSURADO SITE TIRADEROS A CIELO ABIERTO.

DESTACA EL DE SANTA CRUZ MEYEHUALCO, CON UNA AREA DE 150 Ha, DONDE DURANTE 50 AÑOS FUERON DEPOSITADOS LA MAYOR PARTE DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN EL D.F. y EL TIRADERO DE SANTA FE (ALAMEDA PONIENTE), CON UNA EXTENSION DE 50 Ha, QUE OPERO APROXIMADAMENTE 40 AÑOS.

PARA SUSTITUIRLOS, SE HAN CONSTRUIDO DOS GRANDES RELLENOS SANITARIOS QUE PERMITEN DISPONER CERCA DEL 90% DE LOS RESIDUOS SOLIDOS (SANTA CATARINA Y BORDO PONIENTE).

CADA PROCESO DE CLAUSURA SE HA ACOMPAÑADO DE PROGRAMAS DE REGENERACION Y RESTAURACION URBANA Y AMBIENTAL, POR LO QUE LA CIUDAD HA CREADO APROXIMADAMENTE 230 Ha DE AREAS VERDES Y PARQUES RECREATIVOS.

CABE SEÑALAR QUE LOS DESECHOS DEPOSITADOS EN ESTOS SITIOS NO FUERON REMOVIDOS Y QUE DICHOS TIRADEROS NO FUERON CONSTRUIDOS SIGUIENDO LOS REQUERIMIENTOS ACTUALES PARA CONFINAMIENTOS CONTROLADOS, POR LO CUAL NO FUERON REVESTIDOS NI CUENTAN CON SISTEMAS DE RECOLECCION DE LIXIVIADOS. POR ESTA RAZON, CONTINUAN SIENDO FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACION.

DRENAJE Y DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES

DADO QUE EL 26% DE LA POBLACION DEL AMCM NO CUENTA CON DRENAJE (INEGI), LAS ZONAS CARENTES DE ESE SERVICIO ELIMINAN SUS AGUAS RESIDUALES LOCALMENTE EN ARROYOS, FOSAS SEPTICAS Y LETRINAS. ESTOS ASENTAMIENTOS, CASI TODOS SITUADOS EN LA ZONA DE TRANSICION, CREAN LA POSIBILIDAD DE CONTAMINACION DEL ACUIFERO POR ORGANISMOS PATOGENOS Y OTROS CONTAMINANTES PRESENTES EN LOS DESECHOS DOMESTICOS.

NO ES POSIBLE ACTUALMENTE DETERMINAR DE MANERA PRECISA EL VOLUMEN DE AGUAS RESIDUALES QUE SE VIERTEN SIN TRATAMIENTO AL SISTEMA DE DRENAJE DEL AMCM. SIN EMBARGO, DE ACUERDO CON DDF (1992) SE ESTIMA QUE MAS DEL 90% DE LOS DESECHOS LIQUIDOS INDUSTRIALES GENERADOS EN EL AMCM, SON VERTIDOS AL SISTEMA DE DRENAJE. COMO YA SE MENCIONO, NO EXISTE UNA DESCRIPCION DETALLADA DE LOS DESECHOS, PERO DADO QUE EL AMCM SE ENCUENTRA ASENTADA APROXIMADAMENTE EL 48% DE LA INDUSTRIA NACIONAL (DDF, 1987) ES SEGURO QUE ESTOS DESECHOS CONTENGAN SUSTANCIAS QUIMICAS PELIGROSAS DE TODA INDOLE.

ACTIVIDADES DE DESARROLLO INDUSTRIAL

EN EL AMCM SE ENCUENTRAN REGISTRADAS 30,124 EMPRESAS INDUSTRIALES (INEGI, CENSO ECONOMICO 1989). EL 72.4% DE ELLAS SE UBICAN EN EL DISTRITO FEDERAL Y 27.6% ESTAN EN EL ESTADO DE MEXICO.

CLASIFICACION DE LAS EMPRESAS INDUSTRIALES DEL AMCM SEGUN SU TAMAÑO

=====		
TAMAÑO	No DE EMPRESAS	%
MICROINDUSTRIA	22 593	75
PEQUEÑA INDUSTRIA	6 025	20
INDUSTRIA MEDIANA	904	3
GRANDES INDUSTRIAS	604	2
=====		
T O T A L	30 126	100
=====		

SE CALCULA QUE LA CANTIDAD DE DESECHOS TOXICOS Y PELIGROSOS GENERADOS EN EL DISTRITO FEDERAL ASCIENDE A 3 MILLONES DE TONELADAS METRICAS POR AÑO, DE LAS CUALES MAS DEL 95% SON EFLUENTES LIQUIDOS, QUE SE DESCARGAN AL SISTEMA MUNICIPAL DE DRENAJE. EL RESTO SON SOLIDOS, LAS MAYOR PARTE DE LOS CUALES SE ENVIAN A BASUREROS MUNICIPALES O A TIRADEROS ILEGALES DENTRO DE LA CUENCA. SE ESTIMA QUE LA GENERACION DE DESECHOS PELIGROSOS EN EL ESTADO DE MEXICO PUEDE SER DE LA MISMA MAGNITUD QUE LA DEL DISTRITO FEDERAL.

ADEMAS DE LOS DESECHOS QUE SE ESTAN GENERANDO EN LA ACTUALIDAD SE CREE QUE EXISTEN EN EL DISTRITO FEDERAL UNAS 40 MILLONES DE TONELADAS DE DESECHOS PELIGROSOS ANTIGUOS, QUE SE PRODUJERON A PARTIR DE LA DECADA DE 1940, CUANDO SE INCREMENTO LA INDUSTRIALIZACION DEL AMCM.

UNA FUENTE POTENCIAL DE CONTAMINACION EN ZONA DE TRANSICION, LO CONSTITUYE LA REFINERIA 18 DE MARZO QUE FUNCIONO DE 1948 A 1991, Y QUE CESO SUS OPERACIONES DE REFINACION CON BASE EN UNA DECISION TENDIENTE A ABATIR LA CONTAMINACION AMBIENTAL. LA UBICACION DE LA REFINERIA, PLANTEA LA POSIBILIDAD DE QUE LAS BARRERAS SUBSUPERFICIALES A LA INFILTRACION DE CONTAMINANTES PUEDAN SER DISCONTINUAS Y RELATIVAMENTE INEFICIENTES (MAZARI Y MACKAY). LOS CONDUCTOS EMPLEADOS PARA TRANSPORTAR LOS PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETROLEO EN FORMA LIQUIDA O GASEOSA HACIA O A PARTIR DE LA REFINERIA, CONSTITUYEN TAMBIEN UNA FUENTE POTENCIAL DE CONTAMINACION, EN PARTICULAR, DONDE ATRAVIESAN LA ZONA DE TRANSICION O LAS AREAS EN LAS CUALES LAS ARCILLAS LACUSTRES ESTEN FRACTURADAS.

LAS ESTACIONES DE GASOLINA CONSTITUYEN FUENTES ADICIONALES DE DERRAMES O ESCAPES DE COMBUSTIBLES HACIA EL SUBSUELO, RAZON POR LA CUAL SE INICIO EN 1992 UN PROGRAMA PARA IDENTIFICAR Y CORREGIR TALES SITUACIONES EN EL AMCM, EL CUAL LLEVO A IDENTIFICAR QUE APROXIMADAMENTE EL 80% DE LAS 253 ESTACIONES UBICADAS EN EL DF PRESENTABAN ANOMALIAS.

A PARTIR DE LAS FUENTES DE ABASTECIMIENTO (SUPERFICIALES O SUBTERRANEAS) Y ANTES DE SER CONSUMIDA POR LA POBLACION, EL AGUA PUEDE EXPERIMENTAR CAMBIOS EN SU CALIDAD DEBIDO A LAS SIGUIENTES CAUSAS:

- 1. TRATAMIENTO EN PLANTAS POTABILIZADORAS**
- 2. DESINFECCION EN DISTINTOS PUNTOS DE LA RED DE DISTRIBUCION**
- 3. CONTAMINACION POR "CONEXIONES CRUZADAS" EN LA RED**
- 4. CONTAMINACION EN DEPOSITOS DOMICILIARIOS (CISTERNAS Y TINACOS) ABIERTOS O SUCIOS**
- 5. CONTAMINACION POR METALES (PLOMO, COBRE) CAUSADA POR LA CORROSION DE TUBERIAS DE LA RED DE DISTRIBUCION Y DOMICILIARIAS**
- 6. POTABILIACION EN LOS DOMICILIOS (HIRVIENDO EL AGUA, O UTILIZANDO FILTROS U OTROS SISTEMAS DE PURIFICACION)**
- 7. DEGRADACION DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS DOMICILIOS POR MANEJO INADECUADO Y FALTA DE HIGIENE.**

REGULACION SANITARIA

EN SU ARTICULO 209, DEL REGLAMENTO DE CONTROL SANITARIO, (18-1-88), DEFINE AL AGUA POTABLE COMO TODA AQUELLA CUYA INGESTION NO CAUSE EFECTOS NOCIVOS PARA LA SALUD Y SE ENCUENTRE LIBRE DE GERMENES PATOGENOS Y DE SUSTANCIAS TOXICAS, Y CUMPLA, ADEMAS CON LOS REQUISITOS QUE SE SEÑALAN EN EL ARTICULO 210 REFERIDOS A CONTINUACION:

1. EL NUMERO DE ORGANISMOS COLIFORMES TOTALES, DEBERA SER, COMO MAXIMO, DE DOS ORGANISMOS EN 100 ML, SEGUN LAS TECNICAS DEL NUMERO MAS PROBABLE (NMP) O DE FILTRO DE MEMBRANA.

2. NO DEBERA CONTENER ORGANISMOS FECALES

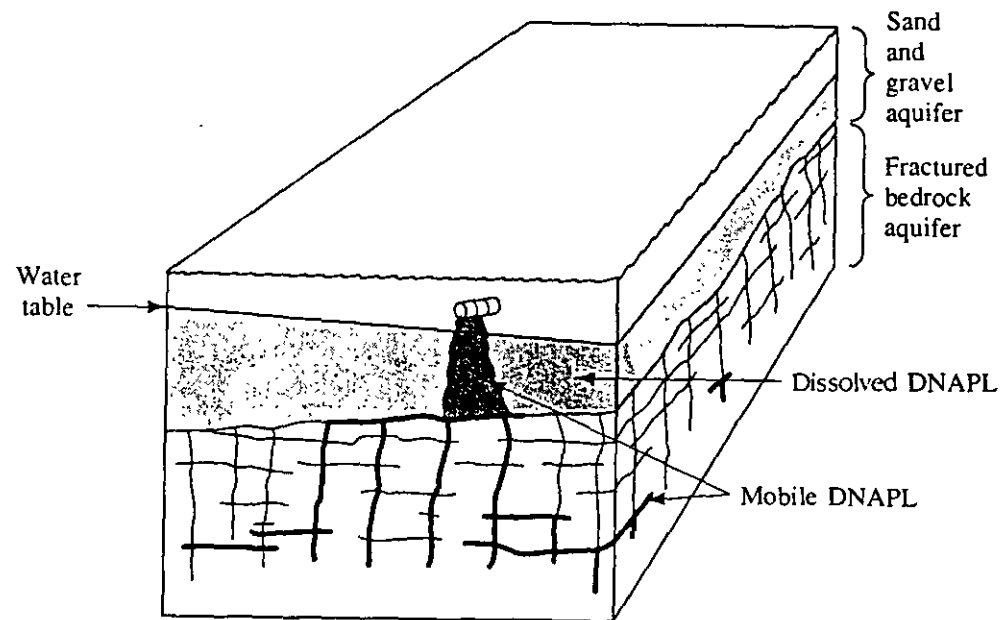


FIGURE 5.27 Movement of a DNAPL into a fractured bedrock aquifer that underlies a sand and gravel aquifer.

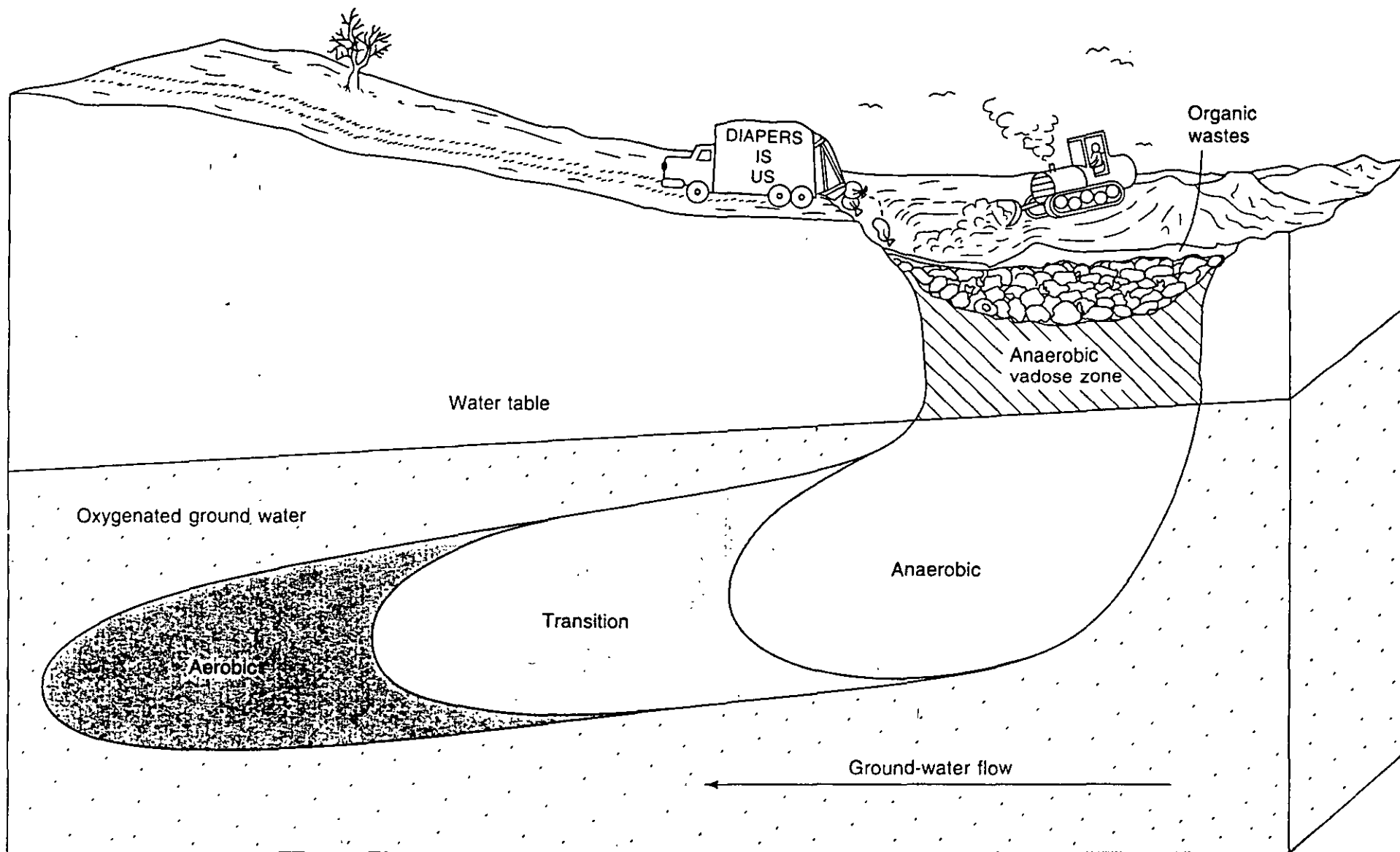


FIGURE 6.15 Geochemical zonation of the leachate plume from a landfill receiving organic waste.

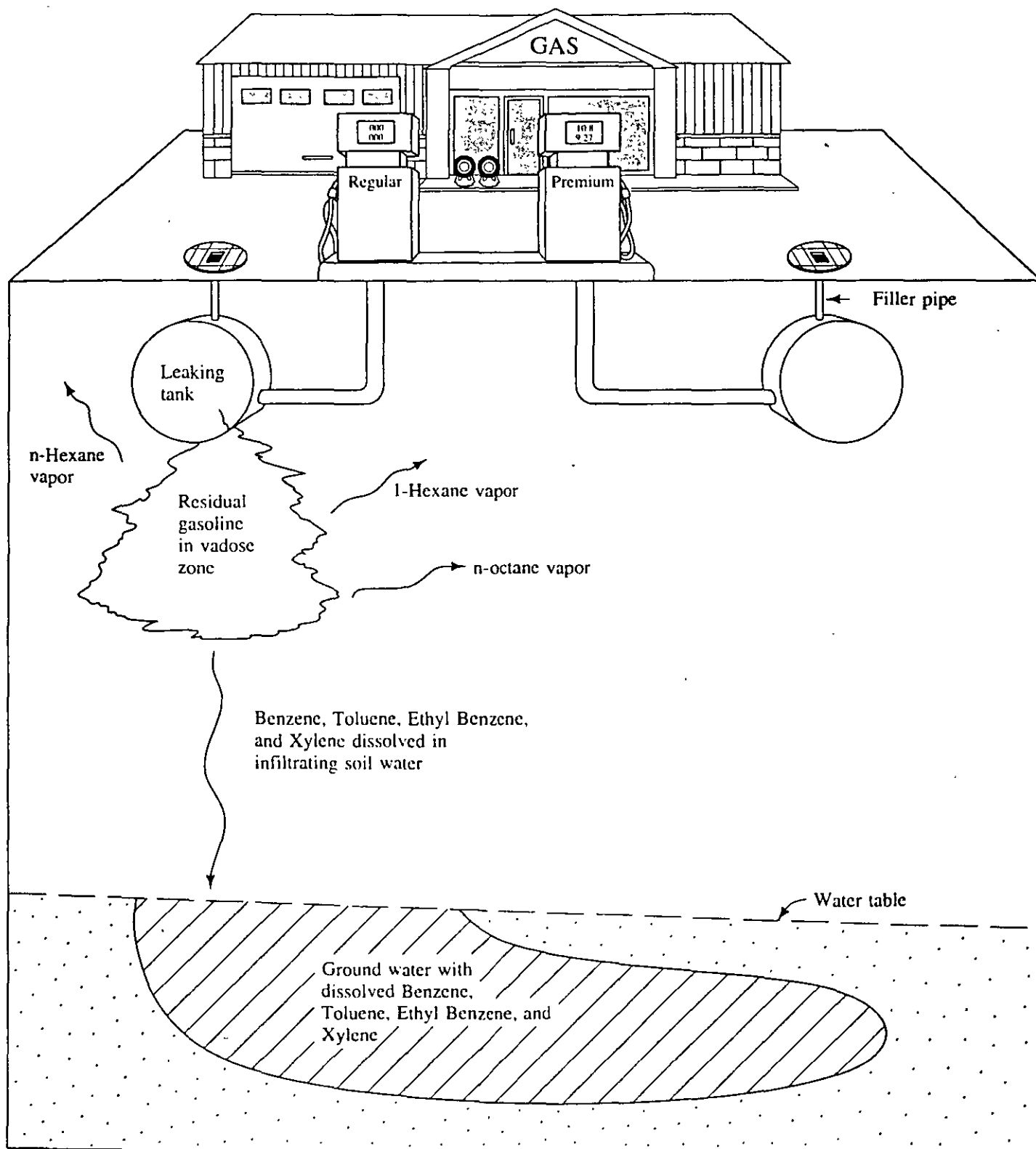
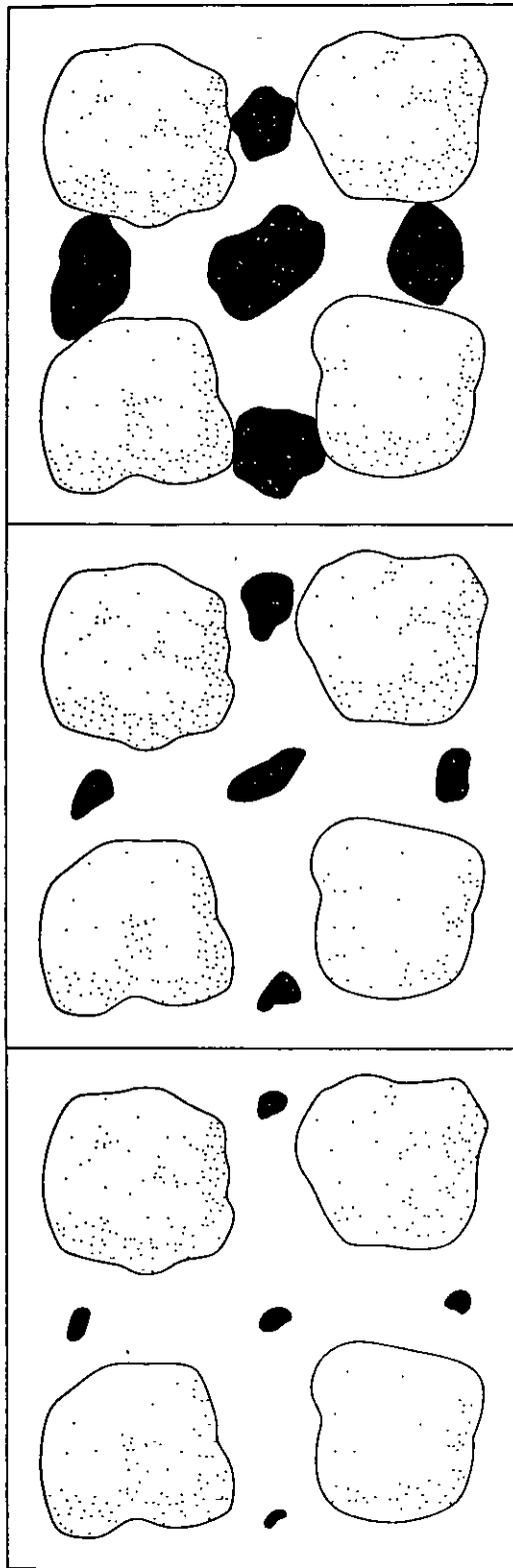
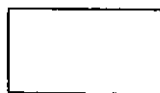
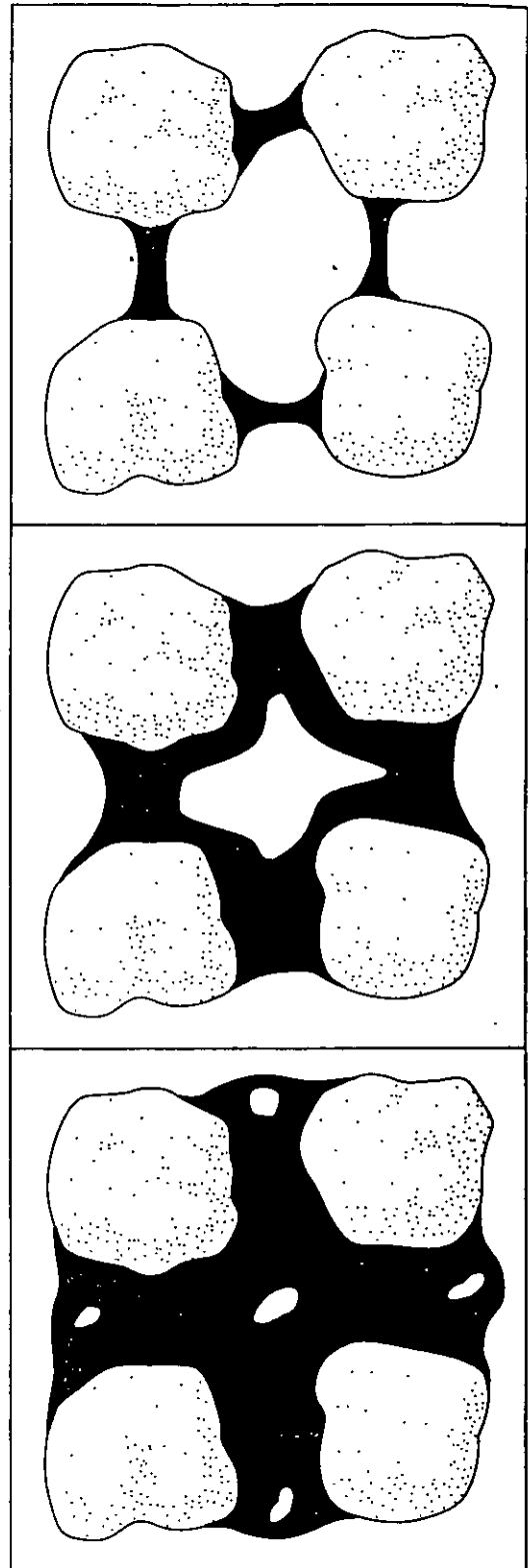


FIGURE 5.18 Process of ground water being contaminated by gasoline constituents from residual gasoline in the vadose zone.

Water wet sand



Oil wet sand

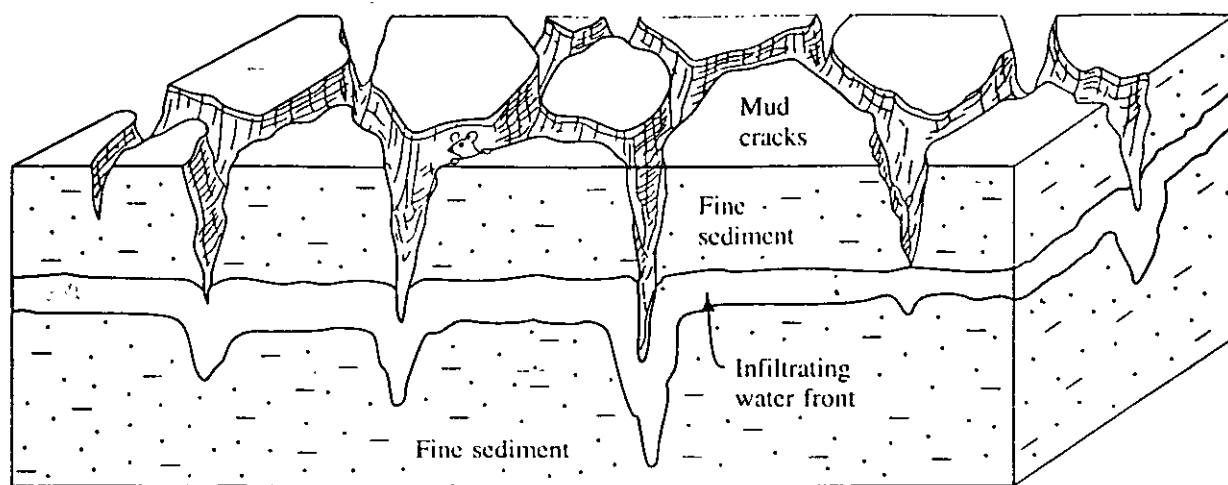


Water

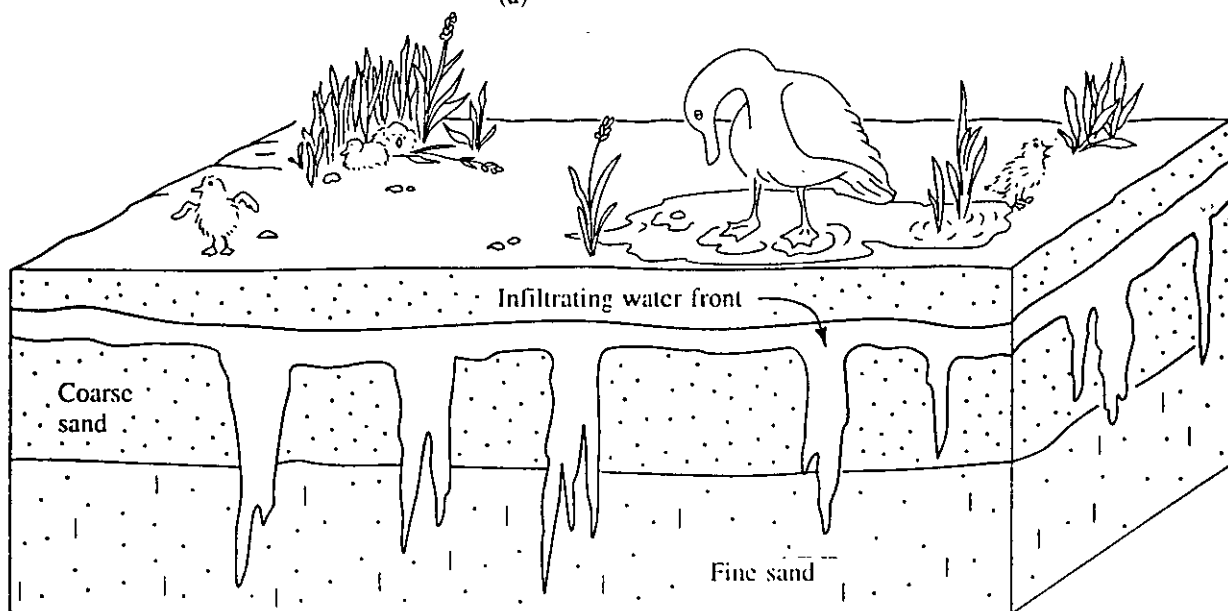


Oil

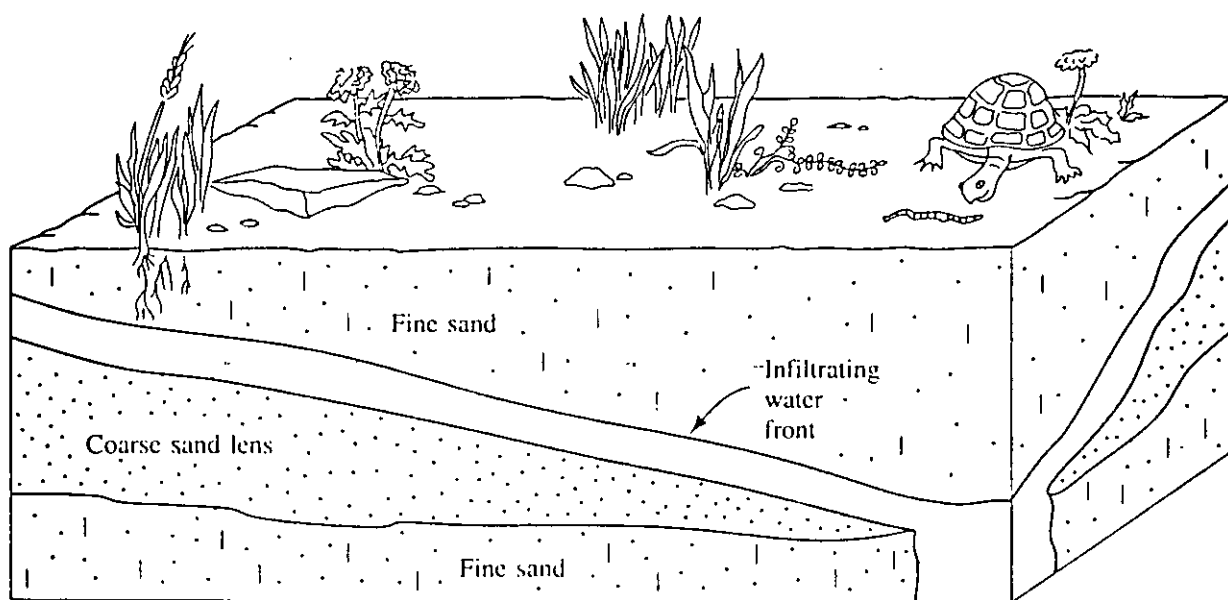
FIGURE 5.5 Different fluid saturation states for a porous media that contains water and oil.



(a)

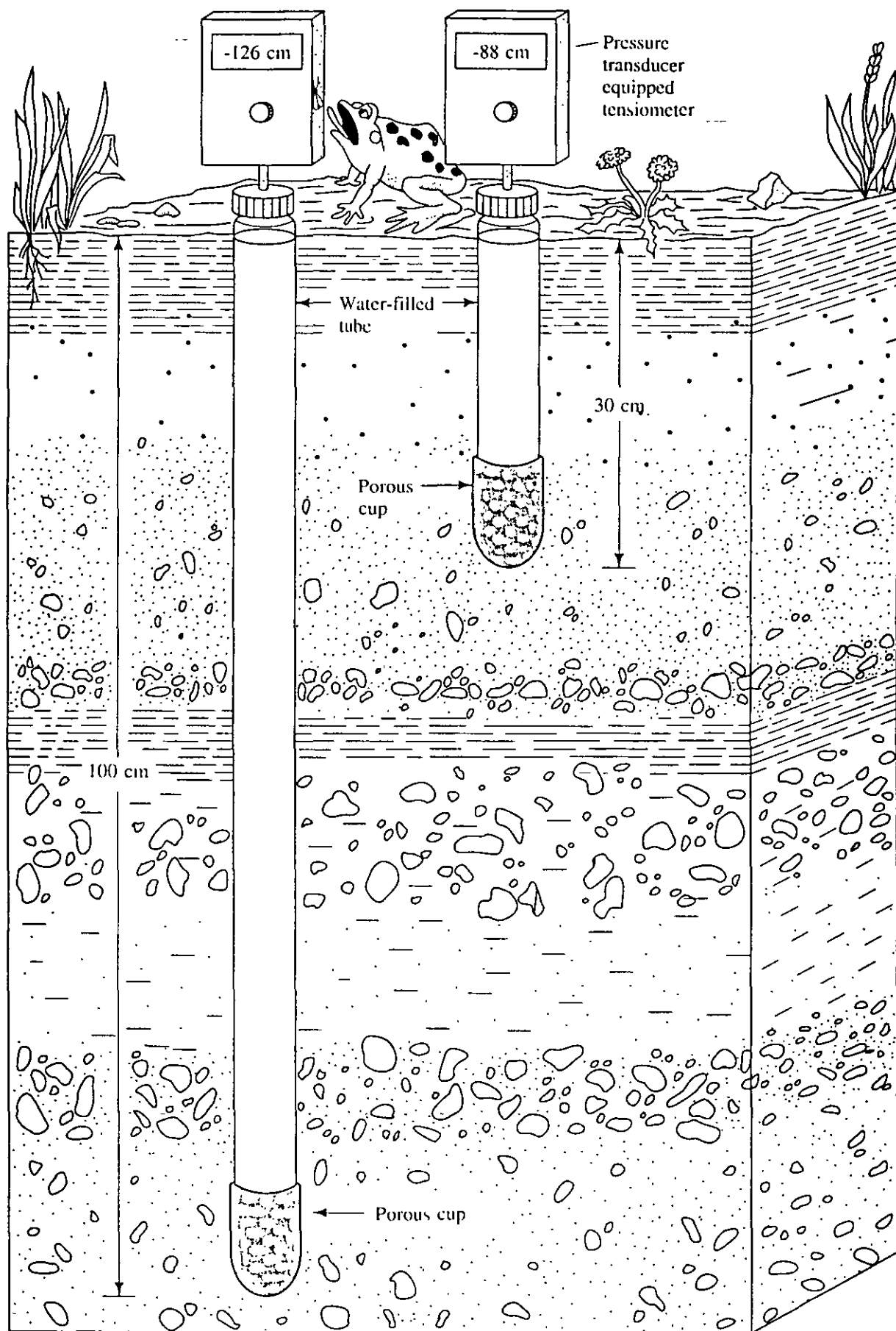


(b)



(c)

FIGURE 4.18 Preferential water movement in the vadose zone due to (a) short circuiting, (b) fingering, and (c) funneling.



4.10 Tensiometer used to measure soil-water potential in the field.

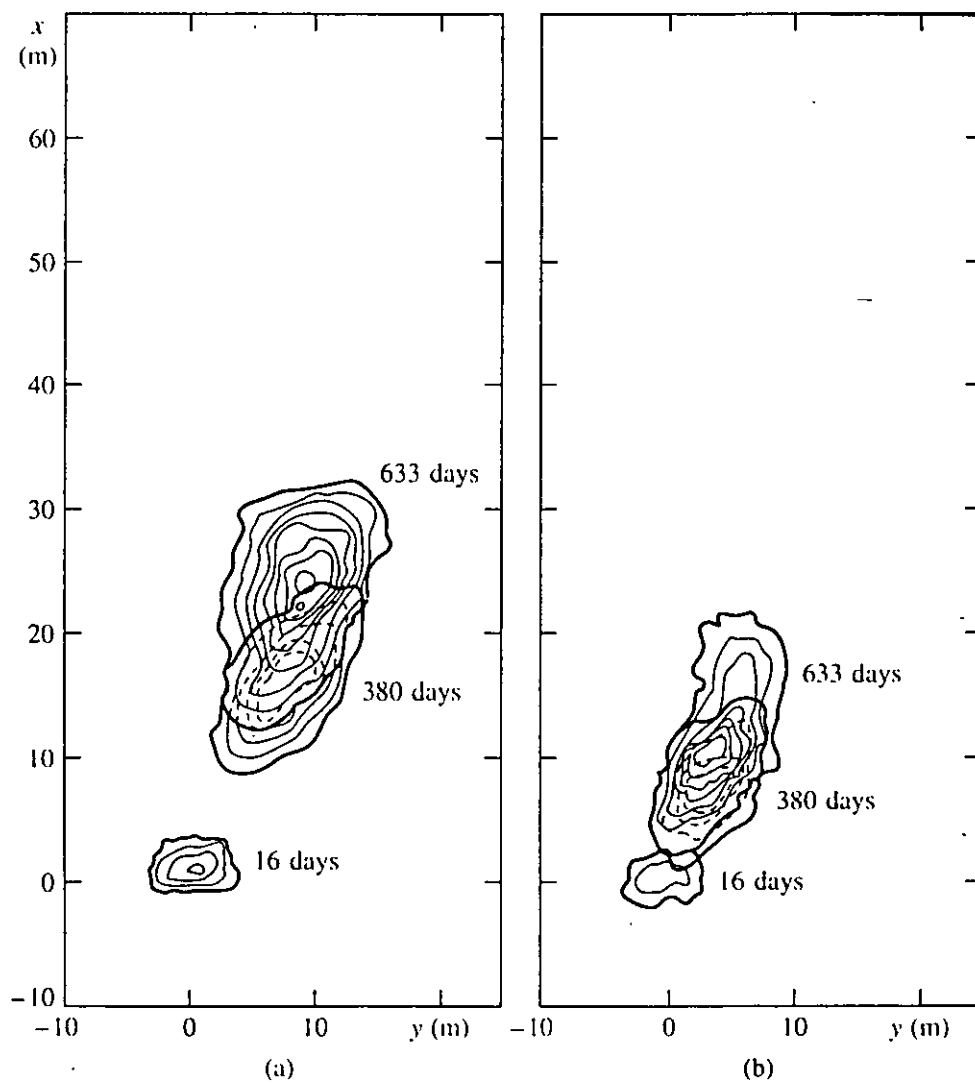


FIGURE 3.17 (a) Growth of carbon tetrachloride plume with time; (b) growth of tetrachloroethylene plume with time. Source: P. V. Roberts, M. N. Goltz, and D. M. Mackay, *Water Resources Research* 22, no. 13 (1986): 2047–59. Copyright by the American Geophysical Union.

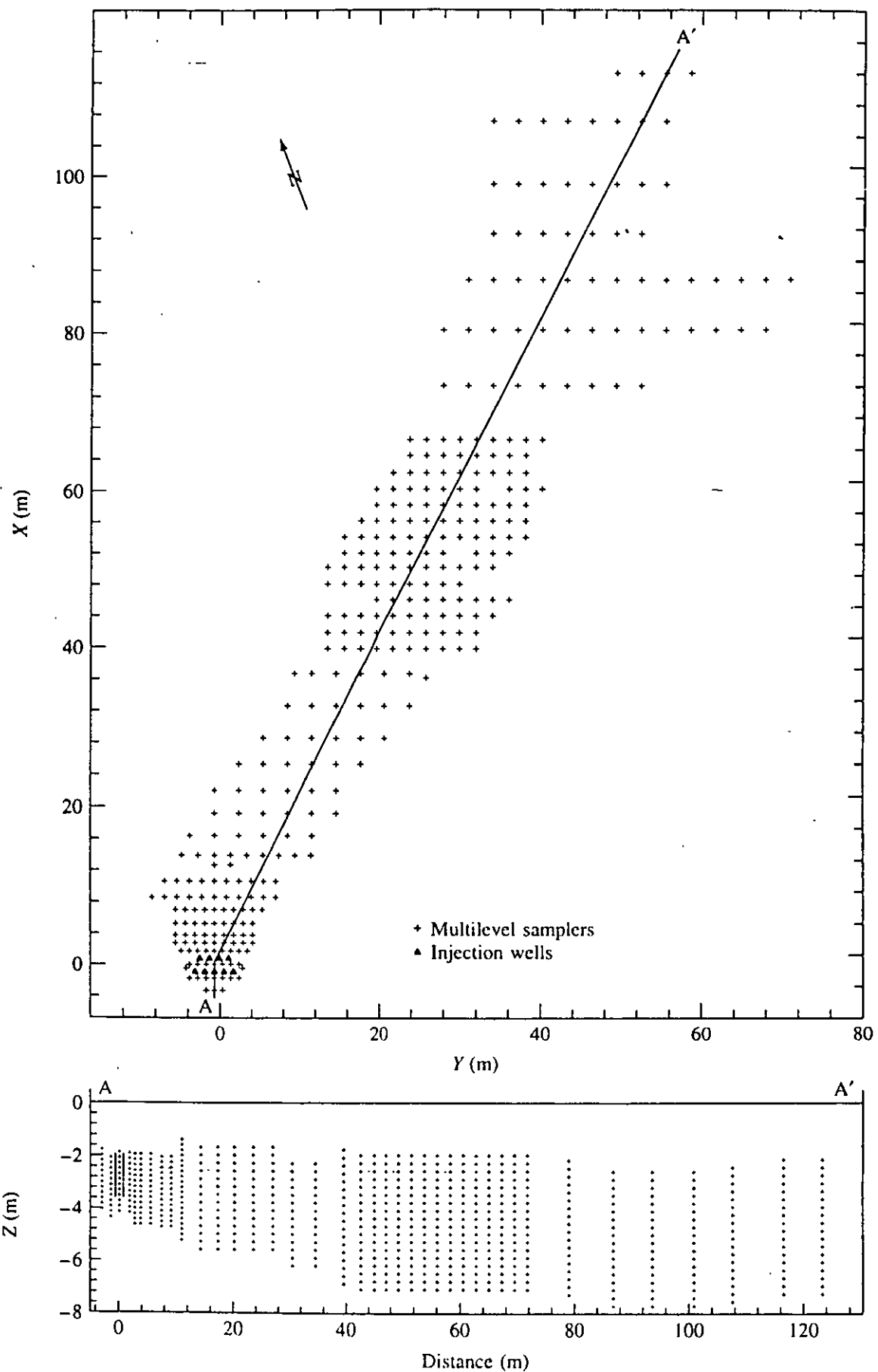


FIGURE 3.13 Location of multilevel sampling devices at the site of the Borden, Ontario, tracer test. Source: D. M. Mackay et al., *Water Resources Research* 22, no. 13 (1986):2017–30. Copyright by the American Geophysical Union.

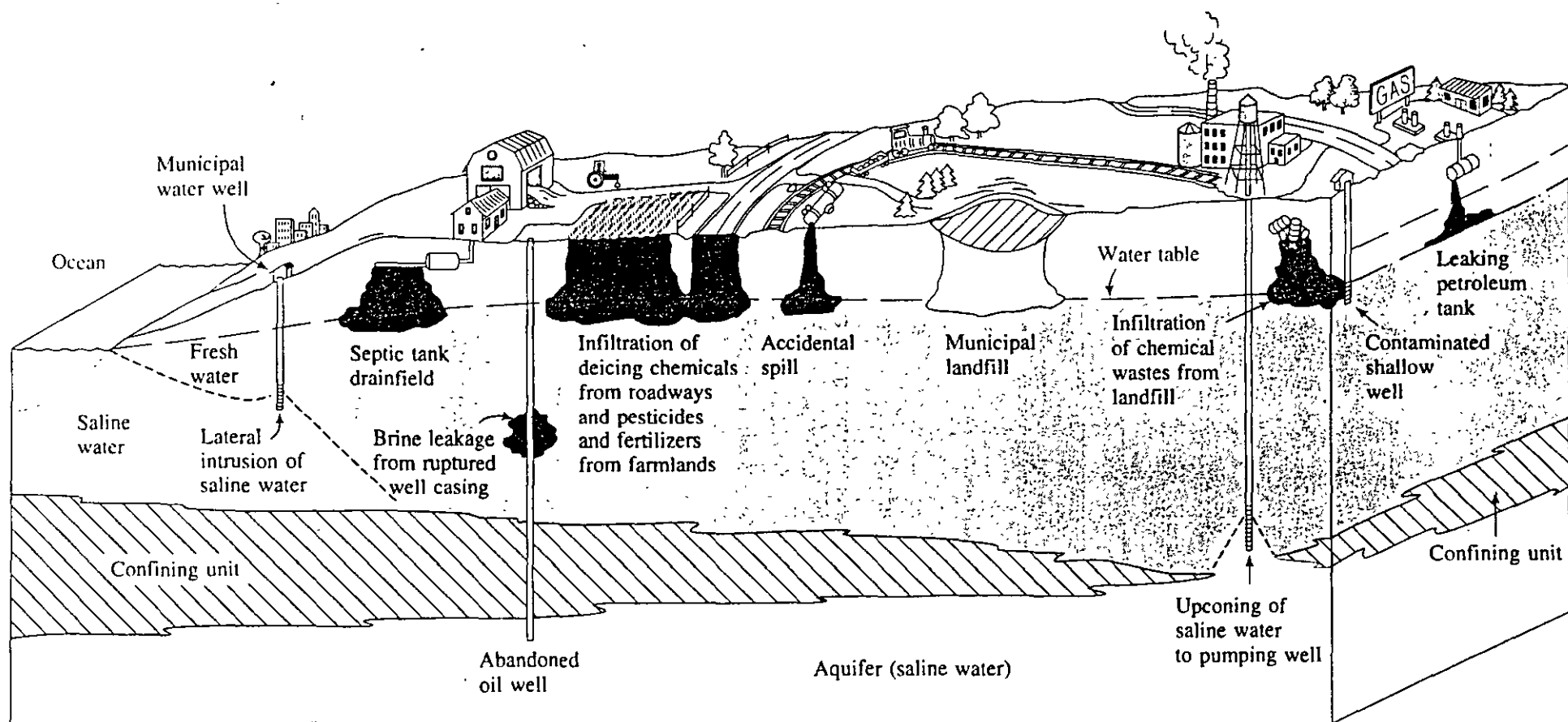


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.

Contaminant	Examples of uses
Aromatic hydrocarbons	
Acetanilide	Intermediate manufacturing, pharmaceuticals, dyestuffs
Alkyl benzene sulfonates	Detergents
Aniline	Dyestuffs, intermediate, photographic chemicals, pharmaceuticals, herbicides, fungicides, petroleum refining, explosives
Anthracene	Dyestuffs, intermediate, semiconductor research
Benzene	Detergents, intermediate, solvents, antiknock gasoline
Benzidine	Dyestuffs, reagent, stiffening agent in rubber compounding
Benzyl alcohol	Solvent, perfumes and flavors, photographic developer inks, dyestuffs, intermediate
Butoxymethylbenzene	NA ^a
Chrysene	Organic synthesis, coal tar by-product
Creosote mixture	Wood preservatives, disinfectants
Dibenz[a,h.]anthracene	NA
Di-butyl-p-benzoquinone	NA
Dihydrotrimethylquinoline	Rubber antioxidant
4,4-Dinitrosodiphenylamine	NA
Ethylbenzene	Intermediate, solvent, gasoline
Fluoranthene	Coal tar by-product
Fluorene	Resinous products, dyestuffs, insecticides, coal tar by-product
Fluorescein	Dyestuffs
Isopropyl benzene	Solvent, chemical manufacturing
4,4'-methylene-bis-2-chloroaniline (MOCA)	Curing agent for polyurethanes and epoxy resins
Methylthiobenzothiazole	NA
Napthalene	Solvent, lubricant, explosives, preservatives, intermediate, fungicide, moth repellent
o-Nitroaniline	Dyestuffs, intermediate, interior paint pigments, chemical manufacturing
Nitrobenzene	Solvent, polishes, chemical manufacturing
4-Nitrophenol	Chemical manufacturing
n-Nitrosodiphenylamine	Pesticides, retarder of vulcanization of rubber
Phenanthrene	Dyestuffs, explosives, synthesis of drugs, biochemical research
n-Propylbenzene	Dyestuffs, solvent
Pyrene	Biochemical research, coal tar by-product
Styrene (vinyl benzene)	Plastics, resins, protective coatings, intermediate
Toluene	Adhesive solvent in plastics, solvent, aviation and high-octane blending stock, diluent and thinner, chemicals, explosives, detergents
1,2,4-Trimethylbenzene	Manufacture of dyestuffs, pharmaceuticals, chemical manufacturing
Xylenes (m, o, p)	Aviation gasoline, protective coatings, solvent, synthesis of organic chemicals, gasoline
Oxygenated hydrocarbons	
Acetic acid	Food additives, plastics, dyestuffs, pharmaceuticals, photographic chemicals, insecticides
Acetone	Dyestuffs, solvent, chemical manufacturing, cleaning and drying of precision equipment
Benzophenone	Organic synthesis, odor fixative, flavoring, pharmaceuticals
Butyl acetate	Solvent
n-Butyl-benzylphthalate	Plastics, intermediate

Contaminant	Examples of uses
Hydrocarbons with specific elements (cont'd)	
1,2-Dichloropropane	Solvent, intermediate, scouring compounds, fumigant, nematocide, additive for antiknock fluids
Dicyclopentadiene (DCPD)	Insecticide manufacture
Dieldrin	Insecticides
Diiodomethane	Organic synthesis
Diisopropylmethyl phosphonate (DIMP)	Nerve gas manufacture
Dimethyl disulfide	NA
Dimethylformamide	Solvent, organic synthesis
2,4-Dinitrophenol (Dinoseb, DNBP)	Herbicides
Dithiane	Mustard gas manufacture
Dioxins (e.g., TCDD)	Impurity in the herbicide 2,4,5-T
Dodecyl mercaptan (lauryl mercaptan)	Manufacture of synthetic rubber and plastics, pharmaceuticals, insecticides, fungicides
Endosulfan	Insecticides
Endrin	Insecticides
Ethyl chloride	Chemical manufacturing, anesthetic, solvent, refrigerants, insecticides
Bis-2-ethylhexylphthalate	Plastics
Di-2-ethylhexylphthalate	Plasticizers
Fluorobenzene	Insecticide and larvicide intermediate
Fluoroform	Refrigerants, intermediate, blowing agent for foams
Heptachlor	Insecticides
Heptachlorepoxyde	Degradation product of heptachlor, also acts as an insecticide
Hexachlorobicycloheptadiene	NA
Hexachlorobutadiene	Solvent, transformer and hydraulic fluid, heat-transfer liquid
α -Hexachlorocyclohexane (= Benzenehexachloride, or α -BHC)	Insecticides
β -Hexachlorocyclohexane (β -BHC)	Insecticides
γ -Hexachlorocyclohexane (γ -BHC, or Lindane)	Insecticides
Hexachlorocyclopentadiene	Intermediate for resins, dyestuffs, pesticides, fungicides, pharmaceuticals
Hexachloroethane	Solvent, pyrotechnics and smoke devices, explosives, organic synthesis
Hexachloronorbornadiene	NA
Isodrin	Intermediate compound in manufacture of Endrin
Kepone	Pesticides
Malathion	Insecticides
Methoxychlor	Insecticides
Methyl bromide	Fumigants, pesticides, organic synthesis
Methyl parathion	Insecticides
Oxathine	Mustard gas manufacture
Parathion	Insecticides
Pentachlorophenol (PCP)	Insecticides, fungicides, bactericides, algicides, herbicides, wood preservative
Phorate (Disulfoton)	Insecticides
Polybrominated biphenyls (PBBs)	Flame retardant for plastics, paper, and textiles
Polychlorinated biphenyls (PCBs)	Heat-exchange and insulating fluids in closed systems
Prometon	Herbicides

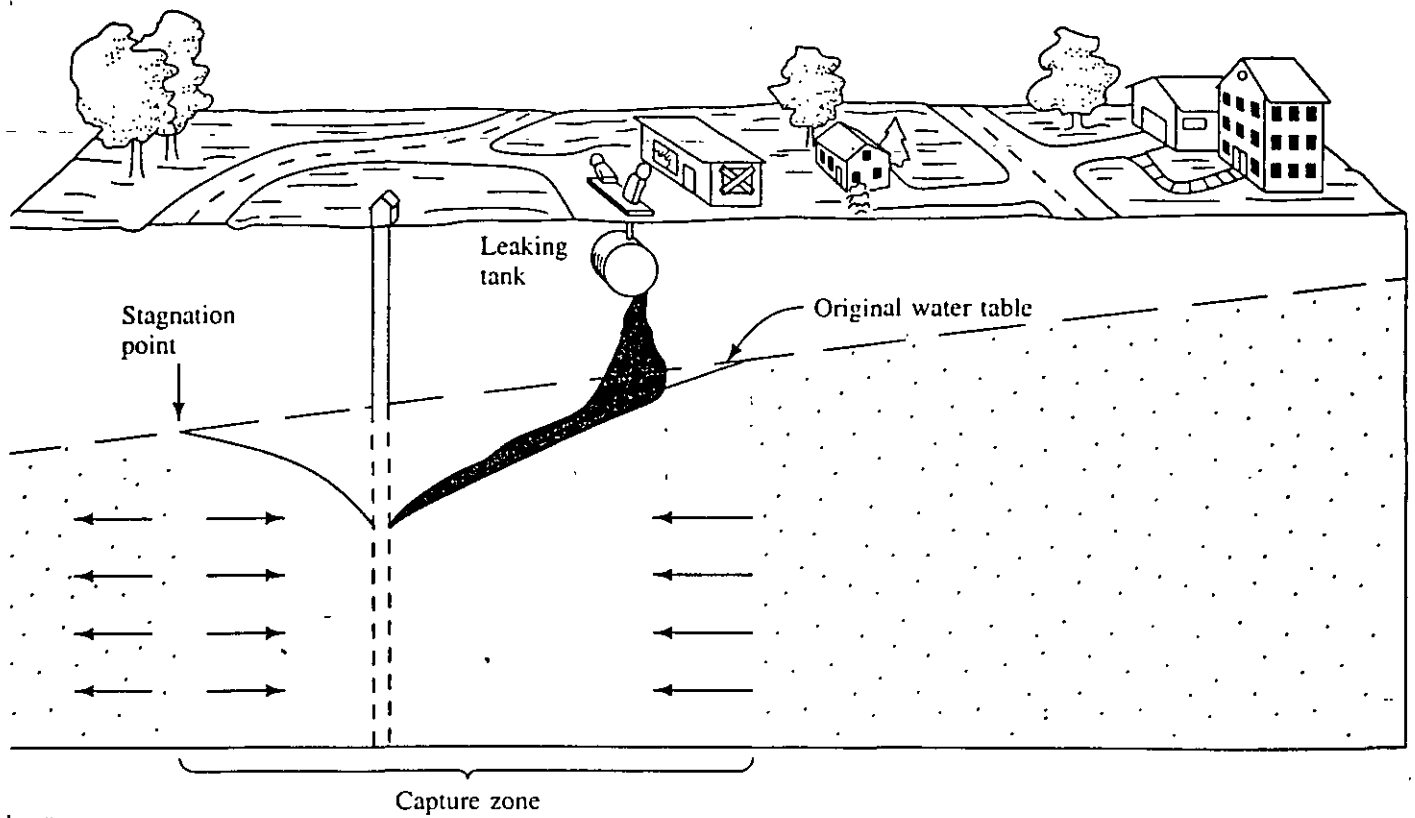
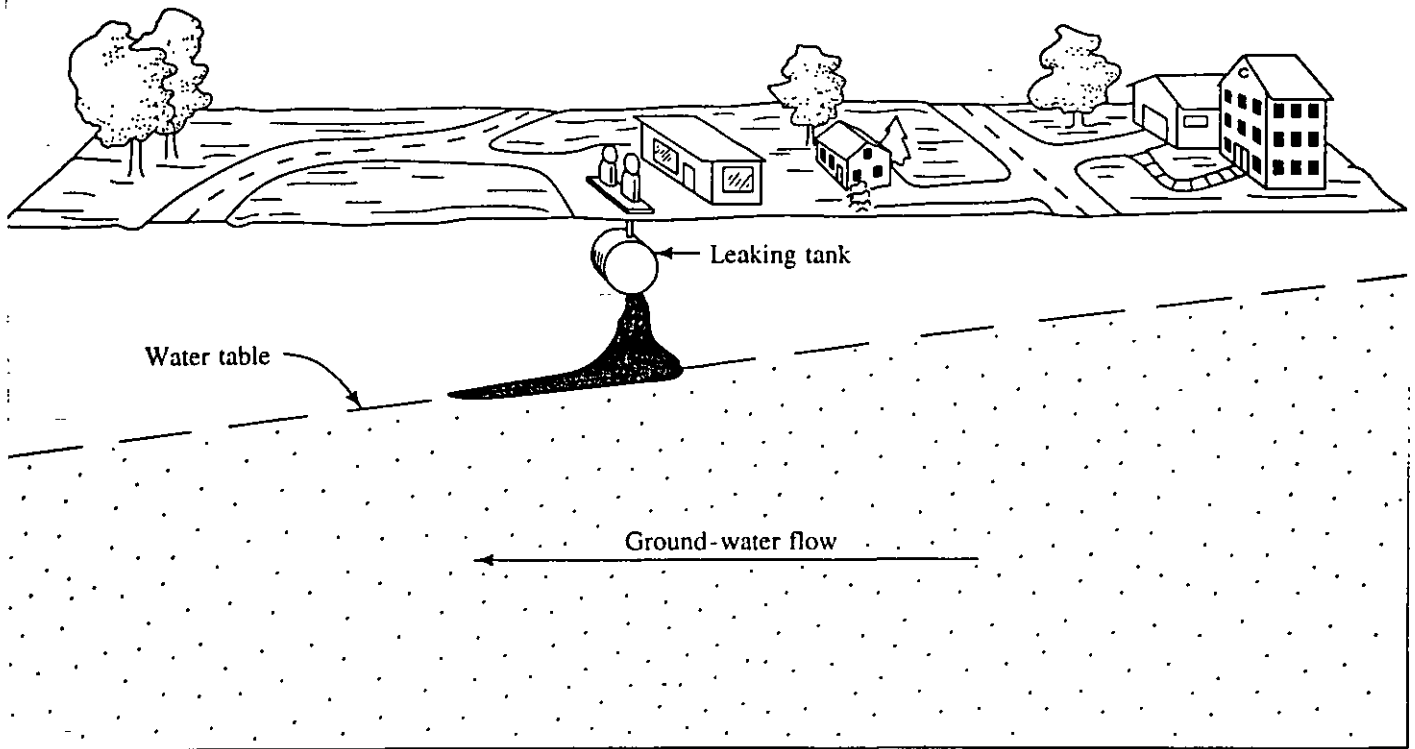
Contaminant	Examples of uses
Oxygenated hydrocarbons (cont'd)	
i-n-butyl phthalate	Plasticizer, solvent, adhesives, insecticides, safety glass, inks, paper coatings
Diethyl ether	Chemical manufacturing, solvent, analytical chemistry, anesthetic, perfumes
Diethyl phthalate	Plastics, explosives, solvent, insecticides, perfumes
Diisopropyl ether	Solvent, rubber cements, paint and varnish removers
2,4-Dimethyl-3-hexanol	Intermediate, solvent, lubricant
2,4-Dimethyl phenol	Pharmaceuticals, plastics, disinfectants, solvent, dyestuffs, insecticides, fungicides, additives to lubricants and gasolines
Di-n-octyl phthalate	Plasticizer for polyvinyl chloride and other vinyls
1,4-Dioxane	Solvent, lacquers, paints, varnishes, cleaning and detergent preparations, fumigants, paint and varnish removers, wetting agent, cosmetics
Ethyl acrylate	Polymers, acrylic paints, intermediate
Formic acid	Dyeing and finishing, chemicals, manufacture of fumigants, insecticides, solvents, plastics, refrigerants
Methanol (methyl alcohol)	Chemical manufacturing, solvents, automotive antifreeze, fuels
Methylcyclohexanone	Solvent, lacquers
Methyl ethyl ketone	Solvent, paint removers, cements and adhesives, cleaning fluids, printing, acrylic coatings
Methylphenyl acetamide	NA
Phenols (e.g., p-tert-butylphenol)	Resins, solvent, pharmaceuticals, reagent, dyestuffs and indicators, germicidal paints
Phthalic acid	Dyestuffs, medicine, perfumes, reagent
2-Propanol	Chemical manufacturing, solvent, deicing agent, pharmaceuticals, perfumes, lacquers, dehydrating agent, preservatives
2-Propyl-1-heptanol	Solvent
Tetrahydrofuran	Solvent
Varsol	Paint and varnish thinner
Hydrocarbons with specific elements (e.g., with N, P, S, Cl, Br, I, F)	
Acetyl chloride	Dyestuffs, pharmaceuticals, organic preparations
Alachlor (Lasso)	Herbicides
Aldicarb (sulfoxide and sulfone; Temik)	Insecticide, nematocide
Aldrin	Insecticides
Atrazine	Herbicides, plant growth regulator, weed-control agent
Benzoyl chloride	Medicine, intermediate
Bromacil	Herbicides
Bromobenzene	Solvent, motor oils, organic synthesis
Bromochloromethane	Fire extinguishers, organic synthesis
Bromodichloromethane	Solvent, fire extinguisher fluid, mineral and salt separations
Bromoform	Solvent, intermediate
Carbofuran	Insecticide, nematocide
Carbon tetrachloride	Degreasers, refrigerants and propellants, fumigants, chemical manufacturing
Chlordane	Insecticides, oil emulsions
Chlorobenzene	Solvent, pesticides, chemical manufacturing
Chloroform	Plastics, fumigants, insecticides, refrigerants and propellants

Contaminant	Examples of uses
Hydrocarbons with specific elements (cont'd)	
RDX (Cyclonite)	Explosives
Simazine	Herbicides
Tetrachlorobenzene	NA ^a
Tetrachloroethanes (1,1,1,2 and 1,1,2,2)	Degreasers, paint removers, varnishes, lacquers, photographic film, organic synthesis, solvent, insecticides, fumigants, weed killer
Tetrachloroethylene (or perchloroethylene, PCE)	Degreasers, drycleaning, solvent, drying agent, chemical manufacturing, heat-transfer medium, vermifuge
Toxaphene	Insecticides
Triazine	Herbicides
1,2,4-Trichlorobenzene	Solvent, dyestuffs, insecticides, lubricants, heat-transfer medium (e.g., coolant)
Trichloroethanes (1,1,1 and 1,1,2)	Pesticides, degreasers, solvent
1,1,2-Trichloroethylene (TCE)	Degreasers, paints, drycleaning, dyestuffs, textiles, solvent, refrigerant and heat exchange liquid, fumigant, intermediate, aerospace operations
Trichlorofluoromethane (Freon 11)	Solvent, refrigerants, fire extinguishers, intermediate
2,4,6-Trichlorophenol	Fungicides, herbicides, defoliant
2,4,5-Trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T)	Herbicides, defoliant
2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid (2,4,5-TP or Silvex)	Herbicides and plant growth regulator
Trichlorotrifluoroethane	Dry-cleaning, fire extinguishers, refrigerants, intermediate, drying agent
Trinitrotoluene (TNT)	Explosives, intermediate in dyestuffs and photographic chemicals
Tris-(2,3-dibromopropyl) phosphate	Flame retardant
Vinyl chloride	Organic synthesis, polyvinyl chloride and copolymers, adhesives
Other hydrocarbons	
Alkyl sulfonates	Detergents
Cyclohexane	Organic synthesis, solvent, oil extraction
1,3,5,7-Cyclooctatetraene	Organic research
Dicyclopentadiene (DCPD)	Intermediate for insecticides, paints and varnishes, flame retardants
2,3-Dimethylhexane	NA
Fuel oil	Fuel, heating
Gasoline	Fuel
Jet fuels	Fuel
Kerosene	Fuel, heating solvent, insecticides
Lignin	Newsprint, ceramic binder, dyestuffs, drilling fuel additive, plastics
Methylene blue activated substances (MBAS)	Dyestuffs, analytical chemistry
Propane	Fuel, solvent, refrigerants, propellants, organic synthesis
Tannin	Chemical manufacturing, tanning, textiles, electroplating, inks, pharmaceuticals, photography, paper
4,6,8-Trimethyl-1-nonene	NA
Undecane	Petroleum research, organic synthesis
Metals and cations	
Aluminum	Alloys, foundry, paints, protective coatings, electrical industry, packaging, building and construction, machinery and equipment
Antimony	Hardening alloys, solders, sheet and pipe, pyrotechnics

Contaminant	Examples of uses
Metals and cations (cont'd)	
Arsenic	Alloys, dyestuffs, medicine, solders, electronic devices, insecticides, rodenticides, herbicide, preservative
Barium	Alloys, lubricant
Beryllium	Structural material in space technology, inertial guidance systems, additive to rocket fuels, moderator and reflector of neutrons in nuclear reactors
Cadmium	Alloys, coatings, batteries, electrical equipment, fire-protection systems, paints, fungicides, photography
Calcium	Alloys, fertilizers, reducing agent
Chromium	Alloys, protective coatings, paints, nuclear and high-temperature research
Cobalt	Alloys, ceramics, drugs, paints, glass, printing, catalyst, electroplating, lamp filaments
Copper	Alloys, paints, electrical wiring, machinery, construction materials, electroplating, piping, insecticides
Iron	Alloys, machinery, magnets
Lead	Alloys, batteries, gasoline additive, sheet and pipe, paints, radiation shielding
Lithium	Alloys, pharmaceuticals, coolant, batteries, solders, propellants
Magnesium	Alloys, batteries, pyrotechnics, precision instruments, optical mirrors
Manganese	Alloys, purifying agent
Mercury	Alloys, electrical apparatus, instruments, fungicides, bactericides, mildew proofing, paper, pharmaceuticals
Molybdenum	Alloys, pigments, lubricant
Nickel	Alloys, ceramics, batteries, electroplating, catalyst
Palladium	Alloys, catalyst, jewelry, protective coatings, electrical equipment
Potassium	Alloys, catalyst
Selenium	Alloys, electronics, ceramics, catalyst
Silver	Alloys, photography, chemical manufacturing, mirrors, electronic equipment, jewelry, equipment, catalyst, pharmaceuticals
Sodium	Chemical manufacturing, catalyst, coolant, nonglare lighting for highways, laboratory reagent
Thallium	Alloys, glass, pesticides, photoelectric applications
Titanium	Alloys, structural materials, abrasives, coatings
Vanadium	Alloys, catalysts, target material for x-rays
Zinc	Alloys, electroplating, electronics, automotive parts, fungicides, roofing, cable wrappings, nutrition
Nonmetals and anions	
Ammonia	Fertilizers, chemical manufacturing, refrigerants, synthetic fibers, fuels, dyestuffs
Boron	Alloys, fibers and filaments, semiconductors, propellants
Chlorides	Chemical manufacturing, water purification, shrink-proofing, flame-retardants, food processing
Cyanides	Polymer production (heavy duty tires), coatings, metallurgy, pesticides
Fluorides	Toothpastes and other dentrifices, additive to drinking water
Nitrates	Fertilizers, food preservatives
Nitrites	Fertilizers, food preservatives

Contaminant	Examples of uses
Nonmetals and anions (cont'd)	
Phosphates	Detergents, fertilizers, food additives
Sulfates	Fertilizers, pesticides
Sulfites	Pulp production and processing, food preservatives
Microorganisms	
Bacteria (coliform)	
Giardia	
Viruses	
Radionuclides	
Cesium 137	Gamma radiation source for certain foods
Chromium 51	Diagnosis of blood volume, blood cell life, cardiac output, etc.
Cobalt 60	Radiation therapy, irradiation, radiographic testing, research
Iodine 131	Medical diagnosis, therapy, leak detection, tracers (e.g., to study efficiency of mixing pulp fibers, chemical reactions, and thermal stability of additives to food products), measuring film thicknesses
Iron 59	Medicine, tracer
Lead 210	NA
Phosphorus 32	Tracer, medical treatment, industrial measurements (e.g., tire-tread wear and thickness of films and ink)
Plutonium 238, 243	Energy source, weaponry
Radium 226	Medical treatment, radiography
Radium 228	Naturally occurring
Radon 222	Medicine, leak detection, radiography, flow rate measurement
Ruthenium 106	Catalyst
Scandium 46	Tracer studies, leak detection, semiconductors
Strontium 90	Medicine, industrial applications (e.g., measuring thicknesses, density control)
Thorium 232	Naturally occurring
Tritium	Tracer, luminous instrument dials
Uranium 238	Nuclear reactors
Zinc 65	Industrial tracers (e.g., to study wear in alloys, galvanizing, body metabolism, function of oil additives in lubricating oils)
Zirconium 95	NA

Chemical	MCLG (µg/L)	MCL (µg/L)	SMCL (µg/L)
Inorganic chemicals (cont'd)			
Mercury	2 ^d	2 ^d	
Nickel	100 ^f	100 ^f	
Nitrate (as N) (3)	10,000 ^d	10,000 ^d	
Nitrite (as N) (3)	1,000 ^d	1,000 ^d	
Selenium	50 ^d	50 ^d	
Silver			100 ^d
Sulfate (4)	$4 \times 10^5 - 5 \times 10^{5f}$	$4 \times 10^5 - 5 \times 10^{5f}$	
Thallium (4)	0.5 ^f	2/1 ^f	
Microbiological parameters			
<i>Giardia lamblia</i>	0 organisms ^c		
<i>Legionella</i>	0 organisms ^c		
Heterotrophic bacteria	0 organisms ^c		
Viruses	0 organisms ^c		
Radionuclides			
Radium 226 (6)	0 ^g	20 pCi/L ^g	
Radium 228 (6)	0 ^g	20 pCi/L ^g	
Radon 222	0 ^g	300 pCi/L ^g	
Uranium	0 ^g	20 µg/L (30 pCi/L) ^g	
Beta and Photon emitters (excluding radium 228)	0 ^g	4 mrem ede/yr ^g	
Adjusted gross alpha emitters (excluding radium 226, uranium, and radon 222)	0 ^g	15 pCi/L ^g	



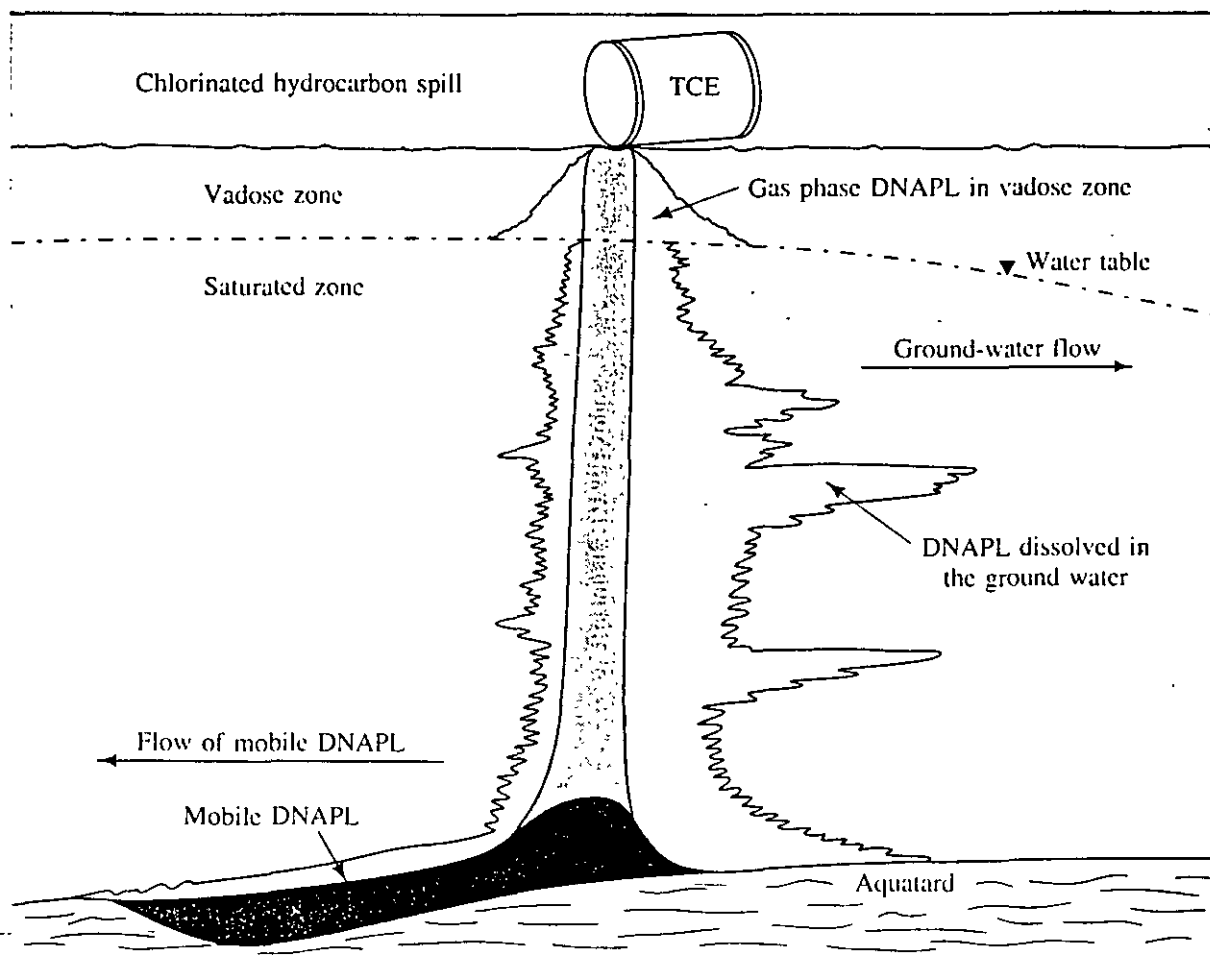
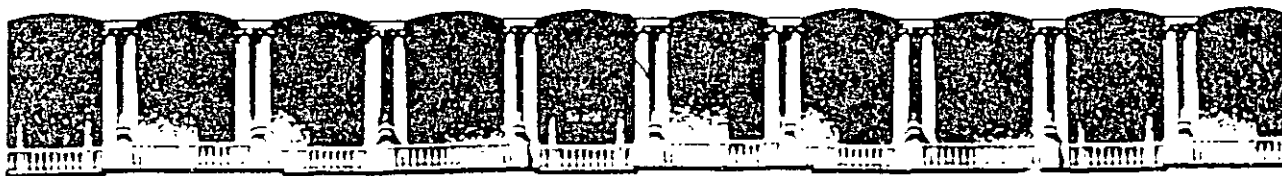


FIGURE 5.25 Distribution of a dense nonaqueous phase liquid in the vadose and saturated zone.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

GEOHIDROLOGÍA

Hidrogeoquímica de las Aguas Naturales

Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.

CONTENIDO

CAPITULO 1	INTRODUCCION
CAPITULO 2	GENERALIDADES
	2.1. EL CICLO HIDROLOGICO.
	2.2. BALANCE DEL AGUA DENTRO DEL CICLO HIDROLOGICO.
	2.3. QUIMICA DEL AGUA DEL CICLO HIDROLOGICO.
	A) COMPOSICION DEL AGUA DE LLUVIA
	B) COMPOSICION DEL AGUA DE RIOS
	C) COMPOSICION DEL AGUA SUBTERRANEA
CAPITULO 3	METODO DE TRABAJO EN LA INTERPRETACION HIDROGEOQUIMICA
	3.1. SELECCION Y MUESTREO DEL AGUA SUBTERRANEA.
	3.2. ANALISIS FISICO-QUIMICOS.
	3.3. UNIDADES USADAS PARA REPORTAR LOS ANALISIS QUIMICOS.
	3.4. ELABORACION DE TABLAS, PLANOS Y DIAGRAMAS E INTERPRETACION DE LOS MISMOS.
	A) TABLAS RESUMEN
	B) CONFIGURACIONES
	C) DIAGRAMAS TRIANGULARES
	D) RESISTIVIDADES Y SOLIDOS TOTALES DISUELTOS
CAPITULO 4	GRADO DE SATURACION DEL AGUA CON RESPECTO A LOS MINERALES MAS COMUNES
	4.1. METODOLOGIA.
CAPITULO 5	INTRUSION SALINA EN ACUIFEROS COSTEROS
	5.1. CARACTERISTICAS FISICAS DE LA INTRUSION SALINA.
	5.2. PRINCIPIO DE GYBEN-HERZBERG.
	5.3. MECANISMO DE LA INTRUSION SALINA.
	5.4. METODOS DE CONTROL DE LA INTRUSION SALINA.
	A) REDUCCION DE LA EXTRACCION
	B) RECARGA ARTIFICIAL
	C) FRONTERAS IMPERMEABLES
	D) BARRERA DE POZOS DE BOMBEO
	E) BARRERA CON POZOS DE INYECCION
	F) METODO COMBINADO

CAPITULO 6	CALIDAD DEL AGUA
	6.1. AGUA POTABLE.
	6.2. AGUA PARA RIEGO.
	6.3. AGUA PARA ABREVADERO.
	6.4. AGUA PARA LA INDUSTRIA.
CAPITULO 7	SIGNIFICADO DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL AGUA
	BICARBONATO Y CARBONATO
	BORO
	CALCIO
	COLOR
	CLORURO
	CONCENTRACION E HIDROGENO
	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA
	DUREZA
	ESTRONCIO
	FIERRO
	FLUOR
	FOSFATO
	LITIO
	MAGNESIO
	MANGANESO
	NITROGENO
	POTASIO
	RELACION DE ADSORCION DE SODIO
	SELENIO
	SILICE
	SODIO
	SOLIDOS DISUELTOS
	SULFATOS
CAPITULO 8	TRAZADORES DE AGUA SUBTERRANEA
	8.1. RESUMEN
	8.2. INTRODUCCION
	8.3. FLUORESCENCIAS
	A) URANINA
	B) EOSINA
	C) AMINORHODAMINA G EXTRA
	E) TINOPAL CBS-X
	F) EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE FLUORESCENCIA
	8.4. SALES.
	A) EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE SALES
	8.5. ESPORAS

CAPITULO 9...

ISOTOPOS AMBIENTALES EN LA GEOHIDROLOGIA

9.1. DEFINICION Y ORIGEN.

9.2. UNIDADES Y METODO DE ANALISIS.

9.3. RECTA METEORICA MUNDIAL Y LOCAL.

9.4. PROCESOS QUE MODIFICAN LA COMPOSICION
DEL AGUA SUBTERRANEA.

9.4.1. VARIACION ESTACIONAL.

9.4.2. EFECTO POR LATITUD.

9.4.3. EFECTO CONTINENTAL.

9.4.4. EFECTO POR ALTITUD.

9.4.5. EFECTO DE EVAPORACION.

9.4.6. EFECTOS GEOTERMICOS.

9.5. METODO GENERAL DE INTERPRETACION.

9.6. TRITIO.

REFERENCIAS

CAPITULO 1

INTRODUCCION

La interpretación geoquímica del agua subterránea, se utiliza junto con la geología, hidrología y geofísica, como un auxiliar para conocer y entender en una forma más completa, el funcionamiento de los acuíferos y la planeación de una mejor y más racional explotación.

Para efectuar la interpretación geoquímica, se toma en cuenta que, el agua que forma los acuíferos, proviene principalmente de la lluvia, donde parte de ésta, al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. Al circular por el subsuelo, entra en contacto con diversas rocas, disolviendo las sales minerales que las forman y produciendo cambios en su composición. La química del agua dependerá de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afecten la solubilidad, como son: las temperaturas del agua y las rocas, el área de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la previa composición química del agua y otros factores.

Por lo tanto, la composición del agua está en íntima relación con el funcionamiento general del acuífero. Es por ello que, a partir de su composición química, se puede obtener la dirección del movimiento del agua subterránea, la localización de las zonas de recarga del acuífero, los tipos de roca a través de las cuales circula, así como algunas características físicas del acuífero y la calidad del agua para usos agrícolas, ganaderos, agropecuarios, potables, turísticos e industriales.

A lo largo de las líneas de costa, en las planicies costeras, el agua de los acuíferos se encuentra en contacto sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de éstas. El contacto entre estas dos masas de agua se encuentra en equilibrio y, las modificaciones producidas en las condiciones originales del acuífero, originan cambios en la posición de dicho contacto. Al explotar los acuíferos costeros, se rompe este equilibrio, produciendo una intrusión de agua de mar, dentro del acuífero.

Debido a las diferencias en concentración y composición química, existente entre el agua de mar y el agua dulce, los métodos geoquímicos ayudan a conocer la posición y velocidad de avance de la intrusión salina.

En las muestras de agua, obtenidas tanto en pozos como en norias, galerías filtrantes y manantiales, se determinan los sólidos totales disueltos, la conductividad eléctrica, la dureza total y las concentraciones de los iones siguientes: Ca, Mg, Fe, Mn, Na, SO_4 , Cl, HCO_3 , NO_2 y NO_3 , principalmente.

Se elaboraran configuraciones de los índices más representativos, obteniéndose, a partir de ellas, las zonas de recarga, las cuales coinciden con los lugares donde se encuentran las menores de sales. Se obtiene también,

la dirección del flujo del agua subterránea, debido a que ésta va disolviendo mayor cantidad de sales conforme avanza. Así, también se pueden determinar las zonas con mayor o menor permeabilidad, ya que éstas afectarán, en mayor o menor grado, la composición y concentración de sales en el agua. A partir de la composición química del agua, se deduce el tipo de roca que forma el acuífero; así, el agua que circula a través de rocas calizas, tendrá en solución abundante calcio y carbonatos, en contraste con agua que circula a través de rocas yesíferas, la cual tendrá disueltos iones de calcio y sulfatos.

Para obtener la calidad del agua para uso doméstico, se comparan los resultados de los análisis químicos, con los límites máximos permisibles ya establecidos, obteniéndose, rápida y directamente, la clase de agua para este uso.

Con respecto a la clase de agua para riego, se utiliza la clasificación de Wilcox, a partir de la cual y por medio de las concentraciones de sodio, magnesio, calcio y la conductividad eléctrica, se conoce la clase de agua para riego a que pertenece cada muestra analizada, así como las recomendaciones relativas al tipo de suelo en que debe usarse, las prácticas del control de la salinidad y los tipos de cultivos más adecuados.

Para la industria, el agua se puede clasificar inicialmente por su dureza. Posteriormente, dependiendo del tipo de industria, el agua deberá cumplir ciertos requisitos establecidos.

REFERENCIAS

Drever, J. K. 1988. The Geochemistry of Natural Water, Second Edition. Prentice Hall. 437 p.

Hem, John, 1971. "Study and Interpretation of The Chemical Characteristics of Natural Water". G.S.W.S.P. 1473.

CAPITULO 2

GENERALIDADES

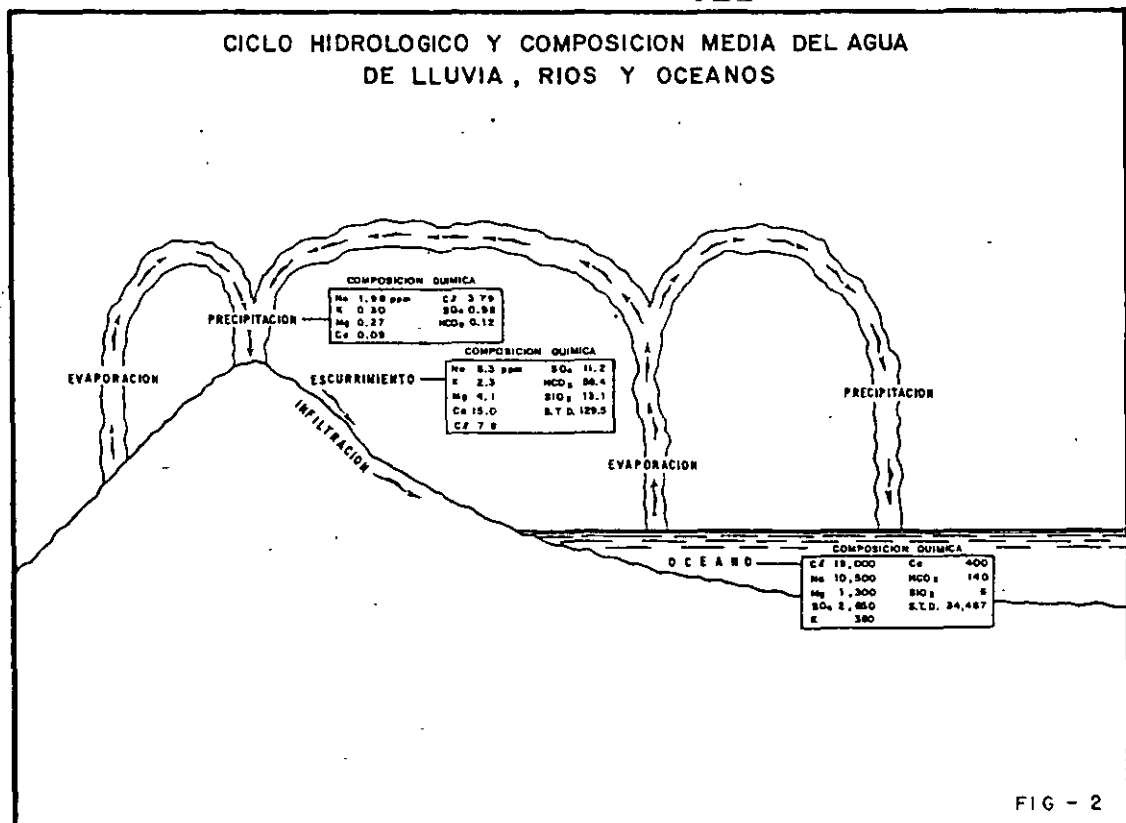
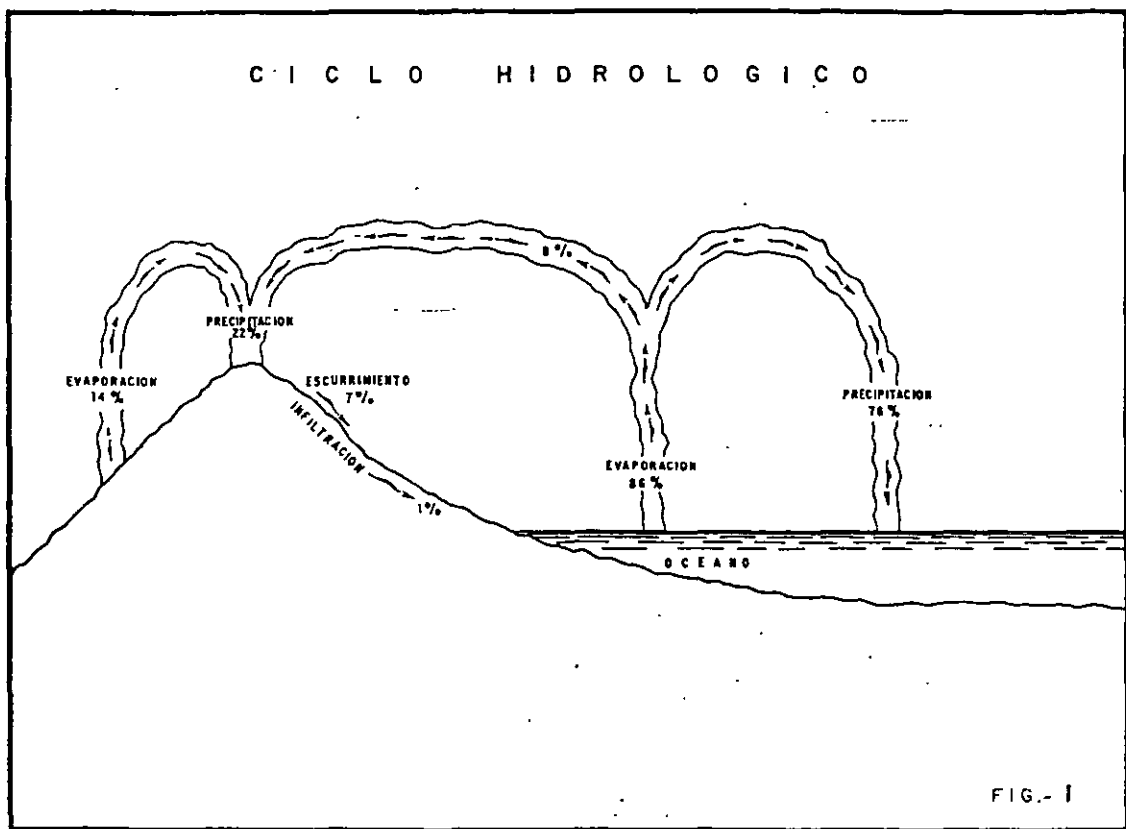
2.1. EL CICLO HIDROLOGICO

Como es sabido, el agua de lluvia que se precipita sobre los continentes, tiene tres caminos por seguir: 1) evaporarse para formar las nubes; 2) escurrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar y; 3) infiltrarse en el subsuelo para formar acuíferos. Esta agua infiltrada, posteriormente es drenada por corrientes superficiales o aflora en forma de manantiales para evaporarse o seguir su camino hacia el mar.

2.2. BALANCE DEL AGUA DENTRO DEL CICLO HIDROLOGICO

Del 100% del agua que se evapora, para incorporarse a la atmósfera en forma de nubes, el 86% proviene del mar y el 14% restante, de los continentes. Del 86% que se evapora en los océanos, el 78% se precipita en el mar y el 8% en los continentes. (Fig.2.1). El otro 14% de evaporación, se precipita sobre los continentes, haciendo un total de 22% de precipitación sobre éstos. De este 22%, se evapora el 14%, escurre hacia el mar en forma de corrientes superficiales el 7%, y el 1% restante se infiltra en el subsuelo y en forma de agua subterránea, es incorporada al mar.

El agua subterránea que forma los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, donde parte de ésta al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. El agua infiltrada, en ocasiones, pasa por zonas cercanas a cámaras magmáticas o puede permanecer atra-



pada entre sedimentos en forma de agua fósil.

Al circular por el subsuelo, entra en contacto con diversas formaciones -- geológicas, disolviendo las sales minerales que forman las rocas y produciendo cambios en su composición. Por lo tanto, la composición química del agua dependerá de la solubilidad y composición de las rocas por las que circula y de los factores que afectan la solubilidad, como son: las temperaturas del agua y las rocas; el área de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la previa composición química del agua y otros factores.

2.3. QUIMICA DEL AGUA DEL CICLO HIDROLOGICO

- a) Composición del agua de lluvia..- Al precipitarse hacia la corteza terrestre, arrastra diferentes materiales finos, que se encuentran en suspensión en la atmósfera y que, en muchos casos, son transportados por el viento. (Figura 2.2.)

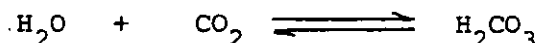
La composición química general del agua de lluvia, según Garrels y Mackenzie (1971), es la siguiente:

Na	1.98 ppm	Ca	0.09	HCO ₃	0.12
K	0.30	Cl	3.79		
Mg	0.27	SO ₄	0.58		

La concentración de elementos disueltos en la lluvia en diferentes lugares, es variable: por ejemplo, el contenido de cloro y sodio, en la precipitación que se lleva a cabo en algunas zonas costeras, es mayor de 2 y 1 ppm respectivamente, mientras que en los continentes es menor de 0.3 y 0.2 ppm, respectivamente.

Debido a la baja concentración de sales en el agua de lluvia, ésta se considera como "agua pura" y las variantes existentes entre la composición y concentración de un lugar a otro, no son de importancia en la interpretación hidrogeoquímica, salvo lugares excepcionales, donde corrientes de aire levantan una gran cantidad de partículas que posteriormente son arrastradas por la lluvia.

Al precipitarse, las moléculas de agua incorporan bióxidos de carbono de la atmósfera, formando ácido carbónico como se ilustra en la siguiente reacción.



Este ácido, tiene un gran poder de disolución y es el principal agente de ataque del agua sobre las rocas.

- b) Composición del agua de ríos. - Las corrientes superficiales, que en la mayoría de los casos son la causa inmediata de la lluvia, tienen contacto con los materiales que forman los cauces, así como con los fragmentos de roca transportados por la corriente.

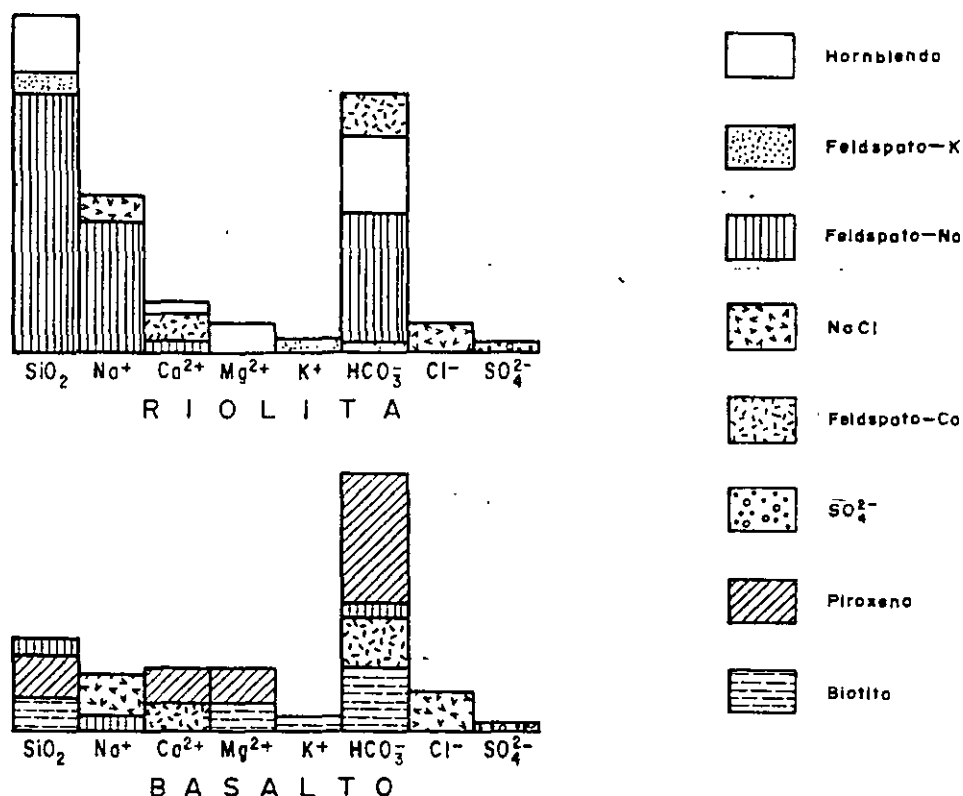
Al contacto con dichos materiales, el agua los ataca y disuelve, llegando a tener una composición dependiente del tipo de materiales con los que tiene contacto.

La composición promedio del agua de ríos, según Livingstone (1963), es la siguiente:

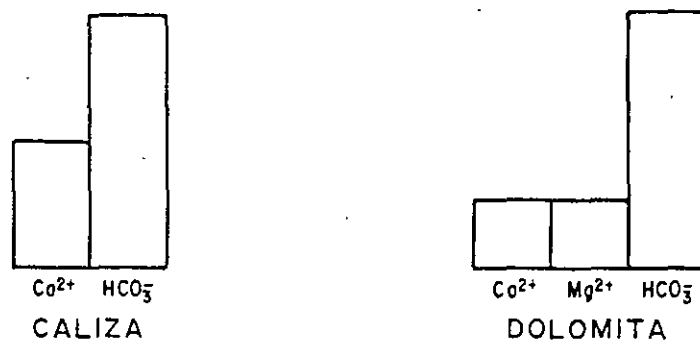
Cl	7.8 ppm	Ca	15.0	Al	0.01
Na	6.3	HCO ₃	58.4	S.T.D.	129.5
Mg	4.1	SiO ₂	13.1		
SO ₄	11.2	NO ₃	1.0		
K	2.3	Fe ⁺⁺	0.67		

- c) Composición del agua de mar. - Los océanos constituyen los mayores depósitos de agua en el mundo, y se caracterizan por tener una gran cantidad de sales disueltas. Estas sales son producto de la erosión química efectuada por el agua durante el ciclo hidrológico, desde la formación de la tierra, hasta nuestra época.

COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA SUBTERRANEA QUE CIRCULA POR DIFERENTES ROCAS



RECONSTRUCCION EN HISTOGRAMAS DE LA COMPOSICION DEL AGUA DE RIOLITAS Y BASALTOS



HISTOGRAMAS MOSTRANDO LA COMPOSICION DEL AGUA DE CALIZAS Y DOLOMITAS

Originalmente, los océanos se formaron por condensación de vapor de agua, la cual se acumuló en las partes bajas de la tierra. Se inició el ciclo hidrológico y esta agua empezó a disolver los minerales que formaban las rocas, conduciendo las sales, producto de erosión química, hacia las cuencas oceánicas. Continuó el ciclo hidrológico y con él, el aumento de sales en el agua de mar.

La composición química del agua de mar, de acuerdo con Goldberg (1957), es:

Cl	19,000 ppm	Ca	400
Na	10,500	HCO ₃	140
Mg	1,300	SiO ₂	6
SO ₄	2,650	S.T.D.	34,467
K	380		

- D) Composición Subterránea.— La composición química del agua subterránea dependerá del tipo de roca, a través de la cual circula y de otros muchos factores complejos. (Fig. 2,3.)

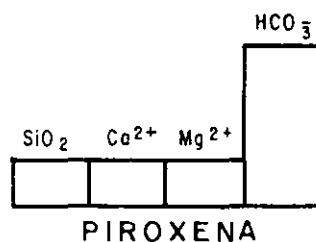
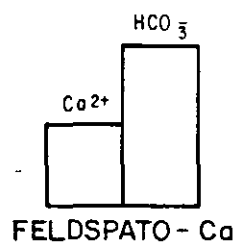
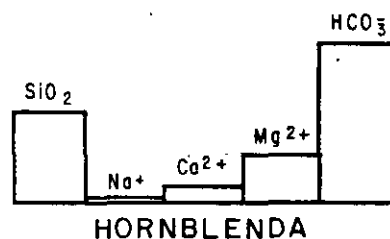
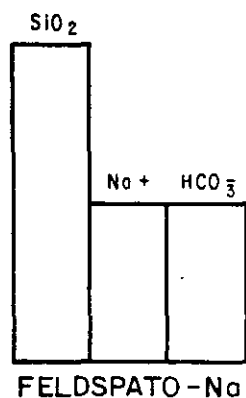
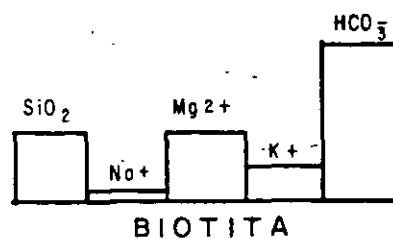
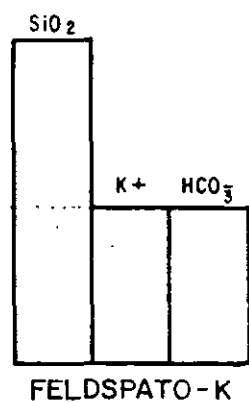
Así, tenemos que un agua que circula a través de rocas calizas, tendrá principalmente iones de calcio, carbonatos y bicarbonatos. Si circula por yesos y anhidritas, tendrá una gran cantidad de sólidos disueltos, debido a la fácil disolución de estas rocas, predominando la presencia de iones de calcio y sulfatos. El agua que circula a través de basaltos, tendrá pocos sólidos disueltos, debido a que esta roca es de difícil disolución; además tendrá aproximadamente, la misma cantidad de calcio, magnesio y sodio.

En las figs. 2.4 y 2.5 se muestra la composición química de algunas rocas y minerales comunes.

REFERENCIAS

- Custodio, E. y Llamas, M. R. 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, España.
- Drever, J. I. 1988. The Geochemistry of Natural Water, Second Edition Prentice Hall. 437 p.
- Fairbridge, R. W. "Encyclopedia of Geochemistry and Environmental Science".
- Garrels and Mackenzie, 1971. "Evolution of the Sedimentary Rocks".
- Hem, John, 1971. "Study and Interpretation of The Chemical Characteristics of Natural Water". G.S.W.S.P. 1473.

COMPOSICION QUIMICA DE ALGUNOS MINERALES

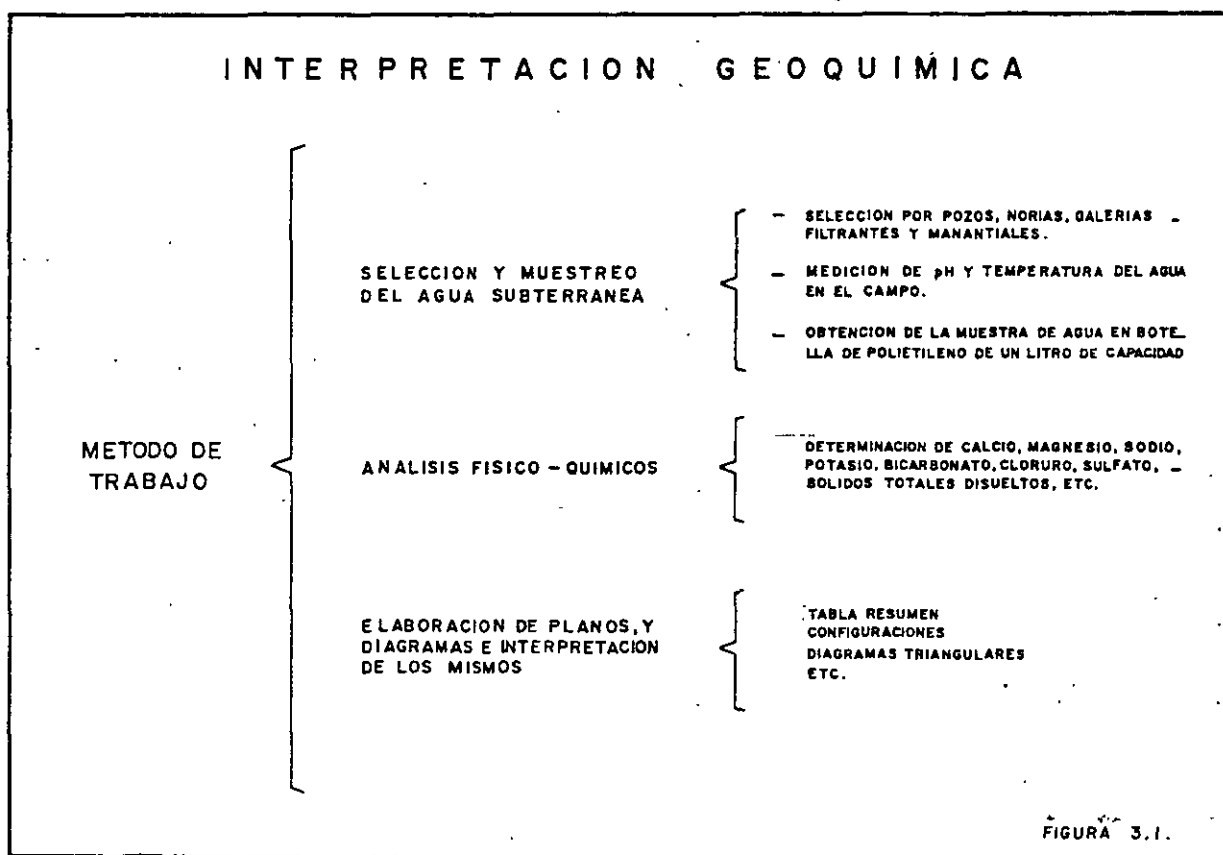


DIAGRAMAS DE BARRAS QUE MUESTRAN LA COMPOSICION DE ALGUNOS MINERALES CONSTITUYENTES DE LAS ROCAS IGNEAS

CAPITULO 3

METODO DE TRABAJO EN LA INTERPRETACION HIDROGEOQUIMICA

Para llevar a cabo una interpretación hidrogeoquímica, se procede de la siguiente manera (Fig. 3.1.)



3.1. SELECCION Y MUESTREO DEL AGUA SUBTERRANEA

Se efectúa una selección de aprovechamientos, tomando en cuenta una distribución espacial, que dependerá de las circunstancias, así como el tipo de aprovechamiento ya sea pozo, noria, manantial, galería, etc, ya que en ocasiones, los diferentes tipos de aprovechamientos, corresponden a sistemas acuíferos diferentes.

El muestreo se debe efectuar usando frascos de polietileno de un litro de capacidad, con doble tapa. Los frascos deben llenarse totalmente para evitar la gasificación de algunos componentes que podría provocar reacciones químicas y alterar la composición de la muestra que es representativa de enormes volúmenes de agua.

Al obtener la muestra en el campo, se deben tomar datos relativos a la localización y características del aprovechamiento, así como la temperatura ambiente, la temperatura del agua al momento del muestreo, el pH y la resistividad eléctrica del agua.

3.2. ANALISIS FISICO-QUIMICOS

Una vez obtenidas las muestras, se remiten al laboratorio en donde se efectúan los análisis fisicoquímicos, determinándose las concentraciones de los principales cationes (Ca, Mg, Na, K), aniones (HCO_3 , Cl, SO_4) los sólidos totales disueltos y, dependiendo del tipo de terreno, se sugiere la determinación de otros índices, por ejemplo, para un terreno con trazas de termalismo, sería conveniente la determinación de litio y boro, así para otros casos, se requeriría determinar FeO, MnO, SiO_2 , F, etc.

SOLIDOS TOTALES DISUELTOS.- Los sólidos totales disueltos representan el residuo que queda al evaporar cierta cantidad del agua. No son representativas de la suma de las concentraciones de los diferentes elementos analizados, ya que, durante la evaporación en el laboratorio, los sólidos volátiles se pierden y los bicarbonatos se convierten en carbonatos. También quedan retenidas cierta cantidad de agua, de cristalización que no alcanza a evaporarse. Por lo tanto, el valor de los sólidos totales disueltos, sólo proporciona un índice del ataque del agua sobre las formaciones geológicas y de la solubilidad y facilidad de remoción de las sales del subsuelo.

3.3. UNIDADES USADAS PARA REPORTAR LOS ANALISIS QUIMICOS

Las unidades más comunes, en las que se reportan los análisis químicos efectuados a muestras de agua, son: partes por millón y miliequivalentes por litro.

Las "partes por millón", son unidades de peso por peso, que equivalen a un miligramo de soluto, por un kilogramo de solución. La unidad de peso por volumen, se tiene al asumir que un litro de solución, pesa un kilogramo; entonces, tenemos que una "parte por millón", es igual a un "miligramo por litro".

Debido a que las unidades anteriores están dadas en peso, no hay equivalencia entre iones de diferente especie, o sea, que no se pueden mezclar, debido a que tienen diferente peso molecular y carga eléctrica. Por lo tanto, para efectuar correlaciones entre ellos, se utilizan unidades equivalentes. La unidad más usada es el "miliequivalente por litro", la cual se obtiene multiplicando los "miligramos por litro", por $\frac{C}{PA}$; donde "C" es la carga del ion y "PA" es el peso atómico.

Otra unidad conocida y usada en Química, es "moles por litro", siendo una mole, el peso atómico de una sustancia en gramos.

Las abreviaciones usadas en las unidades mencionadas, son las siguientes:

ppm	partes por millón
mg/l	miligramos por litro
me/l	miliequivalentes por litro
mol/l	moles por litro

3.4. ELABORACION DE TABLAS, PLANOS Y DIAGRAMAS E INTERPRETACION DE LOS MISMOS

- Tablas resumen.- Para controlar y tener una idea en conjunto de la composición, concentración y calidad del agua, se recomienda elaborar tablas en las cuales se resuma toda la información obtenida.
- Configuraciones.- Con el objeto de tener una distribución espacial de la calidad del agua y con ella determinar cualitativamente las zonas de recarga, la dirección del flujo del agua subterránea, así como tener idea de algunas propiedades físicas del

acuífero, se elaboran configuraciones de las determinaciones efectuadas.

Con el objeto de ilustrar este punto, en las Figs. 3.2. y 3.3. se muestran las configuraciones de sólidos totales disueltos y conductividad eléctrica, para los Valles de Aldama y Samalayucan, Chih.

En el plano de curvas isovalores de sólidos totales disueltos de Aldama, se observa que las zonas con menores concentraciones se encuentran en el extremo noreste de la ciudad de Chihuahua y en el flanco este de la Sierra de La Gloria, coincidiendo éstas con las zonas de recarga del acuífero, donde el agua de lluvia se in filtra.

Las concentraciones aumentan de la ciudad de Chihuahua hacia la de Aldama, indicando que el agua subterránea fluye en dicha dirección al ir disolviendo sales conforme avanza.

Las concentraciones aumentan de la Sierra de La Gloria, hacia el noreste y después hacia el sureste, a lo largo del Río Chuviscar, mostrando que la dirección del agua subterránea es hacia el sureste.

En la configuración de conductividades del área Samalayuca-Juárez, Fig. 3.3. se observa la curva 1000 al pie de la Sierra Juárez y de 1500 hacia el sureste de ella. Esta distribución, indica que la Sierra de Juárez corresponde a una zona de recarga, donde el agua de lluvia se infiltra y fluye hacia el sureste. Observaciones similares se hacen en Samalayuca, donde se deduce un flujo de agua de sur a norte y noreste, uniéndose con el de la Sierra de Juárez, para continuar hacia el Río Bravo.

Por lo tanto, de estas configuraciones se obtiene, entre otras cosas, la zona de alimentación del acuífero y dirección del flujo, el cual coincide con el encontrado por métodos piezométricos.

En la Fig. 3.4. se muestra un corte geológico ilustrativo, que relaciona la zona de recarga y la dirección del movimiento del agua subterránea, con la concentración y composición química del agua.

- c) Diagramas triangulares.- Con el objeto de obtener, en forma rápida e ilustrativa, los diferentes tipos o familias de agua, de acuerdo al catión y anión predominante, se forman diagramas triangulares, como el que se muestra en la Fig. 3.5. En el triángulo de la izquierda de este diagrama se grafican, en porcentaje de me/l, los principales cationes y, en el triángulo de la derecha también en las mismas unidades, los principales aniones. En los vértices de estos triángulos se definen aguas cálcicas, magnesianas, bicarbonatadas, etc., si las muestras se encuentran localizadas en los vértices con los porcentajes mayores al 50% de cal-

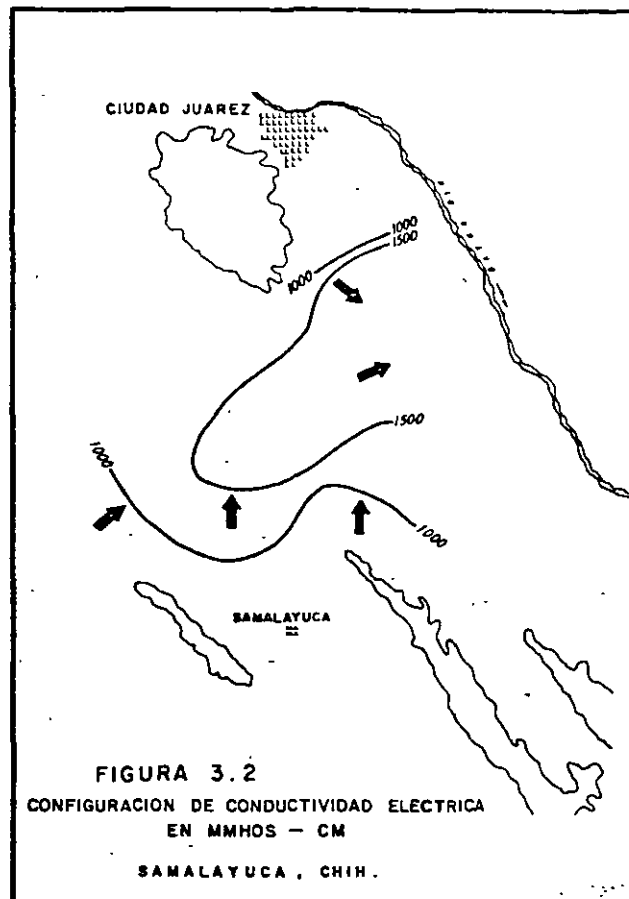
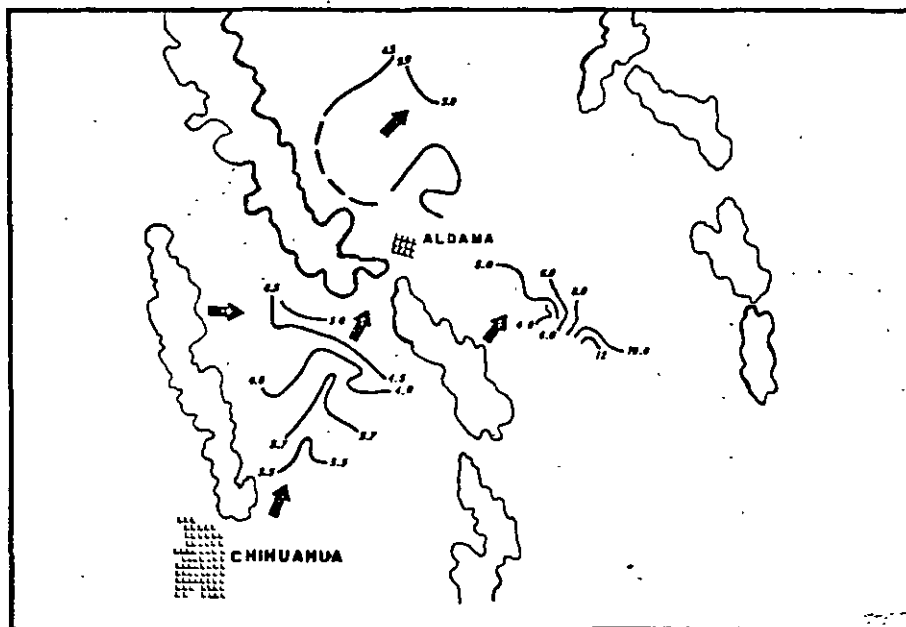


FIG. 3.3. CONFIGURACION DE SOLIDOS TOTALES EN ME/L; CHIHUAHUA-ALDAMA, CHIH.



ZONA DE
RECARGA

ILUSTRACION QUE MUESTRA LA RELACION ENTRE LA ZONA
DE RECARGA Y LA DIRECCION DEL MOVIMIENTO DEL AGUA
SUBTERRANEA, CON LA CONCENTRACION Y COMPOSICION
QUIMICA DEL AGUA

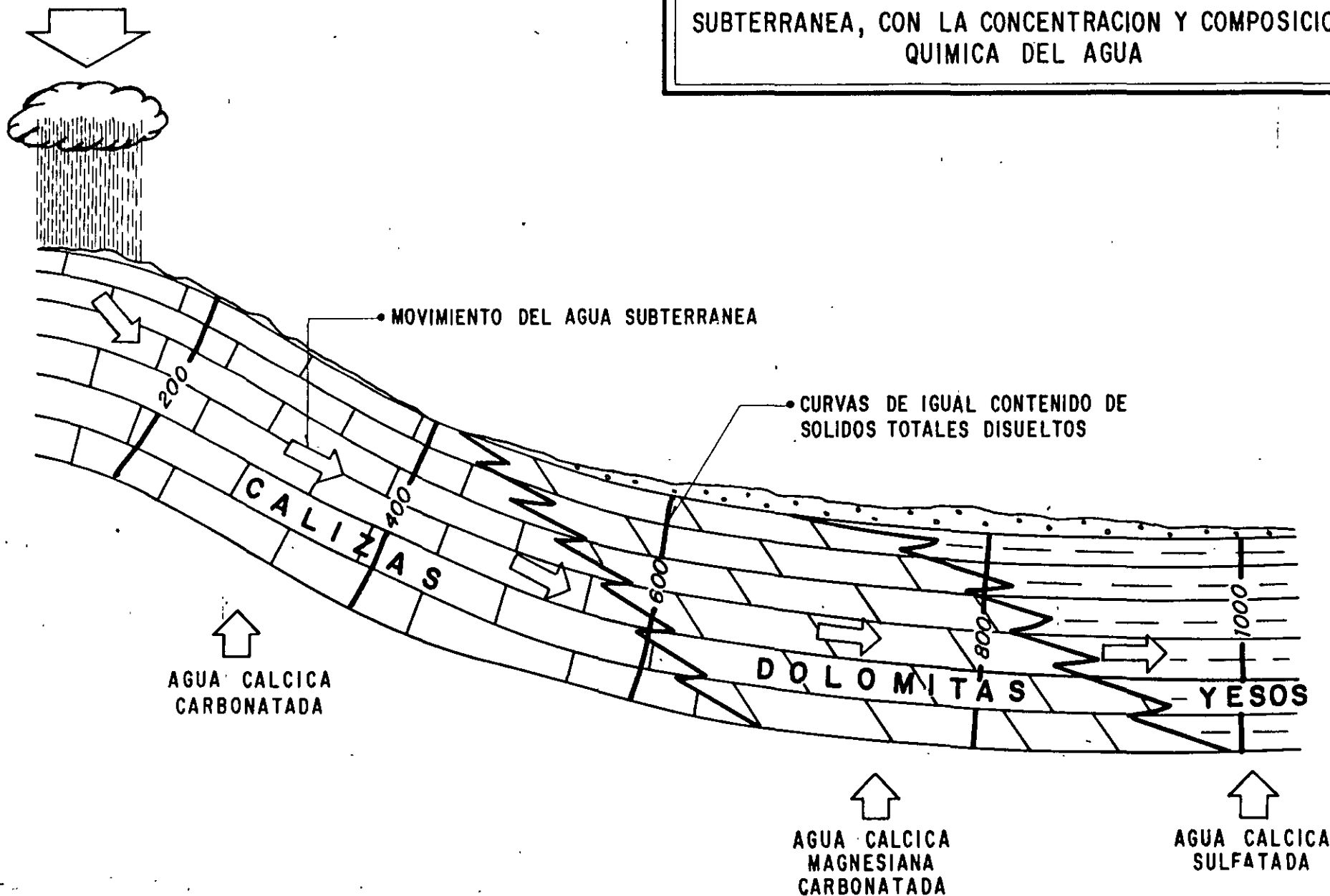


FIGURA Nº 3.4.

DIAGRAMA TRIANGULAR

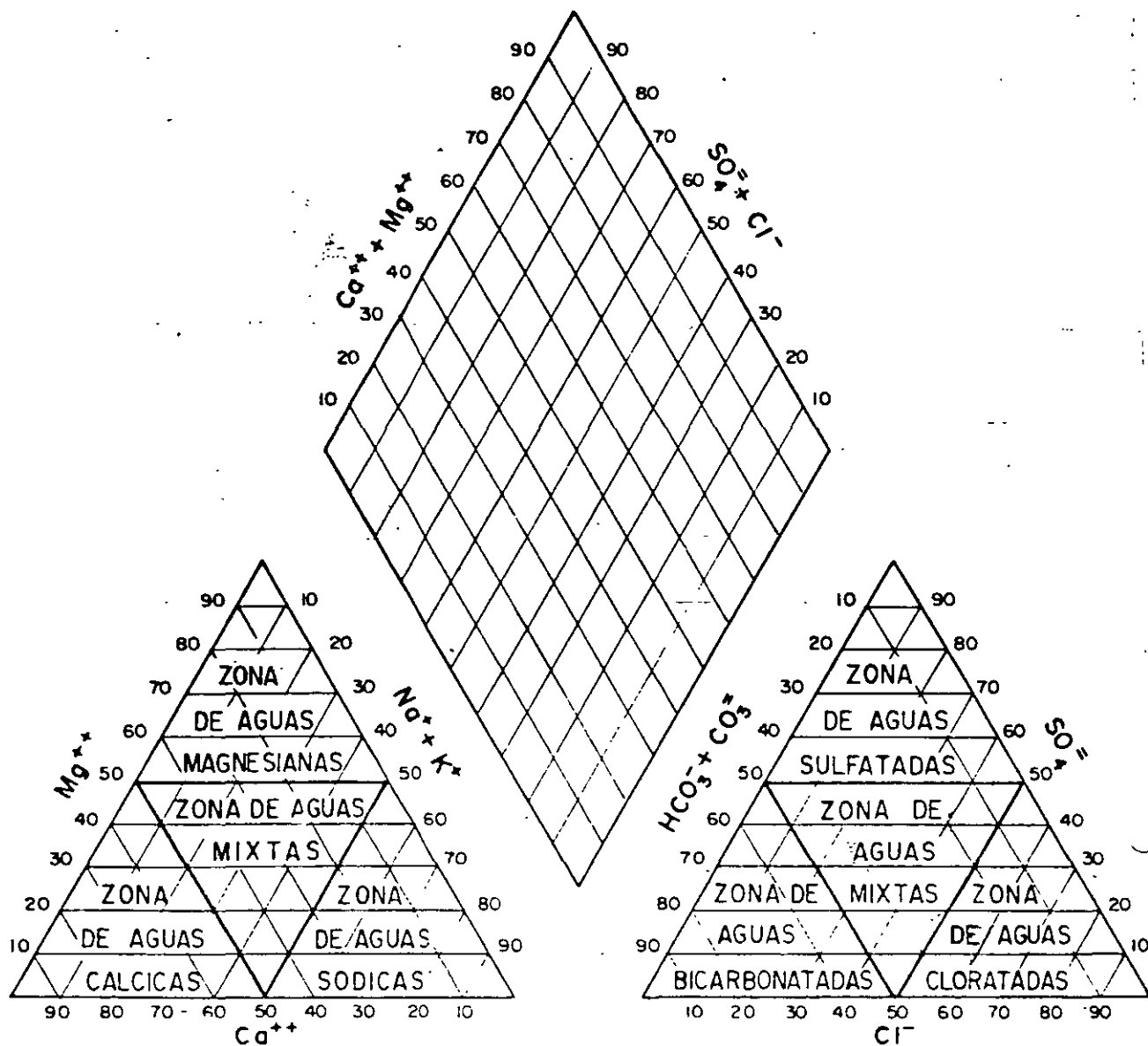


FIG.- 3.5.

cio, magnesio, bicarbonato, etc., respectivamente. Se define como agua mixta, la que se grafica al centro del triángulo, por no existir un ion que predomine.

En la Fig. 3.6. se muestra un diagrama triangular, en el cual se graficaron muestras de agua del Valle de Tecomán-Manzanillo, Col., observándose la existencia de agua de tipo sódico-clorurada, - mixta-mixta y cálcico-bicarbonatada.

El tipo o familia de agua, se vacía sobre un plano delimitado zonas con agua de diferente composición. En la Fig. 3.7. se muestra el plano correspondiente al diagrama triangular de la zona de Tecomán-Manzanillo, en el cual se delimitaron las zonas correspondientes a las familias de agua mencionadas. El agua sódico-clorurada, es consecuencia directa de contaminación del acuífero, con agua de mar. El agua mixta-mixta, es una mezcla de aguas de diferentes tipos y en la cual no predomina ningún ion en especial. El agua cálcico-bicarbonatada, es el producto de la disolución de rocas calizas por el agua.

- d) Resistividades y sólidos totales disueltos.- La resistividad es una medida indirecta de los sólidos totales disueltos (S.T.D.) - que contiene el agua, ya que sus valores son inversamente proporcionales a éstos últimos. Tomando en cuenta esta característica, se forma una gráfica (Fig. 3.8.) con la cual, se pueden calcular resistividades a partir de sólidos totales disueltos, o viceversa. Los sólidos totales disueltos calculados, en algunos casos, ayudan a complementar la información de configuraciones de una forma rápida y económica. Las resistividades calculadas, se pueden utilizar para hacer correlaciones con geofísica.

En la Fig. 3.9. se muestra un ejemplo de la relación entre resistividad y S.T.D., el cual corresponde al área de Sonoyta, Son. - En ella se encontró que, en ciertos lugares, el agua subterránea tenía concentraciones de S.T.D., muy altas y se encontraba rodeado por pozos con agua de mejor calidad. Se efectuaron sondeos geofísicos de resistividad, los cuales al ser interpretados, mostraron la existencia de lentes localizados de muy baja resistividad, los cuales corresponden a agua salobre atrapada entre los sedimentos.

Existen otros tipos de clasificación y representación de análisis químicos, como las de Chase Plamer, Shoeller, Souline, Wilcox, etc.

REFERENCIAS.

Freeze, A. and Cherry, J. 1979. Groundwater. Prentice Hall. 604 p.

Hem, John, 1971. "Study and Interpretation of The Chemical Characteristics of Natural Water". G.S.W.S.P. 1473

Piper, A.M., 1944. "A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analyses". Am. Geophys. Union Trans.

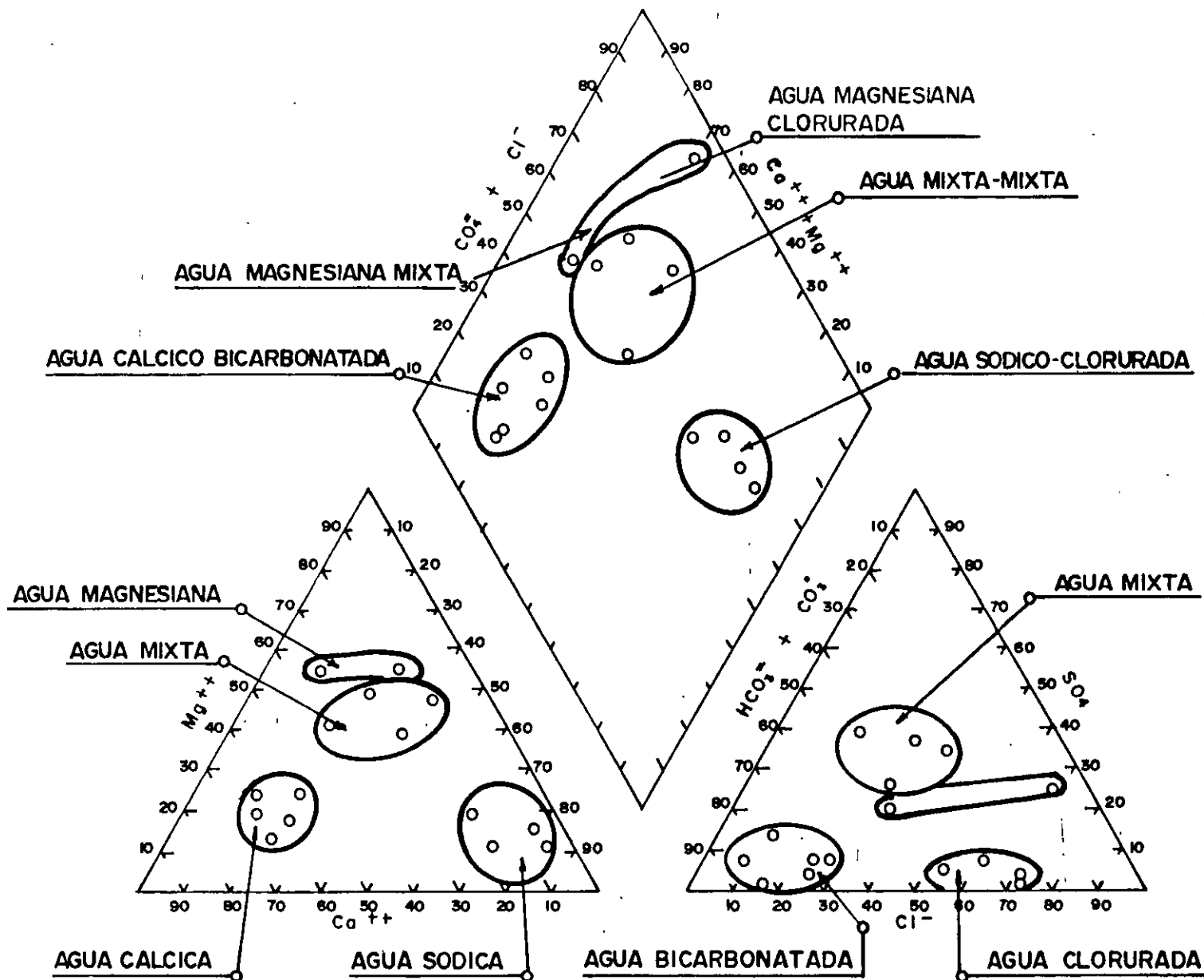


Fig.- 3.0.

ZONIFICACION DE TIPOS DE AGUA SEGUN
SU COMPOSICION QUIMICA

VALLE DE TECOMAN - MANZANILLO, COL.

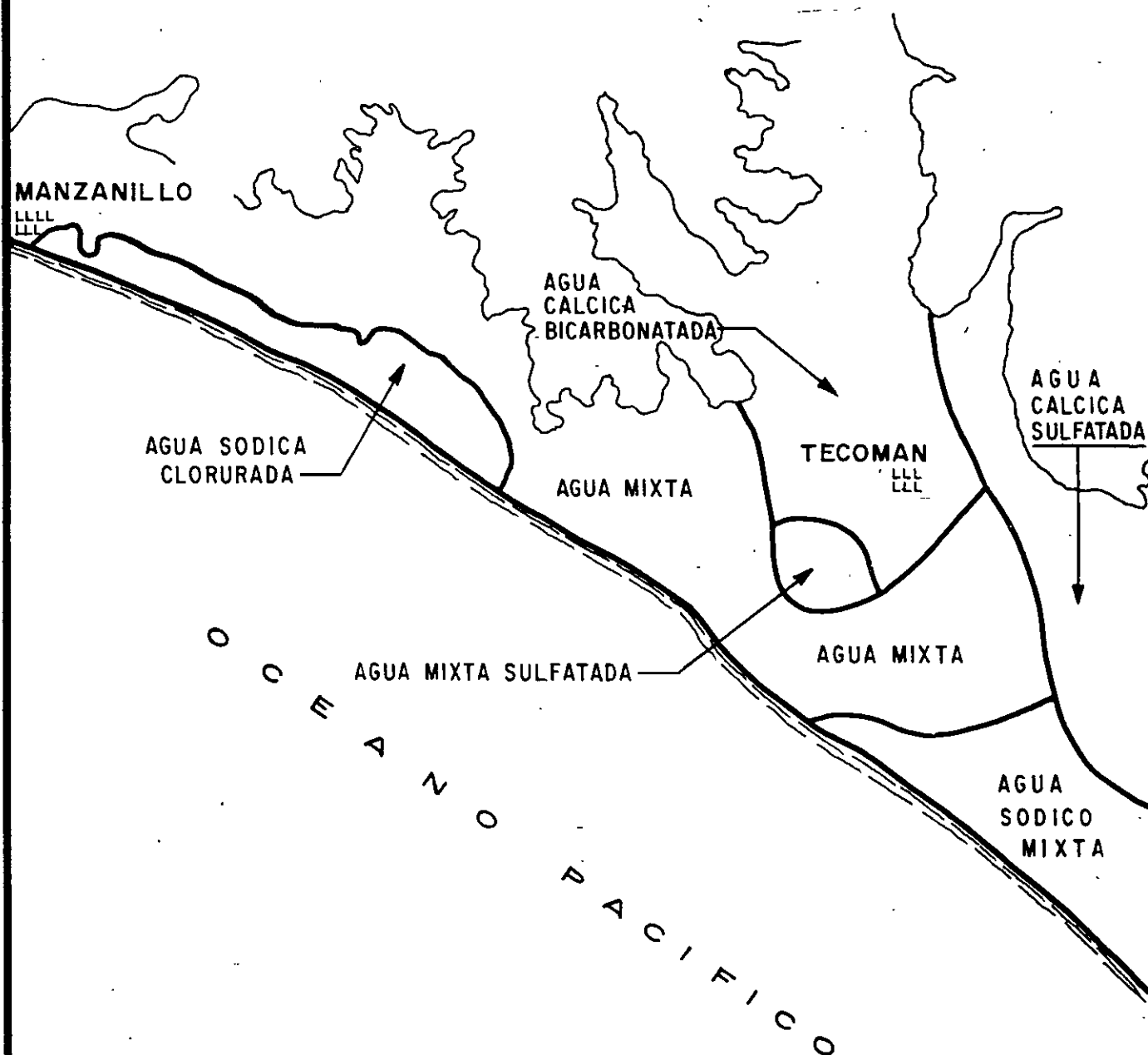


FIGURA 3.7.

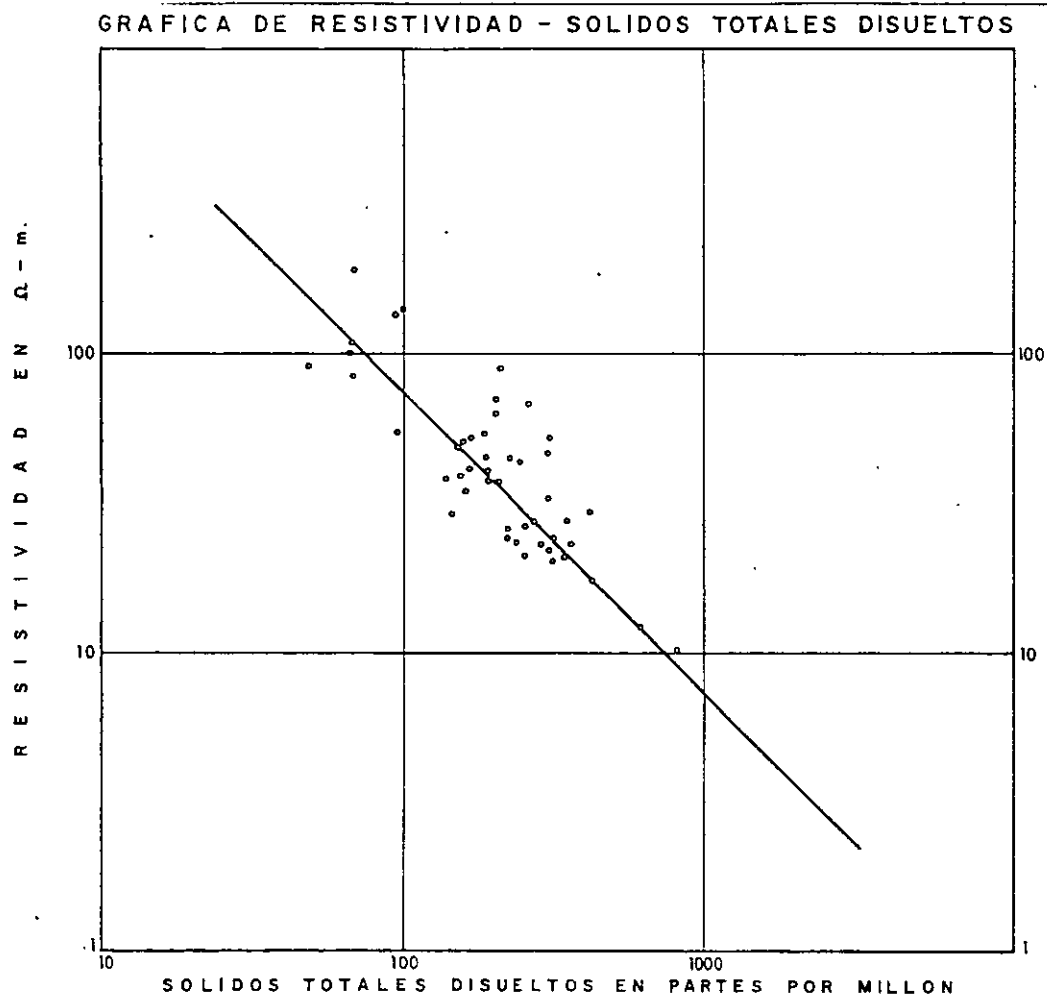


FIG. 13

FIGURA 3.8.

DETERMINACION DE MANTOS DE AGUA SALOBRE SEPULTADOS, POR MEDIO DE GEOFISICA E HIDROGEOQUIMICA

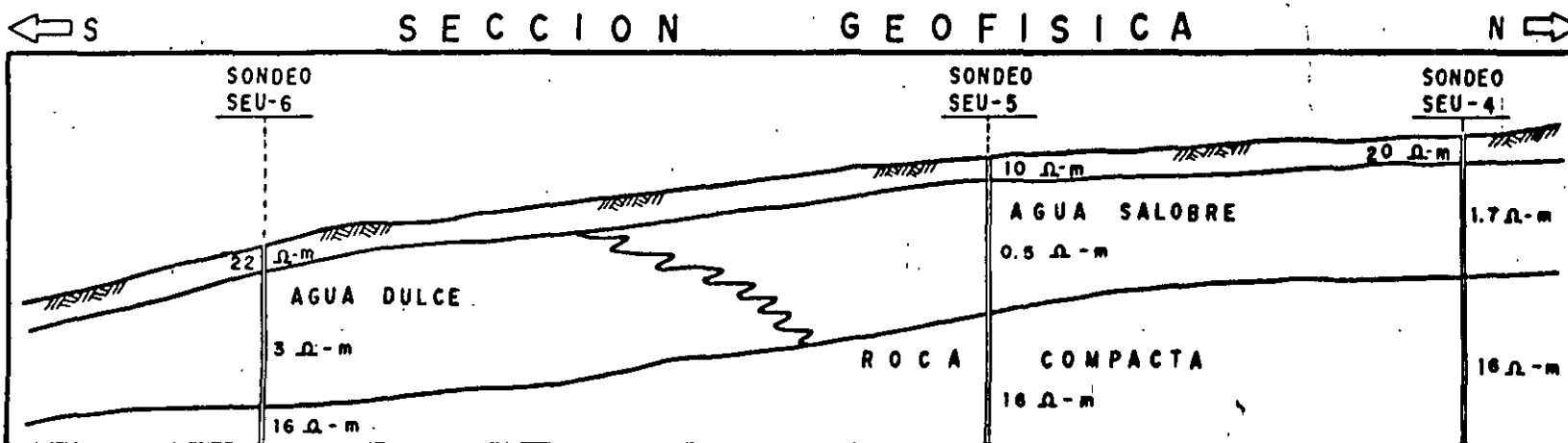
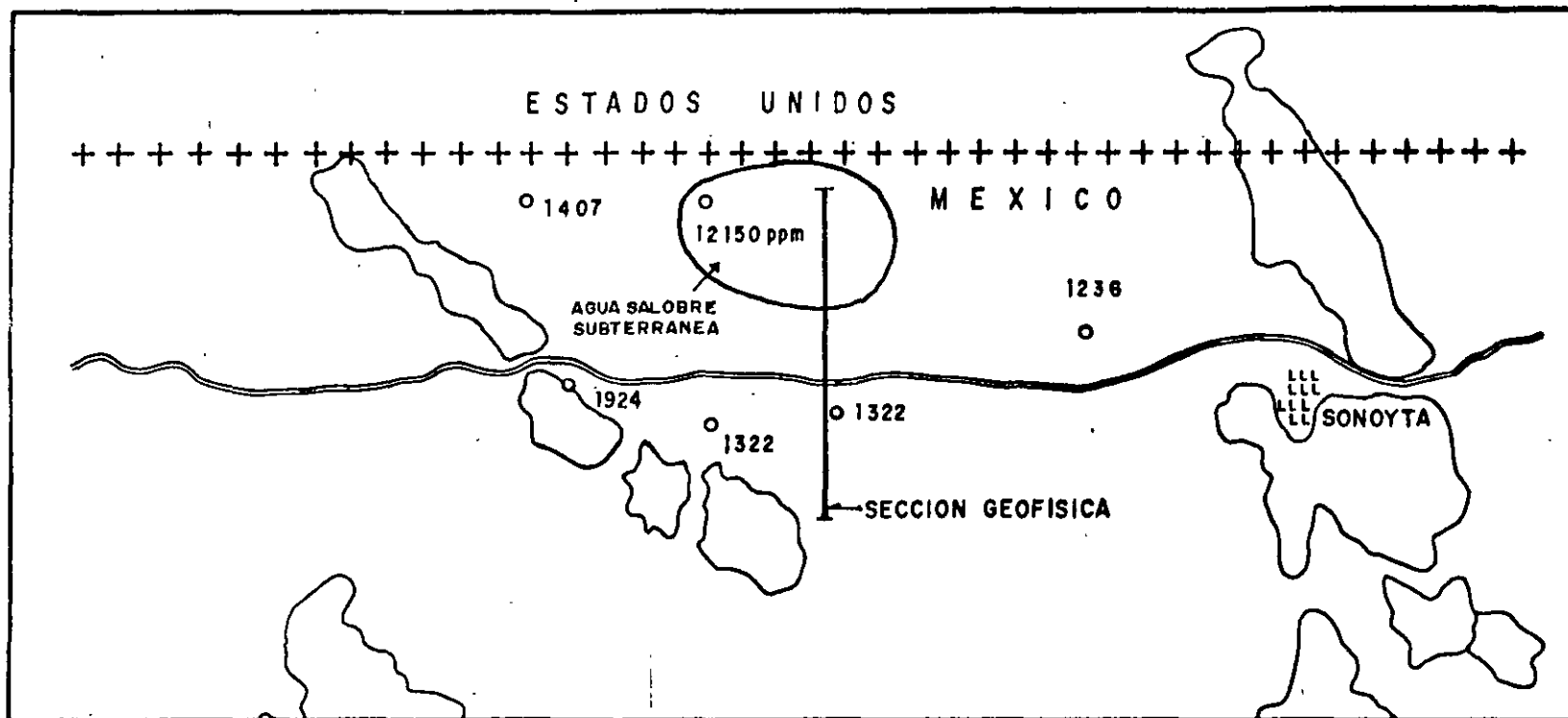


FIGURA
3.9.

CAPITULO 4

GRADO DE SATURACION DEL AGUA RESPECTO A LOS MINERALES MAS COMUNES

Cuando algunas muestras presentaron altas concentraciones de sólidos totales, se procede a hacer un análisis del grado de saturación del agua con respecto a los minerales más comunes; yeso $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Calcita CaCO_3 ; dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

4.1. METODOLOGIA

Para obtener el grado de saturación de una sal en el agua, se obtiene la constante de actividad iónica (K_{ai}) y se compara con la constante de equilibrio (K_e). Para valores de (K_{ai}) mayores que (K_e), la muestra se encuentra sobresaturada y para valores de (K_{ai}) menores que (K_e), la muestra no se encuentra sobresaturada.

En el caso del yeso, este se disocia según la siguiente reacción:



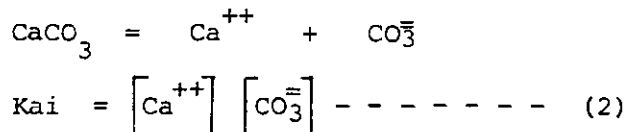
Aplicando la ley de Acción de Masas, obtenemos que la constante de actividad iónica es igual a las actividades de los productos entre los reactivos, o sea:

Donde los paréntesis indican la actividad iónica del ion que encierran.

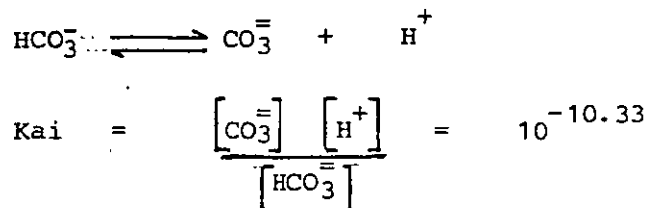
La actividad de los compuestos, es igual a 1.- por lo tanto:

$$K_{ai} = \left[\text{Ca}^{++} \right] \left[\text{SO}_4^{--} \right] \text{-----} (1)$$

De manera similar para la calcita se tiene:



Debido a que los análisis no reportan carbonato, (CO_3^{--}), se utilizó la de terminación de bicarbonato (HCO_3^-), sustituyendo la fórmula (2) de la si- guiente manera:



Despejando:

$$[\text{CO}_3^{--}] = \frac{[\text{HCO}_3^-] \cdot 10^{-10.33}}{[\text{H}^+]}$$

Sustituyendo en la ecuación (2):

$$K_{ai} = \frac{[\text{Ca}^{++}][\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}^+]} \cdot 10^{-10.33} \quad - - - (3)$$

Las actividades iónicas se obtienen multiplicando el coeficiente de activi- dad iónica γ de cada elemento, por la concentración en moles por litro- (M).

O sea:

$$\begin{aligned} [\text{Ca}^{++}] &= \gamma_{\text{Ca}} \cdot M_{\text{Ca}} \\ [\text{SO}_4^{--}] &= \gamma_{\text{SO}_4} \cdot M_{\text{SO}_4} \\ [\text{HCO}_3^-] &= \gamma_{\text{HCO}_3} \cdot M_{\text{HCO}_3} \end{aligned}$$

Las concentraciones en moles por litro (M) se obtienen dividiendo las par- tes por millón reportadas en los análisis químicos por el peso atómico. El coeficiente de actividad iónica γ se calculó mediante la fórmula de Debye- Huckel:

$$\log \gamma_i = \frac{-A Z_i^2 \sqrt{I}}{1 - B a_i \sqrt{I}}$$

Donde Z es la carga del ion; A y B son constantes dependientes de la temperatura (en nuestro caso a 25°C, A = 0.5085 y B = 0.3281 x 10⁸; (Klots, 1950); a_i es una constante relacionada con el tamaño y carga del ion (HEM, 1970) I es la fuerza iónica calculada por la fórmula:

$$I = \frac{1}{2} (M \cdot Z^2)$$

Donde M es la concentración de cada ion en moles por litro.

La constante de actividad iónica (Kai), así obtenida, se compara con la constante de equilibrio (Ke), para encontrar el grado de saturación del agua con respecto a yeso y calcita.

Los valores de Ke son: (Garrels y Chist, 1965):

$$K_e \text{ (calcita)} = 10^{-8.34}$$

$$K_e \text{ (yeso)} = 10^{-4.61}$$

De manera similar, se procede para el cálculo de las constantes de otros minerales.

Ya obtenido el grado de saturación, se delimitan, sobre planos, las áreas sobresaturadas, a partir de las cuales, se deduce la dirección del movimiento del agua subterránea y se explica el comportamiento químico del agua.

En las zonas en donde el agua se encuentra sobresaturada de alguna sal, es de esperarse la precipitación de dicho compuesto y consecuentemente, la incrustación de bombas, tuberías, calderas y demás material que tenga contacto con esta agua. Mientras que las áreas en donde el agua no se encuentre saturada de sales, ésta continuará disolviendo y aumentando su concentración iónica.

REFERENCIAS

- Askin, G. W. and J. V. Largerwerff, 1965. "Calcium Carbonate Equilibria in Solutions Open to the Air.- I.- The solubility of Calcite in Relation to Ionic Strength". Geochim. et Cosm. Acta. 29 (4), 343-352.

- Akin, G.W. and J. V. Largerwerff, 1965. "Calcium Carbonate Equilibria in Solution Open to the Air.- II.- Enhanced Solubility of Calcium Carbonate in the Presence of Magnesium and Sulfate" *Geochim et Cosm. Acta* 29 (4).
- Back, William, 1961. "Calcium Carbonate Saturation in Ground Water, From Routine Analyses. "U.S.G.S., W.S.P." 1535-D
- Drever, J. I. 1988. *The Geochemistry of Natural Water*, Second Edition. Prentice Hall. 437 p.
- Freeze, A. and Cherry, J. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall. 604 p.
- Garrels and Chirst, 1965. "Solution, Minerals and Equilibria".
- Hem, John. "Calculation and Use of Ion Activity" U.S.G.S.W.S.P.
- Hem, John, 1971. "Study and Interpretation of The Chemical Characteristics of Natural Water". G.S.W.S.P. 1473
- Hem, John. 1971. "None Equilibrium Systems in Natural Water Chemistry. Advances in Chemistry Series 106. American Chemical Society.
- Krauskopf, K.B., 1967. "Introduction to Geochemistry".
- Stumm, W. and J. Morgan, 1970. "Aquatic Chemistry". an Introduction. Emphatizing Chamilal Equilibria in Natural Waters.

CAPITULO 5

LA INTRUSION SALINA EN ACUIFEROS COSTEROS

La explotación de agua subterránea en acuíferos de zonas costeras encara un gran riesgo, denominado "Intrusión Salina". Muchas zonas costeras son degradadas por este fenómeno, como resultado del exceso de bombeo del agua del acuífero.

Un renglón importante en los acuíferos costeros, es el estudio de la ubicación y velocidad de la intrusión salina. Dentro de estos estudios, es esencial, la determinación de la posición del nivel piezométrico del acuífero y sus fluctuaciones con el tiempo, así como el registro de las variaciones de salinidad en los pozos. Si se cuenta con estos datos puede determinarse la posición y peligrosidad de la intrusión y planear las alternativas más convenientes para su control.

5.1. CARACTERISTICAS FISICAS DE LA INTRUSION SALINA

Para que una zona costera se vea afectada por este fenómeno, es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- a) Continuidad Hidráulica.- Debe existir continuidad hidráulica en los materiales que forman el acuífero hacia el mar.
- b) Inversión del Gradiente.- Otra de las condiciones necesarias para que se lleve a cabo la intrusión salina, es la inversión del gradiente hidráulico que en forma natural se establece de la planicie costera hacia el mar para originar un flujo hacia él. Cuando por efecto de bombeo se abate el nivel del acuífero para encontrarse abajo del nivel del mar, se invierte el gradiente hidráulico natural y se ocasiona un flujo de agua del mar hacia el acuífero. En la práctica, la magnitud del gradiente hidráulico se obtiene a partir de la medición de la profundidad al nivel del agua en pozos y norias.

5.2. PRINCIPIO DE GHYBEN - HERZBERG

A lo largo de las líneas de costa el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de éstas. El contacto entre estas dos masas de agua (interfase salina) se encuentra en equilibrio dinámico, por lo cual las modificaciones en las con

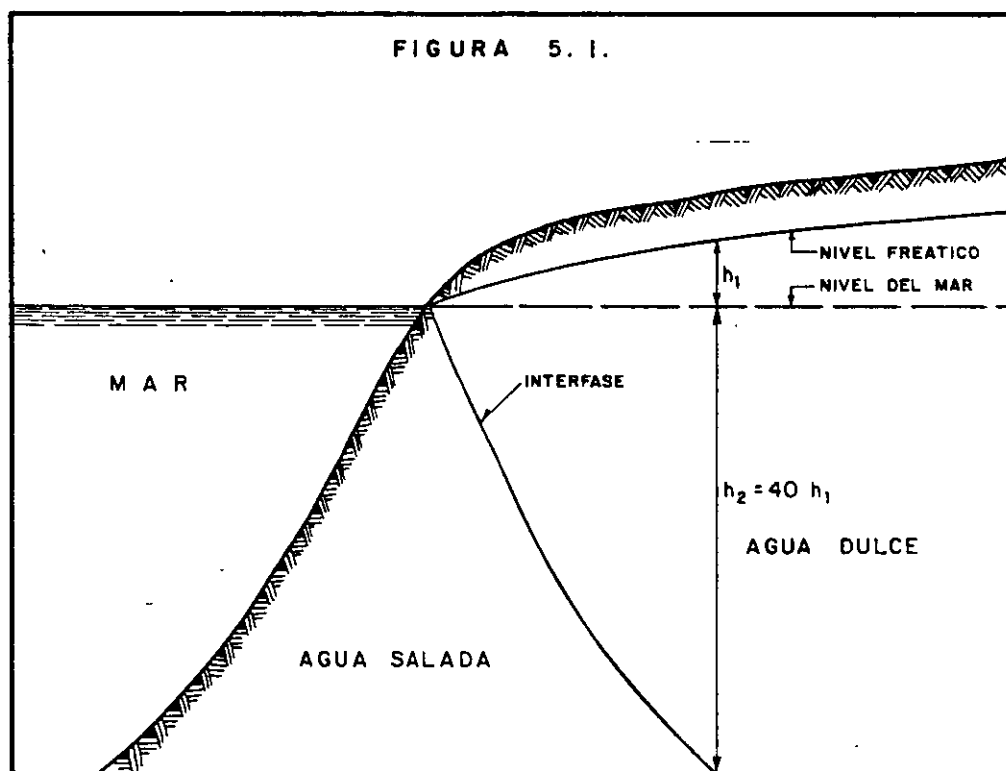
Hidrogeoquímica de las Aguas Naturales,
J. M. Lesser, 1989

diciones originales del acuífero, producen cambios en la posición del contacto entre las dos aguas.

La profundidad a la cual se encuentra la interfase fue descrita por Badon Ghyben en 1869, y aplicada a problemas específicos por Bairat Herzberg en 1901.

La teoría se basa en lo siguiente:

El peso de una columna vertical de agua dulce que va desde el nivel piezométrico del acuífero hasta la interfase, se encuentra equilibrada por el peso de una columna de agua de mar que vaya desde el nivel del mar, hasta la interfase. Esto es, el peso de la columna de agua dulce de longitud $h + Z$ es igual al peso de una columna de agua de mar de longitud Z , donde "h" es la elevación del nivel estático a partir del nivel del mar y "Z" es la profundidad a la interfase, a partir del mismo nivel de referencia. (Fig. 5.1.)



INTRUSION SALINA SEGUN LA TEORIA DE G.HERZBERG

Si "Dd" y "Dm" representan las densidades del agua dulce y de mar respectivamente, la condición para el balance hidrostático se expresa de la siguiente manera:

$$D_m \cdot g \cdot Z = D_d \cdot g \cdot (h + Z)$$

$$Z = \frac{D_d}{D_m} \cdot (h + z)$$

Considerando que las densidades del agua de mar y del agua dulce son 1.025 y 1.000, respectivamente, tenemos que:

$$Z = 40 h$$

O sea que por cada metro que se eleve el nivel piezométrico sobre el nivel del mar, existirán 40 metros de agua dulce bajo el mismo nivel de referencia (Figura 5.2.). La posición del nivel piezométrico sobre el mar, condiciona la profundidad a la interfase. Los movimientos de la superficie del mar por mareas y de la superficie piezométrica del acuífero, producidos por aumento o disminución de agua en él, producen fluctuaciones en la posición de la interfase. El área en donde se llevan a cabo estas fluctuaciones, se denominan zona de difusión. La mayoría de los acuíferos que no están sobreexplotados, descargan agua hacia el mar y la posición real de la interfase, en este caso, se encuentra a mayor profundidad (Hubbert) que la calculada por Ghyben-Herzberg, (Figura 5.3.).

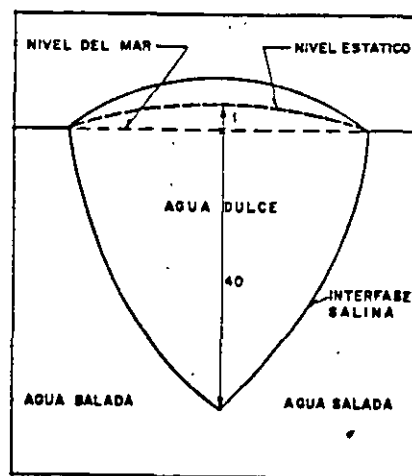
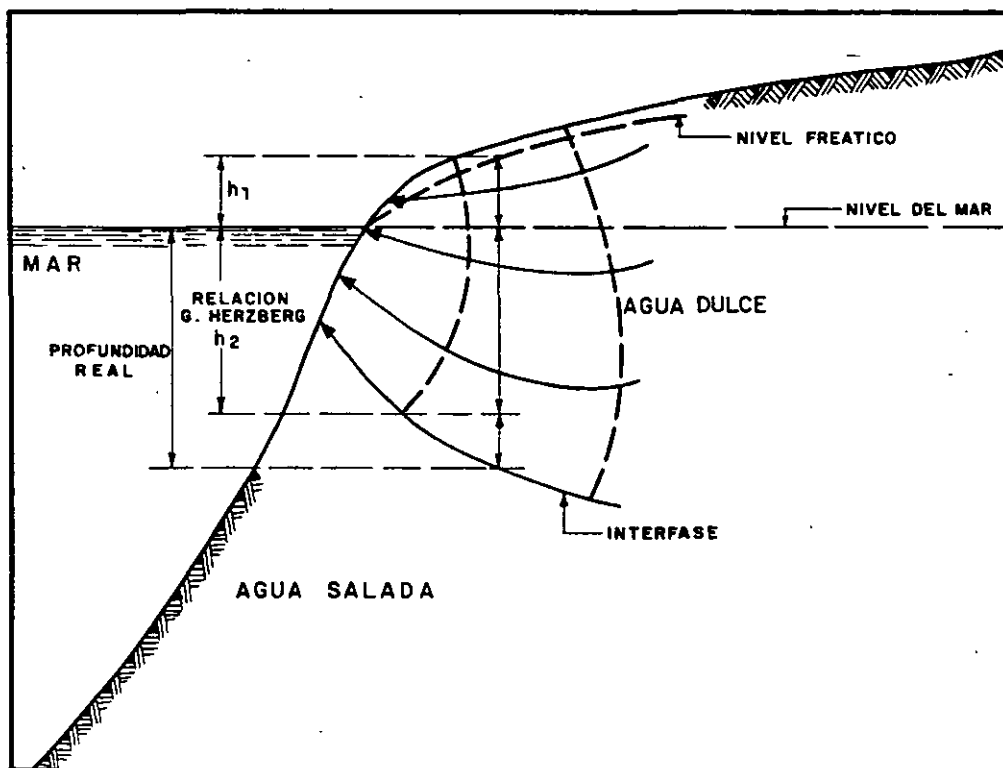


FIG :5.2 POSICION DE LA INTERFASE SALINA EN UNA ISLA

FIGURA 5.3.



5.3. MECANISMO DE LA INTRUSION SALINA

Existen varios mecanismos por los cuales el agua de mar puede intrusionar a un acuífero costero. Estos, están relacionados con la disminución de la elevación del nivel piezométrico y la inversión del gradiente hidráulico, que permite al agua de mar moverse hacia tierra adentro. Bajo condiciones naturales en los acuíferos costeros, existe un equilibrio entre la recarga, la descarga y el cambio del almacenamiento. Es conveniente que exista un flujo de agua dulce al mar, para conservar el equilibrio, y evitar la intrusión. Conforme el agua subterránea es extraída por bombeo, el nivel estático baja acomodándose a las nuevas condiciones y el flujo de la intrusión salina se comienza a mover hacia el acuífero, ocupando primero las zonas costeras y posteriormente la zona de explotación del valle.

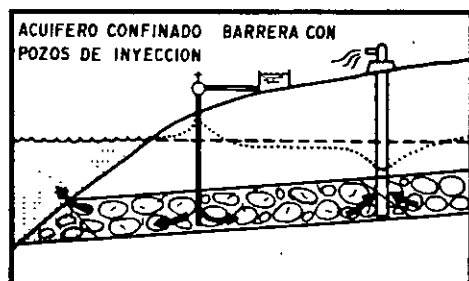
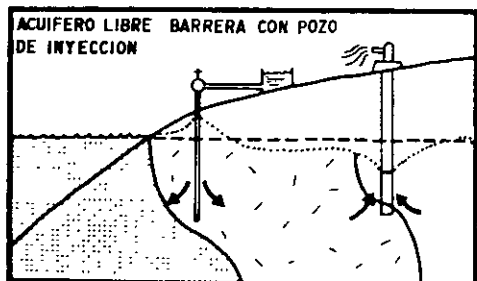
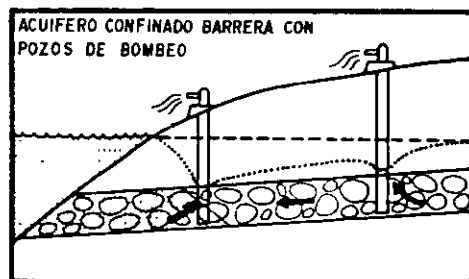
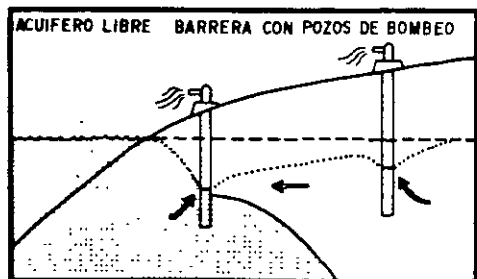
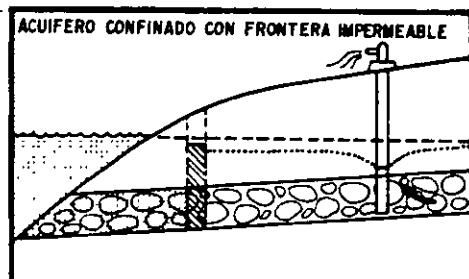
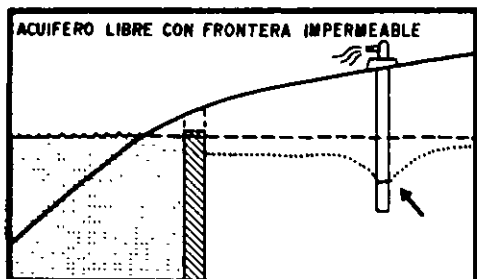
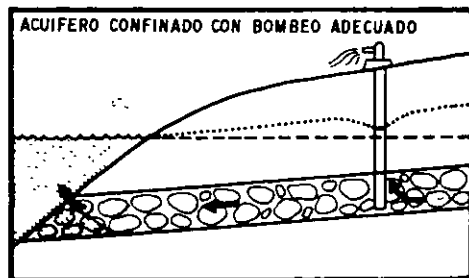
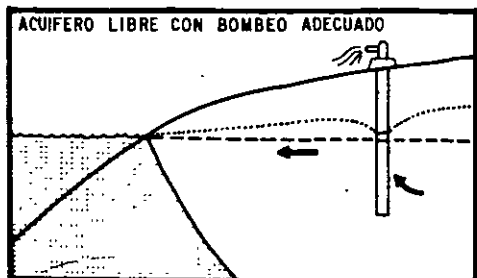
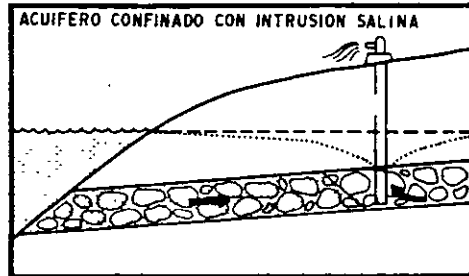
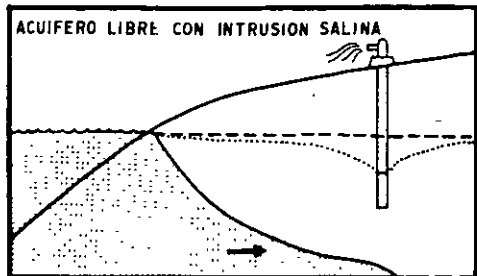
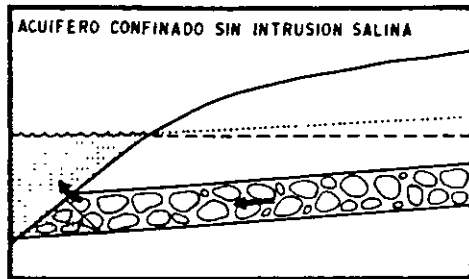
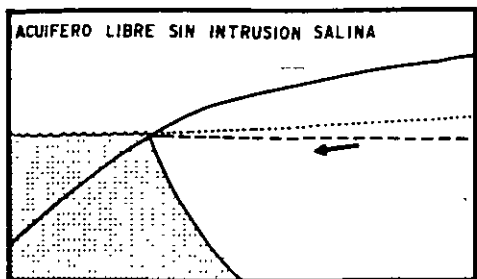
5.4. METODOS DE CONTROL DE LA INTRUSION SALINA

Varios métodos de control son conocidos y utilizados para prevenir la intrusión salina. Los más comunes son:

- 1).- Reducción de la extracción
- 2).- Recarga artificial
- 3).- Fronteras impermeables
- 4).- Barrera con pozos de bombeo
- 5).- Barreras con pozos de inyección (Figura 5.4).

a) Reducción de la Extracción.- Una de las medidas técnicamente más sencillas para prevenir la intrusión de agua de mar, es la extracción de agua subterránea, a un nivel planificado. Esta medida implica una disminución en las demandas de agua lo cual, en ocasiones crea problemas socioeconómicos y políticos muy fuertes. Cuando se opta por este método y el bombeo es reducido, puede establecerse nuevamente el gradiente hacia el mar y la intrusión es reemplazada por un ligero flujo de agua dulce hacia el mar. Si existe información suficiente sobre la variación de los niveles del agua y si se conocen las condiciones geológicas del subsuelo, la reducción de la extracción puede ser controlada de tal manera, que se obtenga la máxima cantidad de agua sin provocar una intrusión salina nociva.

b) Recarga Artificial.- Para ello es necesario contar con una fuente



NIVEL PIEZOMÉTRICO NIVEL DEL MAR ----- AGUA DULCE [] AGUA SALADA [] AGUA INYECTADA []

te adicional de agua así como condiciones apropiadas del terreno, de tal manera, que la recarga pueda llevarse a cabo. Las obras para la recarga pueden consistir en zanj^{as} superficiales construídas en el área de recarga a través de las cuales se ha ce circular agua que se infiltra al subsuelo. Otro tipo de - obras, consiste en la construcción de presas de infiltración, - localizadas en la zona de recarga. En zonas donde existen car-
pas confinantes impermeables, pueden construirse pozos de in-
yección. Al llevar a cabo esta recarga se provoca la reinver-
sión del gradiente hacia el mar, la cual es acompañada por un
flujo de agua dulce. La recarga, en esta forma, es económica, -
respecto a los otros métodos, pero en la mayoría de los casos -
no se cuenta con fuentes de agua adicional para llevarla a ca-
bo.

- c) **Fronteras Impermeables.**- Consiste en la construcción de una ba
rrera impermeable entre la línea de costa y los pozos de explo
tación. El medio de construcción puede ser excavando una zanja
que posteriormente se rellena con materiales arcillosos. Otro
tipo de barrera, consiste en el inyectado de material impermea
ble. Estas construcciones son usadas solo en áreas relativamen
te someras. Es importante, el conocer los resultados posterio
res a su construcción, ya que, si la impermeabilización es com
pleta, permitirá abatimientos fuertes y por lo tanto la obten
ción de mayores volúmenes de agua almacenada. Este método tie
ne la desventaja de no contar con un flujo de agua subterránea
hacia fuera de la zona, que en ocasiones, es necesario para -
mantener un balance de sales favorables.
- d) **Barrera de Pozos de Bombeo.**- Consiste en una línea de pozos lo
calizados entre la zona de explotación del valle y el mar. Los
pozos, deben de extraer toda el agua de mar que intrusióna al
acuífero, hasta obtener un equilibrio hidrostático. Para ello,
los niveles de agua deben de ser bajados en la barrera, más que
en cualquier otro punto en la cuenca. El volúmen de extracción
que se lleva a cabo en el valle, debe de ser reducido, cuando
menos una cantidad ligeramente menor a la que se obtenía antes
de aplicar el método. Es importante, disponer del registro de
los niveles del agua en la zona de la barrera, así como el co
nocer la cantidad exacta de agua que se debe bombear para obte
ner los resultados deseados. Esta cantidad de agua que se debe
de extraer, es muy variable y deberá de ser mayor al volumen -
de agua de mar que originalmente intrusionaba.
Mientras más cerca del mar se localiza la barrera, el bombeo -
tendrá que ser mayor.

- e) Barrera con Pozos de Inyección.- Este método para control de intrusiones salinas, consiste en la construcción de pozos de inyección alineados a lo largo de la costa, su funcionamiento va a depender de la resistencia que encuentre el agua al moverse en el subsuelo.

Al inyectar agua al acuífero se provoca la elevación del nivel piezométrico lo cual se lleva a cabo hasta alcanzar el gradiente requerido. Debido a la diferencia en densidad entre el agua de mar y el agua dulce, se requiere una columna de 41 metros de agua dulce para equilibrar una columna de 40 metros de agua salada. Para controlar la intrusión es necesario primeramente determinar el espesor de sedimentos permeables. Posteriormente se construye la barrera de pozos de inyección y se provoca la elevación del nivel piezométrico a lo largo de la línea de pozos, hasta alcanzar una altura de 75 centímetros arriba del nivel del mar, por cada 30 metros de espesor del acuífero bajo el mismo nivel de referencia. La cantidad de agua utilizada para dicho fenómeno puede ser estimada. Después de que en la barrera con pozos de inyección, se establece un equilibrio, la cantidad de agua que fluye hacia el acuífero, será la cantidad de agua de mar que intrusiónaba anteriormente, siempre y cuando la explotación de la planicie se haya conservado igual. Para mantener el balance dinámico de esta zona, es necesario que exista un pequeño flujo de agua dulce hacia el mar. La magnitud de este flujo es variable, pero será de alrededor de 10% de la que fluye hacia el acuífero. El número de pozos requeridos para formar la barrera dependerá de las características hidráulicas del acuífero, en especial de la capacidad específica de un pozo de bombeo perforado en la zona.

- f) Método Combinado; Barrera por Pozos de Bombeo-Barrera por Pozos de Inyección.- Este método utiliza la combinación de los dos métodos anteriores. Para ello, la barrera por pozos de bombeo, es localizada entre la línea de costa y la zona de explotación del valle y la barrera por pozos de inyección se ubica tierra adentro, del otro lado de la zona de explotación. La barrera combinada, compuesta de los dos sistemas, operando simultáneamente, minimiza los efectos de subsidencia y extracción de agua, así como otros efectos secundarios y permite una mayor flexibilidad en su operación sobre la de uno solo de los sistemas previamente descritos.

REFERENCIAS

- Banks, H.O., and Richter, R.C., 1953, "Sea-Water Intrusion into Ground-Water Basins Bordering the California Coast and Island Bays". American - Geophysical Union Transactions, Vol. 34, No. 4 pp. 575-582.
- Banks, H.O., Richter, R.C. y Harder, J., 1957, "Sea Water Intrusion in California", American Water Works Association, Vol. 49, No. 1 pp. 71-88

Bruington, A.E., y Seares, F.D., 1965, "Operating a Sea Water Barrier Pro-
jet", American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation
and Drainage Division, Vol. 91, No. IRI.

Bruington, A.E. Drescher, W.J. y Sherwood, C.B. 1969, "Saltwater Intrusion
in the United States"., American Society of Civil Engineers Procee-
dings, Journal of the Hydraulics Division, Paper. 6788, HY 5, pp. -
1651-1669.

Custodio, E. y Llamas, M. R. 1976. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega
Barcelona, España.

California Departament of Water Resources, 1957, "Report by Los Angeles -
Country Flood Control District on Investigational Work for Preven--
tion and Control of Sea Water Intrusion West Coast Basin Experimen-
tal Proyet, Los Angeles Country", Boletín No. 63 Apéndice B.

California Departament of Water Resources, 1958, "Sea Water Intrusion in -
California", Boletín No. 63

California Departament of Water Resources, 1960, "An Investigation of Some
Problemes In Preventing Sea-Water Intrusion By Creating a Fresh-Wa-
ter Barrier", No. 63 Apéndice D.

California Departament of Water Resorces, 1970, "Oxnard Basin Experimental
Extraction Type Barrier", Boletín 147-6.

Freeze, A. and Cherry, J. 1979. Groundwater. Prentice Hall. 604 p.

Klein, H., 1965, "Salt Water Intrusion Can be Controlled", Florida Board -
of Conservation, Division of Geology.

Todd, David K, 1959, Ground Water Hydrology, John Wiley and Sons, pp 177.

NOTA: Para la elaboración de este artículo, se utilizaron datos de dife--
rentes textos y trabajos, principalmente de los apuntes del curso de hidro-
logía subterránea del Departamento de Recursos Hidráulicos del Estado de -
California, E.U., por Raymond C. Richter.

CAPITULO 6

CALIDAD DEL AGUA

Las aguas subterráneas y superficiales que son utilizadas para satisfacer las necesidades de agua potable de zonas urbanas, así como la que se destina a la agricultura, ganadería e industria, necesita cumplir con ciertos requisitos respecto a su contenido de elementos químicos, a sus propiedades físicas y a la presencia de materia orgánica.

El objeto del presente trabajo, es el de mostrar, en forma general, las normas de calidad del agua utilizada como potable, en riego, en abrevadero y en la industria, así como el significado y algunas propiedades físicas y químicas del agua.

La calidad del agua, se determina a partir de análisis físicos, químicos y bacteriológicos, los cuales pueden variar desde análisis sencillos donde se determinen los principales elementos, hasta análisis complejos que incluyan la determinación de una gran variedad de especies presentes en el agua.

El tipo de análisis dependerá del uso que se le tenga destinado al agua, así como de algunas características observadas en la zona donde ésta se encuentre. Por ejemplo, en una zona minera, es conveniente determinar las concentraciones de algunos metales que pudieran encontrarse presentes. En lugares próximos a poblados y/o establos, debe ponerse atención a los contenidos de nitratos y organismos coliformes. etc.

6.1. AGUA POTABLE

Para conocer la calidad de cierta agua para uso potable, se comparan los resultados del análisis químicos, con las normas de calidad o límites máximos permisibles que a continuación se describen y que fueron publicados por la Secretaría de Salubridad y Asistencia, en el Diario Oficial de el día 2 de Julio de 1953. (Tabla 6.1.).

TABLA 6.1.

CARACTERISTICAS FISICAS	LIMITES MAXIMO PERMISIBLE	OBSERVACIONES
TURBIEDAD	10 (Escala de Sílice)	DE NO CUMPLIRSE CON LOS RESULTADOS ANTERIORES, SE ADMITIRAN AQUELLOS QUE SEAN TOLERABLES PARA LOS USUARIOS.
COLOR	20 (Escala platino-cobalto)	
SABOR	INSIPIDA	
OLOR	INODORA	

TABLA 6.1. CONTINUACION

CARACTERISTICAS QUIMICAS	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE EN ppm (EXEPTO)
Nitrógeno amoniacal (N)	0.50
Nitrógeno proteico (N)	0.10
Nitrógeno de nitratos (N)	5.00
Potencial hidrógeno (pH)	8.00
Oxígeno consumido (O)	3.00
Sólidos totales disueltos (STD)	1000
Alcalinidad total (CaCO ₃)	400
Cloruros (Cl)	300
Sulfatos (SO ₄)	250
Magnesio (Mg)	250
Zinc (ZN)	125
Cobre (Cu)	15
Fluoruros (Fl)	3
Fierro (Fe)	1.50
Manganeso (Mn)	0.30
Arsénico (As)	0.05
Selenio (Se)	0.05
Cromo (Cr)	0.05
Compuestos fenólicos, (Fenol)	0.001

CARACTERISTICAS BIOLOGICAS	NUMERO MAXIMO PERMISIBLE
ORGANISMOS DE LOS GRUPOS - COLI Y COLIFORMES.	20
COLONIAS BACTERIANAS POR - CENTIMETRO CUBICO DE MUESTRA.	200

Debido a la gran demanda de agua potable en el país y a la escases que presenta este líquido en muchas regiones, esta es ingerida sin cumplir con todos los requisitos anteriores.

El índice que en muchas regiones de México se encuentra sobrepasando el límite máximo permisible, es el de sólidos totales disueltos. Este, en ocasiones, es aceptado en cantidades mayores a 1,000 ppm., siendo su límite la tolerancia del consumidor. Generalmente no sobrepasa a las 2,000 ppm. El ingerir agua con más de 1,000 ppm., normalmente no causa problemas de salud siempre y cuando no se encuentren, en exceso, algunos elementos críticos como los que se mencionan a continuación:

Arsénico, Selenio y Cromo.- No es común encontrarlos en el agua, pero su presencia en cantidades pequeñas es tóxica, por lo cual el agua potable, no debe tener concentraciones mayores de 0.05 ppm.

TABLA 6.1. CONTINUACION

CARACTERISTICAS QUIMICAS	LIMITE MAXIMO PERMISIBLE EN ppm (EXEPTO)
Nitrógeno amoniacal (N)	0.50
Nitrógeno proteico (N)	0.10
Nitrógeno de nitratos (N)	5.00
Potencial hidrógeno (pH)	8.00
Oxígeno consumido (O)	3.00
Sólidos totales disueltos (STD)	1000
Alcalinidad total (CaCO ₃)	400
Cloruros (Cl)	300
Sulfatos (SO ₄)	250
Magnesio (Mg)	250
Zinc (ZN)	125
Cobre (Cu)	15
Fluoruros (Fl)	3
Fierro (Fe)	1.50
Manganeso (Mn)	0.30
Arsénico (As)	0.05
Selenio (Se)	0.05
Cromo (Cr)	0.05
Compuestos fenólicos, (Fenol)	0.001

CARACTERISTICAS BIOLOGICAS	NUMERO MAXIMO PERMISIBLE
ORGANISMOS DE LOS GRUPOS - COLI Y COLIFORMES.	20
COLONIAS BACTERIANAS POR - CENTIMETRO CUBICO DE MUESTRA.	200

Debido a la gran demanda de agua potable en el país y a la escases que presenta este líquido en muchas regiones, esta es ingerida sin cumplir con todos los requisitos anteriores.

El índice que en muchas regiones de México se encuentra sobrepasando el límite máximo permisible, es el de sólidos totales disueltos. Este, en ocasiones, es aceptado en cantidades mayores a 1,000 ppm., siendo su límite la tolerancia del consumidor. Generalmente no sobrepasa a las 2,000 ppm. El ingerir agua con más de 1,000 ppm., normalmente no causa problemas de salud siempre y cuando no se encuentren, en exceso, algunos elementos críticos como los que se mencionan a continuación:

Arsénico, Selenio y Cromo.- No es común encontrarlos en el agua, pero su presencia en cantidades pequeñas es tóxica, por lo cual el agua potable, no debe tener concentraciones mayores de 0.05 ppm.

Zinc, Cobre, Fierro y Manganese.- El cuerpo, puede llegar a tolerar, cantidades un poco mayores a las establecidas como requisito, no es común su presencia en el agua.

Sulfatos.- Concentraciones altas de este compuesto, actúan como laxante. - En combinación con otros elementos, da lugar a un sabor desagradable.

Fluoruros.- El ingerir agua que contenga este elemento en exceso, produce decaimiento de la dentadura, el cual dependerá de la concentración, la edad del consumidor, la cantidad de agua que se consume y la susceptibilidad de cada individuo.

Nitratos.- Proviene de la descomposición de materia orgánica. Concentraciones altas de este compuesto es causa de enfermedades hídricas mortales, como la metamoglobinemia en los niños.

La presencia de concentraciones relativamente altas de sodio, cloro, magnesio, calcio, carbonatos y bicarbonatos, no representan gran peligro, ya que pueden ser eliminadas por el organismo.

6.2 AGUA PARA RIEGO

Para conocer la calidad del agua para riego, se ha optado por utilizar la clasificación de Wilcox (1948) en la cual, por medio de la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS), se obtiene la clase de agua para riego.

La conductividad eléctrica es igual al recíproco de la resistividad y proporcional a la concentración de sólidos totales disueltos. Normalmente, esta se expresa en micromhos por centímetro (mmhos-cm).

La relación de adsorción de sodio, se obtiene por medio de la fórmula siguiente:

$$RAS = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Donde las concentraciones de Na^{+} , Ca^{++} y Mg^{++} están dadas en equivalentes por litro. Con esta relación se obtiene el peligro que entraña el uso del-

CLASIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO

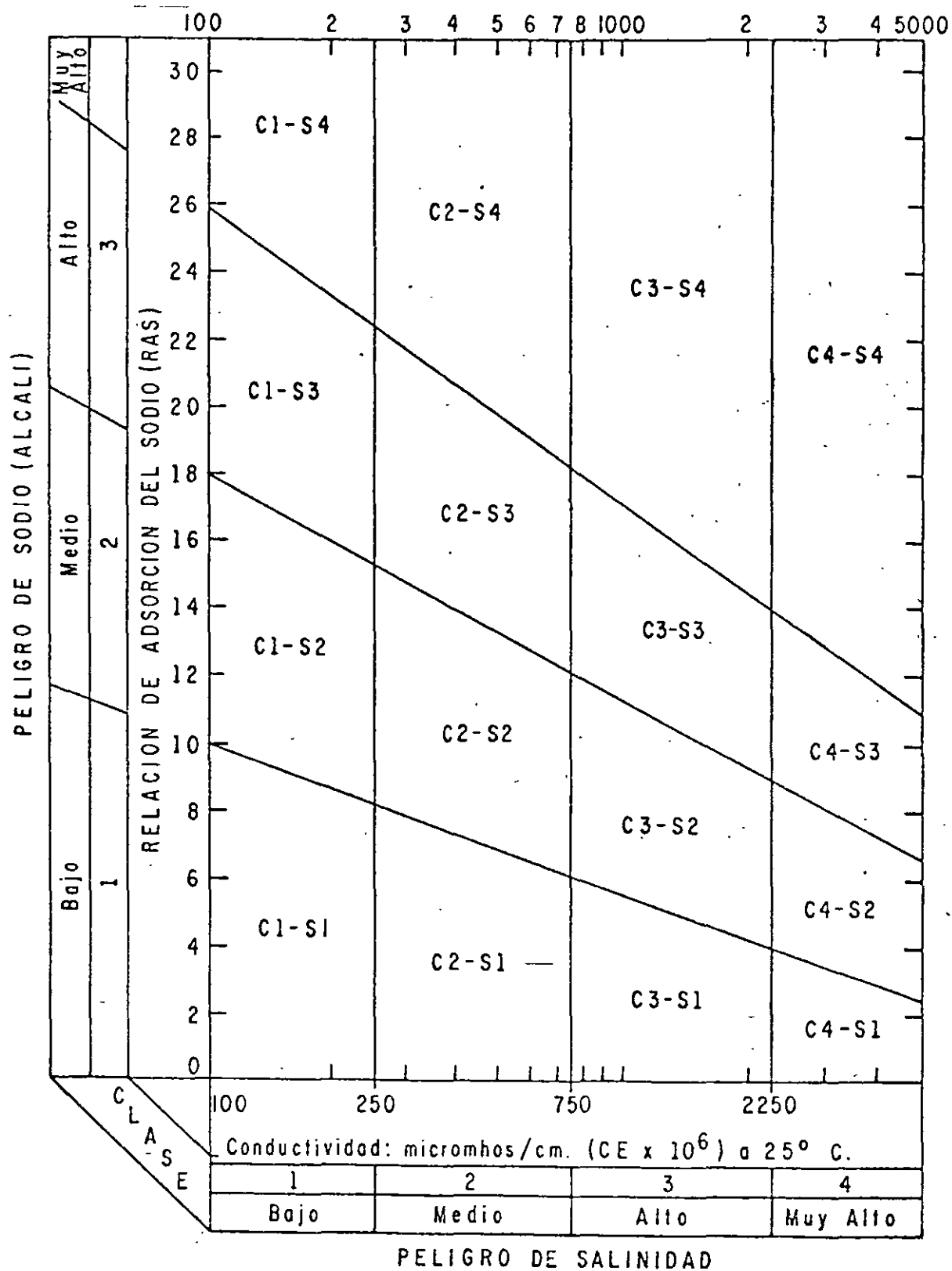


FIGURA 6.1.

agua para riego, el cual, como puede apreciarse en la formula, queda, supeditado a las concentraciones absoluta y relativa de los principales cationes.

Los valores de CE y RAS, son graficados en el nomograma de clasificación - (Fig.6.1)obteniéndose de esta manera, la clase de agua para riego, la cual está definida por los parámetros, C y S y subíndices en cada uno de ellos. El significado de las diferentes clases, así como algunas recomendaciones para el uso del agua en riego, se comentan a continuación:

- C1 BAJA SALINIDAD.- Puede usarse para riego en la mayoría de los suelos y para casi todas las plantas, con pocas probabilidades de que aumente la salinidad.
- C2 SALINIDAD MEDIA.- Puede usarse, si se hacen lavados moderados. Se pueden sembrar plantas moderadamente tolerantes a las sales en la mayoría de los casos, sin efectuar prácticas especiales para el control de la salinidad.
- C3 ALTAMENTE SALINA.- No puede usarse en suelos de drenaje deficiente. Aún con drenaje adecuado, se requiere un manejo especial para el control de la salinidad, además de seleccionar plantas que sean bastante tolerantes a las sales.
- C4 MUY ALTAMENTE SALINA.- No es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias aunque puede usarse, en ocasiones, bajo circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado; el agua para riego debe aplicarse en exeso con el fin de llevar a cabo un lavado fuerte. Las plantas que se seleccionen deberán ser muy tolerantes a las sales.
- S1 CON POCO SODIO.- Puede usarse para riego en casi todos los suelos, con poco peligro de que el sodio intercambiable llegue a niveles perjudiciales. Sin embargo, las plantas sensitivas al sodio como algunos frutales (fruto con hueso) y aguacate, pueden acumular concentraciones dañinas de sodio.
- S2 CON CONTENIDO MEDIO.- Será peligrosa en suelos de textura fina y en aquellos que contengan una alta capacidad de intercambio de cationes, especialmente bajo condiciones de lavados leves, a menos que haya yeso en el suelo. Esta agua puede usarse en suelos orgánicos o de textura gruesa con buena permeabilidad.
- S3 CON ALTO CONTENIDO.- Conducirá a niveles peligrosos de sodio intercambiable en la mayoría de los suelos por lo cual se requerirá de un manejo especial, buen drenaje, lavados fuertes y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos no desarrollarán niveles perjudiciales de sodio intercambiable. Los mejoradores químicos deberán usarse, para el

reemplazo de sodio intercambiable, excepto en el caso de que no sea factible el uso de mejoradores en aguas de muy alta salinidad.

S4 CON MUY ALTO CONTENIDO.- Generalmente no es apropiada para el riego, - excepto en casos de baja y quizá media salinidad, donde la solución del calcio del suelo o el empleo de yeso u otros mejoradores, hagan factible el uso de esta agua.

La conductividad eléctrica puede tomarse como un índice en la selección de cultivos, en la tabla siguiente se presenta la tolerancia relativa de los cultivos a las sales.

TABLA 6.2. TOLERANCIA DE CULTIVOS A LAS SALES

F R U T A L E S

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
Palma : dátiles	Granada Higuera Olivo Vid Melón	Peral Manzano Naranja Toronja Ciruela Almendro Chabacano Durazno Fresa Limonero Aguacate

H O R T A L I Z A S

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
$CE_e \times 10^3 = 12 *$ Betabel Bretón o col - rosada. Espárragos Espinacas	$CE_e \times 10^3 = 10$ Jitomate Brócoli Col Chile dulce Coliflor Lechuga Maíz dulce	$CE_e \times 10^3 = 4$ Rábano Apio Ejotes

Continúa

	Papas Zanahoria Cebolla Chicharos Calabaza Pepinos	
$CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 4$	$CE_e \times 10^3 = 3$

PLANTAS FORRAJERAS

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
$CE_e \times 10^3 = 18$	$CE_e \times 10^3 = 4$	$CE_e \times 10^3 = 4$
Zacate alcalino de coquito	Trébol blanco	Trébol blanco holandés
Zacate Bermuda	Trébol amarillo	
Zacate Rhodes	Zacate inglés perenne	Trébol Alsike
		Trébol rojo
		Trébol ladino
		Pinpinela
	Zacate Sudán	
	Trébol Huban	
	Alfalfa (California común)	

El boro en pequeñas concentraciones, es esencial para el desarrollo normal de las plantas y, la falta de este elemento, o su presencia en concentraciones altas, afecta el crecimiento de los cultivos.

Dependiendo de la cantidad de boro que las plantas acepten, estas se han dividido en tres grupos:

CUANDO ACEPTAN

Cultivos sensibles	Hasta 0.67 ppm.
Cultivos semitolerantes	Entre 0.67 y 1.00 ppm
Cultivos tolerantes	Entre 1.00 y 3.75 ppm

A continuación se muestran algunos cultivos haciéndose distinción entre tolerantes, semitolerantes y sensibles.*

--- TABLA 6.3. CULTIVOS TOLERANTES, SEMITOLERANTES
Y SENSIBLES A LAS SALES.

TOLERANTES	SEMITOLERANTES	SENSIBLES
Espárragos	Girasol (nativo)	Nuez encarcelada
Palma datilera	Papa	Nogal negro
Remolacha azucarera	Algodón	Nogal persa
Alfalfa	Jitomate	Ciruelo
Gladiola	Rábano	Peral
Haba	Chícharos	Manzano
Cebolla.	Rosa Ragged	Uva (Málaga y Sultaina)
	Robin	Higo Kadota
	Olivo	Níspero
Nabo	Cebada	Cereza
Col	Trigo	Chabacano
Lechuga	Maíz	Durazno
Zanahoria	Sorgo	Naranja
	Avena	Aguacate
	Calabacita	Toronja
	Pimiento "Bell"	Limonero
	Camote	
	Frijol Lima	

(En orden descendiente-
de más a menos Toleran-
te).

(De: Suelos Salinos y Sódicos, 1954)

<p>Cebada (Para heno <u>Tri</u> folium (pata de pãja- ro).</p> <p>$CE_e \times 10^3 = 12$</p>	<p>Trigo (para heno) Avena (para heno) Gramma azul Bromo suave Veza lechosa Cicer</p> <p>$CE_e \times 10^3 = 4$</p>	<p>$CE_e \times 10^3 = 2$</p>
--	--	--

CULTIVOS COMUNES

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
$CE_e \times 10^3 = 12$ Cebada (grano) Remolacha azucarera Colza Algodón $CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_2 \times 10^3 = 10$ Centeno (grano) Trigo (grano) Avena (grano) Arroz Sorgo (grano) Maíz Linaza Girasol Higuerilla $CE_e \times 10^3 = 6$	$CE_e \times 10^3 = 4$ Alubias

(De: Suelos Salinos y Sódicos, 1954)

* El número que sigue a la $CE_e \times 10^3$ es el valor de la conductividad eléctrica del extracto de saturación en milimhos por centímetro a 25° C asociado a una disminución en los rendimientos de 50 por ciento.

6.3. AGUA PARA ABREVADERO

El agua usada en granjas y ranchos ganaderos, normalmente debe de cumplir con los mismos requisitos que el agua potable, ya que es utilizada también para usos domésticos de los ranchos. Los animales pueden ingerir agua con una mayor concentración de sales.

A continuación se describen los límites máximos para algunos animales, según McKee y Wolf, (1963).

TABLA 6.4. LÍMITES MÁXIMOS PARA ALGUNOS ANIMALES

Aves	2,860 ppm
Cerdos	4,290 ppm
Caballos	6,430 ppm
Ganado Lechero	7,150 ppm
Ganado de carne	10,100 ppm
Borrego	12,900 ppm

6.4. AGUA PARA LA INDUSTRIA

La clase de agua requerida en la industria, depende del tipo de instalaciones utilizadas.

Una forma rápida de catalogar el tipo de agua para la industria, es conociendo su dureza. Esta normalmente se reporta en concentración de carbonato de calcio (Ca CO_3).

Cuando un agua contiene concentraciones bajas de este compuesto, se denomina "agua blanda" y al agua con concentraciones altas, "agua dura".

De acuerdo con algunos autores (Durfor y Becker, 1964), se han distinguido los siguientes rangos de dureza.

TABLA 6.5. RANGOS DE DUREZA PARA LA INDUSTRIA

Concentración en mg/l de CaCO_3	Descripción
0 - 60	Agua blanda.
61 - 120	Agua moderadamente dura.
121 - 180	Agua dura.
más de 180	Agua muy dura.

En la tabla siguiente, se muestran algunos de los límites para la industria textil y papelera, así como en derivados del petróleo y embotelladoras.

TABLA 6.5. CALIDAD DEL AGUA PARA ALGUNAS INDUSTRIAS
(En mg/l)

CONSTITUYENTE	INDUSTRIA TEXTIL	INDUSTRIA PAPELERA	DERIVADOS DEL PETROLEO	EMBOTE-LLADORAS
SiO ₂	- -	50	- -	- -
Fe	0.1	1.0	1.0	0.3
Mn	0.1	0.5	- -	0.05
Ca	- -	20	75	- -
Mg	- -	12	30	- -
Cu	0.01	- -	- -	- -
NH ₄	- -	- -	- -	- -
Zn	- -	- -	- -	- -
HCO ₃	- -	- -	- -	- -
SO ₄	- -	- -	- -	500
Cl	- -	200	300	500
F	- -	- -	- -	- -
NO ₃	- -	- -	- -	- -
DUREZA	25	100	350	- -
pH	2.5-10.5	6-10	6-9	- -
S.T.D.	100	- -	100	- -

(En: John Hem, 1970)

REFERENCIAS

Chapingo, Escuela Nacional de Agricultura. Calidad del agua para riego, apuntes inéditos.

Hem, John, 1971. "Study and Interpretation of The Chemical Characteristics of Natural Water". G.S.W.S.P. 1473.

Suelos Salinos y Sódicos, 1954 Manual de Agricultura No. 60 Departamento -
de Agricultura de los Estados Unidos de América.

Water Quality Criteria, 1972, Report of the National Technical Advisory -
Comitee to the Secretary of the Interior.

CAPITULO 7

SIGNIFICADO DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL AGUA

Los elementos que pueden encontrarse en solución en el agua pueden ser muy variados. De los más comunes, a continuación se mencionan su fuente o causa de origen, así como algunas de sus principales características.

BICARBONATO (HCO_3) CARBONATO (CO_3)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la incorporación del bióxido de carbono en el agua y de la disolución de rocas carbonatadas como la caliza y la dolomita.

SIGNIFICADO.- Los carbonatos y bicarbonatos producen alcalinidad. Los carbonatos de calcio y magnesio se descomponen en calderas y aguas calientes, facilitando la incrustación y liberando bióxido de carbono corrosivo a la atmósfera. En combinación con calcio y magnesio es causa de la dureza.

BORO (B)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de suelos y rocas, en especial las de origen ígneo. El agua de zonas térmicas y especialmente aquellas que se encuentran en áreas de actividad volcánica reciente, pueden tener altas concentraciones de boro. Puede deberse en ocasiones, a contaminación por desperdicios, especialmente donde se usan detergentes que contienen boratos.

SIGNIFICADO.- Cantidades pequeñas de este elemento, es esencial para creci--

Hidrogeoquímica de las Aguas Naturales,
J. M. Lesser, 1989.

miento, y nutrición de las plantas, pero es tóxico para la mayor parte de ellas cuando se encuentra en concentraciones mayores de 1 mg/l.

CALCIO (Ca)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de casi todo tipo de suelos y rocas pero en especial de las calizas, las dolomitas y el yeso. Algunas salmueras contienen grandes cantidades de calcio.

SIGNIFICADO.- El calcio y el magnesio son los principales responsables de la dureza en el agua, la cual origina un gran consumo de jabones. Puede incrustarse en tuberías y ademes, reduciendo su eficiencia.

COLOR

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- En agua superficial, componentes orgánicos provenientes del decaimiento de la vegetación y por contaminación de desperdicios orgánicos e inorgánicos descargados a los ríos. En agua subterránea, componentes orgánicos que han pasado a través de lignita y turba.

SIGNIFICADO.- Indica la presencia de iones orgánicos o materia orgánica en el agua subterránea. Es un factor importante en la valuación de agua potable o para otros usos.

CLORURO (Cl)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de rocas y suelos, en especial evaporitas; se presenta por contaminación de desperdicios y desagües. Antiguas salmueras, agua de mar y salmueras industriales, contienen grandes cantidades de este elemento.

SIGNIFICADO.- Grandes concentraciones de este elemento, aumenta el poder corrosivo del agua y, en combinación con sodio, da un sabor salado.

CONCENTRACION DE HIDROGENO (pH)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Los ácidos y el bióxido de carbono libre, bajan el valor del pH. Carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, fosfatos, silicatos y boratos, aumentan el valor del pH.

SIGNIFICADO.- Un pH igual a 7.0 indica neutralidad en una solución; valores mayores indican alcalinidad y menores, acidez. La corrosividad, generalmente aumenta al disminuir el pH. Aguas excesivamente alcalinas, pueden atacar metales.

CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Depende de la cantidad de sales disueltas en el agua.

SIGNIFICADO.- Es una medida de la capacidad del agua de conducir corriente eléctrica. Varía con la concentración y grado de ionización de los constituyentes, así como con la temperatura. Se usa para estimar la cantidad de sales disueltas en el agua.

DUREZA COMO CaCO_3

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- En la mayoría de los casos, la dureza es debida a el calcio y el magnesio.

SIGNIFICADO.- Consume jabón y no produce espuma. Forma depósitos de jabón - en baños. El agua dura incrusta calderas y tuberías Dureza es equivalente - de dureza de carbonatos y bicarbonatos.

ESTRONCIO (Sr)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de rocas y suelos, especial de rocas carbonatadas y rocas de origen ígneo.

SIGNIFICADO.- Las concentraciones son en general muy bajas.

FIERRO (Fe)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de suelos, rocas y de tuberías, bombas y equipos similares. Concentraciones mayores a 1 ó 2 ppm, generalmente indican drenaje de zonas mineras u otra fuente.

SIGNIFICADO.- Expuesto a la superficie, el fierro disuelto en el agua se oxida formando un sedimento rojizo. Más de 0.3 ppm, mancha lavadoras y utensilios. Elemento nocivo en el proceso de bebidas, tintes, blanqueadores, hielo, etc. Grandes concentraciones, producen un sabor desagradable y favorece el crecimiento de bacterias.

FLUORURO (F)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Se encuentra diseminado en cantidades muy pequeñas, en casi todo tipo de rocas y suelos.

SIGNIFICADO.- Reduce la picadura de dientes (caries) en los niños durante la época de calcificación. En excesos de este elemento, produce el decaimiento de la dentadura, el cual dependerá de la concentración de flúor, la edad del consumidor, la cantidad de agua que se consuma y la susceptibilidad de cada individuo.

FOSFATO (PO_4)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene del intemperismo de rocas ígneas y de la lixiviación de suelos que contienen desperdicios orgánicos, fertilizantes, detergentes y drenajes domésticos e industriales.

SIGNIFICADO. Concentraciones mayores a las normales, indican contaminación por desechos.

LITIO (Li)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de rocas durante el intemperismo. La escasez del litio es probablemente el responsable de las relativamente bajas concentraciones en el agua.

SIGNIFICADO.- Las concentraciones de este elemento en el agua son en general muy bajas, no afectando la calidad para los diferentes usos.

MAGNESIO (Mg)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de la mayoría de los suelos y rocas pero especialmente de las dolomitas. Algunas salmueras contienen cantidades abundantes de magnesio.

SIGNIFICADO.- El magnesio y el calcio, son los principales responsables de la dureza y del agua incrustante.

MANGANESO (Mn)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de algunos suelos y rocas. Es menos común que el fierro, pero normalmente se encuentra asociado con éste y con aguas ácidas.

SIGNIFICADO.- Es el causante de la coloración café oscura o negra.

NITROGENO, AMONIO (NH_3), NITRITO (NO_2), NITRATO (NO_3)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Se encuentra en el agua como NH_3 , NO_2 , y NO_3 , dependiendo del grado de oxidación. Proviene de la disolución de rocas ígneas suelos enriquecidos por legumbres y fertilizantes, establos y aguas de drenaje.

SIGNIFICADO.- Concentraciones altas de nitrógeno, indica contaminación. Los nitratos aumentan el crecimiento de algas y otros organismos que producen olor y sabor desagradable. Concentraciones mayores a 45 ppm de nitratos, causan metomoglobinemia en los niños.

POTASIO (K)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Se encuentra también en salmueras, agua de mar y en algunos desechos industriales.

SIGNIFICADO.- Grandes concentraciones, en combinación con cloro, producen un sabor salado. Esencial en la nutrición de las plantas.

RELACION DE ADSORCION DE SODIO (RAS)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Se calcula usando las concentraciones de los iones que se indican en miliequivalentes por litro.

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

SIGNIFICADO.- El RAS es usado junto con la conductividad eléctrica, para determinar la calidad del agua para riego.

SELENIO (Se)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- La principal fuente de selenio son las emanaciones volcánicas y los depósitos de sulfuros que han sido acumulados por erosión e intemperismo. Se encuentra en rocas cretácicas, en especial en lutitas y suelos derivados de ellas.

SIGNIFICADO.- Es tóxico en cantidades pequeñas. Constituye un problema cuando

do se encuentra en plantas o agua para el ganado.

SILICE (SiSO_2)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Generalmente se presenta en concentraciones bajas de 1 a 30 ppm. Concentraciones hasta de 100 ppm suelen encontrarse en aguas altamente alcalinas.

SIGNIFICADO.- Produce incrustación en tuberías y calderas.

SODIO (Na)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Se encuentra también en salmueras, agua de mar, desperdicios industriales y drenajes.

SIGNIFICADO.- Grandes concentraciones en combinación con el cloro, producen un sabor salado. Cantidades fuertes comunmente limita el uso del agua para la agricultura.

SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución minerales que forman los suelos y las rocas. Puede incluir constituyentes orgánicos y agua de cristalización.

SIGNIFICADO.- El valor de los sólidos totales disueltos, es una medida de todas las concentraciones que se encuentran en el agua. Es un índice importante en la determinación de los usos del agua.

SULFATOS (SO_4)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Proviene de la disolución de rocas y suelos que contienen yesos, fierro y compuestos sulfurosos. Comunmente se presenta en aguas de drenaje de minas y en algunos desechos industriales.

SIGNIFICADO.- Concentraciones altas, actúan como laxante y en combinación con otros iones dá al agua un sabor desagradable. En agua que contiene calcio, producen incrustaciones.

REFERENCIAS

Drever, J.I. 1988. The Geochemistry of Natural Water, Second Edition. Prentice Hall. 437 p.

Freeze, A. and Cherry, J. 1979. Groundwater. Prentice Hall. 604 p.

Hem, John, 1971. "Study and Interpretation of The Chemical Characteristics of Natural Water". G.S.W.S.P. 1473.

CAPITULO 8

TRAZADORES DE AGUA SUBTERRANEA

8.1. RESUMEN

La técnica sobre la aplicación de trazadores en agua subterránea, se ha venido desarrollando con nuevas metodologías en los últimos 35 años. Los principales trazadores utilizados son: fluoriceinas, sales, esporas e isótopos. Las fluoriceinas son uno de los trazadores más económicos y fáciles de utilizar. Su aplicación se ha incrementado al introducir en el proceso de detección, el espectrofluorómetro y la concentración por medio de carbón activado. Las esporas, son el trazador más nuevo que existe, el cual ha probado ser de gran utilidad. Otro tipo de trazadores de agua subterránea, son los isótopos deuterio, oxígeno 18, tritio y carbono 14, cuya técnica y aplicación es cada día mayor.

8.2. INTRODUCCION

En determinadas ocasiones es de esencial importancia el conocer con exactitud si existe conexión entre dos puntos de un acuífero. Para ello se han llevado a cabo, desde el siglo pasado, experimentos consistentes en mezclar, en el agua de un aprovechamiento subterráneo localizado aguas arriba, una sal o un tinte, el cual puede ser reconocido en otro aprovechamiento localizado a cierta distancia aguas abajo, determinando así, la posible conexión entre dichos puntos. A esta técnica se le conoce como trazadores de agua subterránea.

Este método, se ha aplicado principalmente en rocas fracturadas, donde el tiempo de tránsito es corto, y en distancias hasta de 40 km (Zotl, 1970). En menor proporción, se ha llevado a cabo en medios granulares, ya que por una parte la velocidad de flujo es relativamente pequeña y por otra, la arcilla produce absorción e intercambio iónico, por lo cual la aplicación en este medio debe ser en distancias cortas.

Los puntos de inyección más comunes, son ríos subterráneos localizados dentro de cavernas y los principales puntos de muestreo son manantiales. Con algunas limitaciones los puntos de inyección y muestreo de trazadores pueden ser también pozos, norias, galerías filtrantes, drenes, lagos y presas. En algunas ocasiones, se ha utilizado esta técnica para determinar si el agua de manantiales, ríos o drenes, corresponden a filtraciones de una presa o lago.

Un buen trazador, debe reunir las características siguientes: Debe ser no tóxico; soluble en agua, identificable en pequeñas concentraciones; re-

sistente a cambios químicos; tener poca o nula capacidad de intercambio iónico; no ser absorbido o retenido por suelo o rocas; su determinación debe ser mediante análisis sencillos y su aplicación económica. Los principales trazadores son fluoresceínas, sales esporas e isótopos.

8.3 FLUORESCEINAS

Son sustancias que tienen la propiedad de emitir luz fluorescente. La longitud de onda de esta luz, varía de una sustancia a otra, propiedad que se utiliza para identificarlas. Las sustancias más comunes utilizadas como trazadores son: Uranina, Eosina, Aminorhodamina G extra, Rhodamina FB y Tinopal CBS-X.

A continuación se describen las características de cada una de estas sustancias.

- a) URANINA.- es la de mayor aplicación. Consiste en una fluoresceína de sodio que presenta un color naranja en soluciones concentradas (más de 1 ppm), que cambia de verde-amarillento al ser diluída.

La intensidad de fluorescencia depende del pH. En la fig. 8.1, se muestra la relación entre el pH y la intensidad de fluorescencia de la uranina. En aguas muy ácidas, pierde su fluorescencia pero este proceso es reversible, pudiendo recobrarla al añadir un compuesto básico, como KOH ó NH_3 . Esta propiedad puede utilizarse para identificar el trazador.

El poder de la uranina, puede disminuir por medio de procesos fotoquímicos como la luz ultravioleta, por agentes oxidantes como el cloro y el ozono y en algunos casos por procesos biológicos.

Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Antiguamente se utilizaban lámparas de luz ultravioleta para identificarla cuando se encontraba en concentraciones bajas. Actualmente las concentraciones entre 1×10^{-2} y 2×10^{-6} ppm son medidas con espectrofluorómetro.

La intensidad máxima de fluorescencia se detecta a una longitud de onda de 515×10^{-9} m. A mayor o menor longitud de onda la intensidad disminuye en forma simétrica (Fig. 8.2) y la forma de la curva distingue a la uranina de otra fluoriceína. Para concentraciones menores a 2×10^{-6} ppm, se utiliza carbón activado (W.B. WHITE, 1967, F. BAVER, 1972) el cual se coloca en el agua durante un tiempo que varía de un día a semanas, donde la urani

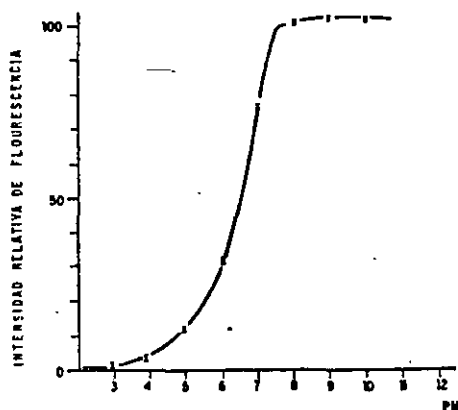


FIGURA 8.1.

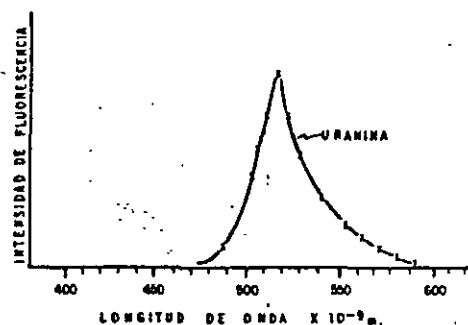


FIGURA 8.2.

- na es absorbida y concentrada de 50 a 500 veces por el carbón y su concentración medida posteriormente.

Para extraer la uranina del carbón, se le agrega a éste algunas gotas de una de las siguientes preparaciones:

Una parte de alcohol etílico al 95% y una parte de hidróxido de potasio diluido al 15% en agua destilada.

Ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF), dos partes de agua destilada y una gota de NH_3 .

Por último, la uranina es resistente a la absorción por arcilla y su uso no es tóxico para el hombre o animales.

- b) EOSINA.- Presenta una fluorescencia naranja-rosa, cuya máxima intensidad se detecta a una longitud de onda de $535 \times 10^{-9} \text{ m}$.

Cuando se presentan valores mayores de 0.01 ppm es visible al ojo humano. Entre 0.01 y $50 \times 10^{-6} \text{ ppm}$, puede detectarse con espectrofluorómetro. Concentraciones menores se concentran con carbón activado del cual puede extraerse añadiendo una sustancia compuesta por ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Al utilizarse junto con rhodamina FB o uranina, se producen interferencias por lo que su aplicación conjunta es limitada.

- c) AMINORHODAMINA G EXTRA.- Conocida anteriormente como sulforhodamina G extra, presenta una fluorescencia naranja-rosa en soluciones concentradas, que cambia a verde al ser diluida. Su mayor intensidad se presenta a una longitud de onda de $554 \times 10^{-9} \text{ m}$. Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm y con espectrofluorómetro pueden detectarse hasta $6 \times 10^{-3} \text{ ppm}$. Valores menores pueden concentrarse por medio de carbón activado, del cual puede ser extraída la fluoresceína, por medio de una solución de ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

Esta fluoresceína presenta inconvenientes, ya que es difícil de disolver y fácilmente absorbida por arcillas. En presencia de uranina, rhodamina FB o eosina, se producen interferencias.

- d) RHODAMINA FB.- Presenta un color púrpura y fluorescencia roja. Su mayor intensidad se detecta a una longitud de onda de 578×10^{-9} m. Es visible al ojo humano en concentraciones mayores de 0.01 ppm. Con espectrofluorómetro se detectan hasta 10×10^{-3} ppm. Valores menores pueden ser concentrados por medio de carbón activado del cual se extrae por medio de una de las soluciones siguientes:

- a) Cinco partes de propanol y 5 partes de hidróxido de amonio.
- b) Ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada.

La rhodamina FB, presenta interferencias al combinarse con uranina, eosina o aminorhodamina G extra. Es tóxica cuando se inhala en soluciones concentradas. Por otra parte, en presencia de arcillas es altamente absorbida.

- e) TINOPAL CBS-X.- Presenta un color verde con fluorescencia azul.

Su mayor intensidad se determina a una longitud de onda de 430×10^{-9} m. Es visible solamente en concentraciones mayores de 1 ppm. Con espectrofluorómetro se pueden detectar hasta 440×10^{-3} ppm. Valores menores son concentrados por medio de carbón activado del cual la fluoresceína puede extraerse agregando unas gotas de una solución que contenga ocho partes de N-N dimetilformadín (DMF) y dos de agua destilada. Este producto, es absorbido por arcillas.

- f) EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE FLUORESCEINA.- Con el propósito de ilustrar su aplicación, a continuación se presentan los resultados obtenidos en un experimento llevado a cabo en una región cárstica.

Se propuso conocer la conexión entre el agua de un río que se infiltraba dentro de una dolina y dos manantiales situados a 5 kilómetros de la primera. Para ello, se inyectaron 3 kg de uranina en el agua de la dolina y se obtuvieron muestras de agua cada dos horas en los manantiales "H" y "S".

En el manantial "S", no se detectó uranina, por lo que se concluye que este no tiene conexión con la zona de recarga donde se inyectó el trazador.

En el manantial "H", se empezó a detectar uranina 56 horas des-

pués de la inyección, y la concentración del trazador fue aumentando hasta llegar a 32 mg/m^3 , según se muestra en la Figura 8.3.

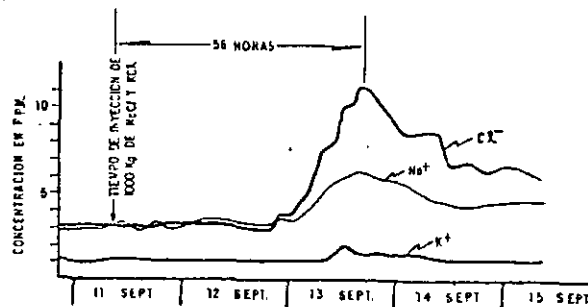
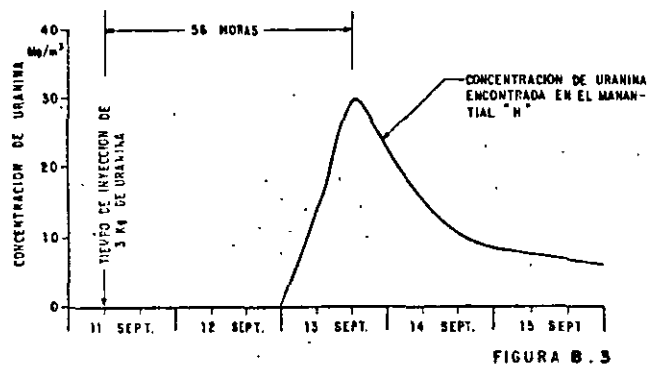
Otro ejemplo ilustrativo de la aplicación de trazadores, ahora en acuíferos granulares someros es el siguiente:

En un valle aluvial que presenta un acuífero freático a 3 m de profundidad, se perforaron 9 pozos a 3" de diámetro y 5 m de profundidad, distribuidos en la forma como se ilustra en la Figura No. 8.4.

En el pozo central, se inyectó uranina y se obtuvieron muestras de agua en el resto de los pozos, cada 20 minutos.

Después de 3 horas 20 minutos de la inyección, se detectó uranina solamente en los Pozos 4 y 5, de donde se puede obtener que el agua subterránea fluye en dirección sureste, a una velocidad de 1.5 m/hr .

Este método es utilizado en zonas sin información y su aplicación queda limitada por la profundidad a que se encuentre el nivel estático, ya que mientras mayor es ésta, mayor es el costo de los pozos de muestreo e inyección.



8.4. SALES

Las sales son el trazador artificial de agua subterránea más antiguo que se conoce se haya aplicado con éxito. Los productos utilizados más comunes son, sal de cloruro de sodio y sal de cloruro de potasio.

La sal es disuelta en agua y posteriormente incorporada al acuífero. Una de las desventajas que presenta este método, es que requiere que en la zona de inyección el caudal de agua que entre al acuífero sea grande. Por otra parte se necesita una gran cantidad de sal en cada experimento.

En zonas cársticas, para distancias entre 3 y 5 Km se requiere inyectar un mínimo de 500 Kg de sal (Zotl, 1975). La cantidad más grande que se ha llegado a inyectar en un experimento de trazadores, fue de 50 toneladas de NaCl, (W. Kass. en H. Batsche et. al., 1970), donde después de 4 días, se encontró en uno de los manantiales de observación un incremento de cloruros de solo 39 ppm.

Los grandes volúmenes de trazador requeridos mediante este método, hacen que su uso sea limitado. La ventaja consiste en que pueden efectuarse determinaciones cuantitativas.

- a) EJEMPLO SOBRE LA APLICACION DE SALES.- Durante los trabajos realizados para conocer la posible conexión entre el agua de un río que se infiltraba en una dolina y dos manantiales localizados a 5 kilómetros de ésta, como se mencionó en párrafos anteriores, se inyectaron 50 Kg de cloruro de sodio y 400 Kg de cloruro de potasio.

Posteriormente se obtuvieron muestras de agua con intervalos de dos horas cada una, tanto en el manantial "H" como en el "S", las cuales se analizaron químicamente determinándose el contenido de cloruros, sodio y potasio.

Al igual que en los resultados obtenidos para la fluoresceína (párrafos anteriores), en el manantial "S", no se detectó incremento alguno en su contenido salino, por lo cual se concluyó que este manantial no tiene conexión con el agua de infiltración de la dolina.

Por lo que se refiere al manantial "H", los resultados de los análisis se graficaron en la Figura 8.5., donde se observa que 56 horas después de la inyección de las sales, se detectó un incremento en los iones determinados, ratificando la comunicación entre la dolina y el manantial.

Considerando el tiempo que tardó en aparecer el trazador en el manantial y la distancia entre éste y la dolina, se obtuvo la velocidad de flujo del agua de este acuífero.

Por otra parte, con estos resultados y los de los análisis químicos y volúmenes aforados, es factible determinar el volumen mínimo de agua almacenado, así como el conocer en que proporción el

agua del manantial, proviene de la que se infiltra en la dolina.

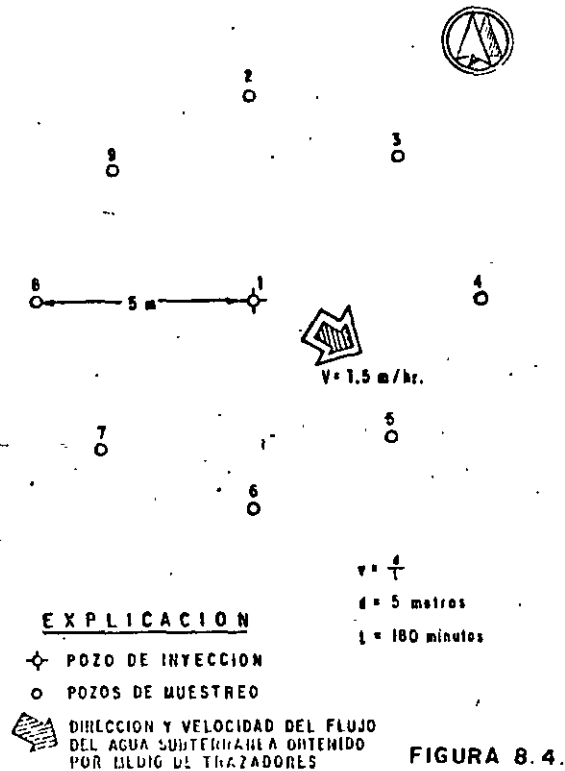


FIGURA 8.4.

8.5. ESPORAS

Las esporas utilizadas como trazadores corresponden al tipo *Lycopodium Clavatum*. Tiene un diámetro de 30-55 micras y un color amarillo pálido (1 micra = 10^{-4} cm).

Su forma es similar a la de un triángulo isósceles con lados convexos. Sus orillas forman cadenas de semicírculos cóncavos (Figura 8.6.). Están cubiertas por una fina membrana insoluble por lo que al ser incorporadas al agua son transportadas en suspensión. No se sedimentan y tienen la propiedad de no ser absorbidas o intercambiadas con el suelo o rocas.



FIGURA 8.6.

En el año de 1953, A. Mayr, trató de emplear las esporas como trazador debido a las propiedades que presentan pero su identificación resultó problemática. J. Zotl y V. Maurin, idearon teñir las esporas de diferentes colores para facilitar su identificación lo cual resultó exitoso. De esta manera pueden mezclarse en agua, esporas de diferentes colores y posteriormente de tectarse en cierta zona de muestreo identificándose, por el color, con cuales sitios tiene conexión.

El muestreo de esporas se lleva a cabo instalando redes para plancton las cuales se pueden dejar por tiempo indefinido en el lugar de muestreo. Al preparar la muestra para observarla en el microscopio, se ha visto que se obtienen resultados satisfactorios, si se lleva a cabo lo siguiente:

A las muestras de campo se le agregan 3 gotas de hidróxido de potasio al 10%, 3 gotas de formol al 35% y una pizca de urea; posteriormente se calienta en baño de María por tres minutos. Se centrifuga y el sedimento se concentra en un tubo al que se le agrega una gota de ácido etílico. Se coloca una pequeña parte de la preparación en una lámina delgada para su análisis al microscopio.

REFERENCIAS

- Davis, S.N., D.J. Cambell, H.W. Bentley and T.J. Flynn. 1985. Ground Water Tracers. National Water Well Association.
- Dechant, M., 1967 "Die Farbung der Lycopodiumspores" Steir Beitr. Z. Hydrogeologie, 18/19, 241-247.
- Dechant M., 1977, "The Dyeing of Lycopodium-Spores" Notes of The Ground Water Tracing Techniques Course" Graz, Austria.
- Gospodaric, R., and P. Habic. 1976. Underground Water Tracing. Yugoslav Committee for Inter.
- White, W. B., 1967, "Modifications of Fluorescein Dye Ground Water Tracing Techniques". Steir. Beitr. Z. Hydrogeologie, 18/19 151-158.
- Wittwen R., Waser H. and Matthe, B., 1971, Essai de Fixation de la Sulforhodamine B et de la Sulforhodamine G. Extra sur Charbon Actif". Act 4e Congr. Suisse Speleol. Neuchtel 1971, 78-83.
- Zotl J. G., 1965, "Karst Hydrological investigations for the Construction of the Diessbach Reservoir".

CAPITULO 9

ISOTOPOS AMBIENTALES

EN LA GEOHIDROLOGIA

9.1. DEFINICION Y ORIGEN

El nombre de isótopo se utiliza para distinguir a los átomos que tienen iguales propiedades físicas y químicas pero diferente masa. Las propiedades químicas de un átomo están definidas por el número atómico del elemento o sea - el número de protones. En el núcleo de los átomos se encuentran, además de - los protones, los neutrones; el total de neutrones y protones en el núcleo - se conoce como número de masa. Al variar el número de neutrones en un núcleo, se alterará su masa pero su carga seguirá siendo igual y por consiguiente - sus propiedades químicas no se alterarán. Los átomos con igual número de pro-
tones que el elemento original y diferente número de neutrones, son conoci-
dos como isótopos.

En otras palabras, los isótopos son átomos caracterizados por tener un mayor número de neutrones que el elemento original. Así, por ejemplo, el elemento - hidrógeno (^1H) en su forma natural tiene un protón y un electrón; cuando ade-
más de lo anterior llega a presentar un neutrón, se convierte en un isótopo - del hidrógeno denominado deuterio (^2H). Cuando presenta dos neutrones dentro
el núcleo, forma otro isótopo (^3H) conocido con el nombre de tritio. Otro ejemplo lo constituye el oxígeno, el cual tiene una masa de 16; cuando -
llega a incluir dos neutrones más dentro de su núcleo, da origen al isótopo -
denominado "oxígeno 18".

Los isótopos son conocidos también como elementos pesados, ya que tienen un -
peso mayor que el elemento "normal".

Los isótopos se forman por la interacción de los rayos cósmicos con la atmós-
fera y pueden provenir de la mayor parte de los elementos. Los de mayor apli-
cación en geohidrología son el deuterio (^2H), el oxígeno 18 (^{18}O), el tritio
(^3H), el carbono 14 (^{14}C) y las relaciones carbono 12/13 y azufre 32/34.

Los tres primeros son los de mayor importancia en geohidrología ya que for-
man parte de la molécula del agua.

Se encuentran en diferentes combinaciones de las cuales tres son las más co-
munes y de mayor interés para los estudios geohidrológicos, que corresponden
a: H_2^{16}O , H_2^{18}O y H_2^{18}O .

Al deuterio y al oxígeno 18, se les denomina isótopos estables; por lo que -
respecta al tritio, éste es radioactivo y se utiliza para determinar la -
edad del agua a partir del momento en que fue recargada al subsuelo.

Las relaciones carbono 12/13 y azufre 32/34, son utilizadas para conocer el -
origen del elemento en el agua, el cual puede provenir de la disolución de -
sales o de la descomposición de materia orgánica.

Los isótopos del hidrógeno tienen diferente peso atómico que el hidrógeno "Normal"; la molécula de agua que forman refleja esta diferencia; por ejemplo, la denominada agua pesada consiste en una molécula de agua que incluye al isótopo deuterio y presenta una masa de 20, comparada con el agua "normal" cuya masa es de 18. Esto, es una de las causas que ocasiona la variación de concentraciones isotópicas en el agua, bajo diferentes condiciones, como se verá más adelante.

En la Tabla No. 9.1. se presenta los isótopos más comunes.

En el agua de mar el contenido isotópico es bastante uniforme, lo cual permite usarlo como patrón mundial de referencia (SMOW, Standar Mean Ocean Water), y con respecto a él y de manera arbitraria, se expresan los contenidos isotópicos del oxígeno 18 y del deuterio.

TABLA 9.1. ISOTOPOS

NOMBRE	SIMBOLO	VIDA MEDIA AÑOS	RANGO DE EDAD DETECTABLE
<u>MAS COMUNES</u>			
DEUTERIO	D		
TRITIO	T	12.4	0 - 50 años
OXIGENO 18	¹⁸ O		
AZUFRE 34	³⁴ S		
CARBONO 13	¹³ C		
CARBONO 14	¹⁴ C	5730	500 - 40,000 años
NITROGENO 15	¹⁵ N		
<u>MENOS COMUNES</u>			
COLORO 37	³⁷ Cl		
ESTRONCIO 86	⁸⁶ Sr		
BORO 10	¹⁰ B		
SILICIO 32	³² Si	103	50 - 100 años
ARGON 39	³⁹ Ar	269	100 - 1,000 años
KRYPTON 85	⁸⁵ Kr		3 - 30 años

Los valores típicos para el agua dentro del ciclo hidrológico varían desde 0, tanto para el deuterio como para el oxígeno 18, en el agua de mar, hasta valores del orden de -400‰ de deuterio y de -40‰ de oxígeno 18.

9.2 UNIDADES Y METODO DE ANALISIS

Las unidades comunmente utilizadas para expresar la concentración de deuterio y de oxígeno 18, se denominan δ y son una relación de la concentración isotópica de la muestra de agua, respecto a la concentración del agua de mar, conocida como (Standar Mean Ocean Water). Se expresa en partes por mil.

$$\delta D = \frac{H^2/H^1 \text{ Muestra} - H^2/H^1 \text{ SMOW}}{H^2/H^1 \text{ SMOW}} \times 1000$$

$$\delta^{18}O = \frac{O^{18}/O^{16} \text{ MUESTRA} - O^{18}/O^{16} \text{ SMOW}}{O^{18}/O^{16} \text{ SMOW}} \times 1000$$

Las concentraciones de estos elementos son medidas por medio de espectrómetro de masas. Los niveles de precisión son de 0.2‰ para el oxígeno 18 y de $\pm 2\%$ para el deuterio (University of Waterloo, 1987).

La complejidad de la determinación hace que los costos por análisis sean elevados y que no se acostumbre realizarlos en forma rutinaria.

La determinación de estos análisis se efectúa mediante espectrómetros de masas, que en su mayoría están basados en el principio del espectrómetro de Nier.

El método de trabajo en la determinación de deuterio y oxígeno 18, es tratado por A. Cortés, 1986 y los principales aspectos del funcionamiento de un espectrómetro se comentan a continuación:

Un espectrómetro de masas es un aparato diseñado para separar moléculas de acuerdo a su relación masa-carga en base a su movimiento a través de campos eléctricos y/o magnéticos. Esencialmente, un espectrofotómetro de masas opera de acuerdo a los principios básicos de: Admisión del gas y formación de iones; aceleración y colimación de iones y; analizador magnético.

9.3. RECTA METEORICA MUNDIAL Y LOCAL

El contenido isotópico del agua de lluvia variará de acuerdo a ciertos factores, como son la altitud de precipitación, la presión barométrica ambiental, la temperatura, la latitud, época del año, etc., sin embargo, existe una re-

lación constante entre el deuterio y el oxígeno 18, tanto en tiempo como en espacio, la cual ha sido estudiada por el Organismo Internacional de Energía Atómica mediante análisis en diferentes partes del mundo y durante un amplio período, obteniendo que dicha relación obedece a la ecuación $\delta D = \delta^{18}O + 10$ (Dansgaard, 1964), la cual se conoce como la "línea meteórica mundial". La referencia general para la mayor parte de los trabajos es la "línea meteórica mundial", sin embargo, para cada sitio, ésta puede presentar cierta variación y denominarse "línea meteórica local", la cual es paralela a la línea mundial y generalmente con variaciones ligeras.

4. PROCESOS QUE MODIFICAN LA COMPOSICION ISOTOPICA DEL AGUA SUBTERRANEA

Los procesos que modifican el contenido isotópico del agua y que son conocidos como fraccionamiento isotópico, son principalmente la evaporación y la condensación.

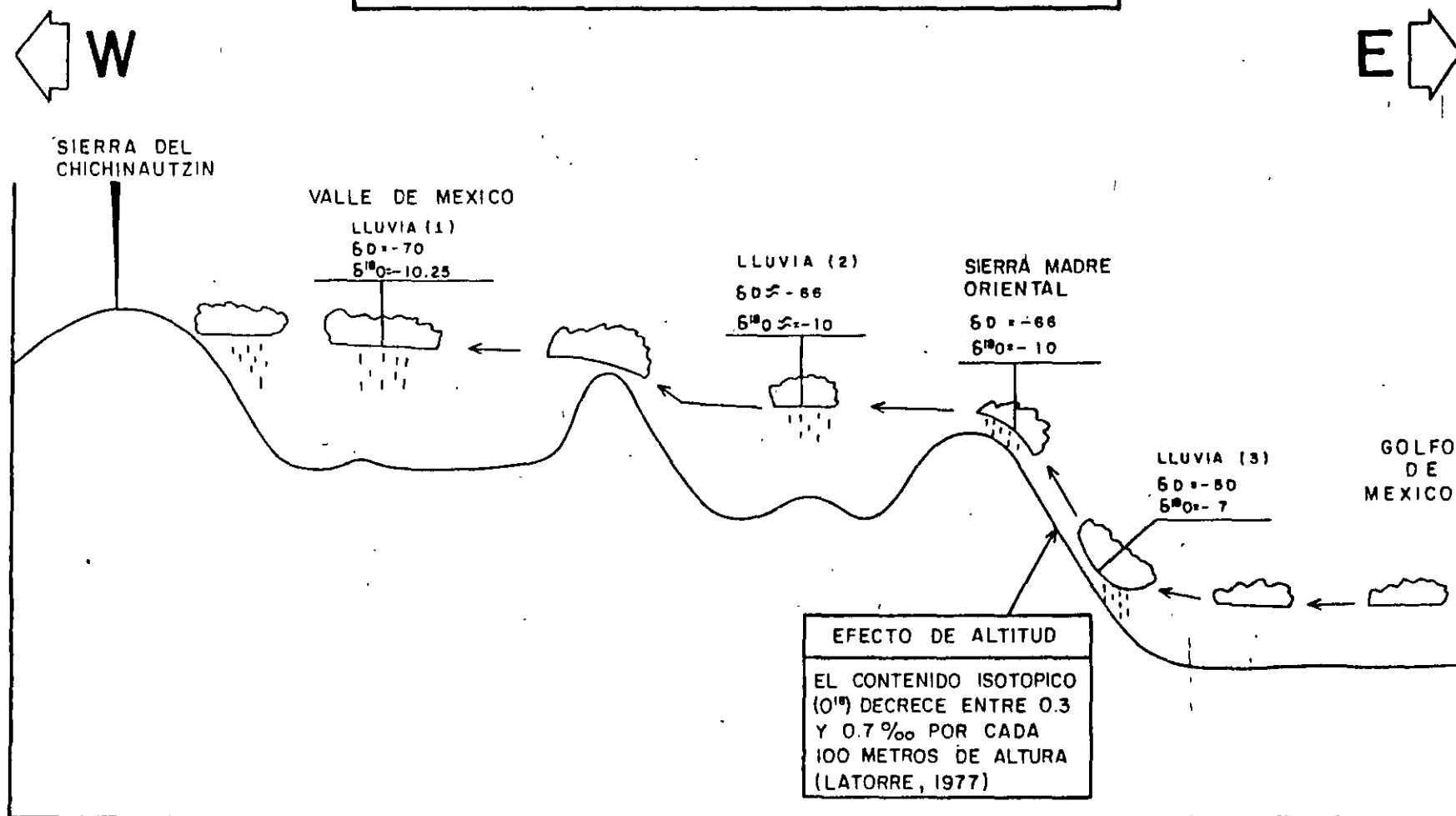
El deuterio y el oxígeno 18 de la atmósfera pasan a formar parte de la molécula del agua que se precipita en forma de lluvia, donde presenta una concentración isotópica característica. La mayor parte de las masas que forman las nubes provienen de los océanos y son transportadas hacia los continentes, modificando en su trayecto su concentración.

En forma general, el vapor formado en el océano presenta una concentración de oxígeno 18 de alrededor de -13‰; al ser transportadas hacia el continente las precipitaciones cercanas a la línea de costa llegan a tener valores de aproximadamente -3‰ debido a que en el proceso de condensación, la mayor concentración isotópica forma el agua de lluvia, en relación con la que se queda en la humedad de la atmósfera. Las nubes continúan su movimiento tierra adentro con alrededor de -15‰ de oxígeno 18 o sea empobrecidas.

En el ciclo hidrológico de los acuíferos del Valle de México, las principales masas nubosas que originan las precipitaciones provienen del Golfo de México, las cuales (Figura 9.1.) tienen en la zona costera un contenido isotópico de alrededor de -7‰ de oxígeno 18 y -50‰ de deuterio (Lesser, 1980). Los vientos predominantes transportan las masas nubosas tierra adentro, donde chocan y se elevan en el frente de la Sierra Madre Oriental; en esta porción, su contenido isotópico disminuye y las precipitaciones en la parte alta llegan a tener valores del orden de -10‰ de oxígeno 18 y -66‰ de deuterio. Las nubes que continúan hacia el Valle de México presentan, a la altura de Pachuca, valores que podrían ser del orden de -10‰ de oxígeno 18 y alrededor de -66‰ de deuterio, para posteriormente originar precipitaciones en las que se han detectado -10.25‰ de oxígeno 18 y -70‰ de deuterio, (Cortés y Farvolden, 1988).

En la Figura 9.2. se muestra la distribución del deuterio y el oxígeno 18 para el agua de lluvia en Norteamérica.

CROQUIS ILUSTRATIVO DEL COMPORTAMIENTO
ISOTOPICO DE LA LLUVIA DEL
GOLFO DE MEXICO AL VALLE DE MEXICO



- (1) CORTES Y FARVOLDEN, 1988
- (2) VALORES INFERIDOS DE ACUERDO A DATOS DE AGUA SUBTERRANEA EN PACHUCA Y PUEBLA (LESSER, 1987)
-) VALORES INFERIDOS DE ACUERDO A DATOS DE AGUA SUBTERRANEA EN VERACRUZ (LESSER, 1980)

FIGURA 9.1

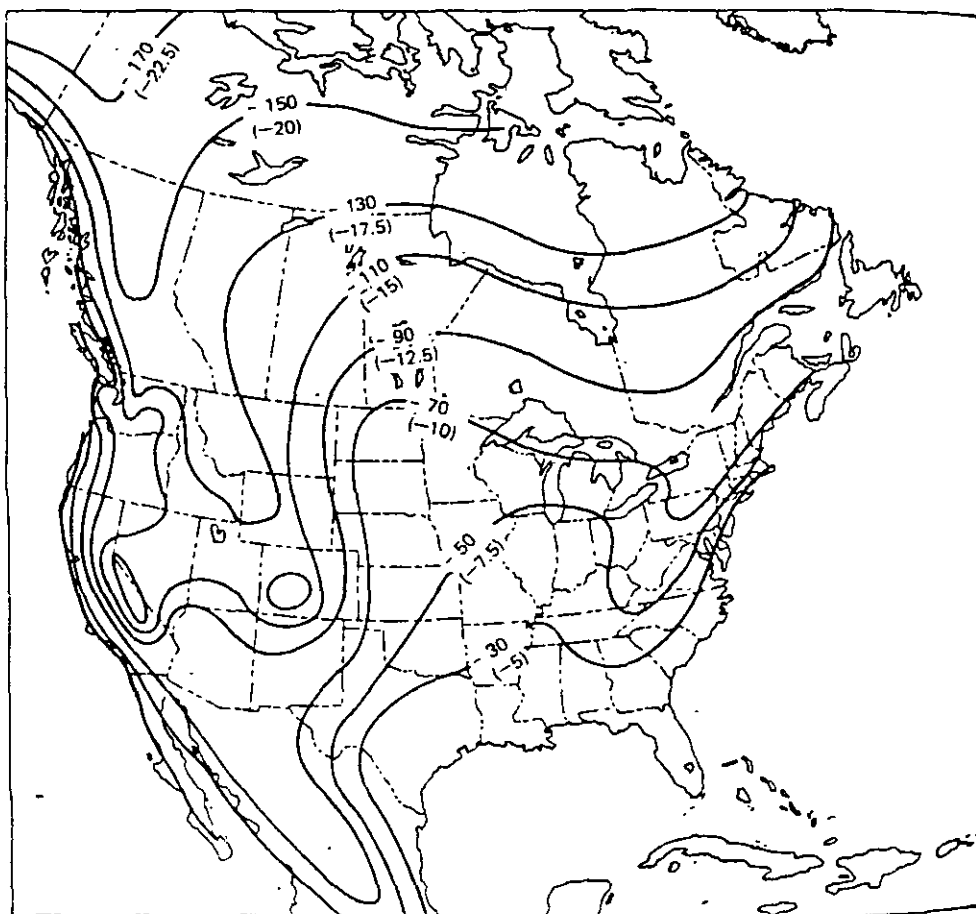


FIGURA 9.2. DISTRIBUCION DEL DEUTERIO Y OXIGENO 18 EN
AGUA PLUVIAL PARA NORTEAMERICA.
(DE: DREVER, 1988)

En el proceso mencionado, se presentan dos efectos. Primero el efecto continental, o sea la variación que presentan las lluvias de una zona húmeda en el océano hacia zonas de menor humedad conforme se internan en el continente, disminuyendo la concentración de los isótopos. Otro efecto es el de altitud, ya que el fraccionamiento isotópico que se produce al cambiar de altura, provoca una disminución en el contenido isotópico, la cual ha sido calculada por varios autores para diferentes sitios. Latorre 1977, indica que se han medido decrementos de 0.3 a 0.7‰ de oxígeno 18 por cada 100 metros de altura que se aumenten.

Otros factores que pueden llegar a modificar el contenido isotópico del agua, son la latitud y la evaporación y, en el subsuelo el intercambio con minerales, la presencia de altas temperaturas, la existencia de medios reductores y la hidratación de silicatos. En general, los contenidos isotópicos del agua de lluvia son menores en climas fríos.

El agua sujeta a procesos de evaporación va a modificar su contenido isotópico, el cual se va a incrementar, y en mayor proporción de oxígeno 18 que de deuterio (Figura 9.3.). El intercambio con los minerales formadores de rocas, afecta solamente al oxígeno 18, disminuyendo su concentración; el efecto contrario ocurre en aguas de alta temperatura, donde el intercambio con minerales llega a producir incrementos significativos solo de oxígeno 18. En medios fuertemente reductores, el gas sulfhídrico puede ser un importante componente del sistema geoquímico, de donde se pueden obtener cantidades bajas de deuterio. La hidratación de silicatos llega también a reducir el contenido de isótopos ambientales, sin embargo, de estos procesos solo la evaporación en cuerpos abiertos es común en el ciclo hidrológico.

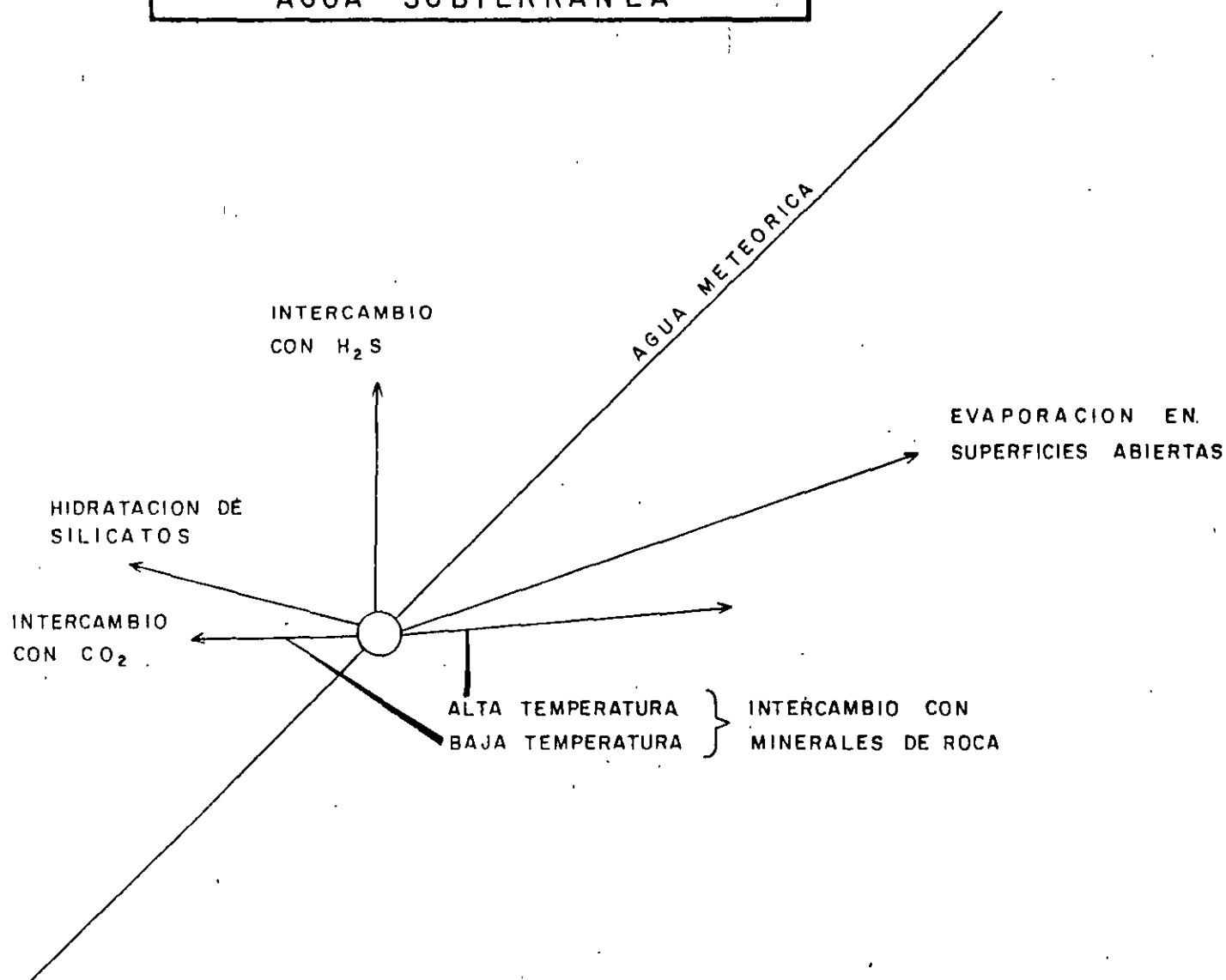
En la Figura 9.4. se muestra la relación de deuterio contra oxígeno 18 para las aguas naturales (Ferry and Polyakov, 1982), donde se marca: (1) La dirección del aumento en oxígeno 18 ocasionado por la interacción con minerales a altas temperaturas; (2) dirección del incremento isotópico por evaporación; (3) concentración del agua de mar; (4) línea meteórica mundial; (5) agua de zonas costeras; (6) agua de montañas e interior de continentes; (7) composición isotópica de nieve de altas montañas y polos; (8) nieve en el polo sur. Debido a que los elementos naturales son más ligeros que los isotópicos pesados (lo cual es una forma de expresar que los elementos ligeros tienen una mayor presión de vapor), al elevar la temperatura de un sistema y producir un cambio de estado, el sistema perderá preferente al elemento natural y se enriquecerá de isótopos. Los procesos de evaporación en el agua, repercuten directamente en el contenido isotópico de la precipitación pluvial, de acuerdo a ciertos patrones tales como variación estacional, latitud y altitud, lo cual se comenta a continuación:

9.4.1. VARIACION ESTACIONAL

Para el deuterio y el oxígeno 18 se presentan variaciones estacionales, que -

PROCESOS QUE PUEDEN MODIFICAR
LA COMPOSICION ISOTOPICA DEL
AGUA SUBTERRANEA

$\delta D\text{‰}$



DE: UNIVERSITY OF WATERLOO, 1987

FIGURA 9.3.

$\delta^{18}O\text{‰}$

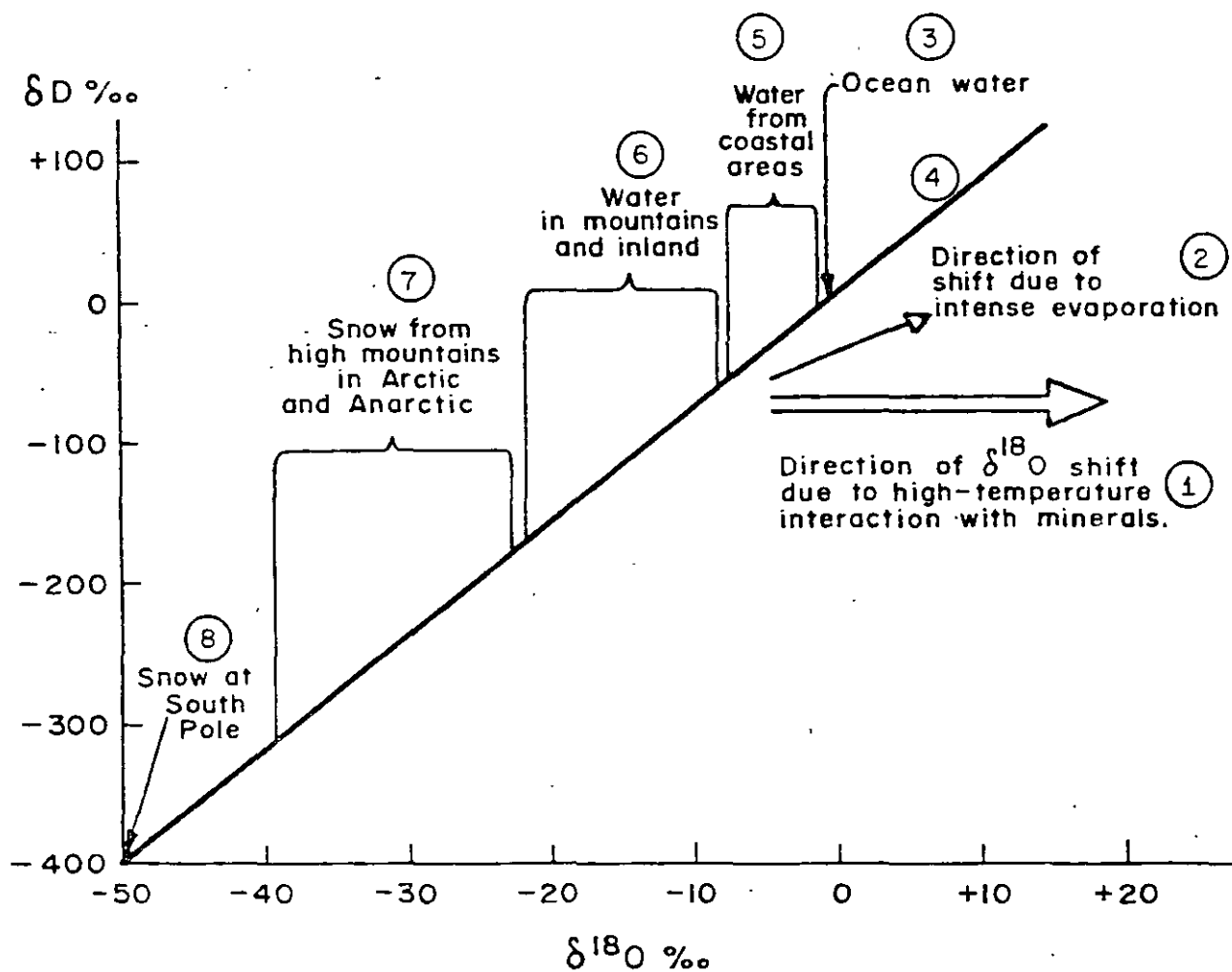


FIGURA 9.4.

DATOS DE : FERRONSKY Y POLYAKOV, 1982

se han comprobado mediante mediciones que realiza el Organismo Internacional de Energía Atómica, donde se ha observado que, en general, los valores isotópicos aumentan en verano y disminuyen en invierno principalmente por la temperatura característica de estas épocas, lo que es el principal factor modificador del contenido isotópico del agua a lo largo del año. En la Figura 9.5. se presentan estas variaciones para la estación Nord. Groelandia.

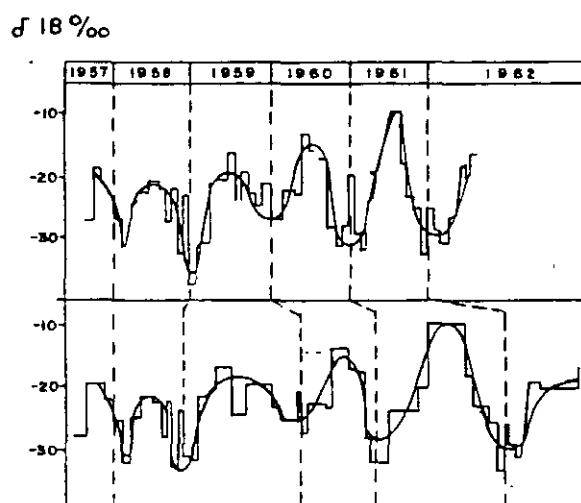


FIGURA 9.5. VARIACION ESTACIONAL DEL OXIGENO 18.
(MODIFICADA DE FONTES, J.C., 1966)

9.4.2. EFECTO POR LATITUD

Los isótopos varían también con la latitud, ya que la temperatura tiene influencia directa en su concentración. Se ha medido que, en las zonas tropicales, los valores de deuterio y oxígeno 18 son más altos y disminuyen hacia los polos. En general, existe una correlación entre el contenido de isótopos estables y la temperatura media anual, que a su vez está relacionada con la latitud. Para estaciones cercanas a los océanos y con temperaturas medias anuales en superficie (TA) menor de 10°C , se cumple que $\delta^{18}\text{O} = 0.69 \text{ TA} - 13.16\%$ y $\delta\text{D} = 5.6 \text{ TA} - 100\%$. Aunque esto se cumple exclusivamente para estaciones en las líneas de costa, ya que tierra adentro está sujeta a otros efectos.

En la Figura 9.6. se muestra la relación entre el oxígeno 18 y la temperatura media anual a diferentes latitudes y en la Figura 9.7. la concentración de deuterio en función de la latitud y altitud.

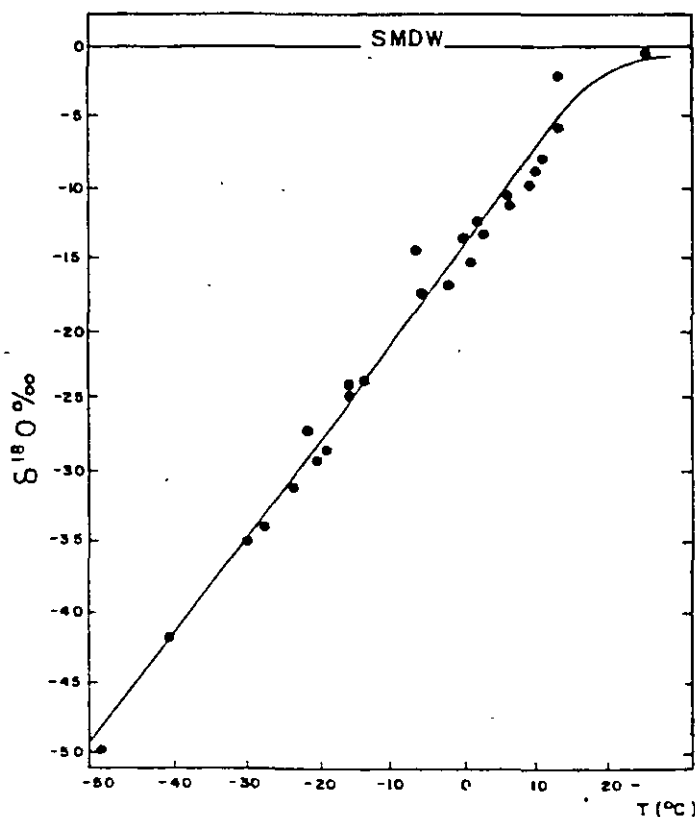


FIGURA 9.6. OXIGENO 18 CONTRA TEMPERATURA MEDIA ANUAL A DIFERENTES LATITUDES (FONTES, J.C., 1976)

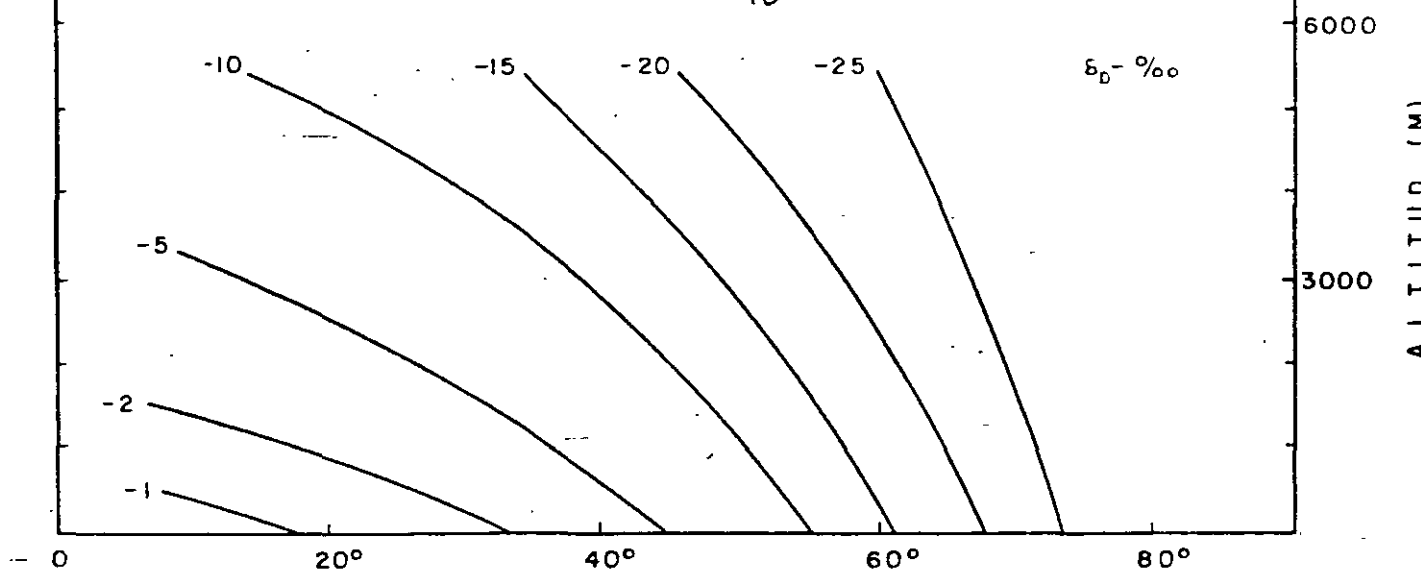


FIGURA 9.7. LATITUD, NORTE
CONCENTRACION DE DEUTERIO EN
FUNCION DE LA LATITUD Y ALTITUD
(DANSGAARD, 1964)

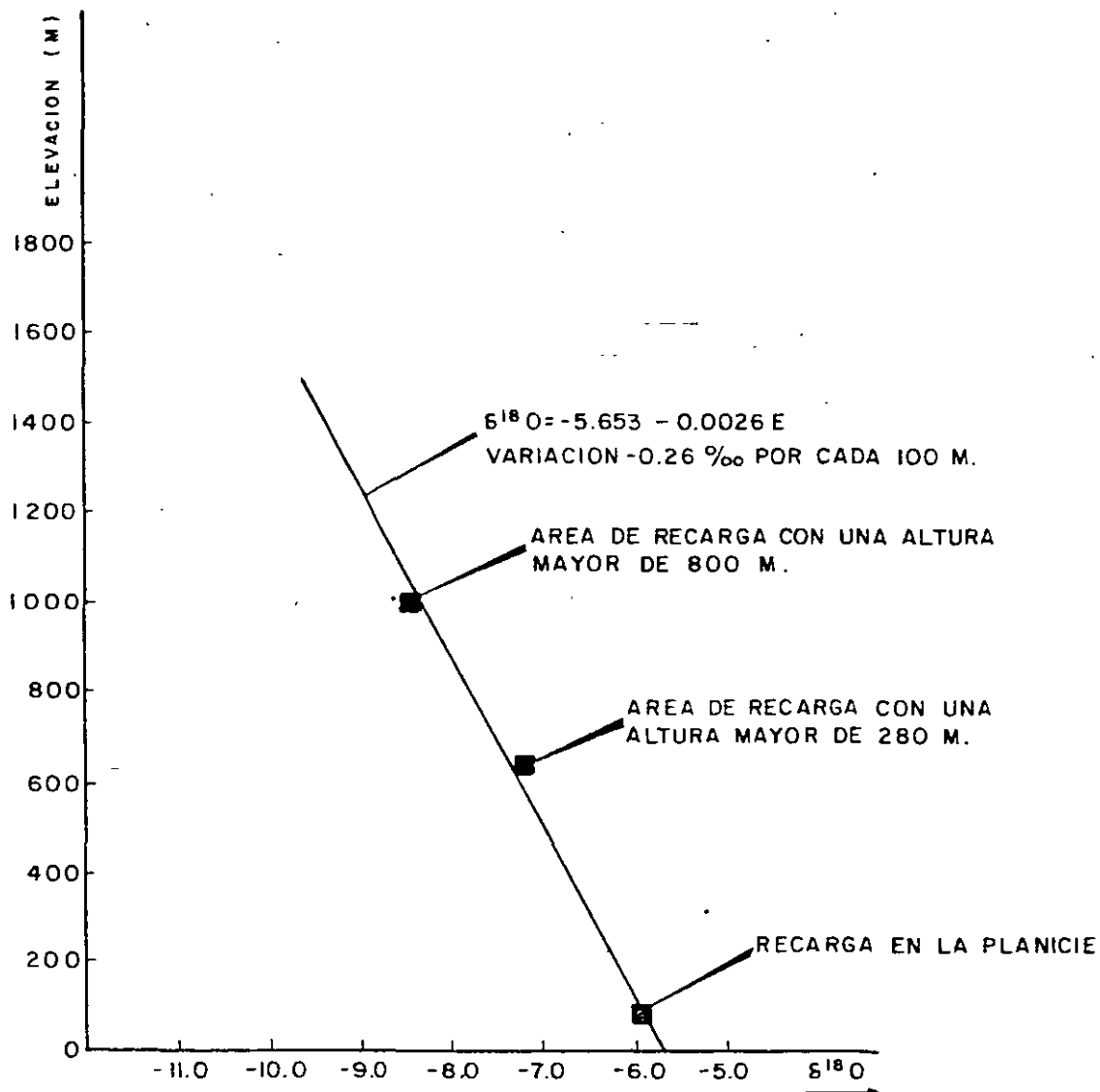


FIGURA 9.8. ALTURA DE RECARGA -vs- OXIGENO 18
(DE: PAYNE AND YURTSEVER, 1974)

9.4.3. EFECTO CONTINENTAL

El efecto continental indica que los valores de deuterio y de oxígeno 18 disminuyen conforme se interna en los continentes. Este hecho está asociado con la pérdida gradual de isótopos pesados a que están sujetas las masas de humedad durante su trayectoria desde los océanos. En la Figura 9.2. se muestran cambios en la concentración isotópica de la zona húmeda oceánica, hacia una zona más seca tierra adentro. En el proceso de condensación la fase gaseosa cede preferentemente sus isótopos pesados, quedándose con los más ligeros. Las masas de humedad de la atmósfera, al precipitarse en forma de lluvia, pierden gradualmente sus isótopos pesados conforme penetran en el continente.

9.4.4. EFECTO POR ALTITUD

Estos isótopos presentan también cambios con la altura, por las alteraciones isotópicas que causa la evaporación y el intercambio isotópico en la precipitación pluvial, los que son más notorios conforme mayor sea su trayectoria hasta llegar al suelo. Existe mayor empobrecimiento en isótopos conforme es mayor la altura de la zona donde ocurre la precipitación. De esta forma, es de esperarse que los contenidos de deuterio y de oxígeno 18 de la lluvia al nivel del mar, sean mayores que el de aquella agua que se precipita a mayor altura. En la práctica, se ha demostrado que es posible distinguir isotópicamente precipitaciones pluviales cuya diferencia de altura es de sólo 100 metros. Se han medido por varios autores, variaciones que fluctúan entre 0.16 y 0.7% de oxígeno 18, por cada 100 metros de altura. Latorre 1977, menciona variaciones de 0.3 a 0.7%. (Figura 9.2.).

En la Figura 9.8. se muestra la relación del oxígeno 18 contra la altura de recarga en un ejemplo de Nicaragua.

9.4.5. EFECTO DE EVAPORACION

La evaporación del agua en espacios abiertos superficiales, es uno de los principales modificadores de su contenido isotópico. La intensa evaporación a que puede estar sujeta el agua, causa un enriquecimiento de isótopos y además, debido a que el proceso es violento, se produce fuera de equilibrio, lo que causa que la variación relativa del oxígeno e hidrógeno, no cumplan la misma relación que la línea meteórica mundial. En la práctica, se ha encontrado que el enriquecimiento isotópico causado por la evaporación en condiciones fuera-

de equilibrio, lo que causa que la variación relativa del oxígeno e hidrógeno, no cumplan la misma relación que la línea meteórica mundial. En la práctica, se ha encontrado que el enriquecimiento isotópico causado por la evaporación en condiciones fuera de equilibrio, tales como a las que están sujetas las presas o lagos y en general cuerpos de agua abiertos, tienen una correlación lineal dada por la siguiente ecuación $\delta D = (5 \pm 1) \delta^{18}O + C$

9.4.6. EFECTOS GEOTERMICOS.

En campos geotérmicos los isótopos pueden presentar alteraciones. En general los cambios son muy lentos pero se aceleran al existir temperaturas elevadas. En este caso, el contenido de oxígeno 18 del agua sobrecalentada tiende a equilibrarse con el alto contenido de las rocas, especialmente de los silicatos y los carbonatos, mientras que el deuterio del agua no se altera. Esto, trae como consecuencia que se produzca una línea isotópica característica para los campos geotérmicos de ecuación $\delta D = (0 \pm 2) \delta^{18}O$.

9.5. METODO GENERAL DE INTERPRETACION

Los isótopos son utilizados para obtener un mejor y más claro conocimiento del flujo del agua subterránea, así como para inferir su historia a través del subsuelo. Mediante su interpretación se pueden identificar zonas de recarga; generalmente los valores más bajos indican puntos de recarga a gran altitud y bajo condiciones climáticas brías. Pueden diferenciarse los sistemas de flujo regionales de los flujos locales; se pueden identificar aguas que han estado expuestas a evaporación en cuerpos abiertos superficiales, así como mezclas de los diferentes tipos de aguas mencionados anteriormente. Esto es posible por las especiales características de los isótopos estables que se han venido mencionando, en especial debido a que tanto el isótopo como el elemento "normal", tienen las mismas propiedades físicas y químicas, o sea que, entre otras cosas, la disolución natural de sales por el agua no modifican el contenido isotópico, a menos que exista algún efecto de evaporación u otro de los mencionados anteriormente.

En la Figura 9.3. se muestra el método general de interpretación que se sigue al graficar el deuterio contra el oxígeno 18. La línea meteórica mundial se utiliza como referencia en la mayor parte de las interpretaciones isotópicas. El agua de lluvia, al evaporarse en cuerpos abiertos en la superficie, llega a presentar contenidos altos de isótopos pesados, los cuales se ubicarán a la derecha de la gráfica; las mezclas entre agua del acuífero y agua evaporada, se encontrará sobre una recta que une al agua de lluvia con la zona típica de agua evaporada.

Algunos procesos que ocurren dentro del ciclo hidrológico llegan a modificar el balance relativo de los elementos nucleares. Sin embargo, esta alteración obedece a patrones definidos y lejos de representar una desventaja, cuando las condiciones son favorables, los procesos a los que ha estado sujeta permiten rastrear su evolución.

9.6. TRITIO

El exceso de neutrones de los isótopos de una familia provoca, en algunos casos, cierta inestabilidad que trae como consecuencia que el isótopo tienda a cambiar después de cierto tiempo su estado o composición. A estos isótopos se les llama radioactivos o radioisótopos.

Emiten rayos alfa, beta o gama, lo cual produce el efecto denominado decaimiento radioactivo. Se ha demostrado experimentalmente que si se tiene una muestra estadísticamente representativa de un radioisótopo, el decaimiento del conjunto no es al azar, sino que obedece a una ley exponencial en función del tiempo, lo cual permite cuantificar su radioactividad y en base a ello determinar edades cortas, de hasta 50 años. Para edades de varias decenas de miles de años, se utiliza el carbono 14, que es otro isótopo radioactivo. Esta misma propiedad de decaimiento radioactivo, es utilizada en geología para la datación de rocas, donde la edad se deduce a partir de las relaciones isotópicas rubidio-estroncio y potasio-argón. En la Tabla 9.1. se presentan los isótopos más comunes.

El decaimiento estadístico obedece a una ley exponencial en función del tiempo, la cual se expresa como $x = x_0 e^{-\lambda t}$; donde x_0 es el número inicial de radioisótopos originales y x el número de radioisótopos que quedan después de un cierto tiempo t ; λ es una constante de decaimiento.

Se define como vida media ($T_{1/2}$) el tiempo en que decae la concentración de un isótopo a la mitad de su concentración original. La vida media del tritio es de 12.26 años.

El valor de la constante de decaimiento en función de la vida media es:

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

donde llega a formar parte de las nubes y se precipita en forma de lluvia. Los átomos de hidrógeno son bombardeados por neutrones cósmicos que son incorporados al núcleo del hidrógeno, formando el tritio. La cantidad de tritio que se forma en la atmósfera es de alrededor de 0.25 átomos por segundo por centímetro cuadrado (Lal and Peters, 1962). Ciertas actividades del hombre, como son las explosiones nucleares, han incrementado la cantidad de tritio en la atmósfera, ocasionando la presencia de concentraciones variables en tiempo y en espacio.

Las determinaciones de tritio o de otros isótopos radioactivos se realizan mediante técnicas químicas altamente especializadas y son difíciles de detectar. Bajos valores de tritio requieren ser concentrados por electrolisis y contados por centelleo líquido.

El tritio se expresa en unidades de tritio U.T., lo cual se define como la concentración en la que existe un átomo de tritio por cada 10^{18} átomos de hidrógeno.

Una unidad de tritio es equivalente a 7.2 desintegraciones por minuto en un litro de agua, o bien a 2.1 picocuries por litro.

El contenido del tritio producido en forma natural es del orden de 10 U.T. Como consecuencia de las pruebas nucleares, en 1963 se llegó a detectar concentraciones de hasta 6000 U.T. en la estación de Ottawa, Canadá y 3700 U.T. en Colorado, E.U. (Figuras 9.9. y 9.10.). Su concentración ha venido disminuyendo; actualmente en la Ciudad de México, se detectan concentraciones de tritio en el agua de lluvia del orden de 3 U.T. (P. Morales, Comunicación Personal). El movimiento de masas de aire produce una variación estacional de tritio, en la que en el hemisferio norte se encuentran valores máximos durante el verano y mínimos durante el invierno, como se puede observar en la Figura 9.9.

El tritio varía también con la latitud. Por lo general, se observa que en el hemisferio norte su concentración es mayor y de forma similar que sus valores en los continentes son mayores que en los océanos, lo cual se ilustra en la Figura No. 9.11., donde se marca la distribución mundial de tritio para el año de 1963. Nótese que actualmente debe de presentar variación, debido al decaimiento radioactivo.

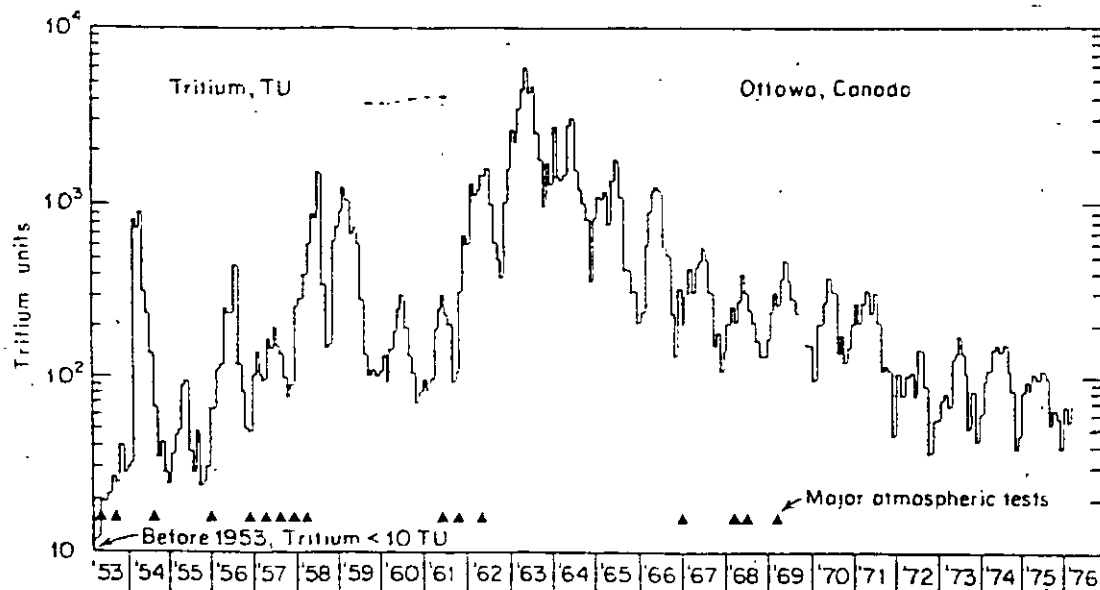


Fig. 9.9. De: Freeze and Cherry, 1979

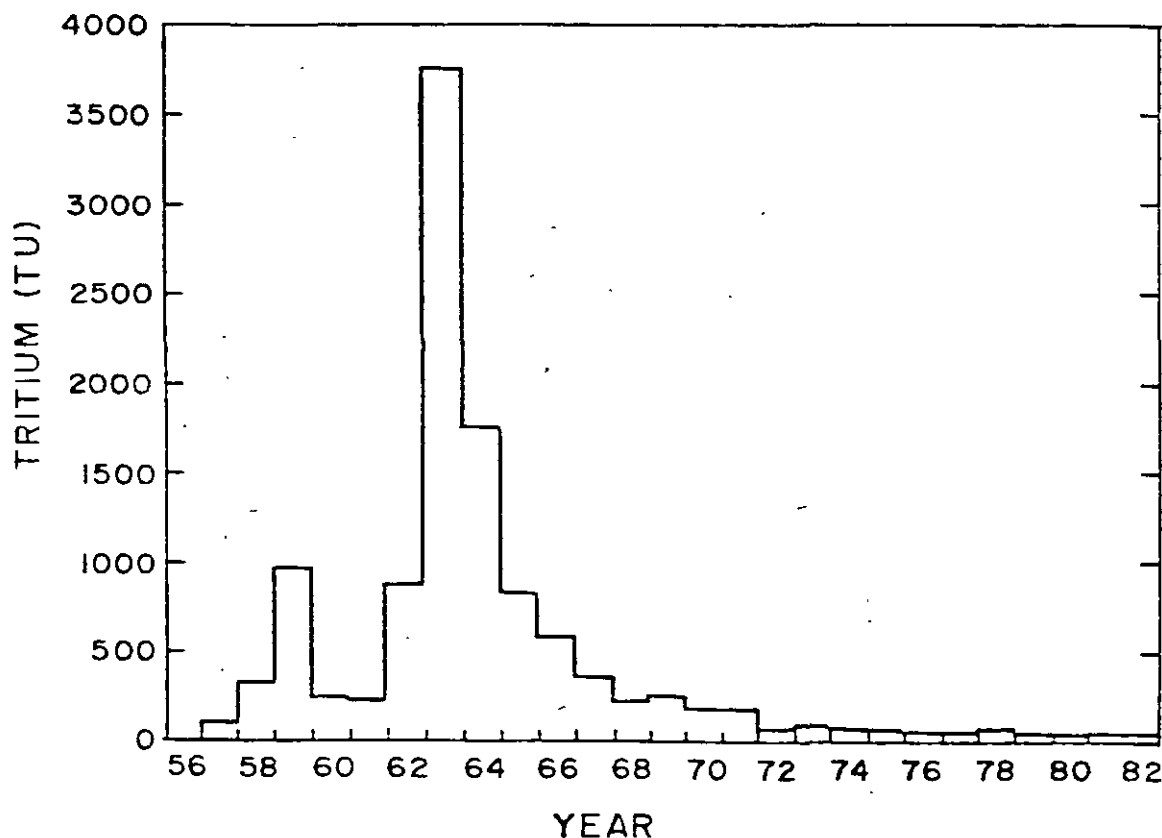
Antes de las explosiones atómicas de principios de la década de los 50's, la cantidad de tritio en el agua de lluvia era de 5 a 15 U.T.; debido al decaimiento radioactivo, el agua que se infiltró en esa fecha, contiene ahora, teóricamente de 0.6 a 2 U.T. (el límite de detección del tritio es de ± 0.2 U.T., o sea que si el agua muestreada y analizada por tritio contiene menos de 2 U.T., podemos inferir que se trata de agua precipitada hace más de 35 ó 40 años y se puede denominar "agua antigua", en contraste con la que presenta concentraciones mayores de 2 U.T. y que se denomina "agua moderna".

Con las explosiones atómicas que se realizaron en la década de los 50 y hasta 1963, la cantidad de tritio en la atmósfera aumentó considerablemente, para llegar a tener en nuestro país alrededor de 180 U.T. Por lo tanto, si aplicamos el factor del decaimiento radioactivo al agua de lluvia que recargó los acuíferos entre 1952 y 1963, obtenemos que actualmente tiene entre 22 y 45 U.T.

Posteriormente a 1963, la cantidad de tritio en la atmósfera ha ido decreciendo para aparentemente estabilizarse en nuestros días en 5 y 10 U.T.

En la Figura 9.12. se ilustra la posible edad del agua de acuerdo a su contenido actual de tritio, siempre y cuando no hayan existido mezclas.

Fig.9.10. Promedio Anual de Tritio en Agua de Lluvia y Nieve, en los Estados de Arizona, Colorado, Nuevo México y Utah. (de: Davis, 1985).



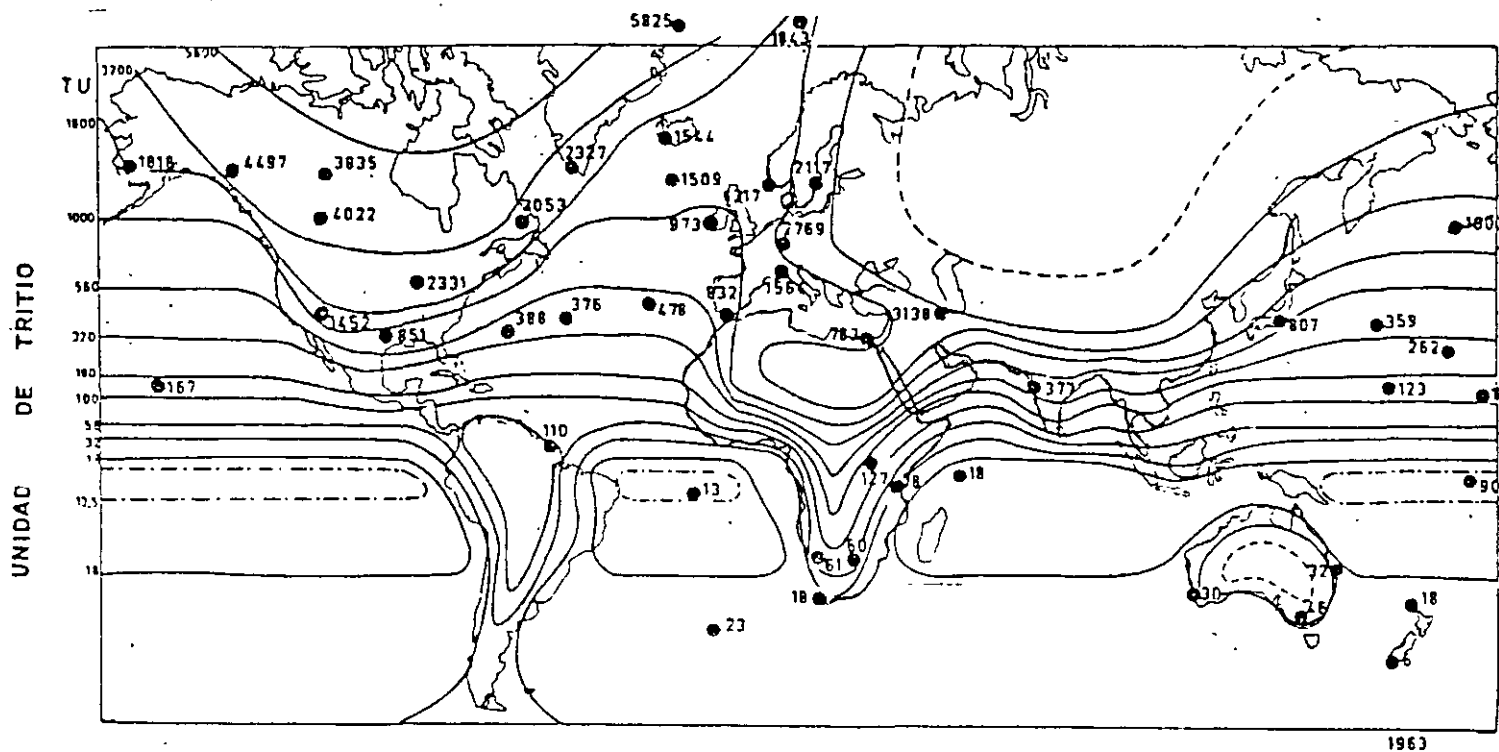


Figura 9.11. DISTRIBUCION GLOBAL DE TRITIO PROMEDIO PARA 1963 (IAEA, 1968)

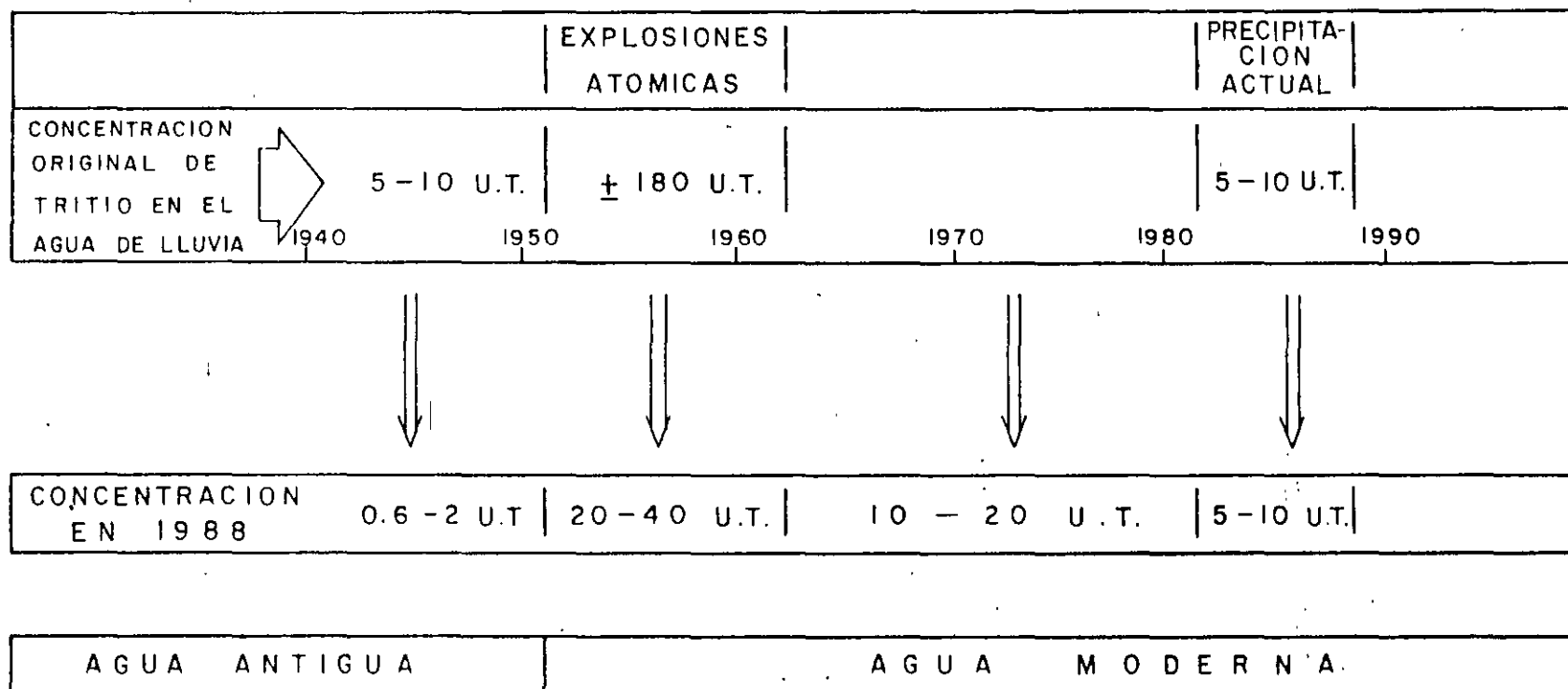


FIGURA 9.12. CONCENTRACION ACTUAL DEL TRITIO EN AGUAS INFILTRADAS EN LOS ULTIMOS 40 AÑOS.

REFERENCIAS

- Beiser A., 1970. Concepts of Modern Physics. Ed. McGraw Hill.
- Burdon, D. J., Et Al. 1963. The use of Tritium in Tracing Karst Ground- - water in Greece; in Radioisotopes in Hydrogeology IAEA Symposium, Tokyo, pp 309-320.
- Cortés A., 1986. Aplicación de la espectrometría de masas y técnicas isotópicas para la determinación de oxígeno 18 y deuterio en problemas hidrológicos. Tesis Profesional, U.N.A.M.
- Cortés A., and Farvolden, R. N. 1988. Isotope studies of precipitation and Groundwater in the Sierra de Las Cruces, Mexico. Submitted to Journal of Hydrogeology.
- Coleman, D. D., Meents, W. F., Liu, C-L; and Keogh, R.A. 1977. Isotopic - identification of leakage gas from Underground storage reservoirs A progress report. Illinois State Geol. Survey, Illinois Petroleum.
- Custodio, E. 1976. Trazadores y Técnicas Radioisotópicas en Hidrología Subterránea; en Hidrología Subterránea Sección: 12 Vol: 2, Editado por E. Custodio y M. R. Llamas; Ediciones Omega, Barcelona, España, pp. 1165-1312.
- Craig, H. 1961. Isotopic Variation in Meteoric Waters. Science 133, pp. 1702-1703.
- Craig, H., 1961. Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and - Oxygen 18 in Natural Waters. Science 133, p. 1833.
- Davis, S. N., and Bentley, H. W. 1982. Dating Groundwater, a short review In Nuclear and Chemical Data Techniques, Lloyd Curie, Ed., Am. Chemical Society Symposium Series No. 176, Chapter 11, p.p. 187-222.
- Davis, S. N., Campbell, D.J. Bentley, H. W., and Flynn, T. J., 1985. Ground Water Tracers. Publish by the National Water Well Association. 200 p.

- Drever, J. I. 1988, The Geochemistry of Natural Waters. Second Edition. Prentice Hall. 437 p.
- Dansgaard, W. 1964. Stable Isotopes in Precipitation. Tellus, Vol 16,4 pp 436-468.
- Ehhalt, R., Knott, K., Nage, J.F., Vogel, J.C., 1963. Deuterium and Oxygen 18 in Rainwater, J. Geophys. Res. 68. p. 3775.
- Epstein, S., Mayeda, T.K., 1963. Variations of the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ Ratios in Natural Waters. Geochim. Cosmochim. Acta 4, 213 p.
- Friedman, I., 1953. Deuterium Content of Natural Waters and Other Substances. Geochim. Cosmochim. Acta 4, 89.
- Fritz, P., Drimmie, R. J., Render, F. W. 1975. Stable Isotope Contents - of a major Prairie Aquifer in Central Manitoba, Canada. Isotope Techniques on Groundwater Hydrology. Proc. Symp. Vienna IAEA.
- Ferronsky, V. I., and Polyakov, V. A., 1982. Environmental Isotopes in the Hydrosphere. John Wiley and Sons, Interscience Publications New York, 466 p.
- Fritz, P., and J. Ch. Fontes (eds). 1980. Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 1, The Terrestrial Environment A. Elsevier, 545 pp.
- Fritz, P. 1984. Environmental Isotope Hydrogeology. Tools to Complement the Classical Techniques of Physical Hydrology and Geochemistry. University of Waterloo.
- Fritz, P., and J. Ch. Fontes (eds) 1986. Hand book of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 2, The Terrestrial Environment B. Elsevier, 557 pp.
- Fritz, P., Drimmie, R. J., Frappe, S. K., and O SHEA, K. (1987) The Isotopic Composition of Precipitation and Groundwater in Canada. In: International Symposium on the use of Isotope Techniques in Groundwater resources Development. IAEA. Vienna, Austria.

- Fontes, J. C., and Fritz, P. 1975. Isotope Hydrology 1974. A review of - the IAEA Symposium on isotope Techniques in Groundwater Hydrology. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 4, pp. 321-324.
- Fontes, J. C., 1980 Environmental Isotopes in Groundwater Hydrology: Handbook of Environmental Isotope Geochemistry. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Vol. 1, 75 p.
- Fox, C.S. 1952. Radioactive Isotopes Trace Underground waters. Public - Works, Vol 83, pp 57-58.
- Freeze, R. A. and Cherry, J. A. 1979. Groundwater. Prentice Hall. 604 p.
- Friedman, I., Redfield, A. C., Schoen, B., Harris, J. 1964. The Variation of the Deuterium Content of Natural Waters in the Hydrologic - Cycle. Rev. of Geophysics, V. 2, No. 1.
- Garlick, G. D. 1974. The stable isotopes of oxygen, carbon, and hydrogen in the marine environment. In The Sea, Vol. 5, E. D. Goldberg ed Wiley-Interscience, New York, pp. 393-425.
- Gonfiantini, R., Gratziu, S. and Tongiorgi, E. 1965. Oxygen Isotopic Composition of Water in Leaves. In: Isotopes and Radiation in soil-plants. Nutrition Studies. Proc. IAEA Symp. Vienna, pp. 405-410.
- International Atomic Energy Agency. 1968. Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology; Tech. Report. Series No. 91.
- International Atomic Energy Agency, 1973. Nuclear Techniques in Ground-- Water Hydrology. In Groundwater studies: UNESCO, Paris, Sections 10.1-10.4, 38 p.
- IAEA. 1981. Stable Isotope Hydrology. Technical Report Series 210 IAEA, - Vienna, pp 337.
- Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1985. Estudio Hidrogeoquímico - de Acuíferos. Contrato 5-33-1-1110. DGCOB.-D.D.F.

- Latorre, C. 1978. Aplicación de las Técnicas de Isótopos Ambientales al Estudio del Agua Subterránea. Informe Inédito, S.A.R.H.
- Latorre, C., Lesser, J.M., Quijano, L. y Payne, B. 1980. Isótopos Ambientales Aplicados al Estudio de la Interconexión de los Acuíferos Calizos y de rellenos en la Región Lagunera de Coahuila-Durango, México. Interamerican Symposium on Isotope Hydrology. Bogotá, Colombia, p.p. 135-148.
- Lesser, J. M. 1974-1980. Aplicación de Isótopos Ambientales en el Estudio de los Acuíferos de: Durango, Sierra del Burro, Coah., Cuautla, Mor., Río Atoyac, Pue., Río Fuerte, Sin., Altiplano Mexicano, - Presa San Ildelfonso, Oro., Valle de Tlacolula, Oax., Piedras Negras, Coah., y San Ciro, S.L.P. Informes Inéditos. Biblioteca de la Dirección de Aguas Subterráneas, S.A.R.H.
- Lesser, J. M. 1979. Apuntes de Hidrogeoquímica. División de Educación Continua, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Lesser, J. M. 1984. Aplicación de Isótopos Ambientales en los Alrededores del Río San Lorenzo, Sin. Boletín de Difusión Técnica y Científica No. 2, Asociación Geohidrológica Mexicana.
- Lesser, J. M., Sánchez, L.F., y González, D. 1986. Hidrogeoquímica del Acuífero de la Ciudad de México. Ingeniería Hidráulica en México, Vol. 1, Número 4.
- Lesser, J.M. 1987. Dictámen Geohidrológico-Isotópico para definir el funcionamiento y zonas de recarga del campo de pozos del área denominada Ojo de Agua de Patagalana, Municipio de Parras, Coah. Seminario de Hidrología Isotópica. IAEA-ININ, México.
- Lesser y Asociados, S. A. 1985. Estudio Isotópico del Acuífero del Valle de México. Elaborado para la D.G.C.O.H. del D.D.F.
- Lesser y Asociados, S. A. 1986. Evaluación del Comportamiento Hidrogeoquímico de Desechos Sólidos y Líquidos sobre el Acuífero del Valle de México. Contrato 6-33-1-0390, D.G.C.O.H. - D.D.F.

- Lesser y asociados, S. A. 1986. Actividades Geohidrológicas en el Valle de México. Informe del Contrato 6-33-1-0196. D.G.C.O.H. - D.D.F.
- Lesser, J.M. 1988. Técnicas isotópicas Aplicadas a la Geohidrología. Apuntes del Curso de la División de Educación Continua de la Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Lesser y Asociados, S. A. 1988. Piezometría y Balance Geohidrológico del Valle de México. Informe del Contrato 8-33-1-0319. D.G.C.O.H. D.D.F.
- Lesser y Asociados, S. A. 1988. Aplicación de Isótopos Ambientales en la Zona de Monclova, Coah. Informe para Altos Hornos de México.
- Libby, W.F. 1961. Tritium Geophysics. Jour. Geophys. Research, Vol. 66, - p.p. 3767-3782.
- Loosly, H.N., and Oeschger, H. 1978. Argon 39, Carbon 14, and Krypton 85 Measurements in Groundwater samples. In: Isotope Hydrology 1978. IAEA, Vienna, Vol. 2, p.p. 931-945.
- Matsuo, S., Friedman, I. 1967. The Deuterium Content of Fractionally Collected Rainwater, J. Geophys. Res. 72-p. 6347.
- O'Neil, J.R. 1979. Stable isotope geochemistry of rocks and minerals. In Lectures in Isotope Geology, E. Jager and J. C. Hunziker, eds.- Springer-Verlag, New York, p.p. 236-263.
- Payne, B.R. 1972. Isotope Hydrology. Advances in Hydroscience, Vol. 8.
- Payne, B.R., Yurkstever, Y. 1974. Environmental Isotopes as a Hydrogeological Tool in Nicaragua. Proc. Sim. Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, IAEA, Vienna, Isotope Vol. I.
- Payne, B.R., Quijano, L., Latorre C. 1977. Los Isótopos Ambientales y el Origen de la Recarga y de la Salinidad de las Aguas Subterráneas del Valle de Mexicali y la Mesa de San Luis, México, Reporte Interno, Grupo de Física S.A.R.H.
- Pearson, F.J., Jr., and T. B. Coplen 1978. Stable isotope studies of lakes- Chemistry, Geology, Physics. A. Lerman, ed., Springer-Verlag, New York, p.p. 325-339.

Sheppard, S., Nielsen, R. and Taylor, H.P., Jr., 1969. Oxygen and hydrogen isotope ratios of clay minerals from porphyro copper deposits. Ec. Geol., Vol. 64, p.p. 755-777.

Smith, D.B., 1973. Flow Tracing using isotopes. Groundwater pollution in Europe. Proc. Reading Conf., Water Research Association, p.p. 241-250.

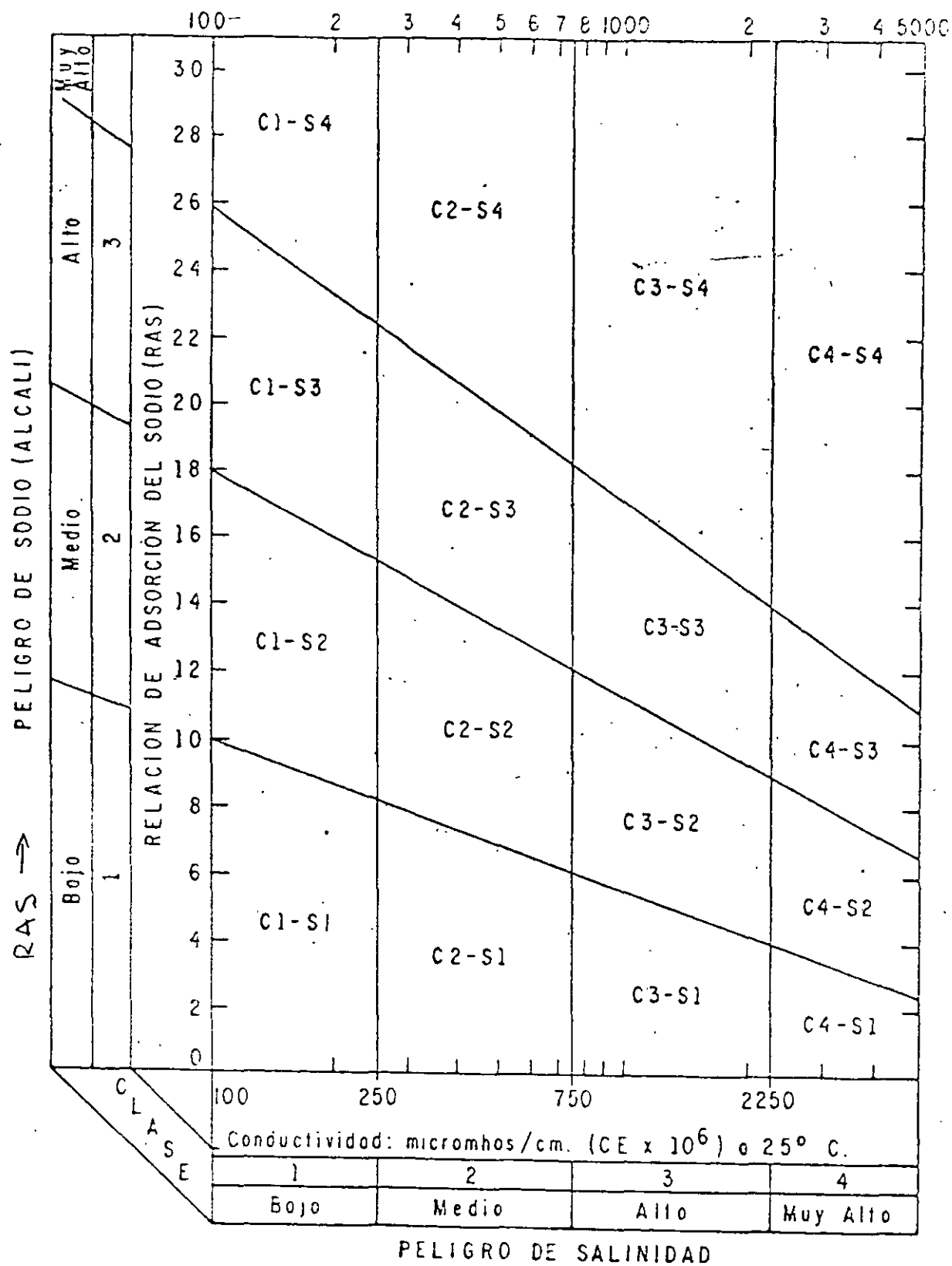
Vogel, J. C., Thild, L., Van Dijken, M. 1974. Determination of Groundwater Recharge With Tritium. Journal of Hydrology, Vol. 23, p.p. 131-140

Waterloo University. 1987 . . Apuntes de

Yurtsever, Y., Gat, J. R. 1981. Atmospheric Waters in Stable Isotope Hydrology, Technical Reports Series No. 210, IAEA, Vienna, p.p. 103-142.

Zuppi, G. M., Fontes, 1974. Isotope Techniques in Groundwater Hydrology 1, IAEA, Vienna.

CLASIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO



$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}}$$

EN me/l

FIGURA 6.1.

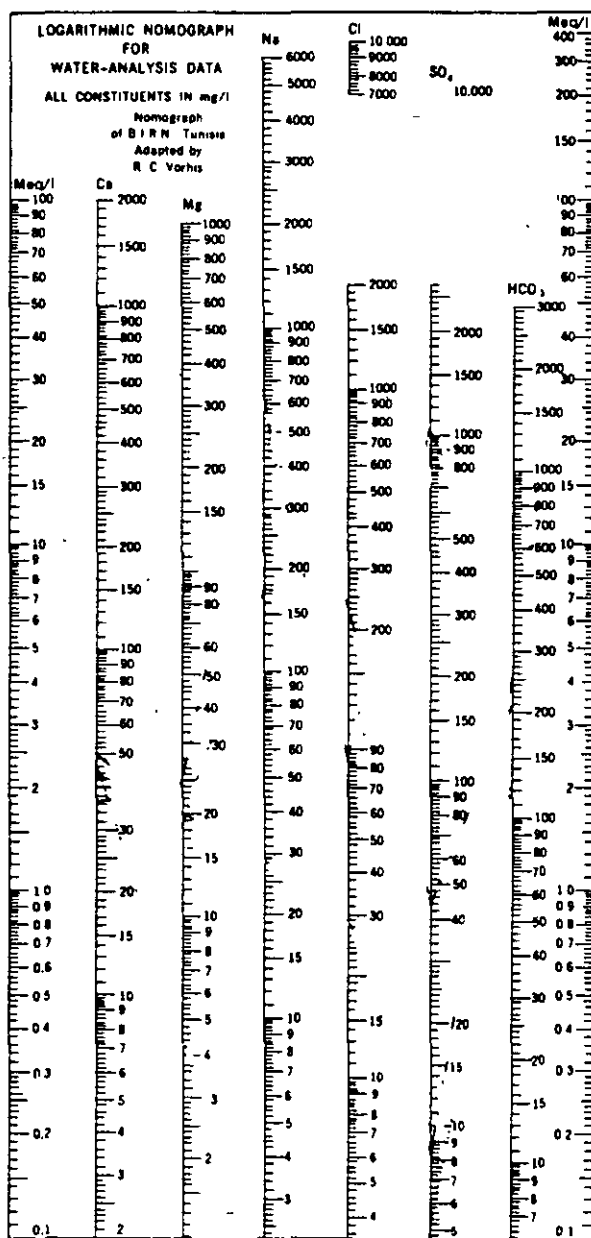


FIGURE 35—Analyses represented by logarithmic plotting of concentration in milligrams per liter.

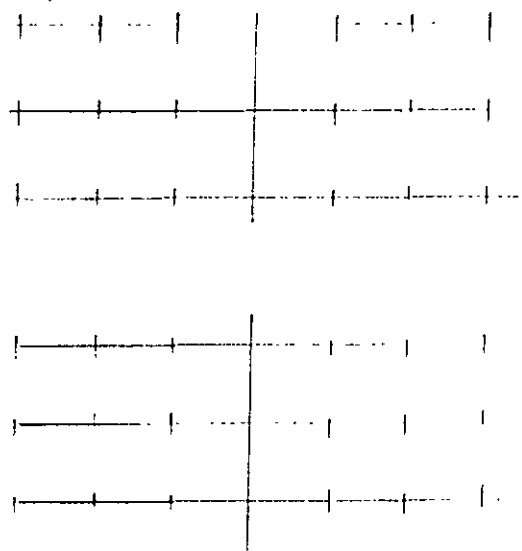
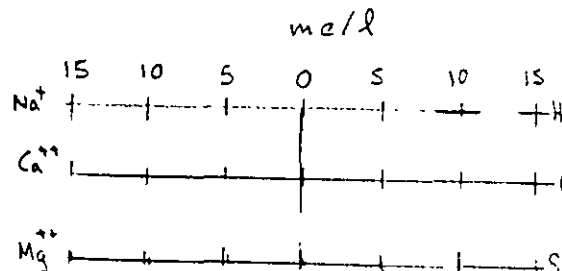


TABLE 9.—Conversion factors: Milligrams per liter $\times F_1$ = milliequivalents per liter; milligrams per liter $\times F_2$ = millimoles per liter (based on 1961 atomic weights, referred to carbon-12)

Element and reported species	F_1	F_2
Aluminum (Al^{+3})	0.11119	0.03715
Ammonium (NH_4^+)	.05544	.05544
Barium (Ba^{+2})	.01456	.00728
Beryllium (Be^{+2})	.33288	.11096
Bicarbonate (HCO_3^-)	.01639	.01639
Boron (B)		.09250
Bromide (Br^-)	.01251	.01251
Cadmium (Cd^{+2})	.01779	.00890
Calcium (Ca^{+2})	.04990	.02495
Carbonate (CO_3^{+2})	.03333	.01666
Chloride (Cl^-)	.02821	.02821
Chromium (Cr)		.01923
Cobalt (Co^{+2})	.03394	.01697
Copper (Cu^{+2})	.03148	.01574
Fluoride (F^-)	.05264	.05264
Germanium (Ge)		.01378
Gallium (Ga)		.01434
Gold (Au)		.00511
Hydrogen (H^+)	.99209	.99209
Hydroxide (OH^-)	.05880	.05880
Iodide (I^-)	.00788	.00788
Iron (Fe^{+2})	.03581	.01791
Iron (Fe^{+3})	.05372	.01791
Lead (Pb)		.00483
Lithium (Li^+)	.14411	.14411
Magnesium (Mg^{+2})	.08226	.04113
Manganese (Mn^{+2})	.03640	.01820
Molybdenum (Mo)		.01042
Nickel (Ni)		.01703
Nitrate (NO_3^-)	.01613	.01613
Nitrite (NO_2^-)	.02174	.02174
Phosphate (PO_4^{+3})	.03159	.01053
Phosphate (HPO_4^{+2})	.02084	.01042
Phosphate ($H_2PO_4^-$)	.01031	.01031
Potassium (K^+)	.02557	.02557
Rubidium (Rb^+)	.01170	.01170
Silica (SiO_2)		.01664
Silver (Ag)		.00927
Sodium (Na^+)	.04350	.04350
Strontium (Sr^{+2})	.02283	.01141
Sulfate (SO_4^{+2})	.02082	.01041
Sulfide (S^{+2})	.06238	.03119
Titanium (Ti)		.02088
Uranium (U)		.00420
Zinc (Zn^{+2})	.063060	.01530

Geochemists, however, have sometimes preferred to express analytical data for water in terms which they believed were more directly comparable to rock-composition data. To this end they have expressed analyses in terms of the percentage of each element or ion in the anhydrous residue remaining after evaporating the water. Clarke (1924 a, b) used this reporting procedure, usually with a value for total dissolved-solids concentration and percentages of the components which he termed "percentage composition of anhydrous residue."

mg/l

DIAGRAMA TRIANGULAR

	①	②	③
Ca^{++}	260	20	240
Mg^{++}	60	24	24
Na^+	23	321	69
HCO_3^-	732	122	732
CO_3^{--}	60	30	30
Cl	70	425	70
SO_4	148	99	99

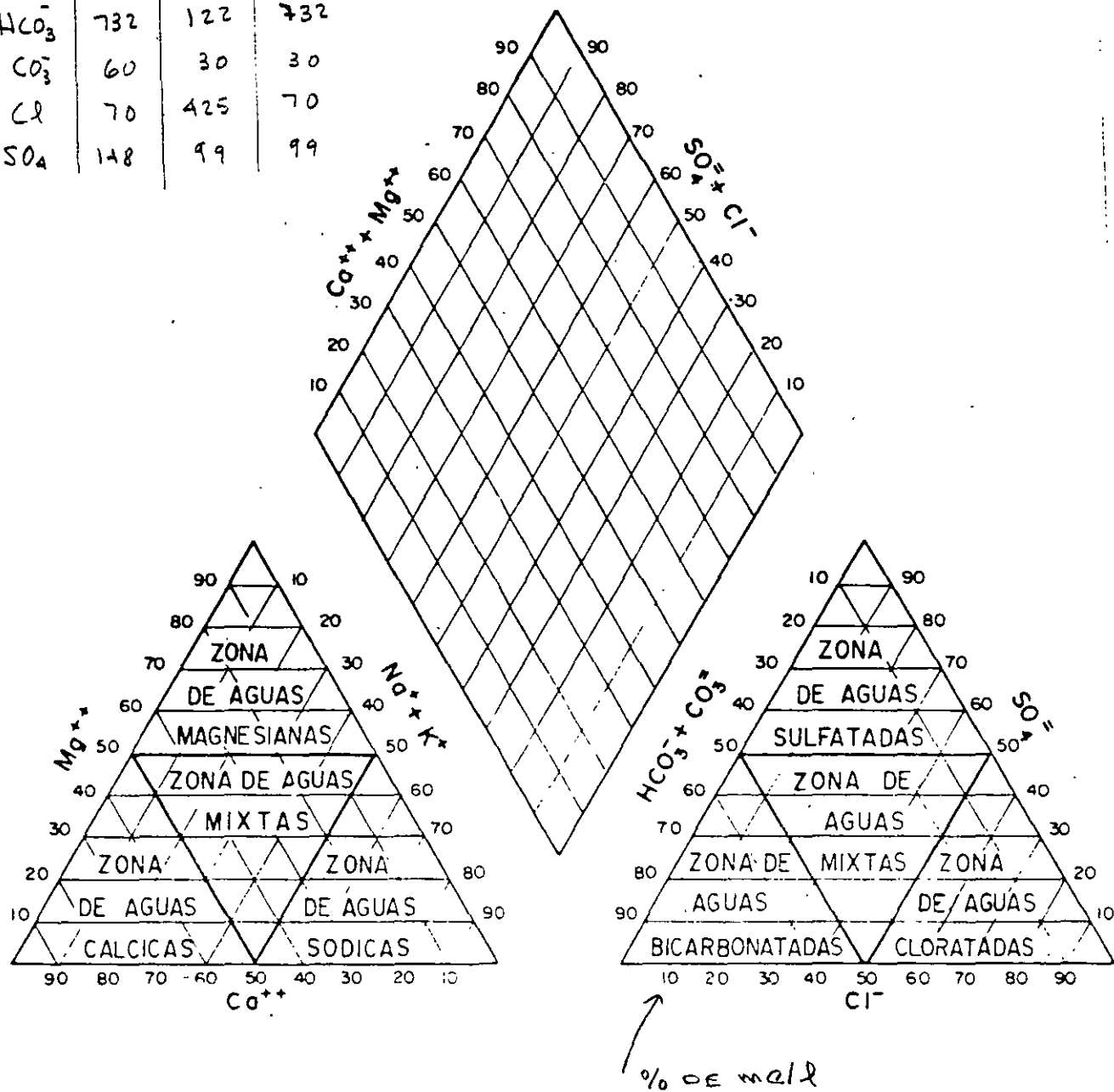
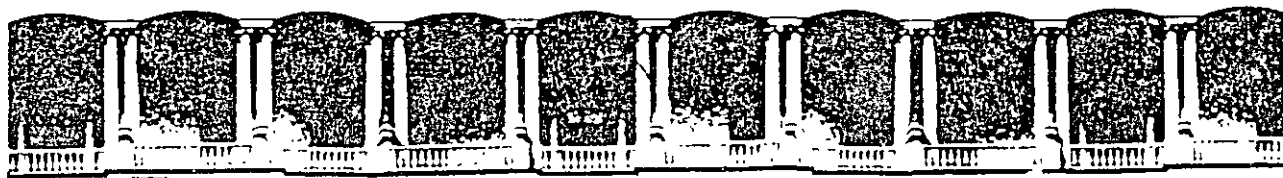


FIG. - 3.5.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

GEOHIDROLOGÍA

*Los Fenómenos de Succión, Difusión, Dispersión y Filtración a través de la
prospección geoelectrica*

**Ing. Alfonso Alvarez Manilla Aceves
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

LOS FENOMENOS DE SUCCION, DIFUSION, DISPERSION Y FILTRACION A TRAVES DE LA PROSPECCION GEOELECTRICA.

** José Alfredo Zepeda Garrido

* Alfonso Alvarez Manilla Aceves

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO

Centro Universitario 76000, Querétaro, Qro.

Tel. (42) 163945

RESUMEN: Para llegar al estado del conocimiento actual de los suelos no saturados, ha sido necesario adentrarse en los ámbitos de la Fisicoquímica, Fisiología, Electroquímica y la Mecánica Variacional de Sólidos y Fluidos. En el presente escrito serán mostrados los conceptos inherentes al transporte y flujo (succión, difusión, dispersión, advección, filtración) en la zona vadosa y su monitoreo mediante la prospección geoelectrónica. Dada la naturaleza del transporte y flujo, ambos fenómenos pueden ser considerados transientes (variables en el tiempo).

Los fenómenos de filtración, advección, dispersión, difusión y succión están gobernados por las propiedades fisicoquímicas de los suelos y fluidos, e historia en el contenido de humedad. Cuando el flujo y transporte han alcanzado el estado de equilibrio hidrostático; en la zona no saturada sólo existirán cambios por evapotranspiración y reacciones bioquímicas; por lo que adquiere gran importancia la succión osmótica (dependiente de las sales y lixiviados). Cuando en la zona *vadosa o no saturada* existe la presencia de contaminantes, entonces el agua, los gases, la fase líquida no acuosa (NAPL) y la fase densa líquida no acuosa (DNAPL) estarán contenidos en los poros y capilares; el flujo a escalas macro y micro queda supeditado a una variedad de transformaciones biológicas, físicas y químicas entre los solutos y el solvente.

La permeabilidad $K(\psi)$ para suelos no saturados no es una sola; depende de la humedad volumétrica en función de la succión $\theta = f(\psi)$, fase del fluido, grado de saturación y magnitud de los gradientes negativos.

El estado de esfuerzos en un suelo no saturado es alterado por los cambios físicoquímicos provocados por el flujo del contaminante, donde la succión osmótica adquiere mucha importancia. La energía liberada de los cambios mencionados es de dos tipos: eléctrica y térmica; lo que hace posible utilizar técnicas indirectas de exploración - geoelectricidad y termometría - para su estudio; son no destructivas y su aplicación puede ser en superficie o pozo.

Los métodos geofísicos complementarios a la mecánica de suelos en el estudio de transporte, flujo y succión en la zona vadosa son: potencial natural, polarización inducida y el de resistividad. Los métodos radiactivos hechos en registros de pozos, han permitido medir la filtración de agua y lixiviados por medio de la atenuación de los rayos gamma y neutrón.

** Profesor de la DEP de la FI de la Universidad Autónoma de Querétaro, México.

* Alumno de la DEP de la FI de la Universidad Autónoma de Querétaro, México.

1.0 AGUA DEL SUELO

Las propiedades físicoquímicas del suelo pueden ser alteradas por la cantidad, calidad y estado energético de los fluidos presentes. De los fluidos, el agua y el aire son los que comúnmente ocupan los poros del suelo; de manera ocasional, algún contaminante es encontrado también. El agua y contaminantes incluyen sales y gases disueltos. La figura 1.1 es un corte esquemático acerca de la disposición y distribución del agua del suelo; aparecen dos zonas principales: una no saturada o vadosa y otra saturada. La franja capilar está incluida en la zona vadosa y es el intervalo de transición entre ambas.

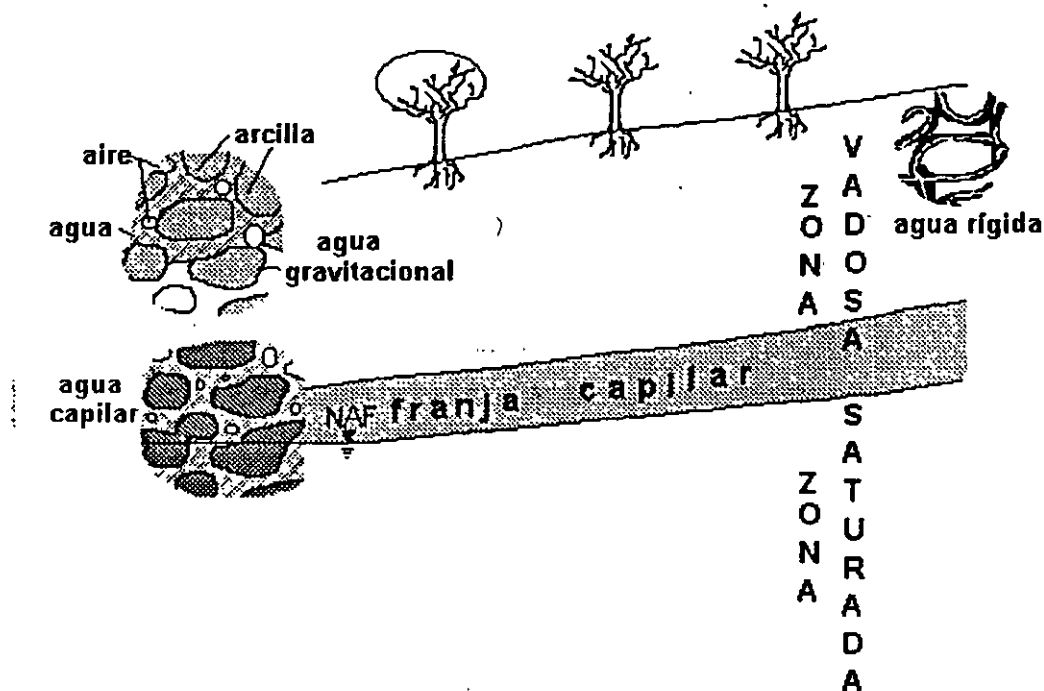


Figura 1.1 Distribución de las zonas vadosa y de saturación.

El agua del suelo se encuentra como:

- i) rígida o higroscópica,
- ii) gravitacional o libre y
- iii) capilar.

El agua rígida o higroscópica tiene estructura cristalina y está fuertemente adherida al grano de suelo; la mayoría de las veces, las altas temperaturas no la remueven. El agua gravitacional o libre se mueve por efecto de fuerzas gravitacionales a través de los poros hasta alcanzar el equilibrio; estado que logra al llegar al nivel del agua freática (NAF). En estado de tensión o presión negativa, el agua capilar aparece como una pequeña película entre partículas de suelo húmedo sobre la superficie del NAF y se le conoce como "succión mátrica". El agua capilar está regulada por las fuerzas de superficie (electromagnéticas), ver figura 1.1.

Los enlaces eléctricos entre las moléculas de agua y las superficies de los granos del suelo ocasionan la formación de agua estructurada, físicamente de menor densidad pero mayor viscosidad al agua gravitacional. La constricción del fluido por fuerzas eléctricas es análogo al comportamiento de las membranas y da origen al potencial o succión osmótico". Durante el desecado de un suelo; el agua sale primero de los poros de gran diámetro y, debido a las fuerzas eléctricas de superficie, los de menor diámetro quedan cubiertos por delgadas películas de agua. La cantidad de líquido y otros fluidos en la zona no saturada regula los fenómenos mecánicos, hidráulicos y químicos.

Las propiedades fisicoquímicas de la montmorillonita la hacen de una gran capacidad de adsorción de fluidos respecto de las illitas, kaolinitas y halloisitas. La adsorción de vapor de agua disminuye al aumentar el tamaño del ion.

2.0 EL ESTADO ENERGETICO DEL AGUA DEL SUELO

El análisis del estado energético del agua del suelo en función de las energías cinética y potencial se hace considerando fenómenos *reversibles* e *isotérmicos*. La energía cinética es la contenida en el agua por virtud de su movimiento, el que es muy lento y su aporte es poco significativo; al contrario de la energía potencial asociada a la posición del agua en el campo de fuerza gravimétrico. Otros campos de fuerzas, como los electromagnéticos y electroquímicos, ejercen mucha influencia.

En la figura 2.1 es mostrado de manera esquemática la distribución de esfuerzos para las zonas vadosa y saturada. Por arriba del NAF, el agua está a presión negativa y las variaciones no son lineales como lo es por debajo. Las variaciones aparecen de acuerdo con la temporada climática, desecación o humectación.

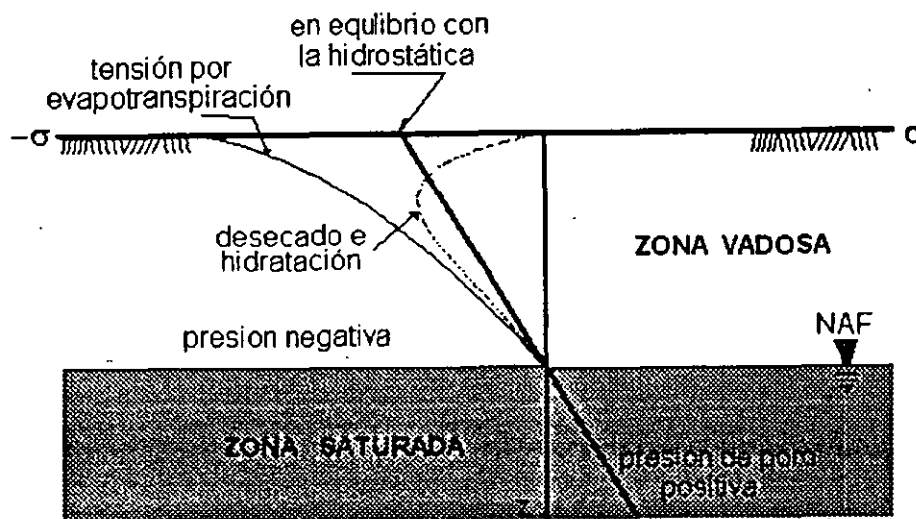


Figura 2.1 Diagrama esquemático de presiones en el subsuelo.

Recordando que la velocidad del agua es muy baja, la energía cinética ($mv^2/2$) es considera poco significativa; por ello, la descripción del estado energético del agua del suelo es hecha en función de la energía potencial por unidad masa o volumen y es denominado **potencial**. En los suelos no saturados el potencial siempre es negativo y se denomina **succión**.

La succión total (ψ_T) es la suma de varias contribuciones, entre las que figuran: succión mátrica (ψ_M), succión osmótica (ψ_O), succión gravitacional (ψ_g), succión de presión (ψ_P), succión de sobrecarga (ψ_Ω), succión de vapor (ψ_v), succión biológica o turgencia (ψ_ω) y de todas aquéllas teóricamente posibles, tal que:

$$\psi_T = \psi_M + \psi_O + \psi_g + \psi_P + \psi_\Omega + \psi_\omega + \psi_v + \dots$$

Las contribuciones principales corresponden a las succiones mátrica y osmótica, (figura 2.2.)

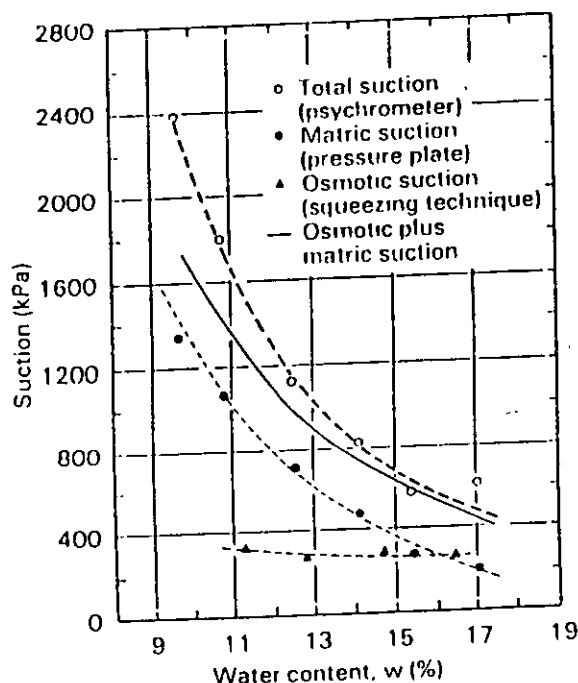


Figura 2.2 Las succiones mátrica y osmótica en función de la humedad según Krahn y Fredlund, 1972.

2.1 SUCCION MATRICA (ψ_M). Está asociada con la atracción del agua a las superficies de los granos del suelo y con la atracción mutua de las moléculas de agua (tensión superficial); aunque más complejo, es análogo al fenómeno capilar.

La succión mátrica es muy importante para el análisis de estabilidad en suelos que forman obras civiles tales como presas de tierra, terraplenes, taludes, cortes, etc; está

asociada con la humedad relativa $RH (\%) = u_v/u_{vo}$, definida como la concentración de vapor de agua en el aire, u_v es la presión parcial del vapor de agua en el aire y u_{vo} la presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura. La succión mátrica es:

$$\psi_M = - \frac{R T}{v_{wo} \omega_v} \ln \frac{u_v}{u_{vo}}$$

donde R la constante Universal de los gases, T la temperatura absoluta, v_{wo} corresponde al volumen específico del agua y ω_v masa molecular del vapor de agua.

La gráfica de la figura 2.3 muestra la curva característica del agua, representa la variación de la succión con la humedad volumétrica (relación del volumen de agua respecto al volumen de la masa, $\theta = V_w/V_m$); conforme la humedad volumétrica disminuye, la succión aumenta; la humedad volumétrica mínima equivale a la humedad relativa RH.

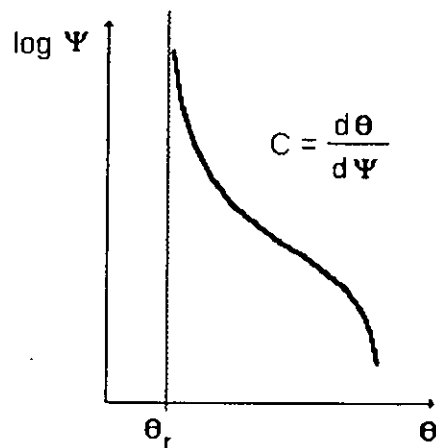


Figura 2.3 Curva característica y capacidad específica de agua.

2.2 POTENCIAL GRAVITACIONAL (ψ_g). Es la cantidad de trabajo necesario para transportar de manera reversible e isotérmica una cantidad de agua, desde un depósito que contiene una solución de composición idéntica al agua del suelo a una altura específica. La altura en cuestión define si el potencial es positivo o negativo respecto al nivel de referencia. La expresión del potencial de gravedad es:

$$\psi_g = \rho_w z g$$

donde ρ_w es la densidad del fluido; z la altura del nivel de referencia al punto específico y g la aceleración de la gravedad.

2.3a POTENCIAL DE PRESION (ψ_P). Es debido al peso del agua en el punto considerado. Es difícil separarlo del mátrico.

2.3b POTENCIAL DE SOBRECARGA (ψ_α). Es una presión que el suelo ejerce sobre el agua, es semejante al potencial de presión causado por el peso del agua arriba de un punto considerado. La variación del potencial de sobrecarga depende de la cantidad de agua contenida en el suelo y de que el suelo encajonante tenga la capacidad amortiguadora para suministrar y absorber agua.

2.3c POTENCIAL DEL GAS (ψ_ω). Es la presión del gas distinta a la que existe en el nivel de referencia. El potencial del gas está dado tanto por la humedad relativa como por la presión de vapor u otros fluidos, esto es:

$$\psi_\omega = RT \ln(HR) \quad \text{en función de la humedad relativa}$$

$$\psi_P = (nRT)/V \quad \text{en función de la presión de fluidos}$$

$$\psi_v = u \exp\{(\omega v_g z)/RT\} \quad \text{en función de la presión de vapor}$$

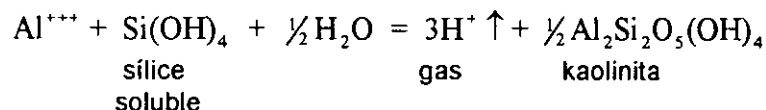
dónde n es la concentración molar. Estos potenciales están íntimamente ligados. Son afectados por los procesos de humectación y deshidratación; que, de acuerdo con su acción, un terrón de suelo puede desmoronarse o estallar cuando la presión del aire encerrado excede a la cohesión de las partículas de suelo. La adsorción del agua en las superficies internas de los capilares comprimen el aire ocluido en los poros y tortuosidades lo que provoca la desintegración mecánica.

Las fuerzas que son degradadas por la acción del agua son:

- i) fuerzas internas de la afinidad por el agua que impulsan su entrada y
- ii) fuerzas cohesivas que mantienen juntos a los agregados del suelo

conforme el agua entra al suelo, la cohesión del suelo disminuye; lo que ocasiona la destrucción de los enlaces de cementación.

En los poros existe aire en los estados libre y adsorbido; el agua, al entrar, libera el aire adsorbido por mojabilidad y añade gas libre a los poros de la siguiente forma:



Cuando el suelo es de permeabilidad baja y el gas no puede escapar, la presión de poro aumenta por compresión del mismo; que, de acuerdo con la rapidez del proceso, será la forma en que los agregados sean desintegrados. Cualquier gas soluble en el agua no ocasionará la desintegración, al no producir presión. Desde el punto de vista práctico y asumiendo que estos efectos son difíciles de separar, se consideran implícitos en la succión mátrica.

2.4 SUCCION OSMOTICA (ψ_o). Para comprender el flujo y la succión osmótica en suelos no saturados, es necesario entender los fenómenos electroquímicos y fisiológicos; la *succión osmótica* abarca ambos, por ello hemos decidido hacer una amplia disertación.

A mediados del siglo XVIII los fisiólogos tenían el firme propósito de entender los procesos de transporte en las células de plantas y animales; investigaciones que terminaron en el descubrimiento del *mágico fenómeno osmótico*. De manera paralela, Thomas Graham y Francois Marie Raoult realizaron los estudios de gases y soluciones, por cuyas aportaciones fueron considerados los padres de la teoría de soluciones.

Aunque el descubrimiento de la difusión se debe a Graham, fue Adolf Eugen Fick quién emitió la Ley de Difusión como una sencilla relación lineal entre el flujo de difusión y la diferencia de concentraciones afectada por un valor que depende de la naturaleza tanto del medio como del fluido {coeficiente de difusión ($D(\theta)$)}.

Graham buscaba una relación más compleja, como la que había descubierto con anterioridad en sus experimentos con gases; en los que demostró que el flujo de difusión de una gas a través de un tapón poroso es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del gas.

Fick descubrió la Ley de Difusión de manera casual, haciendo la analogía con las Leyes de Ohm y de transferencia de Calor.

$$i = - \sigma \text{ grad } V \qquad q = -K \text{ grad } T \qquad m = D_0 \text{ grad } \pi$$

dónde: i , la corriente eléctrica; σ conductividad eléctrica del medio; V , diferencia de potencial; q , flujo de calor; K , conductividad térmica; T , temperatura; m , masa; D_0 , coeficiente de difusión y π la succión osmótica.

El fenómeno de la ósmosis, pese haber sido descubierto con anterioridad, fue explicado 50 años después por J. A. Nollet; profesor de Física Experimental quién observó cómo en una membrana de vejiga de res el agua contenida en un lado fluía hacia el otro ocupado por alcohol; ¡pero no de manera inversa!.

A la sustancia capaz de atravesar una membrana se le llama solvente y la que no puede fluir es el soluto.

El fisiólogo francés Henry Dutrochet dio una explicación científica al fenómeno de la ósmosis; al relatar que la difusión de un solvente a través de una membrana semipermeable va de la solución de menor concentración de soluto a la de mayor; además, el solvente que fluye es capaz de generar una presión sobre la membrana. A ese efecto le denominó **presión osmótica**. El Potencial Osmótico puede ser considerado como el trabajo necesario para separar el solvente del soluto.

La cuantificación de la presión osmótica se debe al también fisiólogo Wilhelm Pfeffer después de haber transcurrido otros 50 años. Pfeffer no utilizó membranas biológicas sino

artificiales y hasta material terroso. La gráfica de la figura 2.4 exhibe el primer resultado al utilizar agua como solvente y sacarosa como soluto. La presión osmótica es directamente proporcional a la concentración y temperatura.

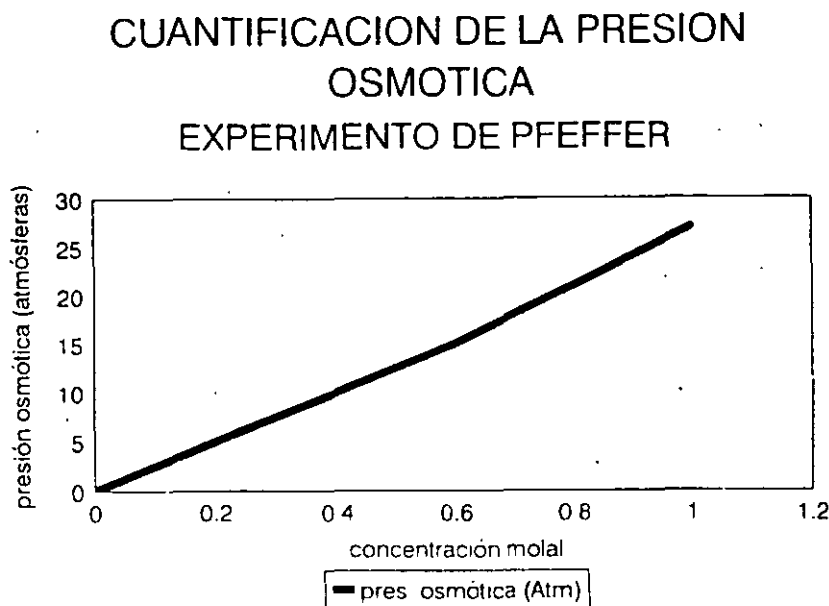


Figura 2.4 Cuantificación de la presión osmótica hecha por Pfeffer.

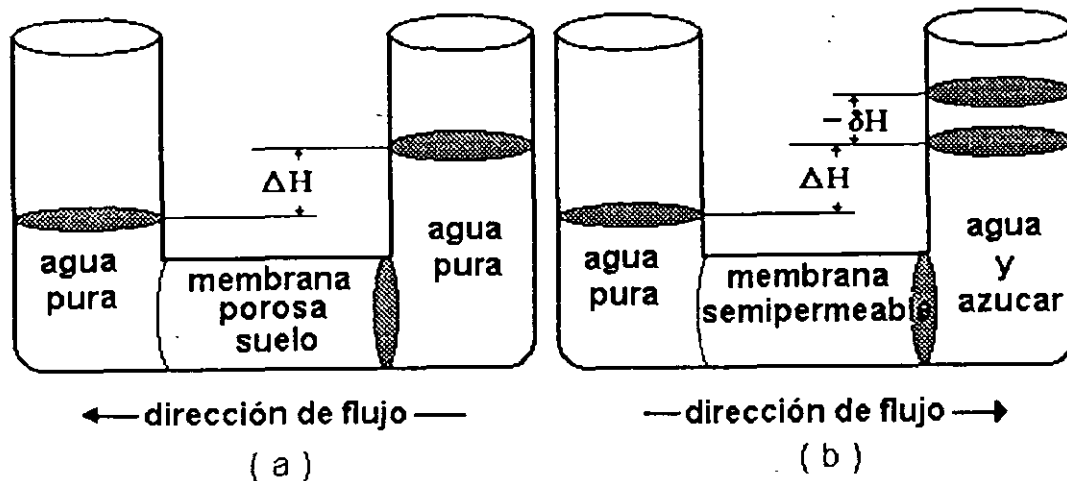
J. H. Van't Hoff propuso que el comportamiento de la presión osmótica es similar a la ejercida por un gas; entendió la presión osmótica no como el efecto del choque entre las moléculas del soluto con una membrana semipermeable, sino la presión necesaria para compensar el déficit energético que se produce por la disolución espontánea del soluto en el solvente.

El flujo del solvente a través de la membrana es acompañado de una exclusión de iones (soluto), cuya concentración genera un incremento en la salinidad.

L. F. del Castillo investigador de la UNAM, asume que la **ósmosis es un efecto de "succión"** de una solución concentrada sobre otra diluida y es **producida por diferencia de energías químicas**.

2.4.1 ASPECTOS TERMODINAMICOS DE LA PRESION OSMOTICA. De manera experimental se ha observado que el flujo osmótico sucede en dirección contraria al esperado (asención de salmueras en campos petroleros), por ejemplo: se podrá observar que el flujo en un sistema de vasos comunicantes separados por una membrana permeable (suelo) es en la dirección del de mayor a menor (figura 2.5a), al igual que en un flujo de calor; esto es, de un gradiente alto a un gradiente bajo.

Ahora, si se deja en los vasos comunicantes una membrana permeable al solvente e impermeable al soluto y en el recipiente con la carga hidráulica mayor una solución de agua con sal, se observará como "algo" mágico que la dirección del flujo se ha invertido; ¡ése es el flujo osmótico!, la presión o "succión osmótica" es cuantificada con la altura (-) que ganó la solución en el recipiente de mayor concentración (figura 2.5b).



Figuras 2.5a y 2.5b. Flujo puro, flujo y presión osmóticos.

De igual manera puede ser analizado el gas del suelo. El agua es sustituida por el gas y la suspensión por una combinación de gases. El recipiente que contiene a la combinación de gases es el que ejerce la presión osmótica.

El equilibrio en el flujo y presión osmótica es alcanzado cuando los niveles permanecen invariantes en el tiempo. Las presiones osmóticas (π) cuantificadas para el soluto (s) y fluidos ($f1, f2$) son:

$$\begin{aligned} \pi &= \Delta P = C_s \mu_s && \text{para el soluto} \\ \mu_{f1} &= \mu_{f2} && \text{para los fluidos o solventes} \end{aligned}$$

donde C_s es la concentración del soluto; μ_s , μ_{f1} y μ_{f2} son los potenciales químicos de las sustancias. Van't Hoff, considerando soluciones diluidas semejantes en su comportamiento al de un gas ideal, obtuvo la expresión de la presión osmótica como:

$$\pi = n_s RT$$

donde n_s el número de moles del soluto en la solución por unidad de volumen, R la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

Se deduce que la succión osmótica es un parámetro que depende del estado de los fluidos, energías químicas y procesos electroquímicos en el sistema agua-aire-suelo-vapor de agua-gases-lixiviados.

2.5 SUCCION E IMPORTANCIA DE SU APLICACION

Considerando que las succiones de presión, gravedad, sobrecarga, gas y todas aquellas teóricamente posibles pueden ser englobadas en las succiones mátrica y osmótica; la succión total es:

$$\psi_T = \psi_M + \psi_O$$

si el suelo está saturado, la succión mátrica es nula ($\psi_M = 0$) y la succión total adquiere el valor de la osmótica:

$$\psi_T = \psi_O$$

de la sencilla expresión anterior son deducidas varias implicaciones:

- i) no importa el estado de agua del suelo, siempre existirá la succión osmótica
- ii) los cambios en la succión osmótica afectan el comportamiento mecánico de los suelos
- iii) la mojabilidad del suelo afecta la succión osmótica
- iv) los procesos electroquímicos entre el agua del suelo-lixiviados y resistencia al esfuerzo cortante son afectados.
- v) los procesos de flujo y transporte en las zonas vadosa y saturada están influenciados por la succión osmótica
- vi) **en la zona vadosa, la permeabilidad depende de la succión mátrica; y en la zona saturada depende de la succión osmótica**

El potencial hidráulico que describe las condiciones superior e inferior al NAF es:

$\psi_T = \psi_M + \psi_P + \psi_g$ o bien, $\psi_T = \phi + z$; donde ϕ es el potencial hidráulico ($\psi_M + \psi_P$) y z la carga de posición (ψ_g). En unidades de carga resulta:

$$H = \phi + z$$

H es positiva bajo el NAF y negativa arriba de él. Es una expresión muy útil en el flujo y transporte de agua en suelos no saturados.

3.0 FLUJO EN LA ZONA VADOSA

El transporte y flujo en la zona vadosa (figura 3.1), están regidos por: *advección*: que es un proceso en el cuál las sustancias disueltas se acoplan al movimiento del agua; *difusión*: corresponde a la migración de un fluido en respuesta a un gradiente de

concentraciones; *dispersión*, tiene componentes longitudinal y transversal (tensor) y opera a una escala capilar como resultado de una mezcla con cualquier fase del fluido.

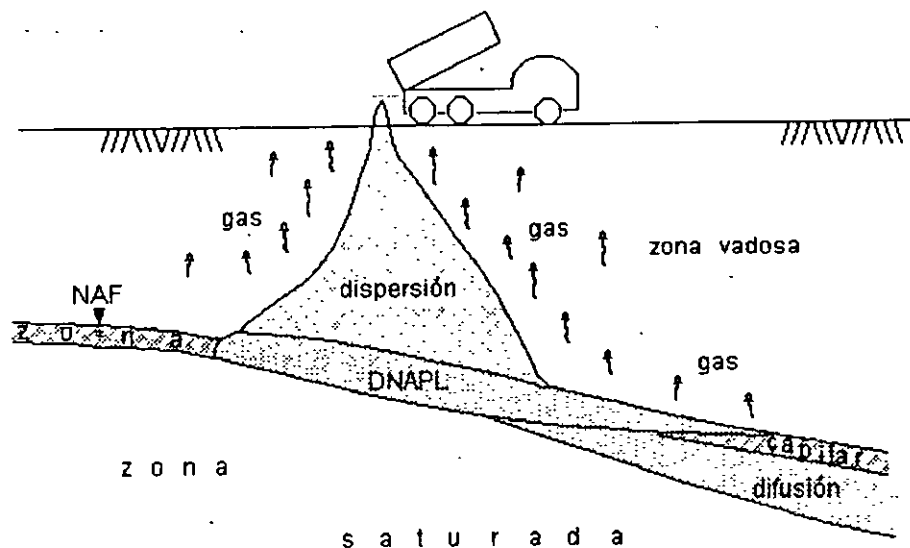


Figura 3.1 Transporte y flujo en la zona vadosa.

El transporte y flujo ocasionan plumas de contaminación y frentes de humectación que viajan con una determinada velocidad de filtración en la zona vadosa; pueden ser mapeados y monitoreados por medio de la polarización inducida y resistividad.

Poiseuille encontró que el flujo (v) en un capilar de forma cilíndrica con radio r y longitud l es:

$$v = \frac{r^2}{8\eta} \left\{ \frac{p_1 - p_2}{l} \right\}$$

η es la viscosidad del fluido y p_1, p_2 son las presiones en las caras de entrada y salida.

Si el agua del suelo está a presión negativa, existe una fase de gas (aire, vapor de agua, gas), según el ambiente fisicoquímico del suelo huésped. La presencia del gas modifica sustancialmente el flujo y se puede establecer que el tamaño de los capilares determina el espesor de las películas de fluidos.

El movimiento de los fluidos es ocasionado por las fuerzas de atracción entre las superficies de los granos del suelo y fuerzas de tracción en los propios fluidos, así como por grandes gradientes hidráulicos negativos (succión).

Como la variación de los gradientes hidráulicos negativos en la zona vadosa no es lineal, es necesario obtener un promedio; el que está dado por: $-\Delta H = -(p_1 + p_2)/2 = \Psi$ o en función de alturas hidráulicas $-\Delta H = -(H_1 + H_2)/2 = \Psi$

Conforme la humedad volumétrica θ disminuye en los capilares, la succión Ψ aumenta y la permeabilidad $K(\Psi)$ baja de acuerdo con área mojada. Para corregir el flujo es necesario introducir en la expresión de Richards un factor adimensional que es dependiente de las áreas que ocupan las fases y especies, de tal forma que:

$$v = -\lambda K(\Psi) \nabla H$$

en el cuál ∇H es el gradiente hidráulico en el que están incluidas las componentes de succión y de posición, la permeabilidad $K(\Psi)$ depende de la succión Ψ relacionada a la humedad volumétrica θ mediante la curva característica, cuya pendiente es la capacidad específica del agua, $C(\theta) = \partial\theta/\partial\Psi$, ver gráfica de la figura 2.3.

El factor λ tiende a 0 si el suelo está seco y vale 1 cuando está saturado. Recordando que la carga hidráulica es la suma de la carga de presión (o su negativo, la succión) y la carga de posición, tal que: $H = \phi + z$, con $z=0$ en el nivel estático, la ecuación para el flujo tridimensional adopta la forma:

$$v = -\lambda K(\Psi) \left[\frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial \phi_y}{\partial y} + \frac{\partial (\phi_z + z)}{\partial z} \right]$$

que para los casos de flujo horizontal en las direcciones vertical, x e y ; resulta respectivamente que:

$$v = -\lambda K(\Psi) \left[\frac{\partial \phi_x}{\partial x} + \frac{\partial \phi_y}{\partial y} \right]$$

$$v = -\lambda K(\Psi) \left[\frac{\partial \phi_z}{\partial z} + 1 \right]$$

$\lambda K(\Psi)$ dependen exclusivamente de las características de los poros y de la humedad volumétrica en el punto de análisis.

De la Ecuación de Continuidad se tiene que:

$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot v$, al sustituir la ecuación de flujo de Darcy modificada por Richards se tiene:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \nabla \cdot [K(\Psi) \nabla \cdot \Psi]$$

que es la Ecuación General de Flujo para Suelos Parcialmente Saturados.

3.1 ECUACION DE DIFUSION EN LA ZONA VADOSA

La difusión se define como el flujo de materia ocasionado por las diferencias de energía cinética en la sustancia; por ello, el flujo de un líquido en la zona vadosa no puede describirse como un proceso de difusión; ya que lo hacen por la atracción de superficies sólidas, por ejemplo; por las fuerzas de tracción que ejerce la tensión superficial en la interfases gas-agua, aire-agua, lixiviado-gas, lixiviado-agua, (figura 3.2); y por la transmisión de fuerzas a través de los líquidos (en virtud de las atracciones intermoleculares).

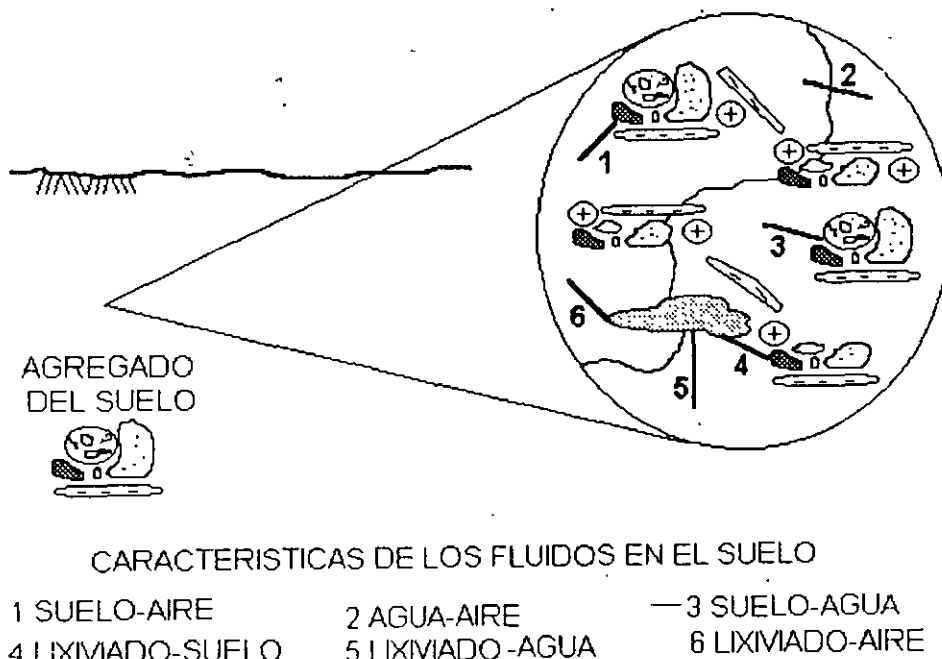


Figura 3.2 Relaciones físicoquímicas a nivel micro entre agua-gas-lixiviados.

Para la descripción del transporte y flujo en la zona vadosa es necesario recurrir a la Ley de Conservación de masa; como la humedad volumétrica es función de la succión $\theta = f(\psi)$, la succión gravitacional se considera despreciable y aplicando la regla de la cadena se tiene que:

$$v = -\lambda K(\theta) \nabla \Psi$$

el gradiente $\nabla \Psi$ en la dirección "z" resulta: $\frac{\partial \Psi}{\partial z} = \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$; y, como $\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \frac{1}{C(\theta)}$, al sustituirlo en la expresión de flujo de Richards se tiene que:

$$v = -\lambda K(\theta) \left[\frac{1}{C(\theta)} \right] [\nabla \cdot \Psi']$$

definiendo la **"difusividad"** como: $D(\theta) = K(\theta) / C(\theta)$, la Ecuación de Difusividad es:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \nabla \cdot [D(\theta) \nabla \cdot \theta]$$

si se acepta para condiciones muy reducidas que $D(\theta)$ sea una constante, la segunda Ecuación de Difusión de Fick es:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda D(\theta) \nabla^2 \cdot \theta$$

La belleza de la expresión anterior reside en su aplicabilidad tanto para el transporte y flujo en la zona vadosa como en la saturada al observar las siguientes consideraciones:

i) la humedad volumétrica θ permanece invariable en el tiempo en un medio saturado, por tanto $\partial \theta / \partial t = 0$

ii) la succión total adquiere el valor de la osmótica $\Psi_T = \Psi_o$ cuando $\omega = 100\%$

iii) con $\lambda = 1$, se tiene la ecuación de Darcy para flujo en suelos saturados:
 $v = -K(\Psi) \text{ grad } H$

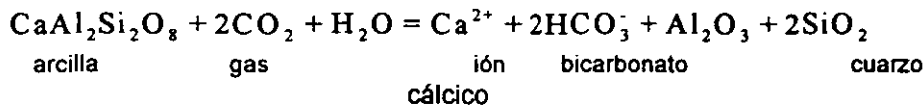
4.0 PROCESOS ELECTROQUIMICOS Y-DE ALTERACION

La presencia de fluidos en la zona no saturada puede ser debida a la filtración del agua de lluvia, derrames accidentales de NAPL o DNAPL y por fugas de contenedores superficiales o enterrados.

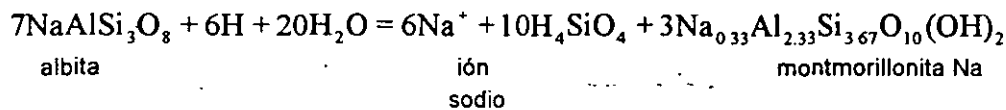
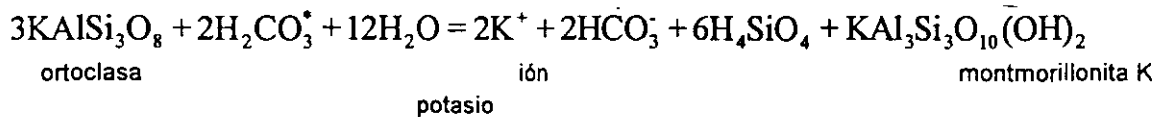
Los fluidos en sus fases líquida y gaseosa pueden permanecer inmóviles, moverse lentamente o de manera muy rápida de acuerdo con las características fisicoquímicas y electroquímicas tales como: potenciales REDOX, pH del suelo, decaimiento radioactivo, disolución, complejación, hidrólisis, adsorción, advección, capacidad de intercambio catiónico, etc.

Los productos finales de los procesos fisicoquímicos en el suelo y subsuelo van acompañados de liberación de energía en las formas de calor y electricidad. En las reacciones químicas subsecuentes son mostradas las sustancias originales, productos finales y los tipos de energía liberados.

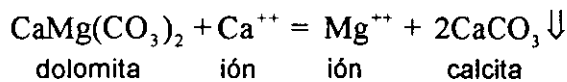
Pese a que el CO_2 es soluble en el agua y no genera presión de poro, provoca alteraciones en las arcillas, tal que:



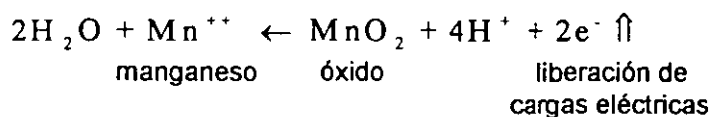
los feldespatos potásicos (ortoclasa) y sódicos (albita) son transformados en montmorillonita de las formas:



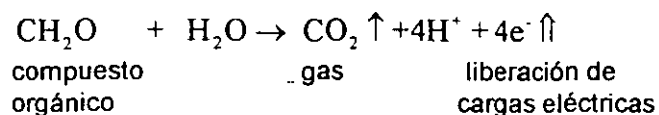
en suelos ricos en carbonatos cálcico-magnésicos, se precipita la calcita:



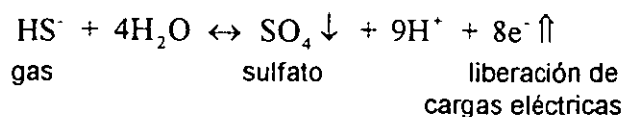
y liberación de energía como potenciales eléctricos de la forma siguiente:



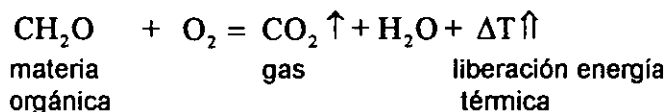
los óxidos de manganeso aparecen en forma de nódulos incrustando tortuosidades, capilares, fracturas y ademes de pozos,



el gas es removido por humectabilidad y pasa a formar presión en el poro. La precipitación de sulfatos ocasiona blanqueamiento de suelos,



la oxidación de la materia orgánica es:



la naturaleza de la anomalías debidas a los procesos electroquímicos y que pueden ser mapeadas y cuantificadas mediante diversas técnicas de la prospección geoelectrica son: precipitación de sales ↓; desprendimiento y migración de gases ↑; disolución; acción bacteriana (anaerobias), algas verde y azul; producción de iones; liberación e intercambio de cargas eléctricas ↑, blanqueamiento de suelos, alteración química de arcillas, etc.

5.0 LA PROSPECCION GEOELECTRICA Y SU APLICACION A LOS FENOMENOS DE: SUCCION, DIFUSION, DISPERSION Y FILTRACION.

Cuando entran en contacto gas, vapor de agua, lixiviados o alguna otra solución con el suelo -en virtud de la atracción superficial de las arcillas sobre los fluidos- aparece una fuerza electroquímica generada por la diferencia de potencial producida por la doble capa electroquímica causada al ser acumulados iones en ambas caras de los granos de suelo (figura 5.1).

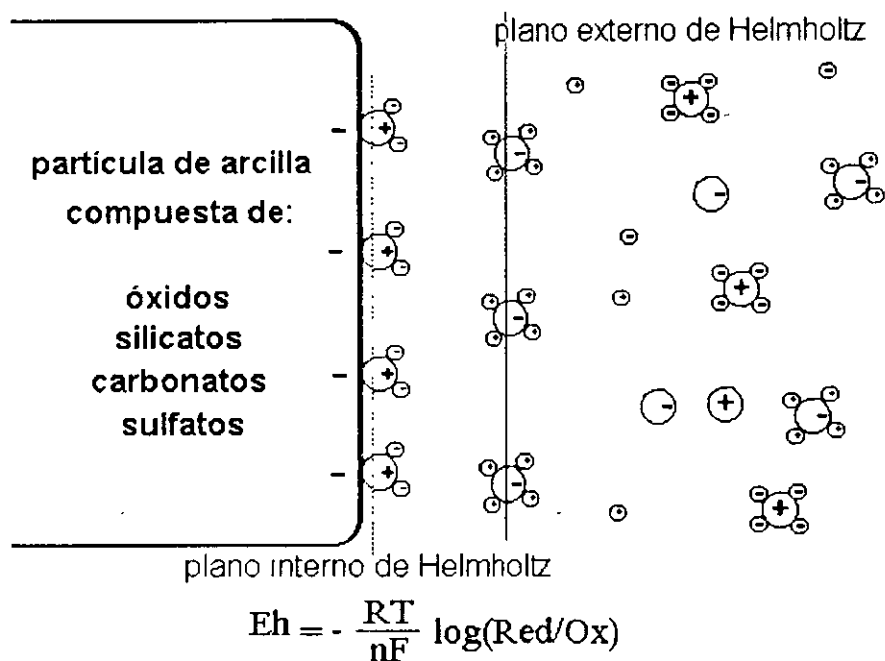


Figura 5.1 Generación de una f.e.m. debido al contacto entre agua-suelo-lixiviados.

Las fuerzas de atracción entre superficies (tensión superficial y tracción) generan un flujo; el cuál puede ser la superposición lineal de todas las fuerzas termodinámicas actuantes (principio de acoplamientos); esto es que, *un flujo cualquiera*, puede ser generado por una fuerza que no corresponda al efecto del fenómeno directo. Onsager estableció la reciprocidad de los efectos directos y cruzados, al afirmar que se pueden intercambiar de tal forma que: una diferencia de temperaturas produce un flujo de cargas y la diferencia de potencial eléctrico produce un flujo de calor, etc.

El cuadro de la figura 5.2, muestra los efectos directos, cruzados y su reciprocidad según el Principio de Onsager modificado por L. F. del Castillo, 1986;

FUERZAS	diferencia de presiones ΔP	diferencia de concentraciones de soluto ΔC_s	diferencia de potencial eléctrico $\Delta \phi$	diferencia de temperatura ΔT
FLUJOS				
flujo de solvente	flujo volumétrico J_v	ósmosis	electroósmosis	termoósmosis
flujo de solutos moléculas neutras	arrastre de solutos por flujo volumétrico	difusión de Fick	Difusión de Nernst-Planck	termodifusión de Soret
flujo de solutos iones	polarización por acumulación de cargas vía flujo volumétrico	polarización por concentración vía flujo de difusión	corriente eléctrica Ley de Ohm	termoelectricidad de Thompson
flujo de calor	flujo térmico Joule-Thompson	difusión térmica Dufour	termoelectricidad electropirosis	conducción térmica Fourier

Figura 5.2 Principales fuerzas termodinámicas, flujos directos y cruzados, según modificaciones de L. F. del Castillo, 1986 a Onsanger.

5.1 EL POTENCIAL NATURAL (SP) Y LA SUCCION OSMOTICA (π). Cuando en los poros del suelo entran en contacto soluciones electrolíticas diversas o existen diferencias de concentración, se genera un potencial o fuerza electromotriz (f.e.m.) denominado "*Potencial de Difusión*". Los iones mono, di o trivalentes de signo distinto, tienen movilidades diferentes que causan una diferencia de potencial ΔV medible en superficie mediante un voltmetro de alta impedancia y electrodos impolarizables. La expresión para el cálculo de potencial en función de las diferencias de concentración en los mismos iones es:

$$\Delta V = \frac{u - v}{u + v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2}$$

con u , v como movilidades del anión y catión; n es la valencia, R , T y F corresponden al mismo significado mencionado anteriormente.

El potencial de difusión sirve para determinar la porosidad en sondeos mecánicos hechos en las zonas vadosa y saturada.

Las fases de fluidos que se mueven en los capilares del suelo generan la diferencia de potencial denominado "*Potencial de Filtración*"; las paredes de los capilares adsorben a los aniones que a su vez atraen a los cationes, y forman la doble capa electroquímica. Los cationes se mueven con el solvente a lo largo de los capilares y el soluto (aniones) quedan fijos a las superficies de las arcillas; por lo tanto, son generados el flujo y presión osmótica.

Como fue apuntado anteriormente, en la zona vadosa predomina la succión mátrica y la osmótica prácticamente tiene el mismo valor arriba y abajo del NAF. La ecuación de Helmholtz relaciona a la succión osmótica y al potencial de filtración mediante la expresión siguiente:

$$\Delta V = \pi \epsilon \phi \rho / \eta$$

donde π es la succión osmótica; ϵ , ϕ , ρ y η son respectivamente la constante dieléctrica, potencial electroquímico de la doble capa, resistividad eléctrica y viscosidad del electrolito.

Con estas mediciones se puede cuantificar el valor de la succión osmótica, capa activa, reconocimiento de zonas húmedas, filtraciones de agua en presas, dirección del flujo.

Con el perfil de potencial natural (SP) efectuado en la base de un bordo de tierra, fue posible cuantificar la succión y corroborar las filtraciones con base a los intervalos con menor succión. Es notorio que, donde las succiones son bajas, corresponde a la zona de fugas de agua. Figura 5.3. Con el apoyo de las mediciones de potencial natural, las mediciones de succión con psicrómetro o papel filtro son reducidas a comprobar en los intervalos de interés, esto es: altas y bajas.

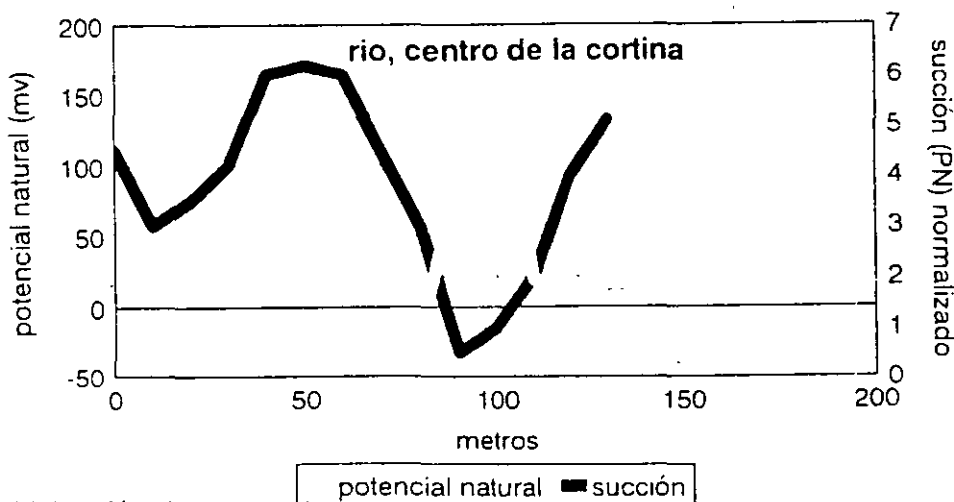


Figura 5.3 Valuación de la succión por medio de las mediciones de potencial natural en la base de un bordo de tierra que presenta filtraciones.

5.2 LA POLARIZACION INDUCIDA Y RESISTIVIDAD, COMO MAPEO DE ANOMALIAS POR LIXIVIADOS Y FILTRACIONES EN LA ZONA NO SATURADA. El transporte y flujo producen una serie de reacciones electroquímicas que forman halos de alteración; uno de ellos es la "*polarización*" del medio ocasionada por las diferencias de movilidad de los iones. Los halos anómalos son por: plumas de contaminación, frentes de humectación y filtración. Estas porciones con características propias en la zona vadosa, pueden ser mapeados y monitoreados por medio de la polarización inducida y la resistividad.

El mecanismo de la polarización inducida fue propuesto por Marshall y Madden (1959); el cuál establece que al circular una corriente eléctrica en un medio, produce una separación de cargas que dan lugar a gradientes eléctricos opuestos al flujo de la corriente eléctrica causando la polarización (figura 5.4) que puede presentarse de tres formas: membrana, de electrodo y electrolítica.

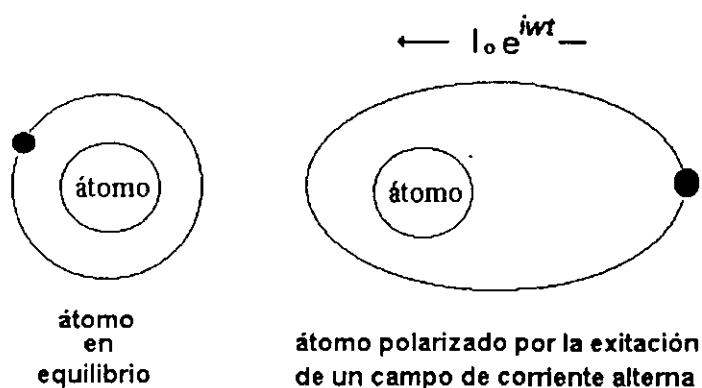
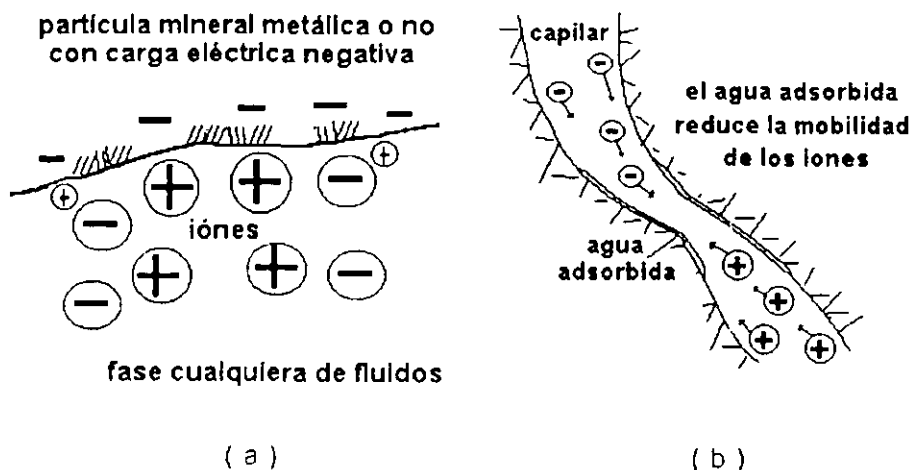


Figura 5.4 Polarización del átomo debido a la excitación de un campo eléctrico.

La *Polarización de Membrana* ocurre al formarse nubes de cargas positivas sobre las partículas de arcilla que impiden la movilidad de los aniones. La *Polarización de Electrodo* aparece cuando los óxidos (limonita, magnetita, etc.) dispersos en los capilares, bloquean una trayectoria y la conducción iónica cambia a electrónica aparece la doble capa electroquímica similar a un capacitor que almacena energía (figura 5.5a).



Figuras 5.5a y 5.5b Polarizaciones de electrodo, membrana y Electrolítica.

Finalmente, la *Polarización Electrolítica* ocurre por el flujo de fluidos en los capilares independientes a su fase; si el diámetro cambia, habrá una diferencia de movilidades, lo que genera una separación de cargas y la formación de la doble capa electroquímica (figura 5.5b). De la analogía eléctrica (figura 5.6) del fenómeno de polarización inducida puede ser cuantificada la magnitud, lo que resulta como:

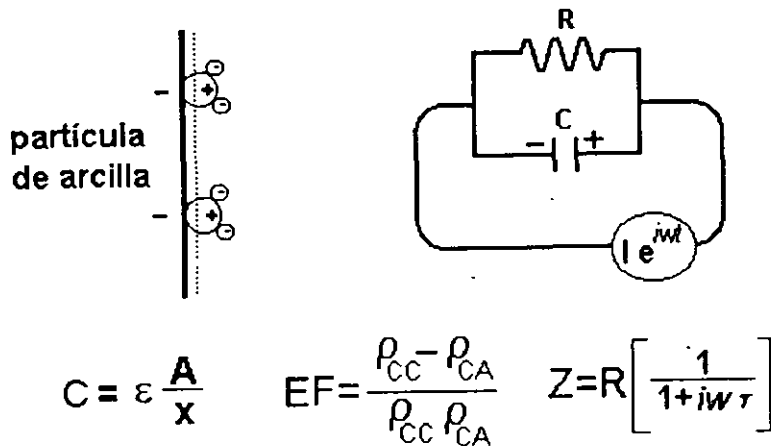


Figura 5.6. Analogía eléctrica de la doble capa electroquímica y cuantificación de: la polarización y resistividad.

donde EF es el efecto de frecuencia; ρ_{CC} la resistividad aparente a corriente continua y ρ_{CA} la resistividad aparente a corriente alterna. Como se observa, la resistividad es un caso particular de la polarización inducida a frecuencia "cero" o corriente continua y se valua como:

$$\rho_{acc} = \{ \Delta V / I \} Fg;$$

en el que ρ_{acc} es la resistividad aparente en corriente continua; ΔV , la diferencia de potencial; I la intensidad de corriente eléctrica inyectada al medio, R la relación $\Delta V/I$; $I = V - 1$ ω la frecuencia; τ corresponde a la constante de tiempo y Fg , el factor geométrico que depende de la posición de los electrodos.

Las arcillas montmorillonitas, kaolinitas e illita presentan diferentes superficies específicas; y como la polarización inducida es un fenómeno de superficie, puede ser empleada como un método aproximado económico y rápido para la identificación, (figura 5.7).

POLARIZACION & TIPO DE ARCILLA

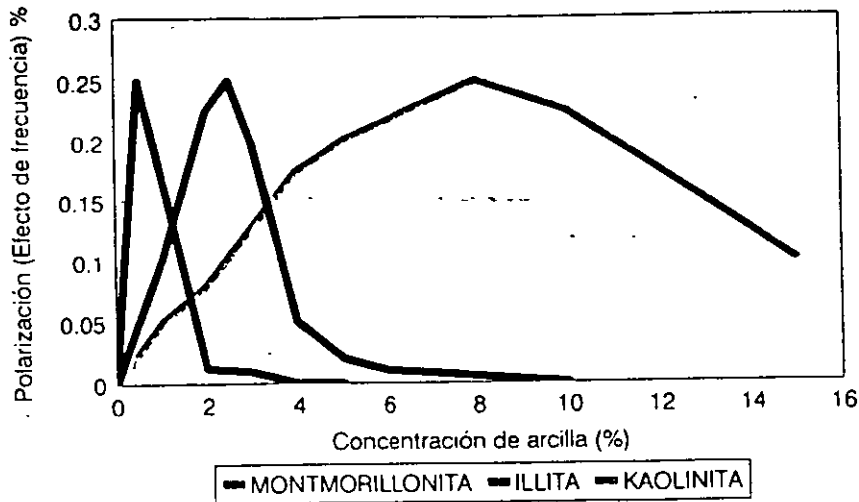


Figura 5.7 Polarización de diferentes arcillas en función de la superficie específica y volumen de concentración.

Un ejemplo de la aplicación de la polarización lo brinda el levantamiento realizado en la vecindad de un basurero, los estudios consistieron en definir las zonas de generación de gas metano en las arcillas de un lago y las trayectorias de flujo hasta los pozos donde el agua subterránea es extraída. Las anomalías y explicación aparecen en la figura 5.8. La polarización contribuye de manera importante el definir la zona de influencia aun por debajo del NAF.

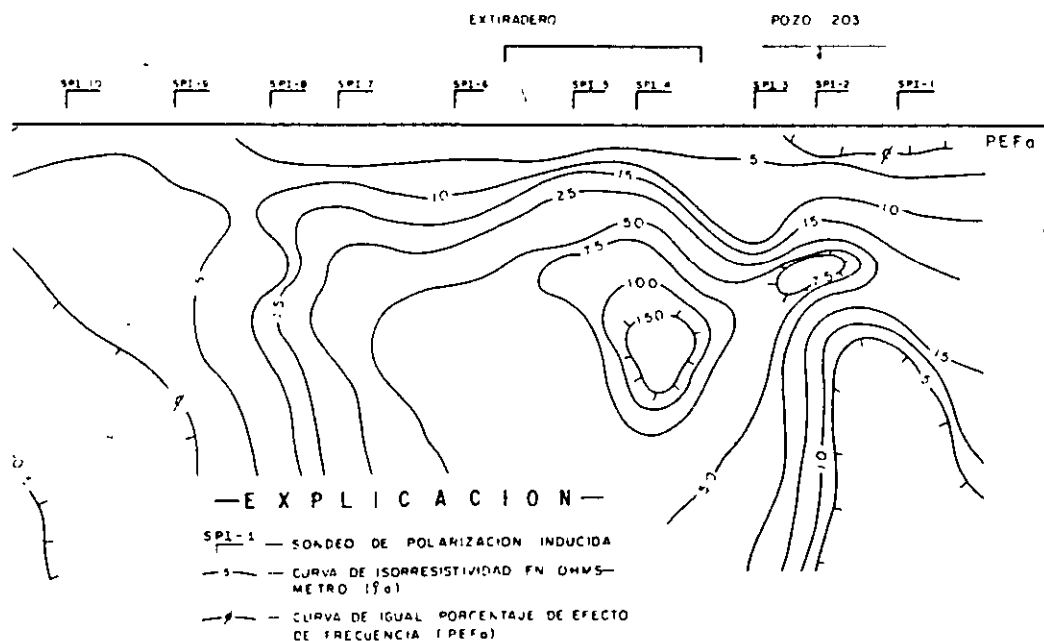


Figura 5.8. Anomalías de polarización inducida en el flujo de contaminantes en las zonas vadosa y saturada.

El ejemplo de aplicación del método de resistividad es el que muestra la variación de la conductividad eléctrica en arcillas localizadas al norte del Valle de Querétaro, cuya finalidad fue definir la profundidad de la capa activa. Las observaciones fueron hechas a lo largo de 8 meses (figura 5.9), y, con ellas ha sido posible determinar que la profundidad de la capa activa varía entre 2 y 6 metros aproximadamente. En la zona, el espesor del estrato de arcillas con alto potencial expansivo varía entre 2 y 20 metros. Los datos fueron tomados de diversos cortes litológicos de pozos profundos perforados para las industrias.

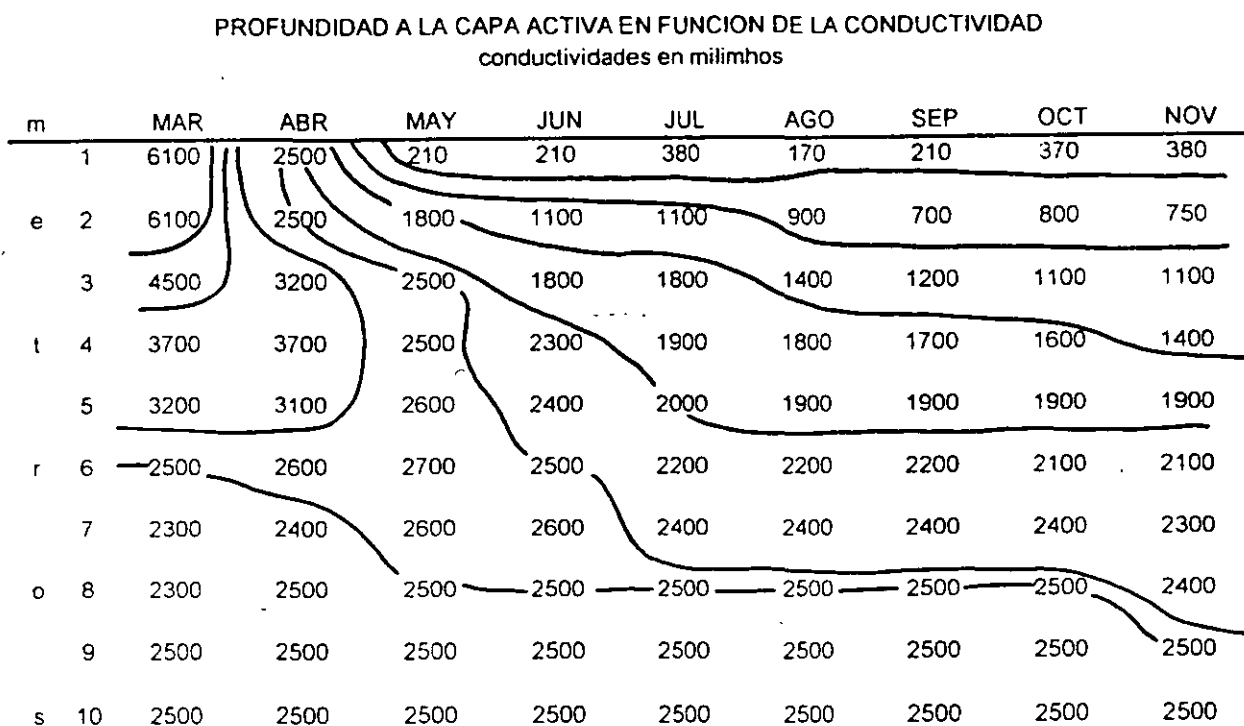
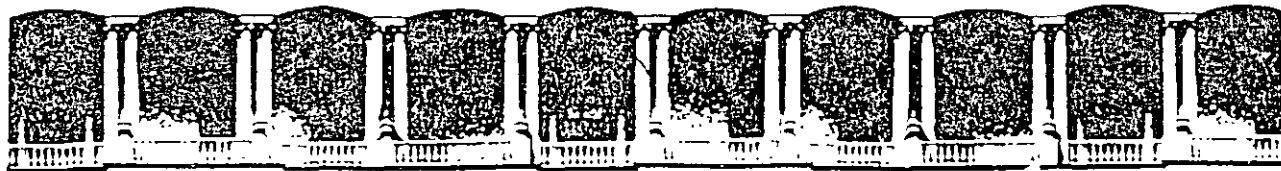


Figura 5.9 Profundidad de la capa activa en arcillas al norte del Valle de Querétaro. Fueron definidos dos intervalos principales: de 2.5 a 3.5 metros y de 5.0 a 6.0 metros.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

GEOHIDROLOGÍA

Geología del Aguas Subterránea

Ing. Héctor L. Macias González ...
Guanajuato, Guanajuato
1998.

GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA

POR: ING. HECTOR L. MACIAS GONZALEZ *

1.1.- GENERALIDADES

A la GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA, también se le conoce como Hidrogeología. Este término fué introducido por Lucas en 1789 para designar el estudio geológico del agua subterránea. Mead, en su tratado sobre hidrogeología, publicado en 1919, acentuó el carácter especial del "estudio del agua subterránea considerada como un elemento geológico cuyo conocimiento contribuye a lograr la comprensión del origen y evolución de los cursos superficiales de agua y los sistemas de drenaje".

Con el tiempo, diversos autores han concebido otras definiciones sobre hidrogeología, pero en esencia todas coinciden con remarcar la importancia del conocimiento geológico, no sólo en la exploración del agua subterránea, sino en la cuantificación del recurso.

En efecto, si se acepta como la definición más simple para la hidrogeología al referirse a la relación agua-roca, se desprende de esto, que la infiltración del agua al suelo, su movimiento vertical descendente hasta llegar a la zona de saturación y el movimiento preponderantemente horizontal en el acuífero desde las zonas de recarga a las de descarga, esté controlado por el patrón geológico (litológico y estructural) en que se almacena y circula el agua subterránea. El manejo de estos controles quedaría incompleto, sin el conocimiento de la historia geológica de la región por estudiar, ya que el análisis de la secuencia de acontecimientos geológicos que la conformaron, permiten conocer de manera general la naturaleza y distribución espacial de las rocas y por tanto, que tipos de acuíferos

* Prof. de Geología y Geohidrología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

pueden esperarse encontrar, sus espesores, límites laterales y de manera cualitativa la relación hidráulica con los estratos o capas adyacentes, suprayacentes y laterales (límites geológicos naturales

Naturalmente, esta primera concepción del marco geológico de la región, se va ampliando progresivamente por medio de exploraciones directas e indirectas, con cuya información se precisan la profundidad y dimensiones de las rocas en el subsuelo. A su vez, los datos obtenidos de las captaciones de agua subterránea sobre profundidades al nivel del agua, caudales, calidad química, temperatura, etc. propician ampliar el conocimiento del MARCO HIDROGEOLOGICO.

La determinación del marco hidrogeológico de una cuenca, es indispensable en regiones donde únicamente se dispone de la información que pueda derivarse de las rocas que afloran; sumamente útil en cuencas abiertas a la explotación y en donde se requieren nuevos alumbramientos de agua subterránea y por último, es de gran utilidad en estudios de cuantificación y modelado hidráulico e hidrogeoquímico donde se precisa conocer con bastante aproximación la geometría de los sistemas acuíferos y en consecuencia la delimitación de las fronteras naturales de los mismos.

1.2.- ROCAS PERMEABLES

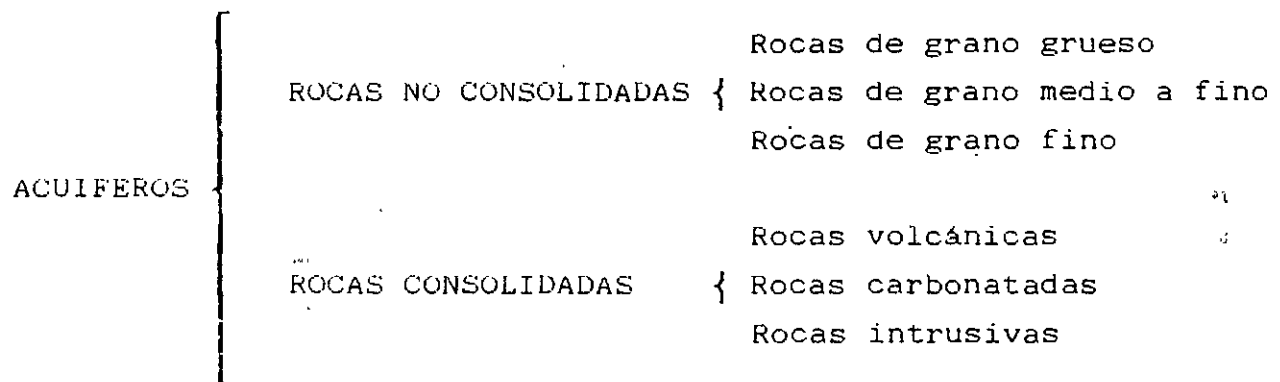
Los acuíferos están formados por rocas con capacidad para almacenar agua; permitir su circulación desde las zonas de recarga a las de descarga y ceder caudales significativos hacia las zonas de descarga natural o hacia las captaciones artificiales.

El término SIGNIFICATIVO de esta definición se usa para connotar el hecho de que los caudales extraídos o cedidos por un acuífero están en estrecha relación con la región geográfica e hidrogeológica de que se trate. Así por ejemplo, en algunas de las regiones más áridas de Baja California, un pozo con un caudal de 1 lps y agua de buena calidad, caracteriza un acuífero, ya que su explotación cubriría

holgadamente las necesidades de una población de 500 habitantes. En contraste, ese mismo caudal en la Cuenca del Bajío, donde el agua subterránea es aún abundante y se encuentran gran cantidad de pozos que extraen caudales mínimos de 30 lps, no tendría mayor significado.

De la definición anterior se desprende que los acuíferos están formados por rocas permeables, es decir, rocas que permiten el paso del agua a través de ellas.

Las rocas permeables que constituyen acuíferos se dividen en dos grandes grupos:



1.2.1.- ACUIFEROS FORMADOS POR ROCAS NO CONSOLIDADAS

Este tipo de rocas está formado por materiales sueltos derivados del intemperismo y erosión de rocas preexistentes. Al tiempo de su depósito, los fragmentos no están consolidados y se puede decir que están sueltos. En ese estado, el espacio abierto o poro que dejan entre sí las partículas, depende de su tamaño, forma, distribución, modo de transporte, heterogeneidad y ambiente de depósito. Conforme se suceden otros depósitos sobre una acumulación de fragmentos, ocurren alteraciones que modifican el tamaño y volumen de los espacios abiertos ya sea por consolidación debido al peso de los nuevos estratos o por cementación derivada de los procesos de diagénesis y otros externos.

La mayoría de las rocas clásticas son mezclas de fragmentos de diversos tamaños; no obstante, pueden clasificarse de acuerdo con el predominio de un cierto tamaño del grano en:

- Rocas clásticas de grano grueso
 - Rocas clásticas de grano medio a fino
 - Rocas clásticas de grano muy fino
- Rocas clásticas de grano grueso.

En este tipo de rocas predominan los fragmentos del tamaño de bloques (32-512 mm) y guijones (64-256 mm), mezclados con otros angulosos de menor tamaño, arenas y fragmentos de minerales como feldespatos y micas entre otros. Algunos de estos depósitos como los de talud, están ubicados al pie de los macizos rocosos, de tal manera, que los fragmentos son angulares y tienen poca distribución debido al escaso acarreo.

Otros depósitos similares de grano grueso son los constituidos por los abanicos aluviales que se forman al pie de las sierras, donde se acumula el acarreo de las corrientes fluviales al desembocar en las laderas y planicies. En este caso tienen mayores distancias y tiempos de transporte y por tanto, suele formarse una mezcla de bloques y guijones con gravas y otros fragmentos redondeados y arenas de todos los tamaños. En las zonas áridas, estos depósitos, aunque tienen heterogeneidad por la rapidez del depósito (lluvias torrenciales), tienen muy buena permeabilidad. En las brechas de talud, abanicos aluviales y gravas de lechos de cauces fluviales antiguos y meandros, a pesar que la distribución es mala, el promedio del tamaño de los fragmentos es grande y la permeabilidad es alta.

Dentro de estos depósitos se cuentan también los de coquinas, formados por conchas de animales marinos. Cuando estas acumulaciones de conchas no se encuentran cementadas o embebidas en una matriz arcillosa, son de muy alta permeabilidad.

- Rocas clásticas de grano medio a fino.

Este tipo de depósitos de grano medio a fino, acusan obviamente mayores distancias de acarreo y, en consecuencia, de tiempo de transporte. Esto origina que los fragmentos de roca vayan disminuyendo de tamaño progresivamente con el acarreo, hasta llegar a la fragmentación de los minerales que constituyen las rocas. De esta manera, los feldespatos, las micas y algunos minerales ferromagnesianos son desintegrados durante un acarreo largo, preservándose casi solamente los granos redondeados de cuarzo, que es el mineral mas resistente a la erosión. En este caso pueden encontrarse depósitos potentes de arenas formadas casi totalmente de cuarzo. En aquellos casos en que el acarreo o transporte no haya sido demasiado largo en tiempo y espacio, suelen encontrarse con las arenas de cuarzo fragmentos de feldespatos y micas.

El tamaño, forma y distribución de los granos de cuarzo, feldespatos y micas, estará controlado por la historia del transporte, así como si fueron transportados por agua o por el viento y por la influencia del ambiente de depósito.

Las arenas transportadas por el viento formarán depósitos homogéneos de permeabilidad elevada, las transportadas por agua, constituirán depósitos mas heterogéneos y la porosidad disminuye por la presencia de materiales finos que ocupan los espacios dejados por las arenas.

- Rocas clásticas de grano muy fino.

Estas rocas están formadas por arcillas y limos que son el producto final de la descomposición química de los minerales destructibles de la roca madre.

Estos materiales constituyen importantes depósitos en las planicies de inundación; en cuencas endorreicas donde llegan a acumular espesores muy grandes de sedimentos lacustres y en cuencas ubicadas en las franjas costeras con episodios de invasiones marinas.

Los depósitos arcillosos después de su sedimentación pueden pasar por una compactación debido al peso del estrato depositado sobre ellos. Como resultado de esta compactación, asumen una condición más o menos masiva, llamándosele a estas rocas "lodolitas", las cuales con un posterior endurecimiento se vuelven rocas duras llamadas "lutitas".

La porosidad de estas rocas, como se verá más adelante es muy elevada, pero tienen en cambio una permeabilidad muy baja. Por esta razón constituyen acuíferos de muy bajo rendimiento y generalmente se les clasifica como acuitardos.

Los tres tipos de depósitos enunciados en los párrafos anteriores de acuerdo al tamaño de su granulometría, suelen encontrarse frecuentemente mezclados, alternados e interdigitados en capas, constituyendo los rellenos de valles fluviales y tectónicos así como la cobertura aluvial de los mismos.

En estas rocas clásticas, independientemente del tamaño de los granos, el agua subterránea se almacena y circula en y por los poros, espacios e intersticios que dejan entre sí las gravas, arenas, arcillas y otros fragmentos mayores al acomodarse durante su depositación. Es por ello que a este tipo de depósitos se les clasifica como rocas de permeabilidad primaria, ya que adquirieron sus características de porosidad y permeabilidad durante el tiempo de su formación. También se les conoce como rocas con permeabilidad de intersticios o de medios porosos.

La porosidad y permeabilidad de este tipo de rocas depende de los siguientes factores:

- a) Tamaño, forma y textura de los granos
- b) Arreglo y acomodo de los granos
- c) Homogeneidad o heterogeneidad del depósito
- d) Comunicación entre los poros

Todos estos factores se combinan entre sí para formar rocas de diferentes grados de porosidad y rangos de permeabilidad. En las figuras 1 y 2, se muestran distintos tipos de intersticios, así como la relación entre la textura y la porosidad de las rocas.

Es conveniente hacer notar, que el tamaño del grano no es suficiente para caracterizar la porosidad de una roca, ya que a iguales diámetros, la porosidad puede variar significativamente con arreglos o acomodos diferentes. De igual manera es interesante resaltar que la heterogeneidad del depósito disminuye la porosidad y que la homogeneidad la aumenta.

Dado que la porosidad de una roca está definida como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la roca, si una formación se encuentra totalmente saturada, la porosidad es por tanto una medida de la cantidad de agua que la roca contiene por unidad de volumen.

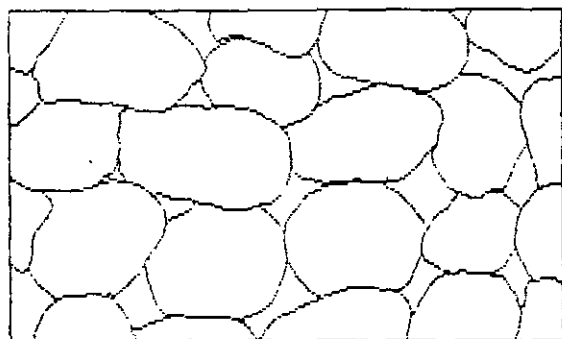
$$\phi = \frac{V_{\text{huecos}}}{V_{\text{total de la roca}}}$$

Ahora bien, una roca muy porosa y que por ello contiene mucha agua en sus espacios vacíos, no necesariamente tiene una elevada permeabilidad. Para algunas rocas como las arcillas, mientras más grande es la porosidad menor es la permeabilidad.

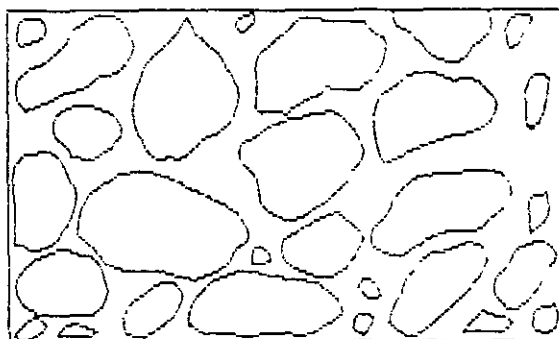
Si se recuerda que la permeabilidad, de manera simple y general, es la capacidad de una roca para permitir la circulación del agua a través de ella, es fácil comprender, que además de los factores como tamaño, forma, acomodo y heterogeneidad de las partículas, la permeabilidad dependerá también de la conexión o intercomunicación de los poros que contienen agua.

La arcilla por ejemplo, como se dijo antes, es una roca muy porosa, pero tiene una permeabilidad muy baja. Esto se debe a que sus partículas son microscópicas y se encuentran densamente empaquetadas.

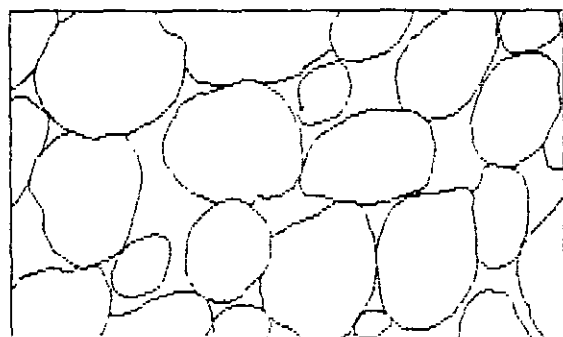
DISTINTOS TIPOS DE INTERSTICIOS Y RELACION ENTRE LA TEXTURA Y LA POROSIDAD DE LAS ROCAS



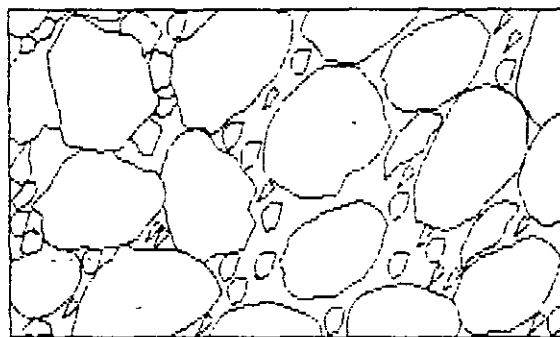
Depósito sedimentario de granulometría homogénea y gran porosidad



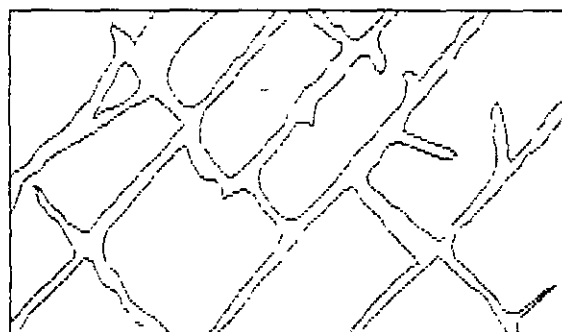
Depósito sedimentario de granulometría homogénea cuya porosidad ha disminuido por cementación de sus intersticios con materias minerales



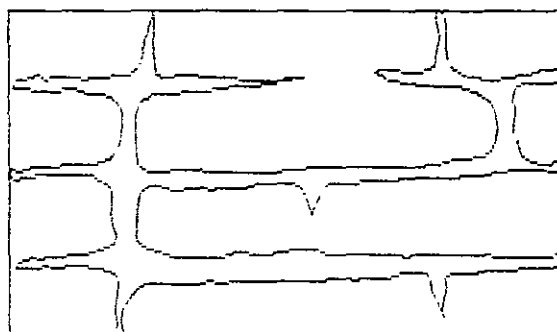
Depósito sedimentario de granulometría homogénea formado por elementos que a su vez son porosos; por tanta porosidad muy elevada



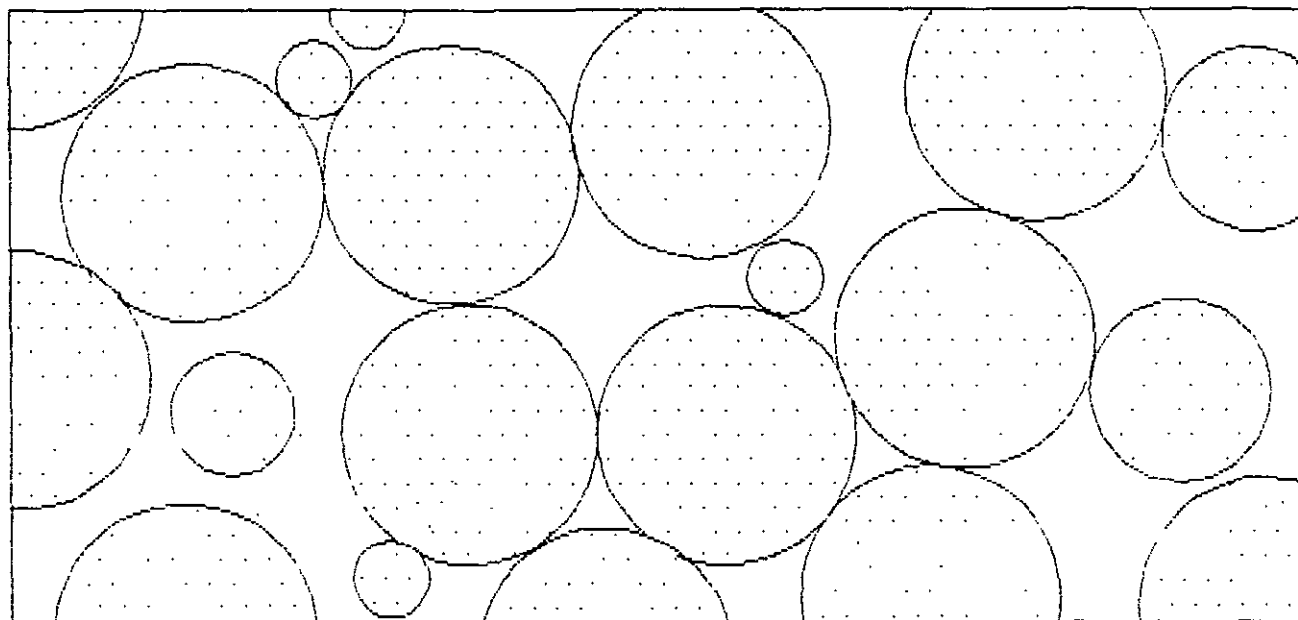
Depósito sedimentario de granulometría heterogénea y escasa porosidad



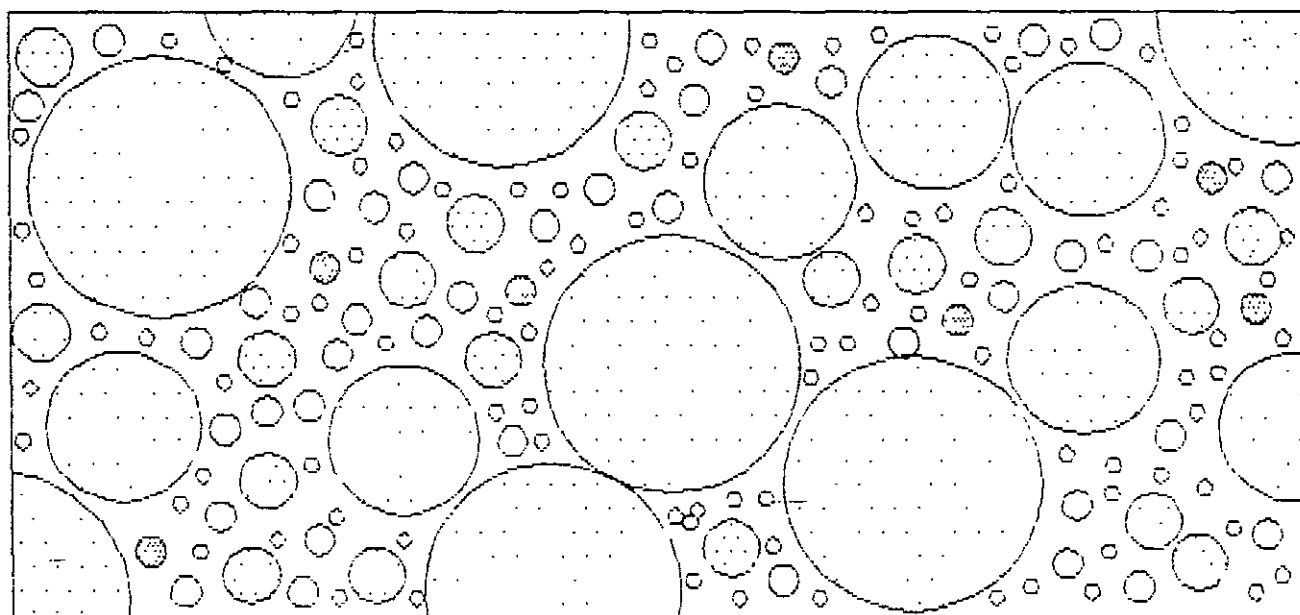
Roca porosa por fragmentación



Roca porosa por solución



POROSIDAD 32%



POROSIDAD 17%

Variación de la porosidad debida al grado de homogeneidad del tamaño de los granos. Los números que figuran al pie de cada dibujo indican el porcentaje de porosidad de la muestra

FIG. 2

De Krumbein, W.C. y C.D. Monk, 1943.

Las fuerzas de atracción molecular, adhesión y cohesión se combinan para que el agua contenida entre sus poros sea cedida muy lentamente en forma natural o hacia las captaciones artificiales (Tabla I).

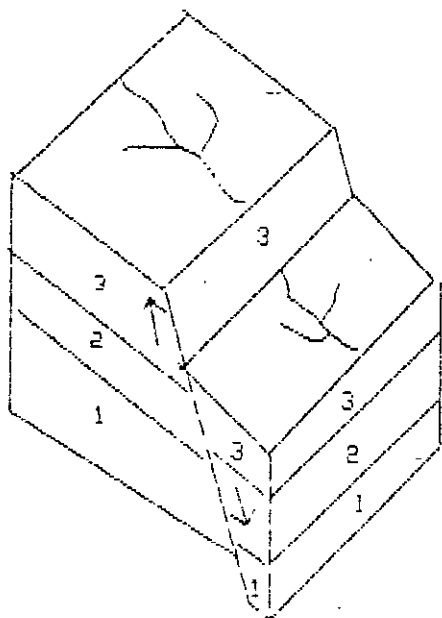
TABLA I

ROCA	POROSIDAD%	RENDIMIENTO ESPECIFICO	PERMEABILIDAD
Arcilla	40 - 55	1 - 10	10^{-10} - 2×10^{-7}
Arena	30 - 40	10 - 30	10^{-5} - 3×10^{-4}
Grava	30 - 40	15 - 30	10^{-5} - 1.3×10^{-3}
Grava y arena	20 - 35	15 - 25	10^{-5} - 5×10^{-4}
Areniscas	10 - 20	5 - 15	10^{-8} - 5×10^{-6}
Calizas	1 - 20	9.5 - 5.	muy variable

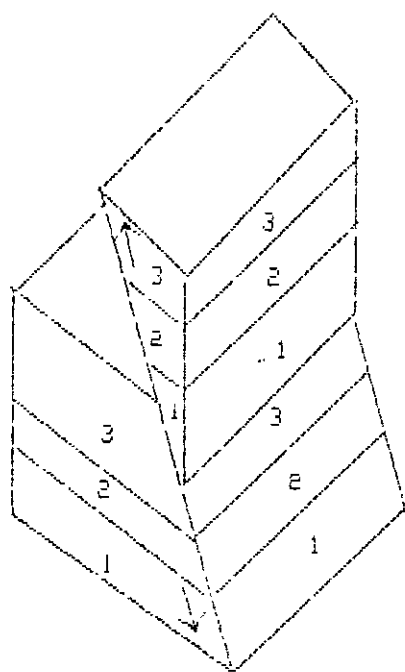
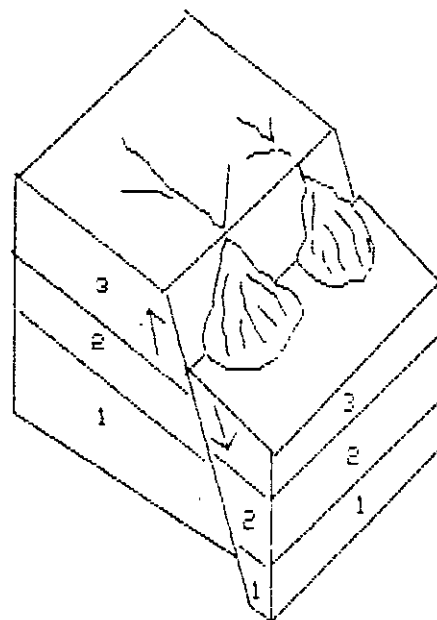
1.2.2.- ACUIFEROS FORMADOS POR FRACTURAMIENTO DE ROCAS VOLCANICAS

En este grupo de rocas se encuentran las rocas densas o compactas como el basalto, la andesita, riolita, riodacita, ignimbrita y dacita entre otras.

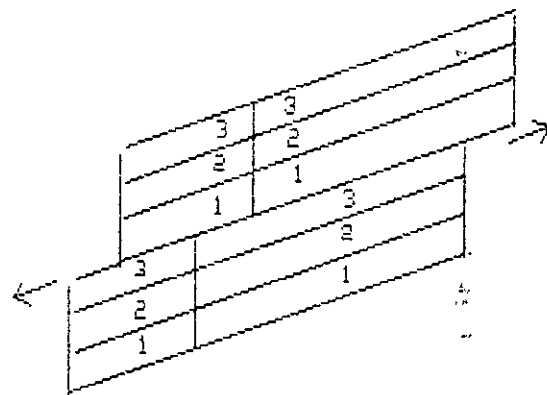
Los procesos que causan que estas rocas de origen impermeables se vuelvan permeables, pueden ser de origen tanto mecánico como químico. En la mayoría de los casos, este cambio es propiciado por la combinación de los dos procesos, pero para ello entra en juego el clima y la naturaleza de la roca. En condiciones áridas extremas, sólo tienen significancia los procesos mecánicos. Las aberturas secundarias en las rocas se inician con una falla de la masa de la roca para resistir la presión sufriendo una deformación. Cuando esta deformación es expresada en una pequeña abertura se llama junta. Cuando ocurre una fractura con desplazamiento horizontal o vertical se le conoce como falla. En la figura 3 se esquematizan los principales tipos de fallas.



Falla normal



Falla inversa



Falla de rumbo

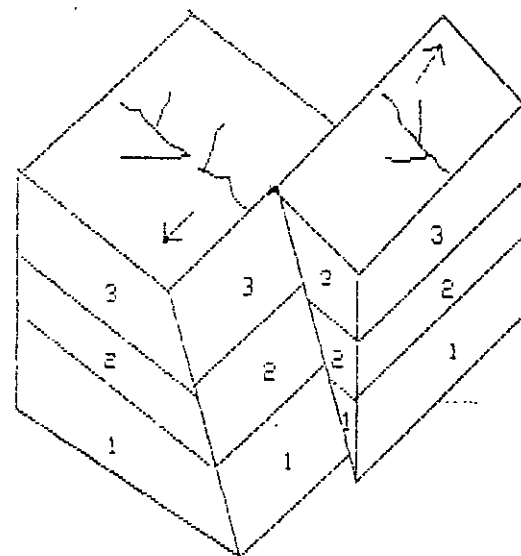


FIG. 3

Las juntas (fig. 3) se desarrollan en las rocas ígneas debido a esfuerzos de tensión desarrollados dentro de las rocas cuando se van solidificando y enfriando. En la mayoría de los casos, tales juntas se abren cuando la roca es aliviada de la presión que le rodea. En la estructura columnar de algunos flujos de basalto, el enfriamiento produce columnas hexagonales. En estas estructuras, las juntas pueden abrirse a lo largo de las columnas por esfuerzos tectónicos, lo que aumenta la densidad de discontinuidades en la roca y la infiltración.

De acuerdo a la naturaleza de la juntas, su distribución espacial puede ser inferida en el subsuelo; así, las juntas por alivio de la presión en las rocas ígneas generalmente están restringidas a profundidades someras; alrededor de 30m, pero pueden extenderse horizontalmente sobre amplias áreas, lo que propicia una buena infiltración del agua de lluvia.

Por otro lado, las fracturas y juntas relacionadas con fallas regionales, están restringidas en superficie, pero llegan hacia abajo a profundidades de unos cuantos cientos de metros (fig 4).

La permeabilidad de estas rocas volcánicas depende del grado de fracturación. En rocas ígneas de grano grueso, en lo general esta es reducida debido a la caolinización de los minerales feldespáticos a lo largo de los planos de fracturación o de las juntas interiores como es el caso de las andesitas porfídicas. En las rocas ígneas de grano fino como los basaltos, y vetas de cuarzo de grandes juntas, pueden ser obtenidas altas permeabilidades.

- Basaltos

En México, en toda la Franja del Eje Volcánico Mexicano, los acuíferos en rocas basálticas son abundantes y muy productores. Como ejemplos pueden citarse entre muchos, los pozos del Sur y Sudeste de la Cd. de México, emplazados en basalto y con caudales muy apreciables. Los del Area de Chiconautla en la parte media del Valle de México, los manantiales de Xochimilco ya agotados por la extracción

Pozo productor y seco en rocas
volcánicas fracturadas.

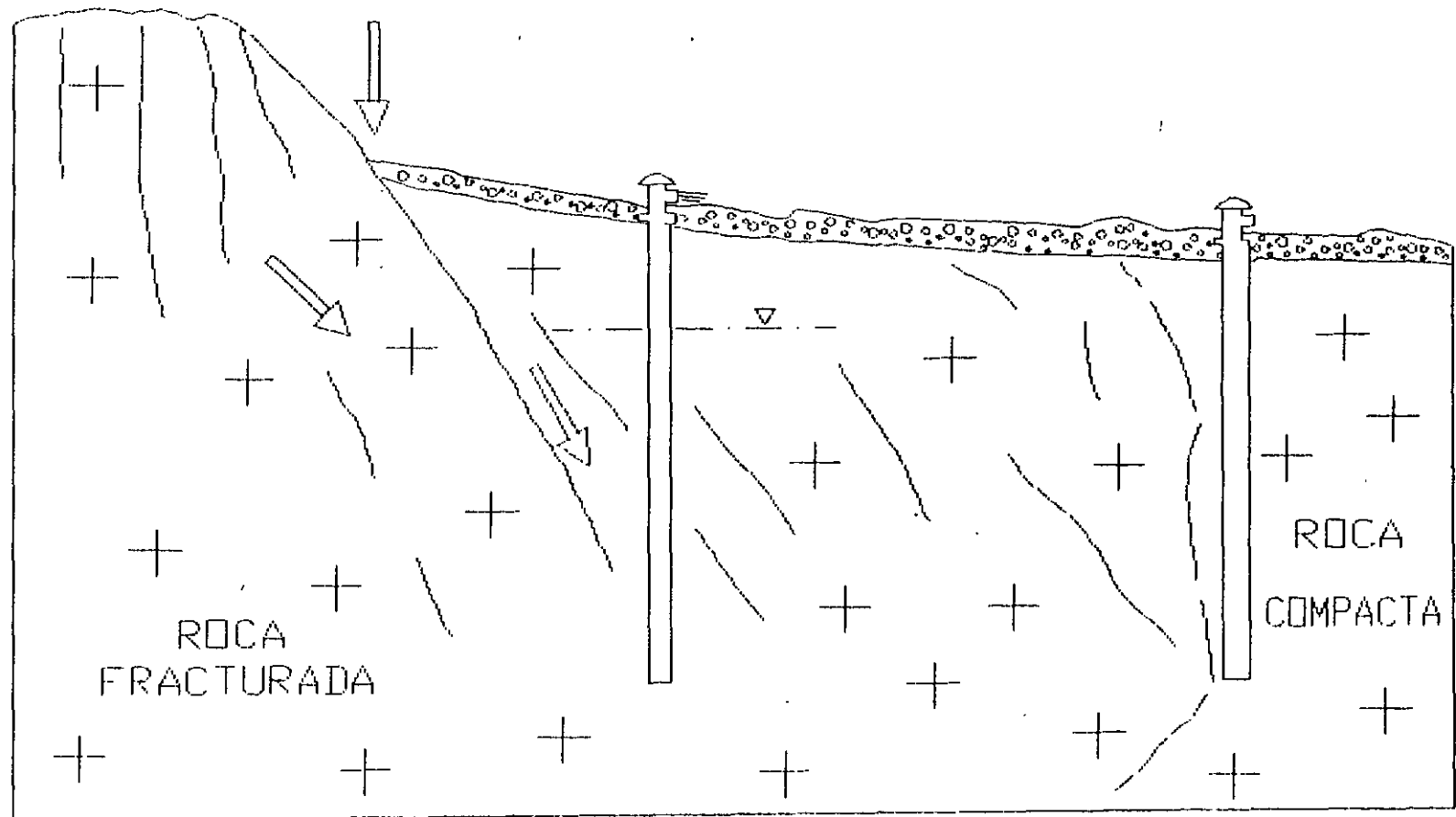


FIG. 4

Héctor L. Macías González, 1986.

de pozos en el área de la planicie, los manantiales de Chapultepec; de Cuernavaca y los pozos termales de Apaseo el Alto en Guanajuato. Lo mismo puede decirse por el material escoráceo del basalto conocido como "tezontle" que produce pozos de gran rendimiento en la misma Faja Volcanica.

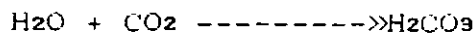
- Riolitas e ignimbritas

El fracturamiento en las rocas riolíticas y las tobas conocidas como ignimbritas, se traduce también pródigamente en excelentes acuíferos en estas rocas. En ciertas porciones del territorio son abundantes las mesas de ignimbritas con fracturamiento vertical que funcionan como zona de recarga y los fracturamientos regionales en estructuras de altos y bajos tectónicos por donde se infiltra el agua de lluvia a profundidades de cientos de metros. Los ejemplos más conocidos son el Valle de Villa de Reyes en San Luis Potosí y el Valle de León en Guanajuato. (Fig.5)

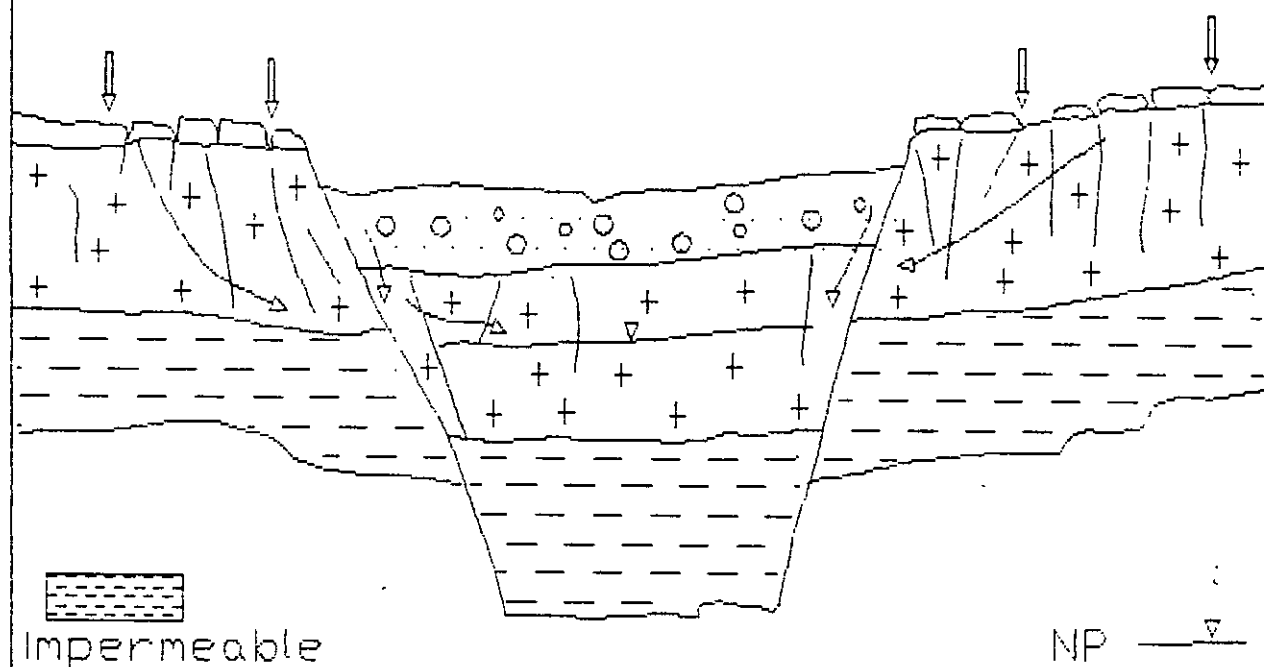
1.2.3. ACUIFEROS FORMADOS POR FRACTURAMIENTO Y DISOLUCION EN ROCAS CARBONATADAS

Algunas rocas carbonatadas como aquellas que se forman en ambientes de plataforma como arrecifes o colonias coralinas, pueden iniciarse con una permeabilidad primaria bastante alta. Sin embargo, la mayoría de los acuíferos más productores de calizas en México se deben a procesos de fracturamiento y disolución en rocas calcáreas densas. La disolución es causada por una sobresaturación agresiva del agua al entrar en las fracturas. La agresividad del agua está determinada por el contenido de CO₂ en ella, el cual toma directamente del aire y de la materia orgánica de la cubierta de suelo.

El proceso de disolución se inicia cuando el agua que contiene CO₂ se transforma en un ácido carbónico débil.



Comunicación a través de fracturas desde la superficie



Alimentación descendente por medio del estrato y capa sobreyacente

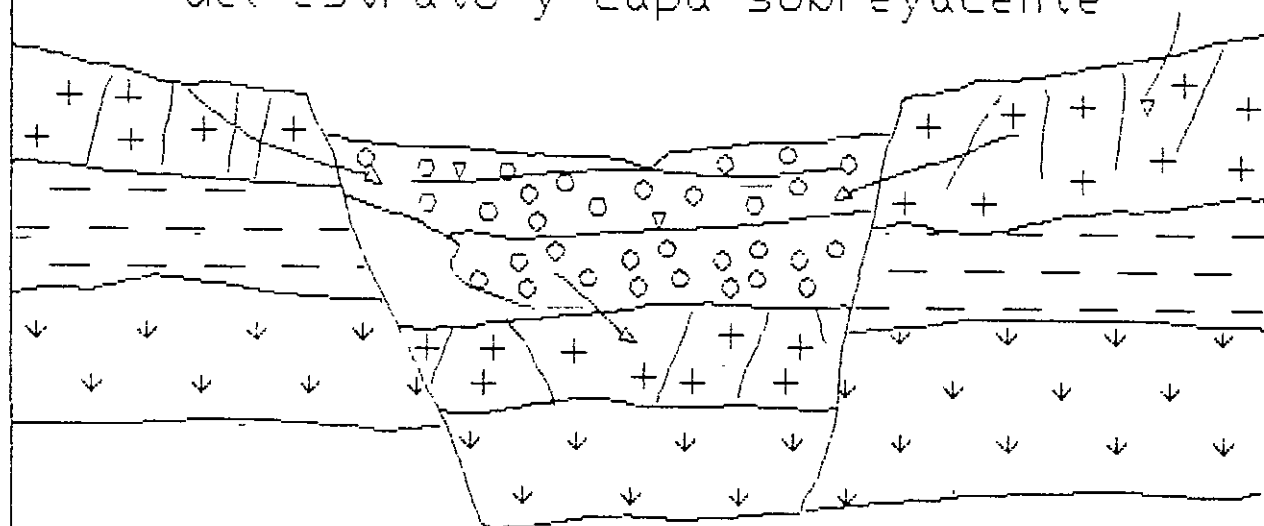
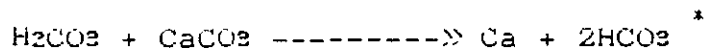


FIG. 5

Héctor L. Macías González, 1986.

El modo de acidificación del agua dependerá de la cantidad de CO₂ disponible en la atmósfera y en el suelo, de la temperatura, la presión atmosférica y el pH del agua. El ácido carbónico ataca a la roca carbonatada disolviéndola en Ca⁺⁺ y en 2HCO₃⁻ :



La cantidad total de roca soluble depende de la cantidad total del agua y CO₂ que pasen a través de la roca. Por tanto, el fenómeno de disolución es más intenso y extremo en las regiones de temperatura y humedad tropical. En estas regiones la espesa vegetación y el delgado humus que contiene el subsuelo producen un alto contenido de CO₂ en el agua.

El tiempo a través del cual ha estado en circulación este tipo de agua, es también un factor decisivo y en regiones en donde las rocas han estado sujetas a la disolución durante largos períodos geológicos, puede ser totalmente denudada.

Una región donde el fenómeno de disolución está altamente desarrollada es la región de Karst en la Dinárides, Yugoslavia, de donde se tomó el nombre para marcar en general a éste fenómeno.

La petrografía y la química de la roca tienen una importante influencia en el desarrollo del fenómeno de disolución. Las observaciones han demostrado que las rocas carbonatadas formadas por cristales grandes de calcita, tienden a desarrollar permeabilidades más altas que las rocas litográficas. Las crestas pueden ser de impermeables a semipermeables; en presencia de margas, se reduce aún más su permeabilidad. La dolomita, que es Ca Mg (CO₃) es alrededor de 4 veces menos soluble que la caliza (CaCO₃) y sin embargo, existen acuíferos dolomíticos altamente permeables.

* El H₂CO₃ que es inestable se descompone espontáneamente en forma de H⁺ + HCO₃⁻ por lo que también suele expresarse así.

La grutas de Cacahuamilpa en el Estado de Guerrero son un típico ejemplo del poder de disolución del ácido carbónico sobre las rocas calcáreas. en los Estados de Nuevo León y Coahuila existen también grutas y manantiles de este tipo y pozos de gran producción.

1.3 - ROCAS IMPERMEABLES

Aunque el título de este subtema es el de rocas impermeables, es importante hacer notar que en la naturaleza no existen las rocas impermeables. Tanto las rocas plutónicas como las rocas metamórficas tienen permeabilidades de muy bajas a extremadamente bajas. Por esta razón, para fines prácticos se les considera como impermeables.

Las rocas que fueron formadas debido a la cristalización y consolidación de un magma y que no han pasado por la fase secundaria de fracturación y descomposición son muy impermeables. Dentro de estas, quedan comprendidas las rocas intrusivas como el granito, diorita, tonalita, granodiorita y gabro entre las principales.

En contraste con este grupo, existe el de aquellas que han estado sujetas a diversos episodios de tectonismo y que han sufrido tantas alteraciones y cambios que es difícil reconocer a la roca madre. Este tipo de rocas llamadas metamórficas, incluyen a rocas tales como el mármol, pizarras, esquistos, gneisses y cuarcitas en donde los espacios abiertos son muy reducidos. Los esfuerzos a que fueron sometidas y su prolongada edad, han producido una fuerte compactación, y en los casos de zonas de fracturamiento, estas están casi siempre rellenas por vetas de mineralización, de sílice o de relleno estéril.

Estos dos grandes grupos de rocas intrusivas y metamórficas cuando no presentan un alto grado de intemperismo tienen una porosidad total inferior al 3%, y por lo general casi siempre inferior al 1%. Esto se debe a que los escasos poros existentes en estas rocas son muy pequeños y por lo general sin conexión entre sí.

Estas consideraciones pueden ser válidas para la generalidad de las rocas plutónicas y metamórficas. sin embargo, algunos casos particulares se alejan de la generalidad como son algunos granitos y cuarcitas que en obras de tuneleo y otras llevadas a cabo en México, han aportado apreciables caudales de agua subterránea.

La permeabilidad que puede desarrollarse en estas rocas tiene lugar en las zonas de intemperismo y decomposición. Las rocas graníticas paleozoicas y mesozoicas que bordean a la Cd. de Nogales, Son., por ejemplo, exhiben una cubierta de intemperismo formada de arena gruesa llamada "tucuruguay". Esta cubierta que en algunas localidades alcanza espesores de hasta 150m es muy permeable y en ella se han emplazado pozos con caudales de hasta 15 lps (Fig. 6). En estas rocas, los diques funcionan como barreras laterales al flujo. Por debajo de esta cubierta la roca sana muestra un sistema de fracturas escasamente desarrollado que se cierra a poca profundidad.

En un tipo de rocas metamórficas denominadas cuarcitas, el Ing. Mario Veytia (comunicación verbal), encontró durante uno de sus trabajos de asesoría, agua subterránea en el túnel Río Colorado - Tijuana, proveniente de las cuarcitas y con una carga de columna de agua de unos cien metros.

Como puede esperarse, estos casos son excepcionales y lo más frecuente en los trabajos de exploración o cuantificación, es el de considerar a estas rocas como barreras al flujo de agua subterránea.

1.4.- ESTRATIGRAFIA REGIONAL

En el estudio de la estratigrafía regional, se investiga la secuencia del carácter litológico y la distribución espacial de las capas en una cierta región. En el estudio geohidrológico, el hidrogeólogo se interesa en la distribución espacial de las rocas que forman acuíferos, acuícludos y acuitardos. El estudio de esta secuencia se lleva a cabo investigando la sección geológica de la región.

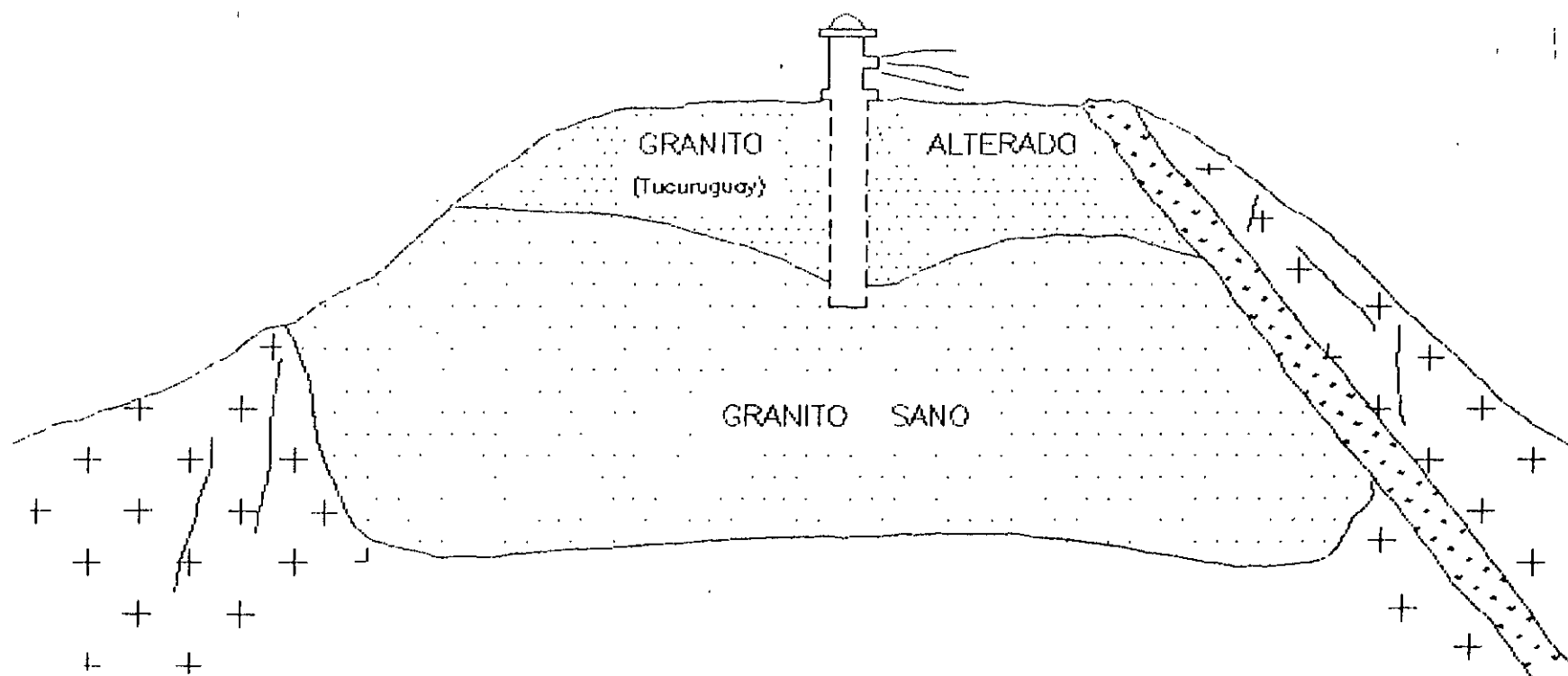


FIG. 6

Héctor L. Maciás González, 1986

La secuencia es subdividida de acuerdo con sus unidades litológicas y de acuerdo con las unidades de tiempo.

Se debe tener cuidado de no mezclarlas, ya que esto traerá malas interpretaciones y fallas en la construcción del modelo geológico.

Las unidades litoestratigráficas son aquellas distinguibles de acuerdo a su carácter litológico.

Las unidades cronoestratigráficas son aquellas distinguibles de acuerdo a sus diferentes edades absolutas o relativas.

La unidad litoestratigráfica básica es la Formación

Una Formación es una unidad cartografiable

Varias formaciones forman un Grupo

Las unidades de tiempo se fijan de acuerdo con las divisiones de tiempo de la columna geológica, la cual, a su vez, ha sido construida auxiliándose de los fósiles y elementos radioactivos.

La división dentro de las formaciones es significativa desde el punto de vista hidrogeológico y con este propósito, las formaciones pueden ser agrupadas o subdivididas en unidades hidroestratigráficas.

Una unidad hidroestratigráfica es una unidad cartografiable con propiedades hidrogeológicas específicas.

Como en la litoestratigrafía, también en la hidroestratigrafía se pueden tener cambios de facies debido a los cambios laterales en el ambiente de depósito. Estos cambios de facies tienen una importancia muy grande desde el punto de vista hidrogeológico.

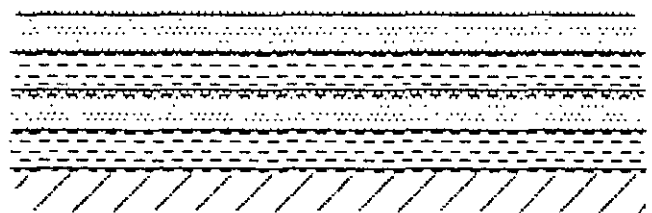
Después de definir las formaciones geológicas se procede con la ayuda de la estratigrafía, a construir la sección o columna de la región estudiada auxiliándose en los afloramientos y en la información proporcionada por pozos y exploraciones geofísicas.

Esta información permite construir secciones transversales al flujo del agua y el diagrama de bloques tridimensionales o bloque diagramático.

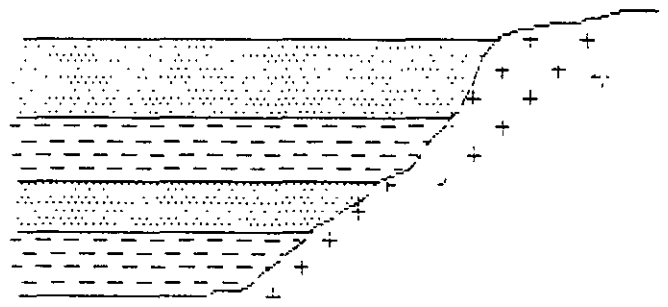
Al construirse el modelo tridimensional, se puede encontrar no sólo la correlación estratigráfica local sino la secuencia regional y ocasionalmente la presencia de discordancias en las secciones geológicas.

Una discordancia se refiere a una alteración en la historia geológica de una región y son como sigue:

DISCORDANCIA
ANGULAR



DISCORDANCIA
ESTRATIGRAFICA



DISCORDANCIA
EROSIONAL

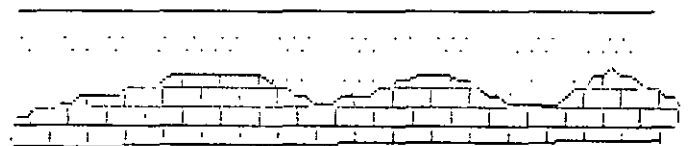


FIG. 7

Es muy importante el conocimiento de estas discordancias desde el punto de vista hidrogeológico, ya que pueden dar lugar a cambios de permeabilidad, de la superficie freática o piezométrica, o bien identificar barreras de flujo subterráneo.

1.5 - DISTRIBUCION DEL AGUA EN EL SUBSUELO

El agua que se infiltra en el subsuelo inicia un recorrido a través de él, con un movimiento preferentemente vertical causado por el efecto de la gravedad hasta alcanzar el acuífero o roca almacenante caracterizada por la saturación de agua en sus intersticios. En el trayecto del agua, antes de alcanzar su destino en el subsuelo, pueden reconocerse tres subzonas que se citan en orden descendente desde la superficie del terreno: subzona de agua del suelo, subzona intermedia y subzona capilar. Estas subzonas se agrupan y conforman la llamada zona de aereación (fig. 8).

El agua contenida en la zona de aereación se designa como agua suspendida o vadosa.

La subzona del agua del suelo tiene una extensión variable, su espesor quedará definido por el tipo de suelo y la vegetación del lugar, pero para fijar límites se puede decir que esta subzona tiene una dimensión que va desde la superficie del terreno hasta la profundida de las raíces de las plantas.

Parte del agua contenida en la primera subzona, será capaz de drenar por acción de la gravedad, a esta agua se le conoce como agua gravitacional; la parte restante queda retenida en la superficie de las partículas del suelo, en forma de una película fina alrededor de ellas por acción de la tensión superficial. Esta agua denominada agua pelicular es utilizada en gran medida por las plantas y es precisamente en agricultura donde se define como "capacidad de campo" a la máxima cantidad de agua pelicular que es capaz de retener un suelo por unidad de volumen.

La subzona intermedia ocupa un terreno comprendido entre el límite inferior de la subzona de agua y el límite superior de la subzona capilar (fig. 8). Aunque muchos autores se empeñan en hacer intervenir a esta subzona, en opinión del autor se puede decir que es una extensión a profundidad de la subzona del agua del subsuelo, ya que también está constituida por el agua pelicular y el agua gravitacional; la única diferencia estriba en que en la subzona intermedia por definición, no debe existir la influencia de las plantas.

La subzona más profunda de la zona de aereación se le denomina subzona capilar. Esta se extiende por encima de la zona de saturación en donde el agua se eleva a causa de la atracción capilar; así, el espesor de la subzona por encima del nivel freático está definido por el límite de la elevación capilar del agua. Este límite es función de la granulometría de esta zona. A menor diámetro de las partículas mayor será la altura de la zona capilar y viceversa.

En la zona de saturación, el agua llena completamente los intersticios (poros, fisuras y fracturas) de la roca y acusa un movimiento fundamental en dirección horizontal diferenciándose del movimiento vertical que se establece en la zona de aereación.

Los límites superiores de esta zona son variables, es decir, las subzonas anteriores bien pueden no existir si el nivel freático se encuentra situado muy cerca de la superficie del terreno. Así, es en las rocas que constituyen esta zona donde se almacenan cantidades de agua, tan grandes según la porosidad existente en ellas y las características geológicas generales propias de la zona.

1.6 TIPOS DE ACUIFEROS

Como se vió en la primera parte, las rocas capaces de almacenar y transmitir agua reciben el nombre de acuíferos (del latín *acqua* = agua y de *fero* = llevar).

Se vió también en el inicio de 1.2 que los acuíferos funcionan como cuerpos transmisores de agua, desde las zonas de recarga a las de descarga o hacia los embalses subterráneos de almacenamiento.

En estrecha relación con los acuíferos hay otros tipos de rocas que se clasifican de acuerdo a su funcionamiento y capacidad para almacenar agua y cederla a las zonas de drenado natural, a las captaciones artificiales o a los mismos acuíferos. Estas rocas o formaciones geológicas que sobreyacen, subyacen o limitan lateralmente a los acuíferos se conocen como acuicludos, acuitardos y acuífugos.

Aunque algunos autores se oponen al uso de estos términos, se hace la descripción de los mismos en estas notas por considerarse de interés. Los acuicludos o acuícierres (del latín *claudere* = cerrar) son las formaciones geológicas que contienen agua, pero que no la transmiten, por lo que su explotación no puede efectuarse. El ejemplo clásico que se cita en todos los libros son las arcillas, que a pesar de su alta porosidad (40-50%) no permiten que el agua sea drenada pues a ello se opone la atracción molecular, la cohesión y la tensión superficial.

Los acuitardos, como su nombre lo indica, son formaciones geológicas semipermeables que transmiten muy lentamente el agua que contienen. Por esta circunstancia, localmente los acuitardos no son aprovechables, sin embargo, a nivel regional, pueden ceder agua en cantidades significativas en un balance de aguas subterráneas. Existen numerosos ejemplos de acuitardos que limitan superiormente a acuíferos y que por diferencia de presiones hidráulicas entre ambos, se establece una recarga descendente o ascendente del acuitardo hacia el acuífero, o del acuífero hacia el acuitardo.

Ejemplos de acuitardos son algunas formaciones arcillosas mezcladas con arenas y limos, con horizontes de arenas o fragmentos de coquinas, o de arenas, cenizas y fragmentos mayores de origen volcánico.

Los acuifugos (del latín *fugere* = huir), son las formaciones impermeables que no contienen agua como son las rocas ígneas extrusivas e intrusivas que no se encuentran fracturadas o alteradas y rocas carbonatadas en las mismas condiciones.

Desde el punto de vista de funcionamiento hidráulico y según el grado de confinamiento de las aguas que contiene, los acuíferos se clasifican en tres tipos:

- acuíferos libres o freáticos
- acuíferos confinados
- acuíferos semiconfinados

Los acuíferos libres son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre sujeta a la presión atmosférica. Esta superficie libre es el límite superior de la zona de saturación y se le conoce como superficie freática (fig. 9).

Un acuífero limitado superior e inferiormente por formaciones impermeables y que contiene agua a mayor presión que la atmosférica se le clasifica como acuífero confinado. Cabe aquí hacer mención que en la naturaleza, raramente se encuentran formaciones completamente impermeables, por lo que algunos autores mencionan de manera muy atinada al referirse a estos acuíferos que las capas que los limitan son "relativamente impermeables" (fig. 10).

La compresión del agua en estos acuíferos confinados se debe a la transmisión de la presión de la carga hidráulica a altura de la columna de agua al seno del acuífero y al peso de la columna litostática que éste soporta. Por ello, cuando se perfora un pozo en estos acuíferos, el agua asciende dentro del pozo por encima del techo del acuífero, y si la presión de confinamiento es mayor, el agua puede brotar como en los pozos surgentes o artesianos.

DISTRIBUCION DE AGUA EN EL SUBSUELO

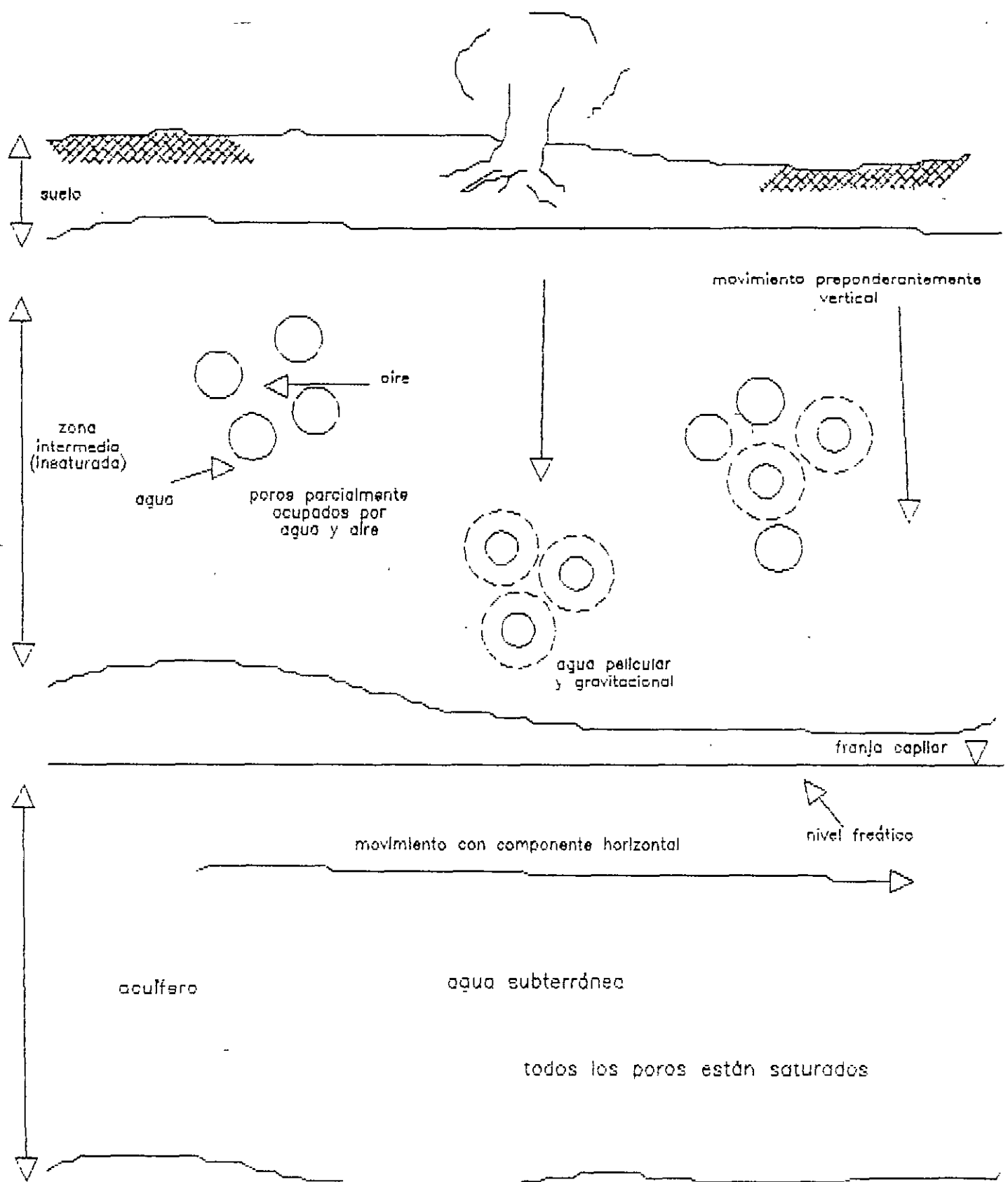


FIG. 8

DIFERENTES TIPOS DE ACUIFEROS

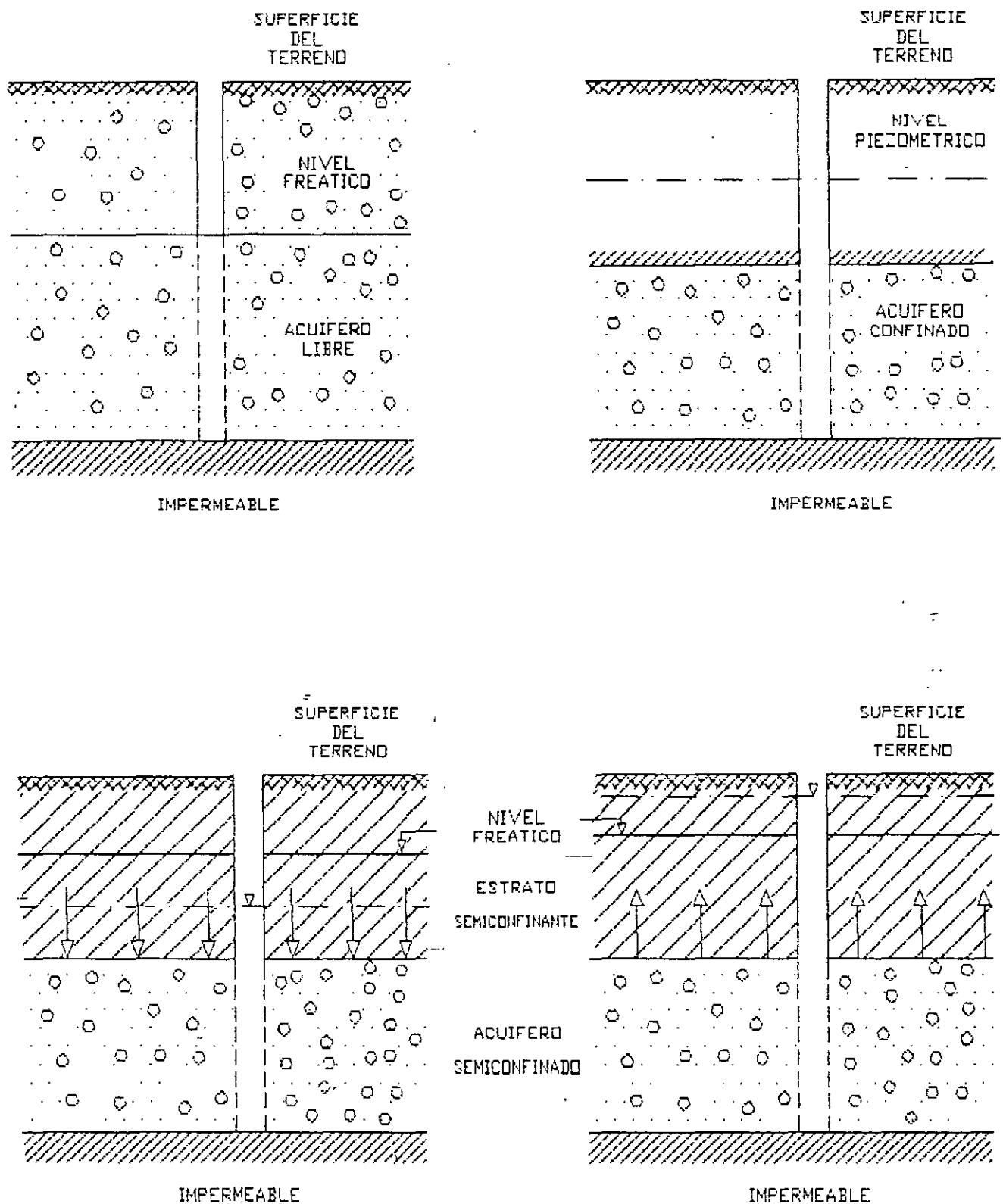


FIG. 9

Los acuíferos semiconfinados son también estratos completamente saturados y sometidos a presión, limitados en su parte superior por un estrato menos permeable a través del cual puede recibir o ceder recarga vertical.

En las siguientes figuras se esquematizan los tipos de acuíferos descritos. En la primera (fig. 11) se idealiza un estrato de rocas calcáreas confinado entre dos capas de lutita. También se puede ver que el acuífero confinado funciona como una tubería a presión, y el acuífero libre como un canal.

Otra analogía para los acuíferos confinados además de las obras hidráulicas, es la de un vaso comunicante en donde se igualan las presiones de un líquido (fig. 12).

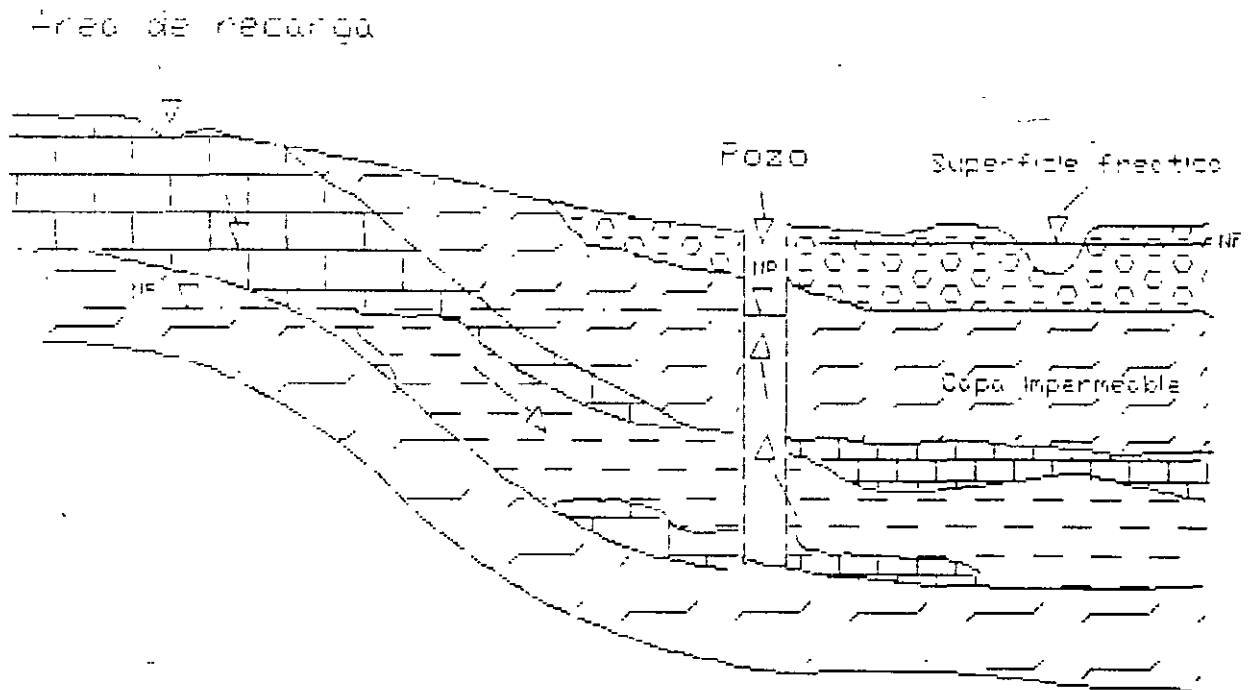
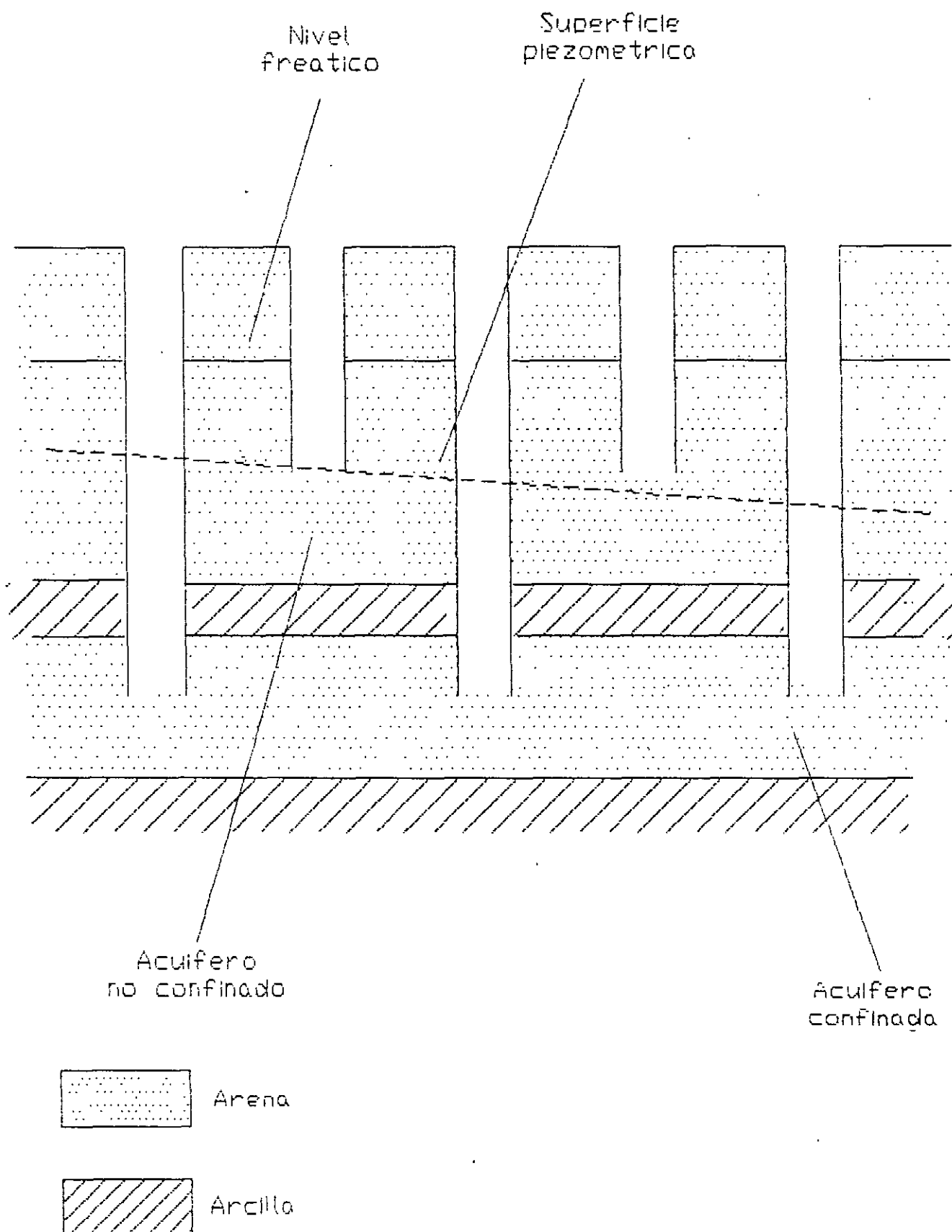


FIG. 11

Héctor L. Macías González, 1986.

ACUIFERO CONFINADOS Y NO CONFINADOS



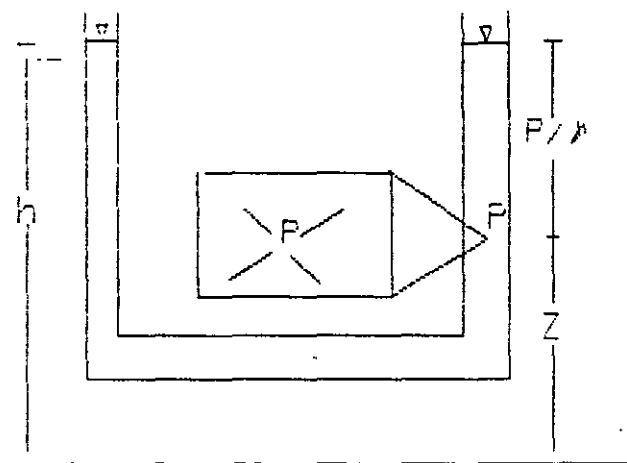


FIG. 12

Nivel de
referencia
arbitrario

La siguiente figura (fig. 13) muestra la esquematización de un acuífero semiconfinado:

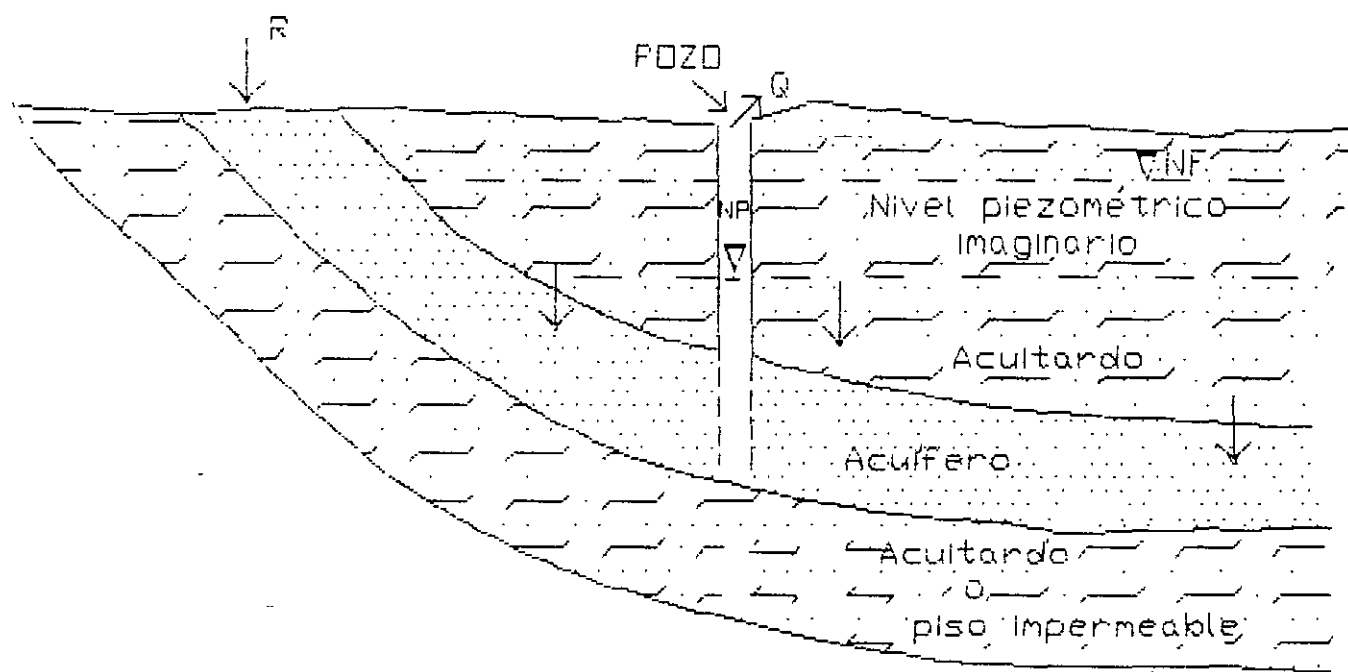
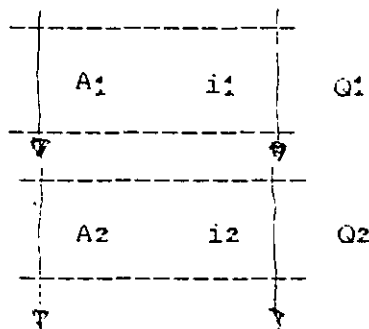


FIG. 13

1. / INFLUENCIA DE LAS ESTRUCTURAS SOBRE LA SUPERFICIE FREATICA O PIEZOMETRICA

La representación gráfica de los niveles del agua subterránea (profundidad al nivel o elevación con respecto a un nivel de referencia), son sumamente útiles para conocer de manera aproximada el grado de explotación de un acuífero, la dirección preferencial de flujo y la posición de las zonas de recarga y descarga. La dirección del flujo está determinada, en condiciones naturales o de equilibrio, por la relación geográfica entre el área de recarga y descarga. Cuando una cuenca se encuentra sobreexplotada, la red de flujo es deformada en la medida en que se tome agua del almacenamiento.

El gradiente en la red de flujo a un mismo caudal, es función inversa de la permeabilidad, por lo que si en una cierta sección se observa un cambio significativo del gradiente, esto puede deberse a un cambio en la litología y por tanto de la permeabilidad o a un cambio en el caudal de flujo.



Por hipótesis los caudales Q_1 y Q_2 son iguales

$$Q_1 = A_1 v_1$$

$$Q_2 = A_2 v_2$$

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$Q = A_1 k_1 i_1 = A_2 k_2 i_2 \therefore \frac{k_1}{k_2} = \frac{A_2 i_2}{A_1 i_1}$$

como las áreas son consistentes, entonces:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{i_2}{i_1}$$

En un acuífero uniforme, se tendrá en consecuencia, una velocidad uniforme y se tienen trazos más o menos rectos.

Debido a las condiciones arriba mencionadas se puede ver que en estructuras geológicas diferentes se tendrán condiciones diferentes en el nivel del agua. Esto estará controlado por:

- a) Topografía
- b) Estructura geológica y litología (control estructural)
- c) Permeabilidad
- d) Influencia de las zonas de recarga y descarga
- e) Espesor del acuífero

En el caso de que se tuviera una capa impermeable intermedia entre la superficie y el techo del acuífero, se habla de un manto colgado y un nivel de aguas colgadas (fig. 14).

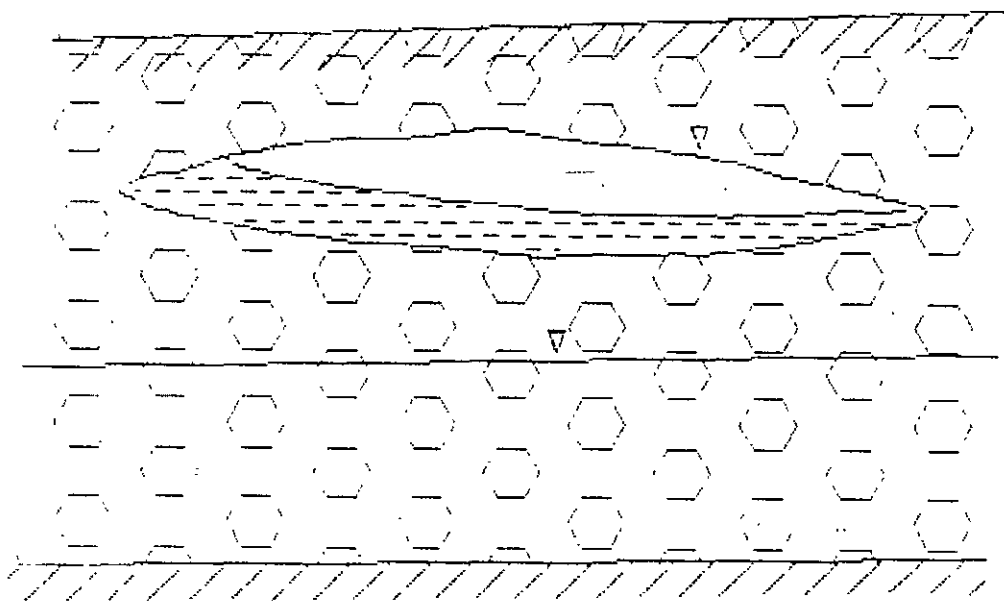


FIG. 14

11/23/91 L. V. 45 000247, 100%
12/10/91 L. V. 45 000247, 100%

Entre más húmeda sea el área, habrá más cambios para un nivel de agua somero. Otro caso es por la ocurrencia de fuentes de recarga como flujos de entrada o por el contrario, flujos de salida del agua subterránea. Como ejemplo ríos efluentes o influentes (fig. 15).

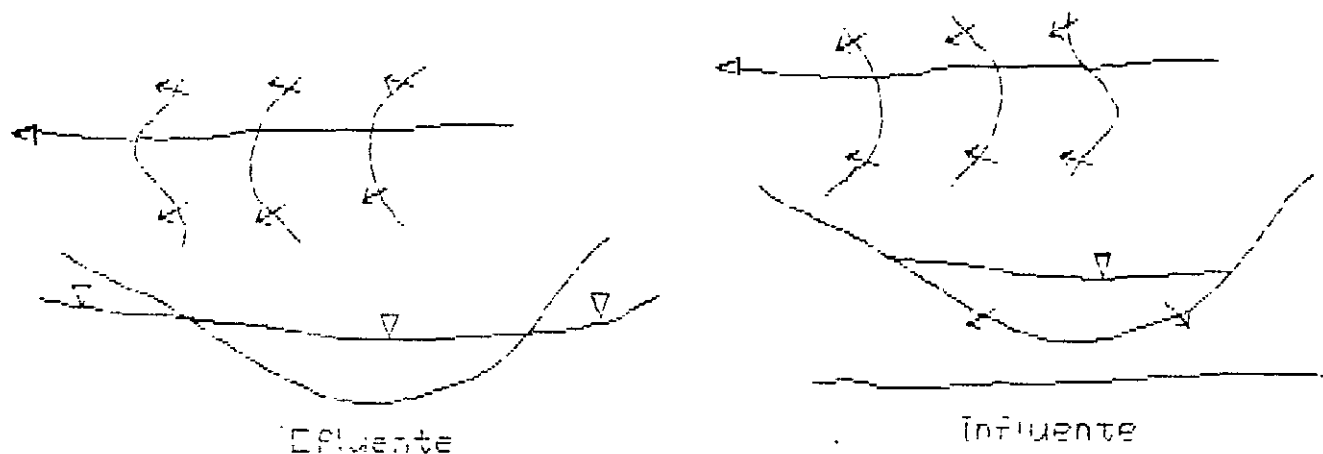


FIG. 15

Además del cambio en la forma del nivel de agua debido a un cambio en la permeabilidad del acuífero y sus espesores, se puede tener una influencia en el nivel del agua por la estructura geológica (fig. 16).

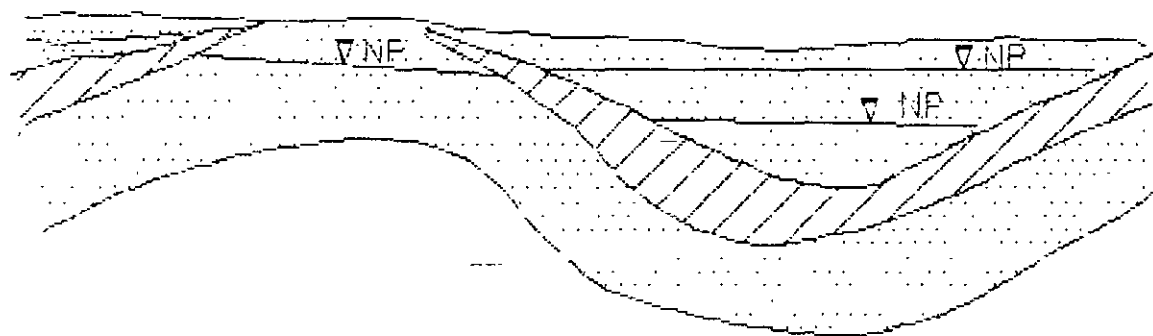


FIG. 16

Hector L. García (compilador) 1988

En un anticlinorio, pueden tenerse diferencias locales y regionales en el nivel de agua subterránea (fig. 17).

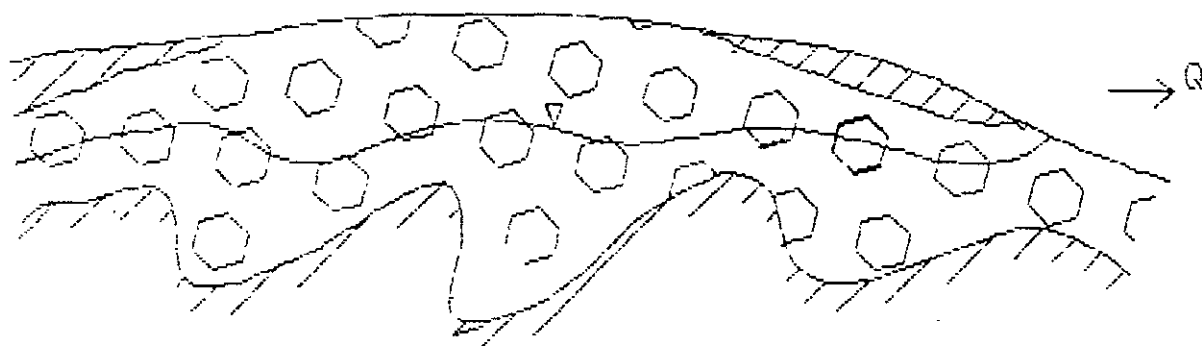


FIG. 17

En los pliegues monoclinales puede originarse una pendiente pronunciada del nivel de agua subterránea (fig. 18).

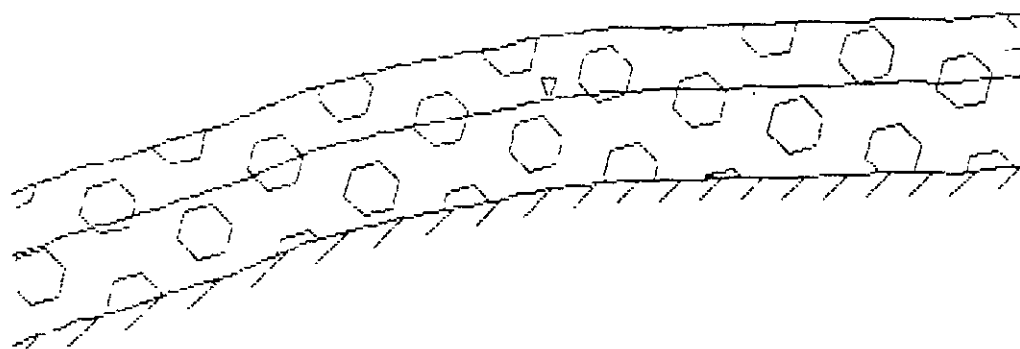


FIG. 18

En las zonas de falla se origina un cambio en el gradiente del nivel del agua debido al cambio de permeabilidad de un acuífero a otro (fig. 19).

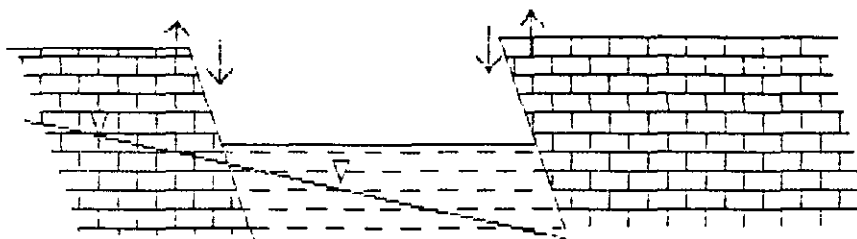


FIG. 19

Si las zonas de falla son de una alta permeabilidad, el gradiente del agua subterránea se atenuará en esta zona y viceversa. Recuérdese que el gradiente es inversamente proporcional a la permeabilidad (fig.20).

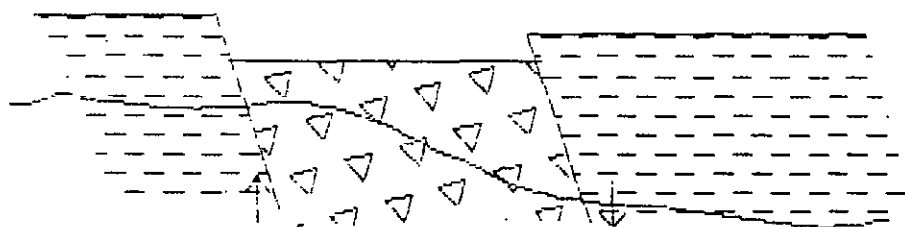


FIG. 20

Una falla puede causar un ascenso del nivel del agua debido a una alimentación proveniente de un manto de agua confinada, producir el caso contrario o un manantial (fig. 21).

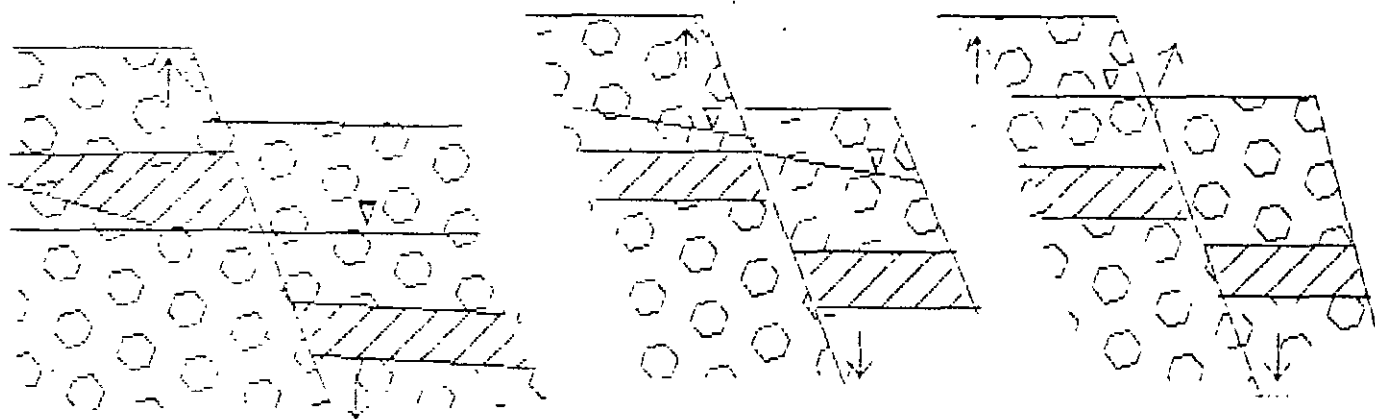


FIG. 21

Dentro de un graben, el nivel del agua puede mostrar una tendencia a bajar (fig. 22).

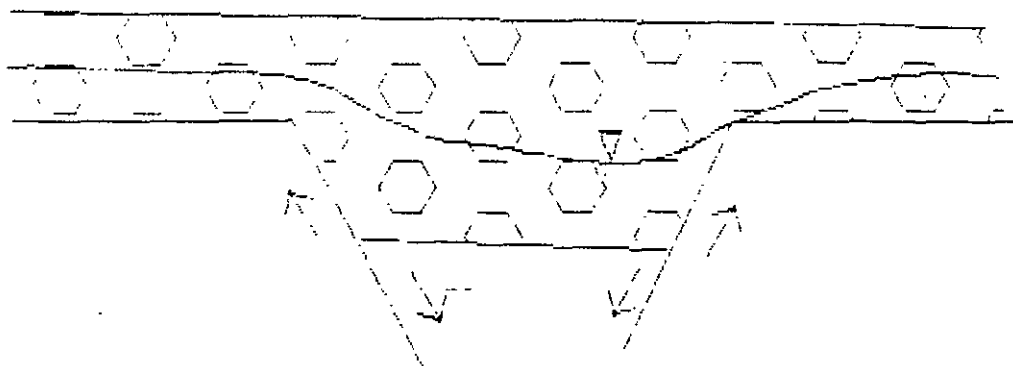


FIG. 22

En un horst al contrario, puede establecerse un nivel de agua colgado independiente (fig. 23).

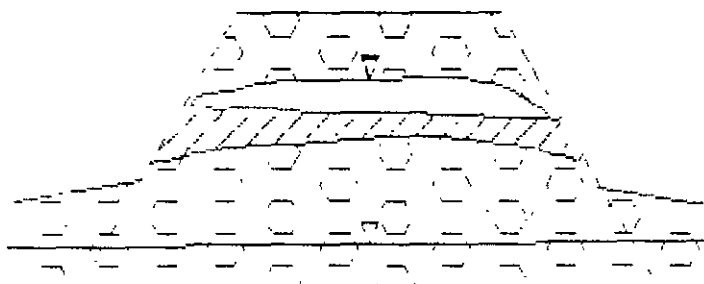


FIG. 23

1.8 - ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA DE ACUIFEROS

Las zonas de recarga natural a los acuíferos están estrechamente ligadas a la latitud, relieve, litología y los rasgos geológicos estructurales.

Una zona templada de relieve moderado formada por rocas permeables es una zona de recarga, debido a que el escurrimiento superficial será relativamente lento y en consecuencia se tendrá un mayor tiempo de contacto entre el agua y las rocas permeables lo que se traducirá en una infiltración significativa.

En una zona árida de relieve accidentado donde la lluvia ocurre esporádicamente en régimen torrencial, aún si las rocas son permeables, el agua escurrirá rápidamente sin que se genere una recarga apreciable.

En los casos precedentes es obvio que la temperatura ambiente, el tipo de suelos y la vegetación son factores que complementan el criterio para definir a una zona como área de recarga.

En algunas cuencas hidrográficas las zonas de recarga se localizan en los bordes perimetrales compuestos de rocas permeables y en los límites interiores (fig. 24).

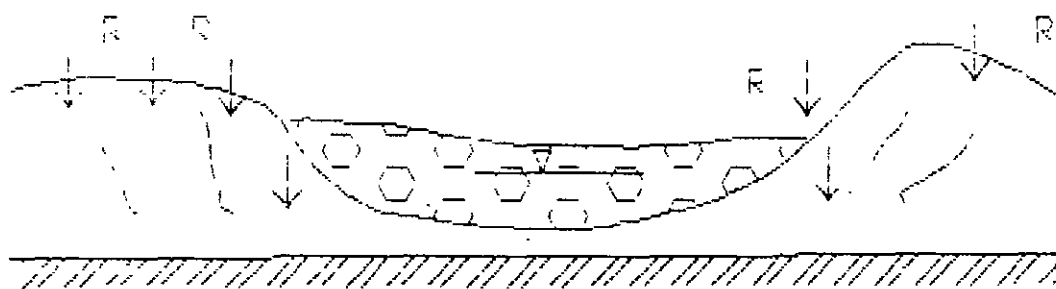


FIG. 24

Según el patrón estructural, la recarga puede incorporarse a un flujo local somero o a otro mas profundo (fig. 25).

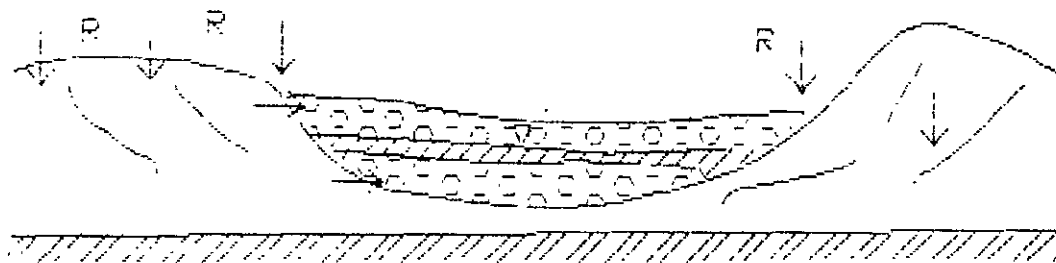


FIG. 25

La recarga natural en los valles fluviales tiene lugar por la infiltración del escurrimiento del colector principal y los arroyos tributarios que escurren sobre la planicie (fig. 26).

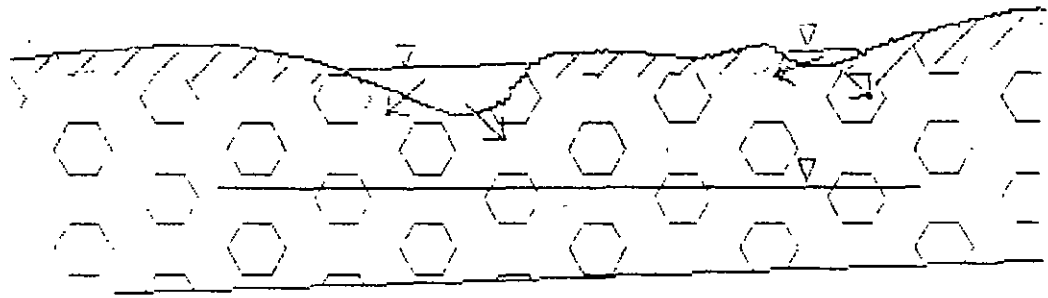


FIG. 26

cuencas de este tipo son muy comunes en México. Algunos ejemplos son la Cuenca de Río Aguanaval en Zacatecas y Durango. Hace unos 40 años, la recarga mas importante de la zona de la laguna de Coahuila, era inducida por el Río Nazas, antes de que se construyera sobre él la Presa Francisco Zarco.

En las cuencas de origen tectónico la recarga se establece a través de los grandes sistemas de fallas y fracturas (fig. 27), para alimentar tanto al relleno como a las rocas permeables más profundas. Uno de los casos más representativos de este mecanismo de recarga son los valles de León y del Río Turbio que son alimentados a través de extensos afloramientos de ignimbritas y riolitas.

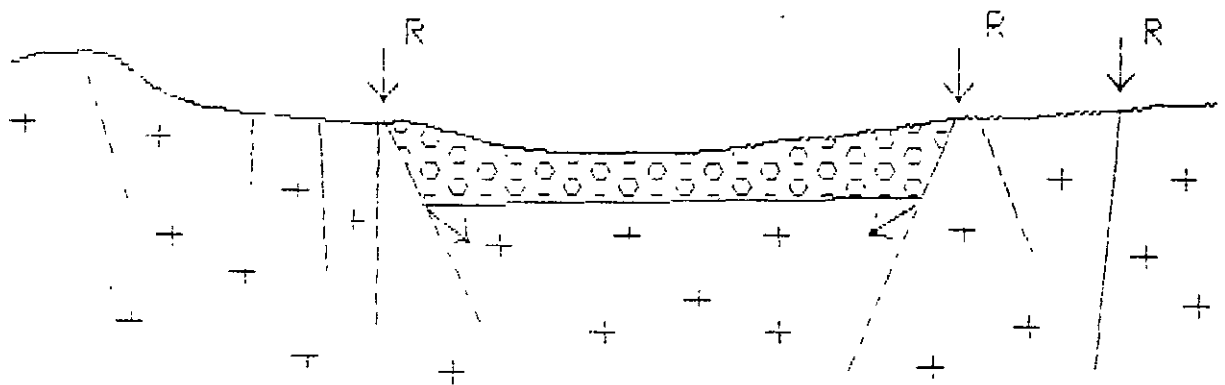


FIG. 27

Extensas planicies como la de Ojuelos en Guanajuato funciona como zona de recarga a la Fosa de Villa de Reyes en San Luis Potosí (fig. 28).

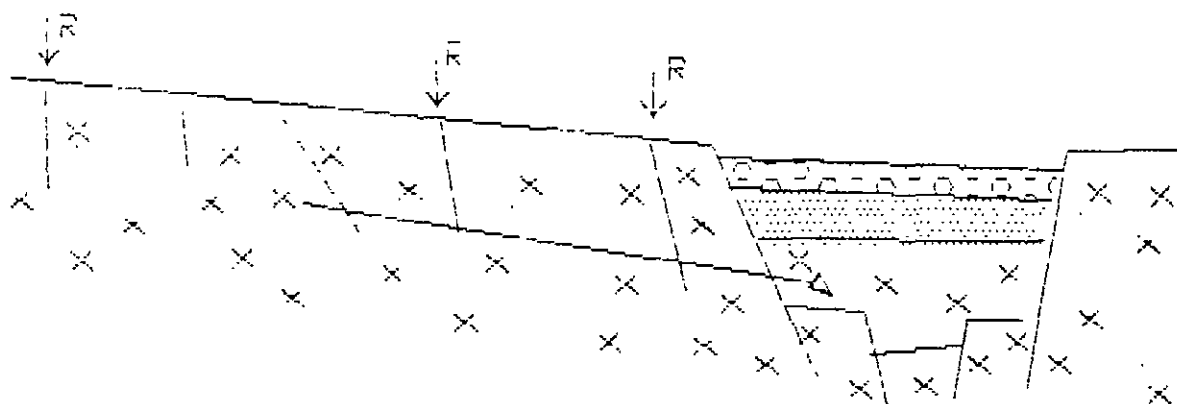


FIG. 28

En algunas cuencas tectónicas como la de Guaymas y San Ignacio en Sonora y la de Valle de Banderas en Jalisco, tienen como zonas de recarga los bordes de falla y la que ocurre por infiltración del escurrimiento del Arroyo Santa Cruz, San Ignacio y Ameca, sobre la planicie permeable (fig. 29).

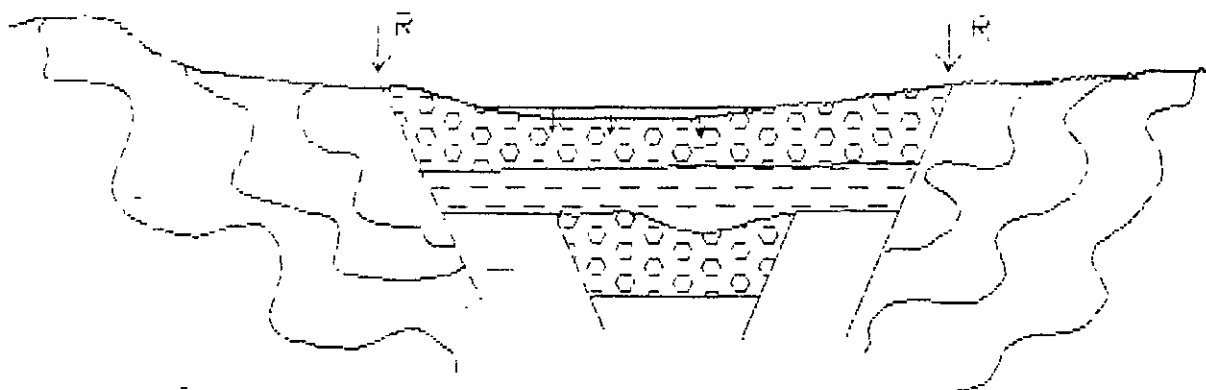
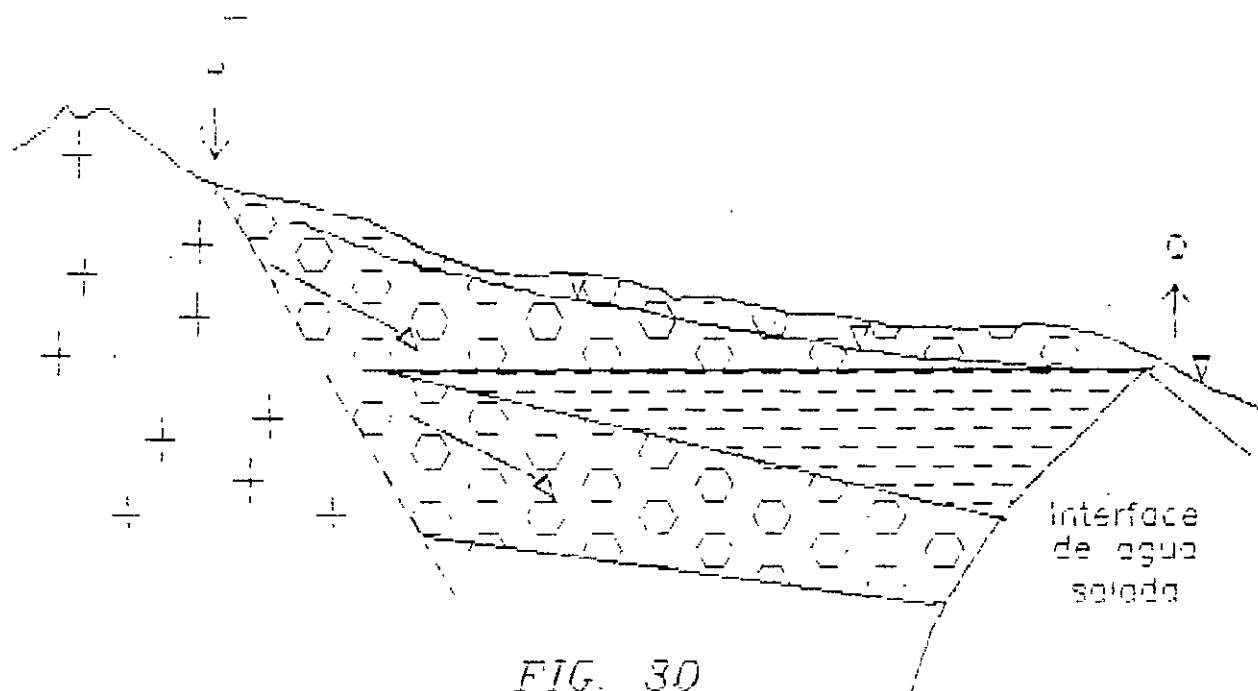
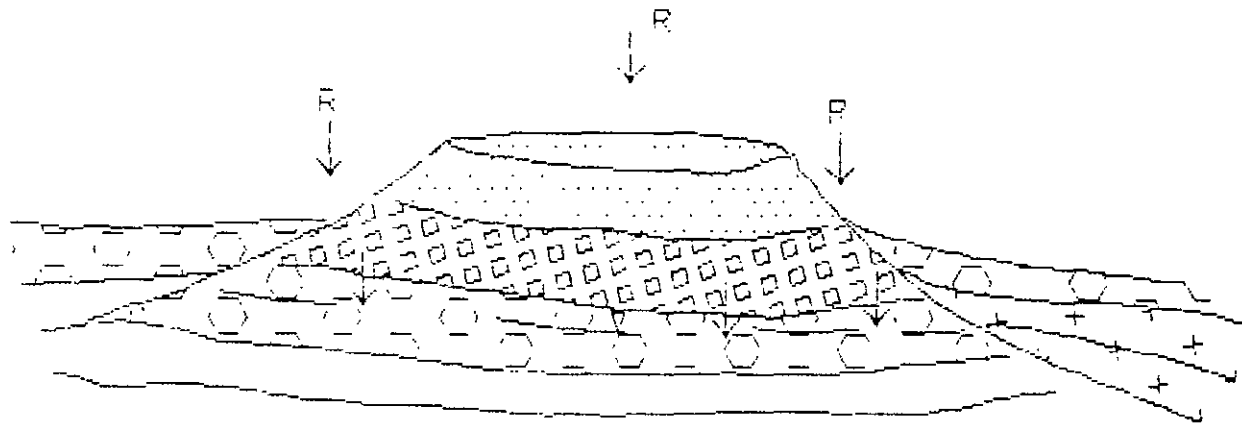


FIG. 29

En otros valles de origen tectónico otra zona de recarga se ubica en las terrazas altas de la cabecera (fig. 30).



Los conos volcánicos estratificados de grandes dimensiones, son también zonas de recarga, debido a la alta permeabilidad de los productos piroclásticos (fig. 31).



Muchas de estas estructuras de estrato-volcanes se ubican a lo largo del Eje Neovolcánico Mexicano en rocas basálticas y andesíticas y sus piroclastos asociados. También dentro del Eje Neovolcánico se encuentran numerosas calderas, donde se acumula el agua de lluvia para drenarse hacia el subsuelo posteriormente (fig. 32). Los ejemplos más conocidos son los de la Caldera en Valle de Santiago, Gto., La Alberca en Zacapu, Mich. y la Laguna de Achichica, Pue.

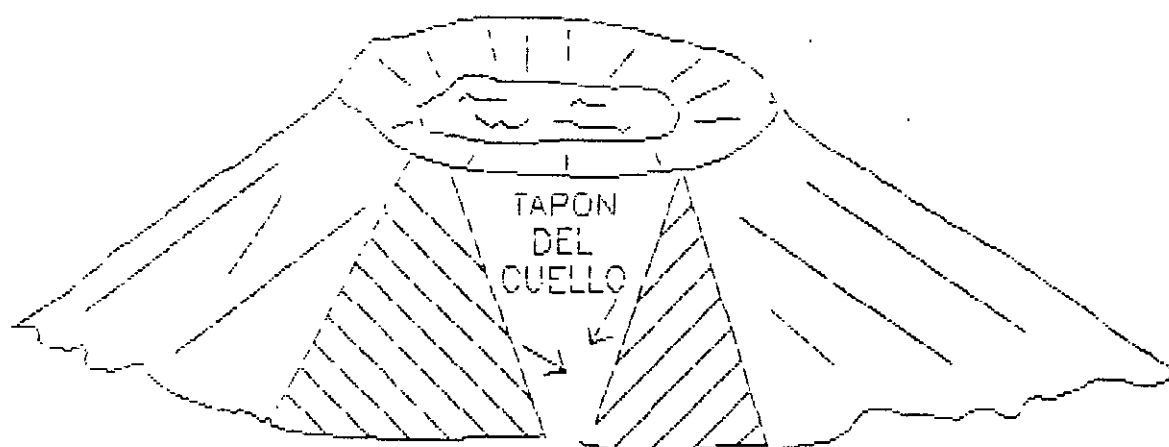


FIG. 32

Las barrancas y cañones rellenos por coladas de lava basáltica son también excelentes zonas de recarga y almacenamiento (fig. 33).

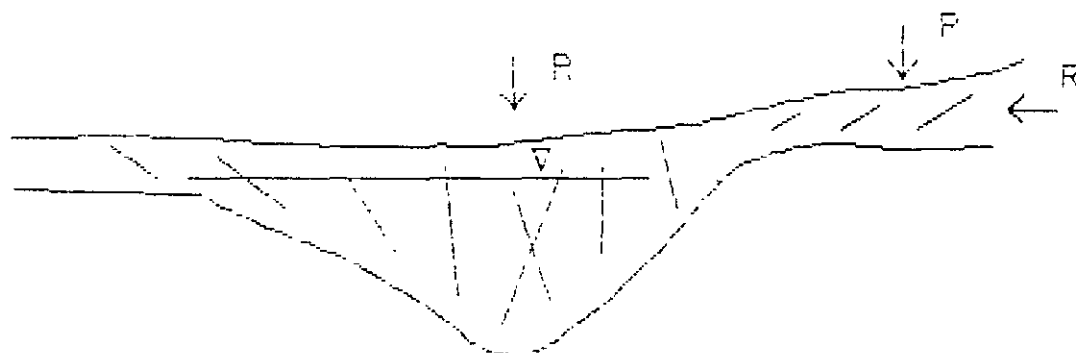


FIG. 33

En las rocas carbonatadas la zona de recarga puede ubicarse a distancias considerables del área de descarga. Un ejemplo es el Manantial de la Media Luna en Río Verde, S.L.P. que descarga aproximadamente $6\text{m}^3/\text{s}$ (fig. 34).

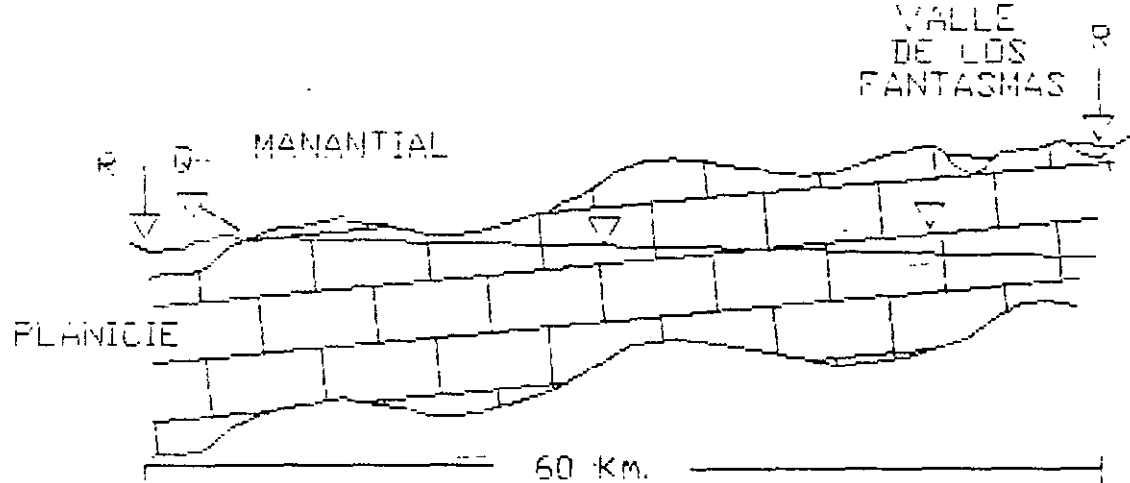


FIG. 34

1.8.1. ZONAS DE RECARGA INDUCIDA

En áreas de irrigación extensas se induce una recarga vertical por reinfiltración de la lámina de agua aplicada al riego del cultivos y por la infiltración de la red de canales sin revestimiento (fig.35). Un ejemplo ocurre en el Valle del Mezquital.

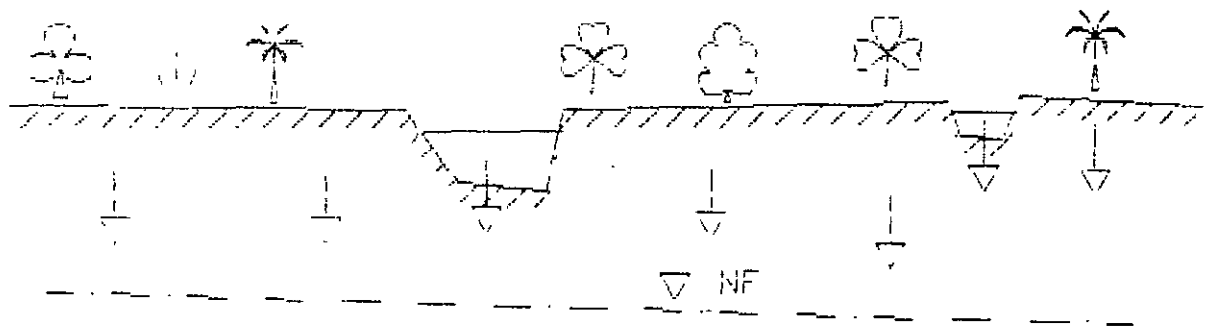


FIG. 35

Existe otro tipo de recarga inducida de acuíferos, llamada Recarga Artificial. En esta caso el hombre controla y maneja el agua de escurrimientos para introducirla en el acuífero. La elección del sitio o zonas de recarga artificial se basa en dos factores fundamentales que son las características físicas e hidrodinámicas del acuífero que se pretende alimentar y del tipo de agua que se va a introducir. Otros factores complementarios cuando la recarga se realizará sobre la superficie y que condicionarán también la recarga son la topografía, la cubierta de suelo, la naturaleza de las rocas en superficie, la pendiente del terreno y la profundidad del nivel de saturación.

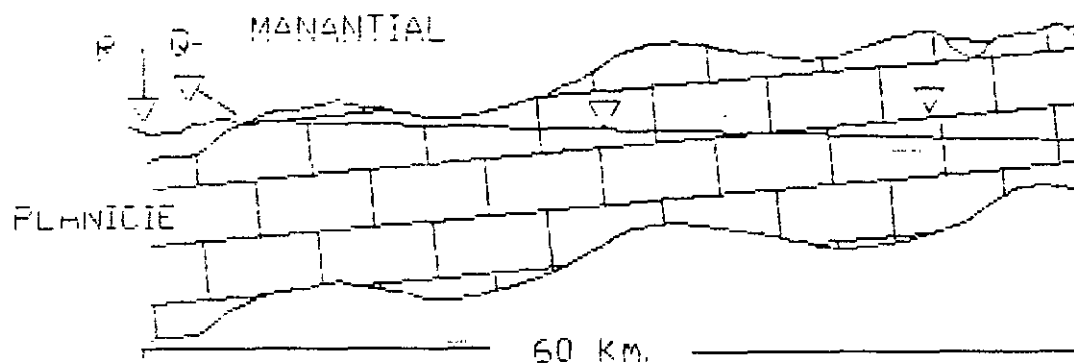


FIG. 34

1.8.1. ZONAS DE RECARGA INDUCIDA

En áreas de irrigación extensas se induce una recarga por reinfiltración de la lámina de agua aplicada al riego de y por la infiltración de la red de canales sin revestimiento. Un ejemplo ocurre en el Valle del Mezquital.

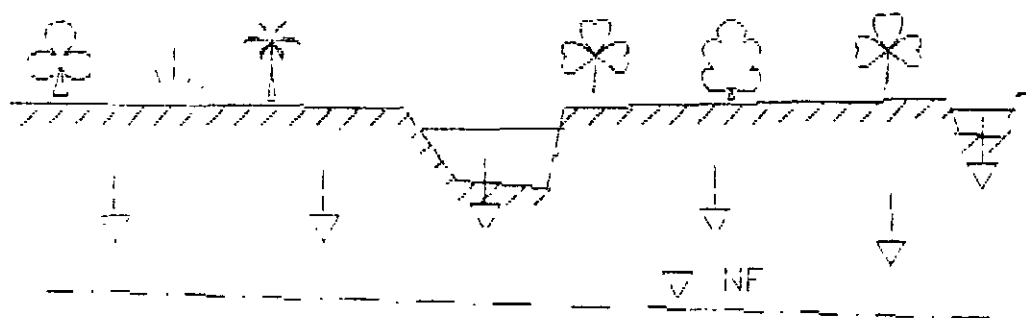


FIG. 35

Existe otro tipo de recarga inducida de acuíferos, Recarga Artificial. En esta caso el hombre controla y maneja de escurrimientos para introducirla en el acuífero. La elección del sitio o zonas de recarga artificial se basa en dos fundamentales que son las características físicas e hidrodinámicas del acuífero que se pretende alimentar y del tipo de agua que se pretende introducir. Otros factores complementarios cuando la recarga se realizará sobre la superficie y que condicionarán también la eficiencia son la topografía, la cubierta de suelo, la naturaleza de la superficie, la pendiente del terreno y la profundidad del nivel de saturación.

Muchas de estas estructuras de estrato-volcanes se ubican a lo largo del Eje Neovolcánico Mexicano en rocas basálticas y andesíticas y sus piroclastos asociados. También dentro del Eje Neovolcánico encuentran numerosas calderas, donde se acumula el agua de lluvia para drenarse hacia el subsuelo posteriormente (fig. 32). Los ejemplos más conocidos son los de la Caldera en Valle de Santiago, Gto., La Alberca en Zacapu, Mich. y la Laguna de Achichica, Pue.

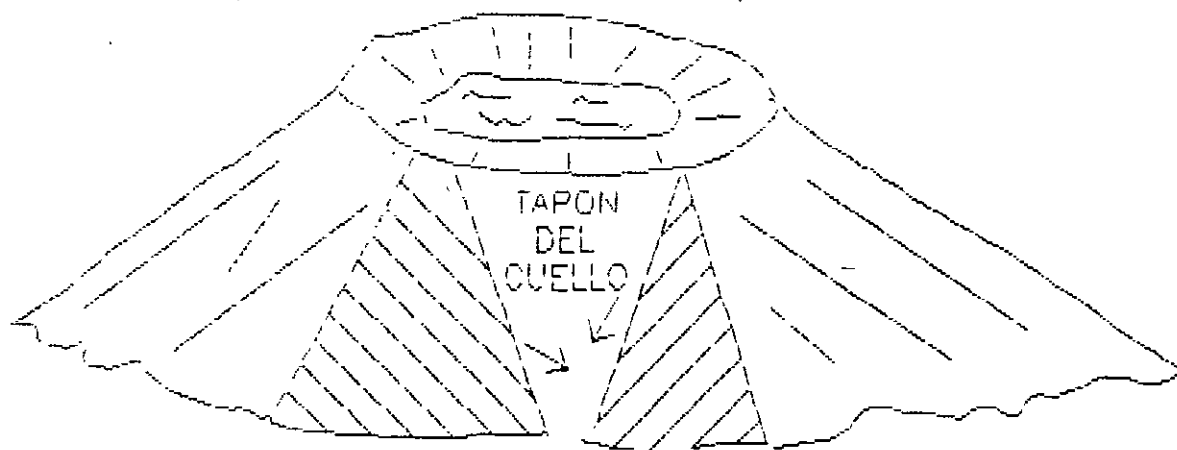


FIG. 32

Las barrancas y cañones rellenados por coladas de lava basáltica son también excelentes zonas de recarga y almacenamiento (fig. 33).

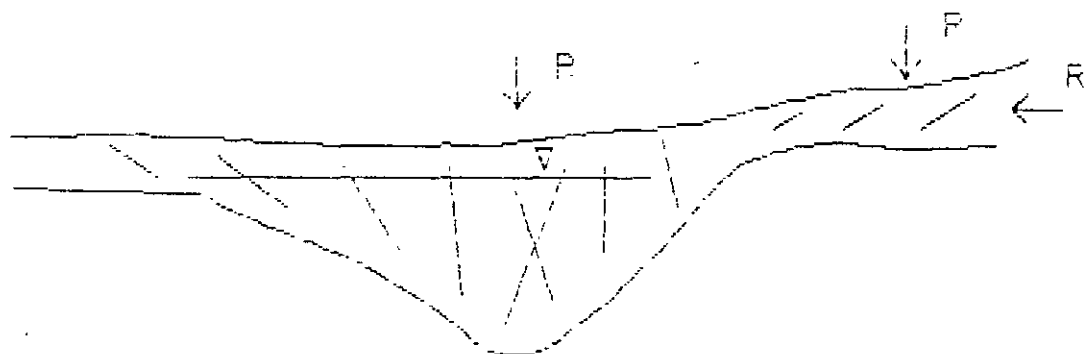


FIG. 33

En las rocas carbonatadas la zona de recarga puede ubicarse a distancias considerables del área de descarga. Un ejemplo es el Manantial de la Media Luna en Río Verde, S.L.P. que descarga aproximadamente $6\text{m}^3/\text{s}$ (fig. 34).

La recarga artificial en superficie puede realizarse de diversas maneras; en los arroyos de la vertiente del Océano Pacífico en la Península de Baja California se han construido bordos convenientemente espaciados con el mismo material de acarreo, con el fin de disminuir la velocidad de escurrimiento del agua y extenderla sobre zonas permeables y extensas. Con estas barreras de bajo costo, se logra mayor tiempo de permanencia del agua en contacto con los acarreos fluviales y se aumentan las posibilidades de inducir una mayor infiltración.

Este mismo artificio puede aplicarse a llanuras de inundación, construyendo terrazas a modo de embalses. El agua así retenida, puede canalizarse posteriormente a zanjias o canales de infiltración. Una generalización esquemática de este último sistema es como sigue (fig.36):

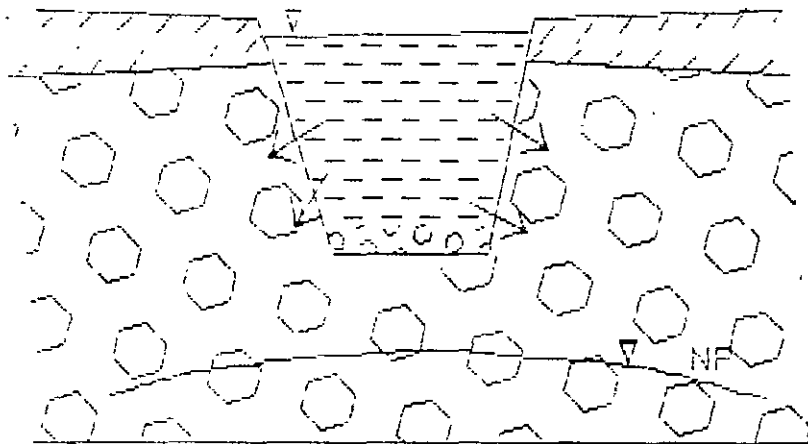


FIG. 36

La recarga artificial por pozos de absorción, además de ser evidentemente más costosa, presenta más problemas en el manejo previo del agua a infiltrar. Como en este caso el agua llegará directamente al acuífero, ésta deberá ser previamente tratada. El tratamiento

consiste esencialmente en eliminar en lo posible los sólidos en suspensión y someterla a un proceso de eliminación de bacterias. En los casos en que la depuración bacteriológica no se haya hecho eficientemente, en poco tiempo la proliferación de colonias bacterianas es suficiente para formar una costra que sella las ranuras de la tubería de ademe. El control de la temperatura del agua que se inyectará también tiene relevancia, ya que a diferentes temperaturas entre el agua del acuífero y de recarga, provoca la precipitación de sales en la vecindad del pozo con los mismos resultados de obstrucción de las ranuras.

Otro aspecto muy importante es la profundidad al nivel del agua. mientras más grande sea esta longitud, la columna de agua dentro del pozo tendrá mayor presión de entrada hacia el acuífero. Los siguientes esquemas ilustran pozos libres y confinados (fig. 37).

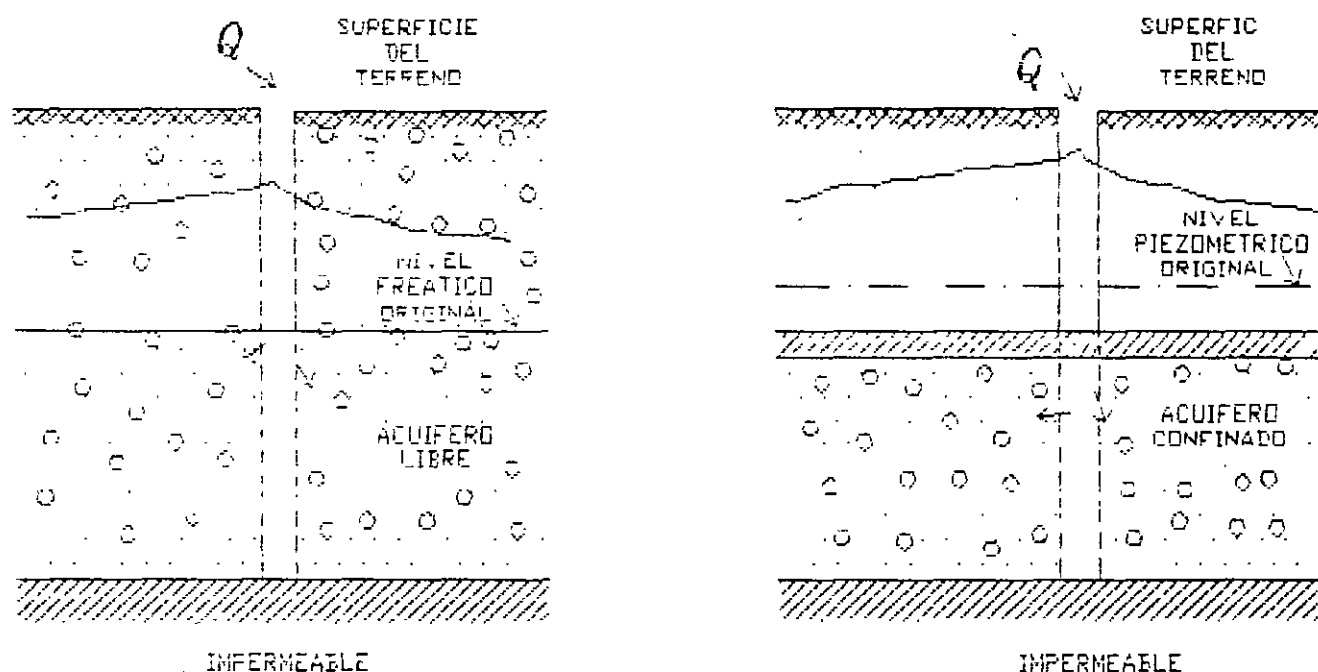


FIG. 37

Experiencias de este tipo se empezaron a tener en México en la década de los sesenta por la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México de la Secretaría de Recursos Hidráulicos. En esa época se construyeron dos pozos de absorción cerca de la Presa Tarango en la parte alta de Mixcoac. La profundidad al nivel estático era en ese entonces de 90m, lo que representaba una presión muy significativa para introducir agua al acuífero.

Actualmente se están reiniciando este tipo de trabajos con el fin de optimizar nuestros recursos hidráulicos subterráneos.

1.8.2. ZONAS DE DESCARGA

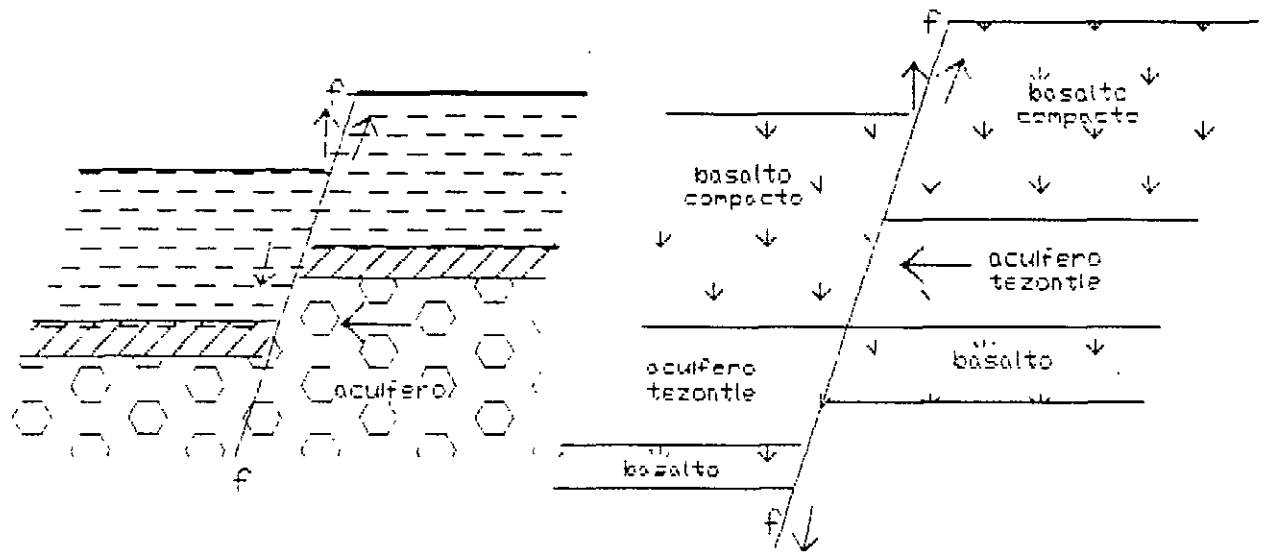
Las zonas de recarga y descarga guardan una estrecha relación con la topografía, ya que el agua subterránea se desplaza desde los niveles energéticos más altos a los más bajos, por lo que su energía procede fundamentalmente de las diferencias de nivel y de presión.

La descarga de los acuíferos ocurre de tres maneras posibles: descarga natural por manantiales, evapotranspiración y tectónicos. De entre las diversas clasificaciones de manantiales, se toman para estas notas, algunas figuras de Dr. Issar, que correlacionan la descarga por manantiales con los aspectos -topográficos y geológicos mencionados.

En las Fig. 38 y 39 se esquematizan diversos tipos de manantiales.

MANANTIALES ORIGINADOS POR FALLAS

MANANTIALES ASCENDENTES



MANANTIAL EN PLIEGUES FALLADOS

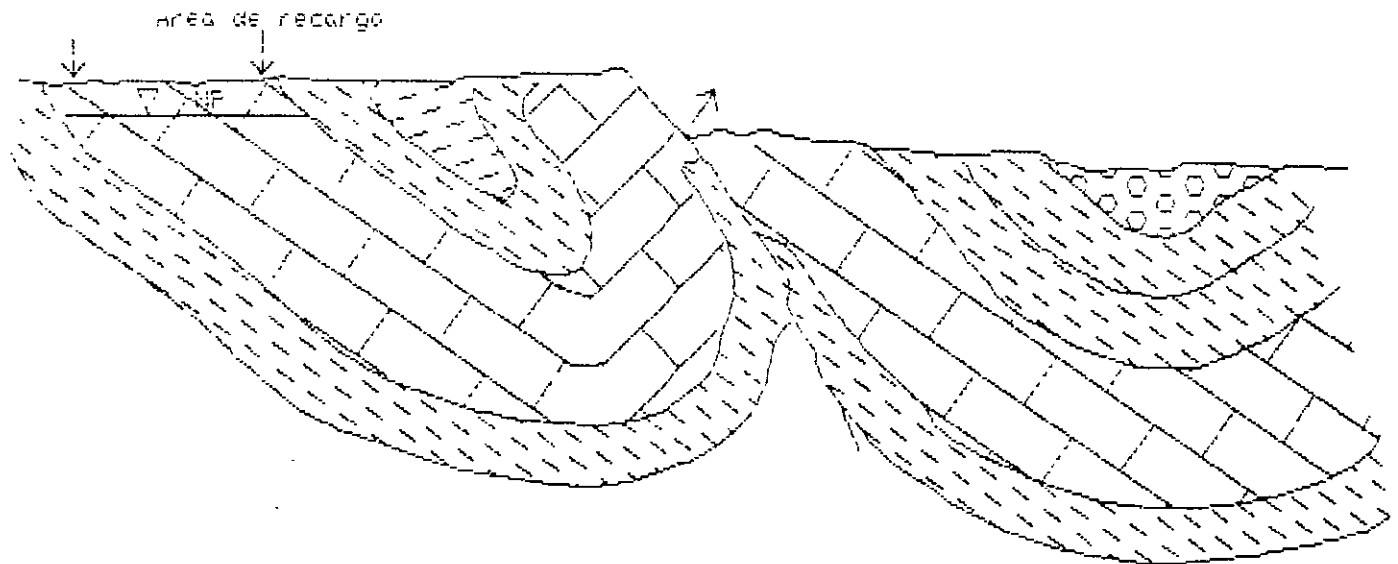
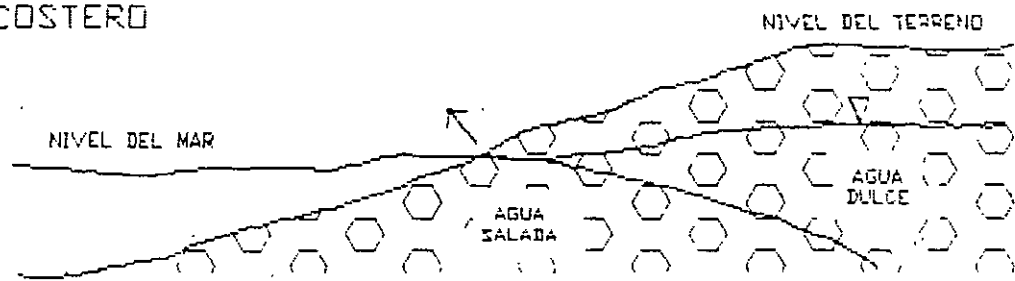


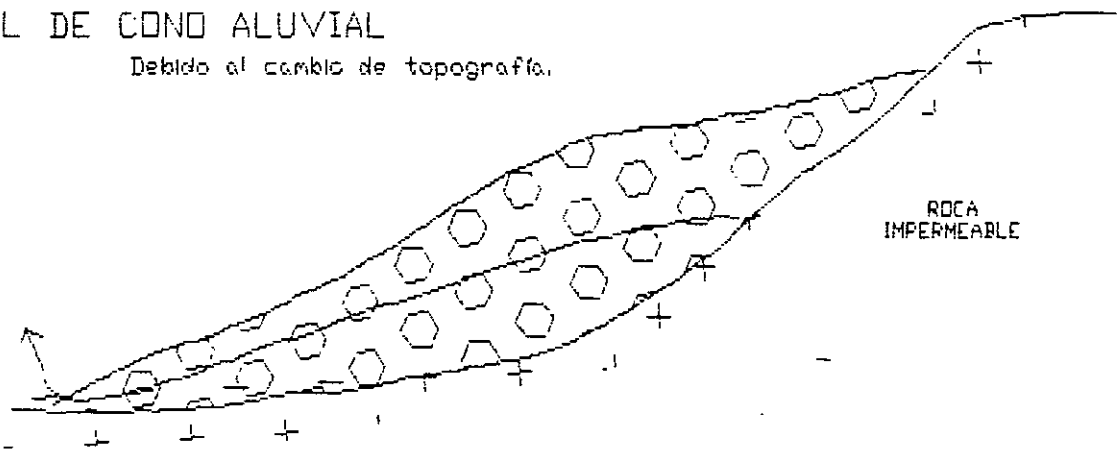
FIG. 38

MANANTIAL COSTERO



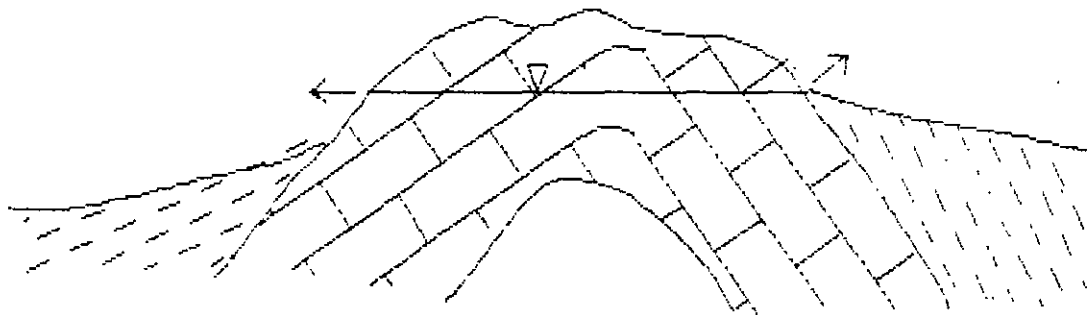
MANANTIAL DE CONO ALUVIAL

Debido al cambio de topografía.



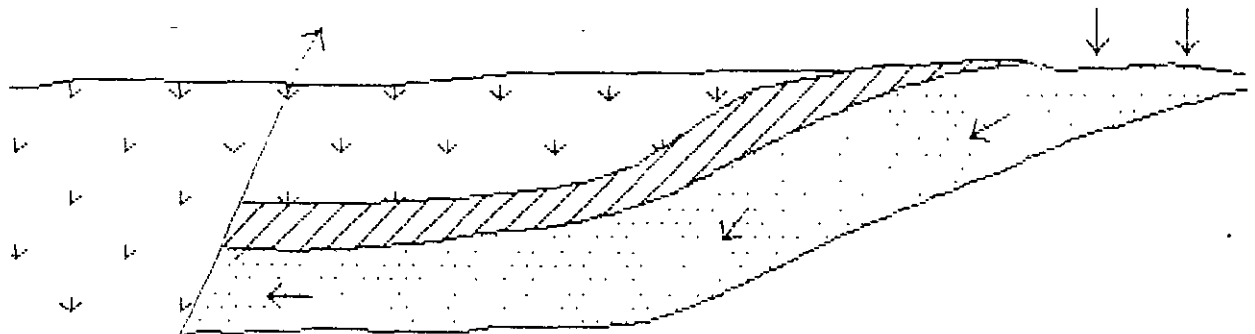
MANANTIALES EN ANTICLINALES

Se forma en algunos puntos de los flancos de la estructura en contacto con rocas impermeables



MANANTIALES TERMOMINERALES DE LINEA DE FALLA

La fuente de agua de tales manantiales es la precipitación de agua de lluvia ocurrida en las áreas de captación e infiltración, las cuales pueden encontrarse alejados o cercanos al área de afallamiento.



1.9. CARACTERISTICAS DEL AGUA SUBTERRANEA

1.9.1. CICLO HIDROLOGICO

El agua en la naturaleza se mantiene en un constante proceso de movimiento ciclico. La energia solar y la gravedad terrestre son los principales factores que originan los fenómenos de precipitación, evaporación, escurrimiento e infiltración, que en conjunto constituyen lo que se conoce como *CICLO HIDROLOGICO* (fig. 40).

El ciclo hidrológico es la descripción simplificada de los mecanismos que sigue el agua para desplazarse de un lugar a otro del planeta, en un continuo movimiento que involucra prácticamente a la totalidad del agua de la Tierra.

Durante la etapa de diferenciación de la Tierra, el agua se almacenó originalmente en el interior de la misma, atrapada en las moléculas de los silicoaluminatos hidratados que formaban la gran mayoría de las rocas. Al aumentar la temperatura en la Tierra tuvo lugar la fusión parcial de estas rocas y se inició la liberación y acarreo del agua hacia la superficie con el magma fundido. Cuando las lavas alcanzaron la superficie, gran cantidad de agua en forma de vapor caliente se desprendió y llenó los océanos en los primeros 1,000 millones de años de la historia de la Tierra. Aunque en el presente, el vulcanismo contribuye con emisión de agua, CO₂ y otros gases a la atmósfera, los volúmenes de agua constituyen una mínima parte del ciclo hidrológico.

Una gran cantidad de agua que llega a la superficie de la Tierra a formar parte de los rios, lagos y océanos, vuelve a la atmósfera debido a la transpiración de las plantas; a la interacción de ambos fenómenos - evaporación y transpiración - se le conoce como evapotranspiración y actua en gran medida principalmente en zonas de clima tropical, donde el calor del sol que llega a la superficie terrestre es alto y la vegetación abundante.

La mayor parte del vapor de agua incorporado a la atmósfera en forma de masa de aire, se reúne en gotas de agua o cristales de hielo que se precipitan sobre los océanos o sobre la superficie hasta llegar a los océanos, donde gran cantidad de agua se evapora nuevamente, reiniciándose en esta fase el ciclo hidrológico.

La cantidad de agua que se infiltra al subsuelo para formar el agua subterránea, es sólo una pequeña parte del volumen total que interviene en el ciclo hidrológico.

Esto se debe a que la infiltración está controlada por diversos factores fisiográficos y geológicos tales como el relieve del terreno, la permeabilidad de las rocas, tipo de suelos, temperatura ambiente, cobertura vegetal y modo de ocurrencia de la lluvia en el tiempo y en el espacio. En la figura 40 se muestra de manera esquemática la interacción de los fenómenos que integran el ciclo hidrológico.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

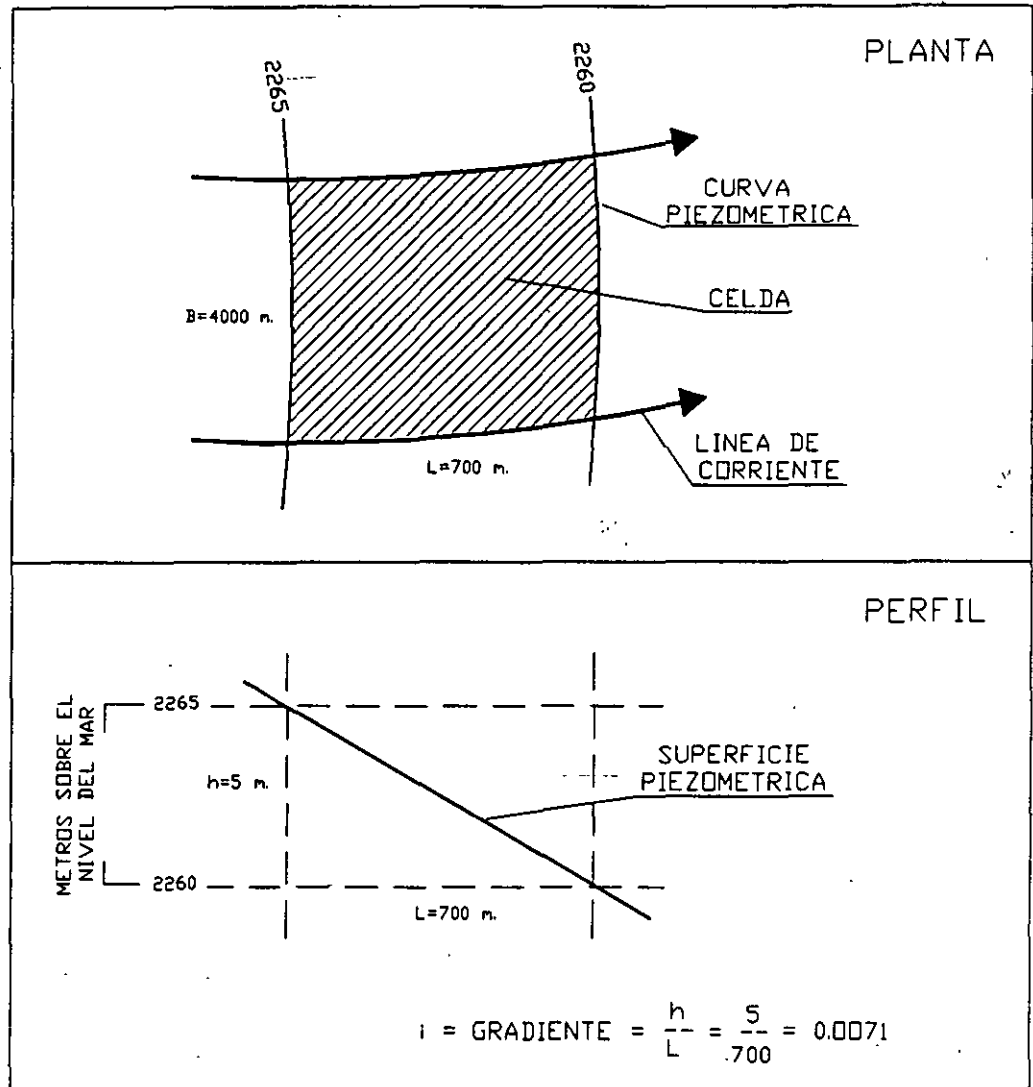
**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

GEOHIDROLOGÍA

Redes de Flujo Subterráneo

**Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

CALCULO DEL FLUJO SUBTERRANEO



$Q = TBi$ FORMULA PARA EL CALCULO DE FLUJO SUBTERRANEO

DONDE:

Q = CAUDAL EN METROS CUBICOS POR SEGUNDO

T = TRANSMISIBILIDAD EN METROS CUADRADOS POR SEGUNDO

B = ANCHO DE LA CELDA

i = GRADIENTE HIDRAULICO

$$Q = 0.012 \times 4000 \times 0.0071 = 0.341 \text{ m}^3 / \text{seg.}$$

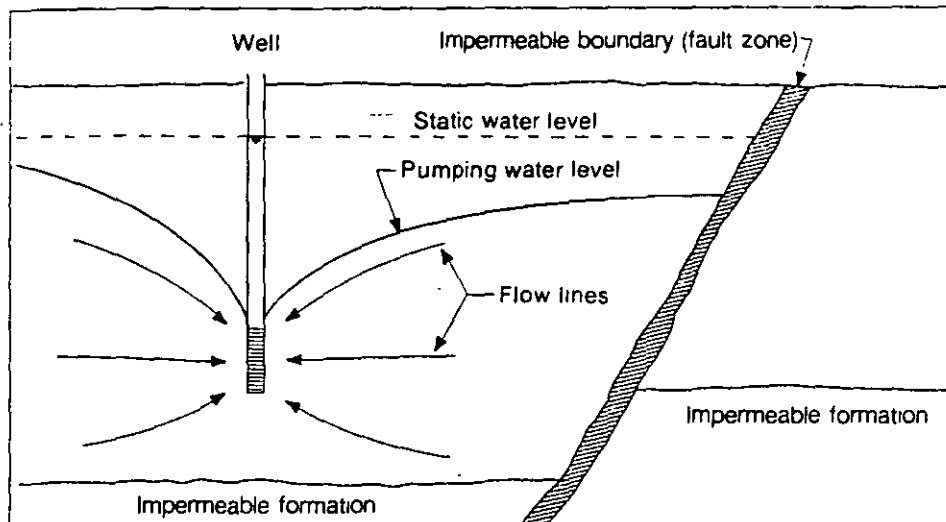


Figure 5.18a. Cross section near a pumping well showing the flow lines followed by water moving toward the well.

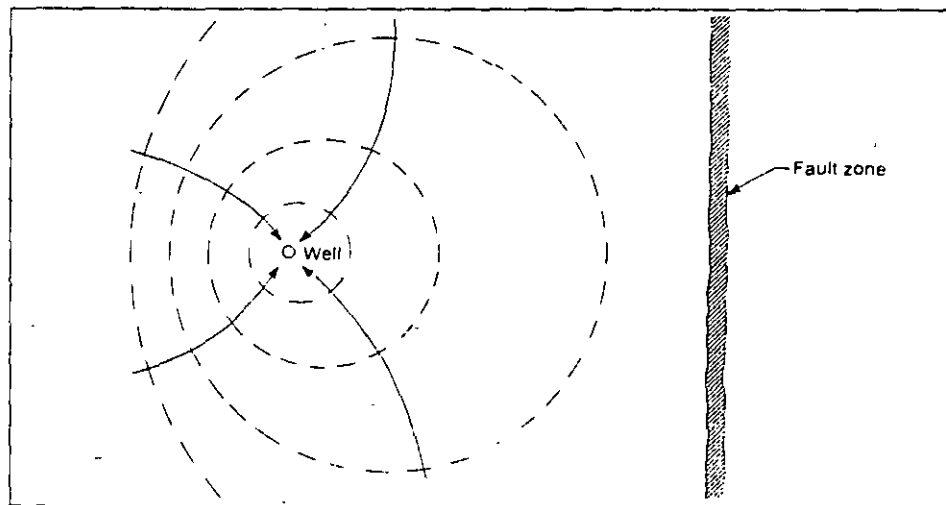


Figure 5.18b. Map of the potentiometric surface during long-term pumping shows that the impermeable boundary causes greater drawdown in the direction of the fault.

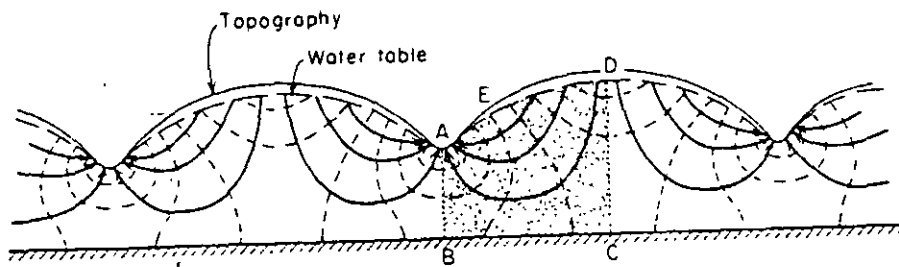


Figure 6.1 Groundwater flow net in a two-dimensional vertical cross section through a homogeneous, isotropic system bounded on the bottom by an impermeable boundary (after Hubbert, 1940).

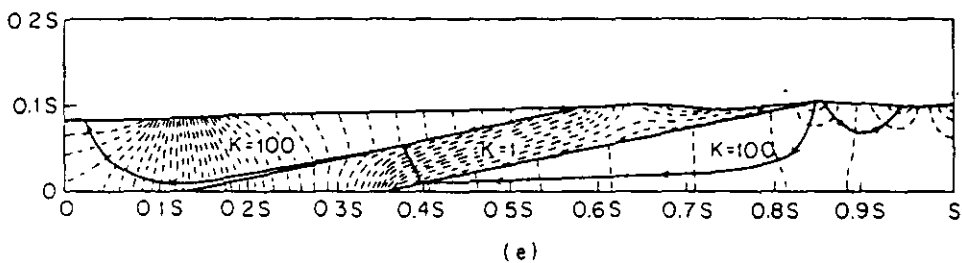
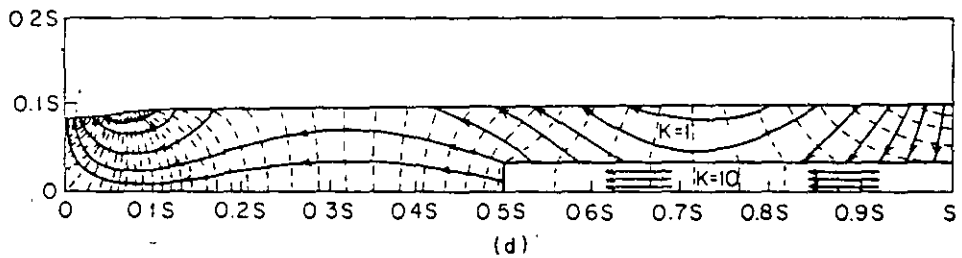
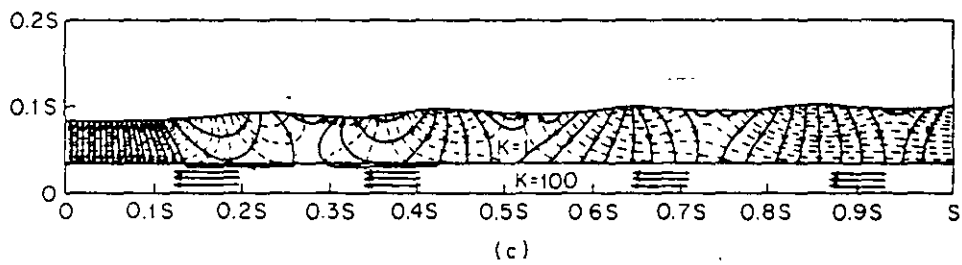
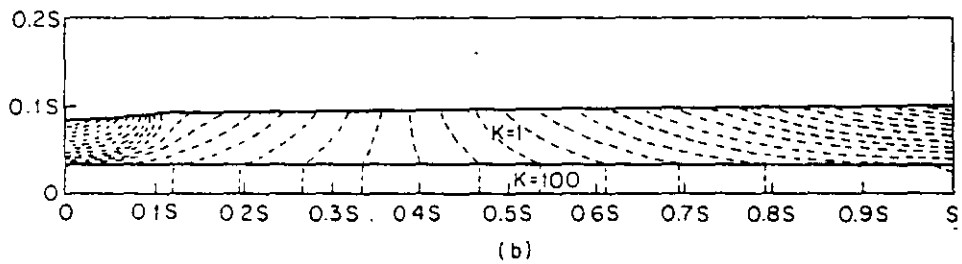
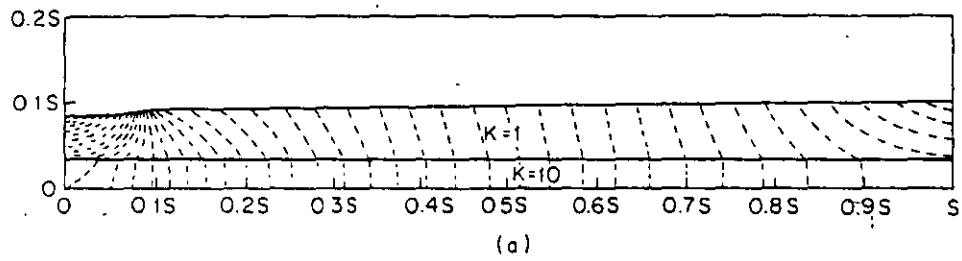


Figure 6.4 Effect of geology on regional groundwater flow patterns (after Freeze and Witherspoon, 1967).

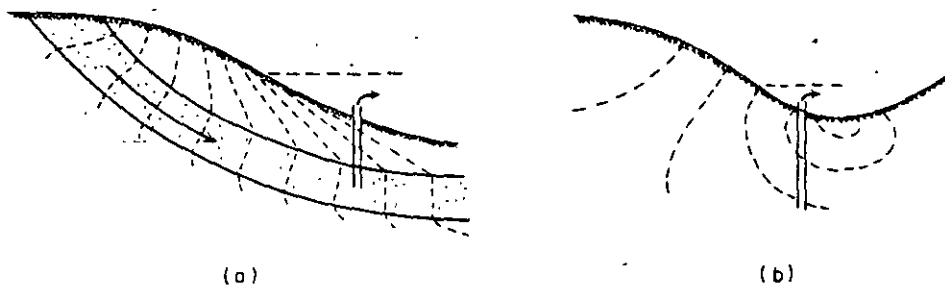


Figure 6.5 Flowing artesian wells: (a) geologically controlled; (b) topographically controlled.

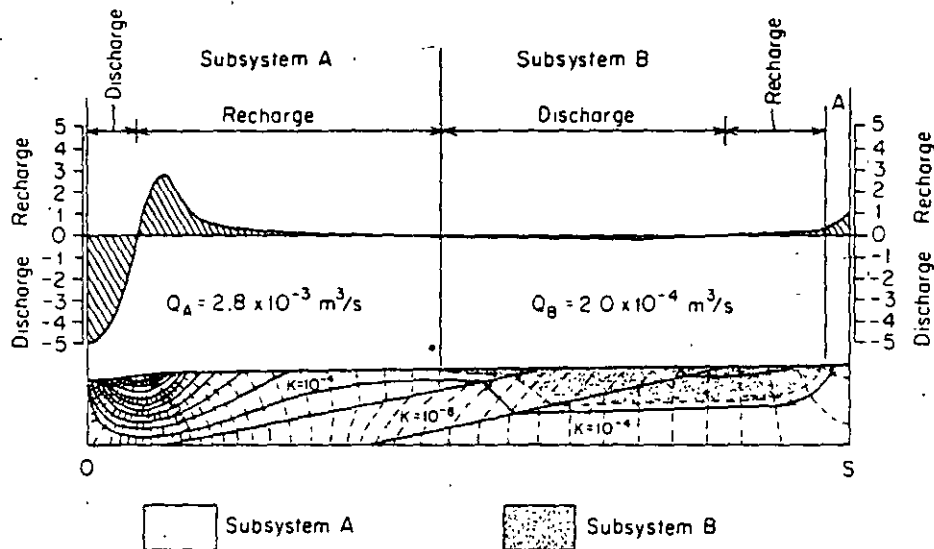


Figure 6.8 Quantitative flow net and recharge-discharge profile in a two-dimensional section through a heterogeneous groundwater basin (after Freeze and Witherspoon, 1968).

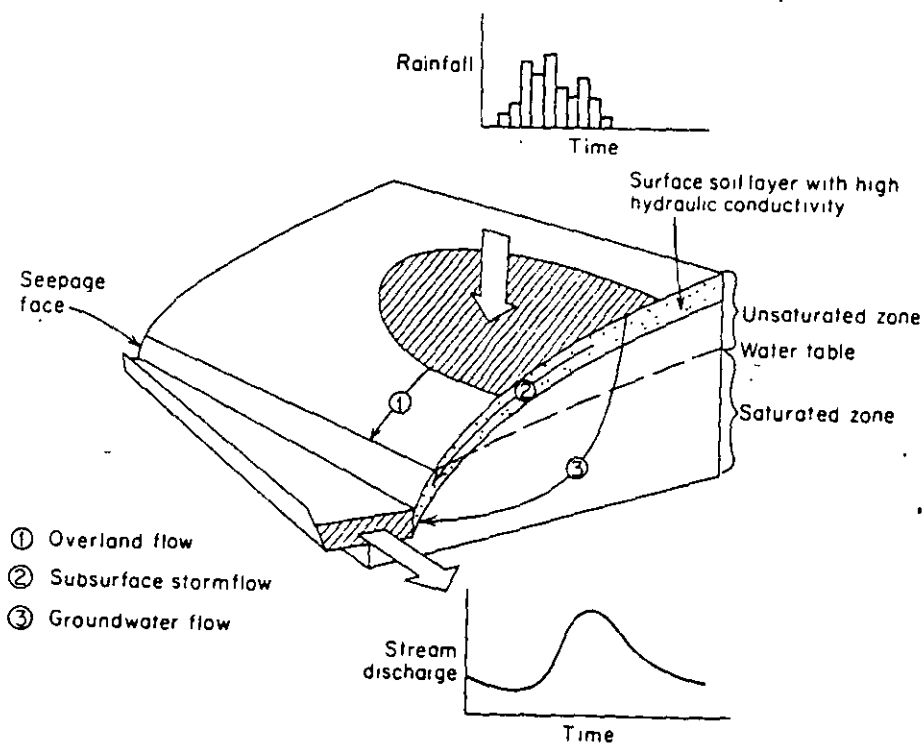
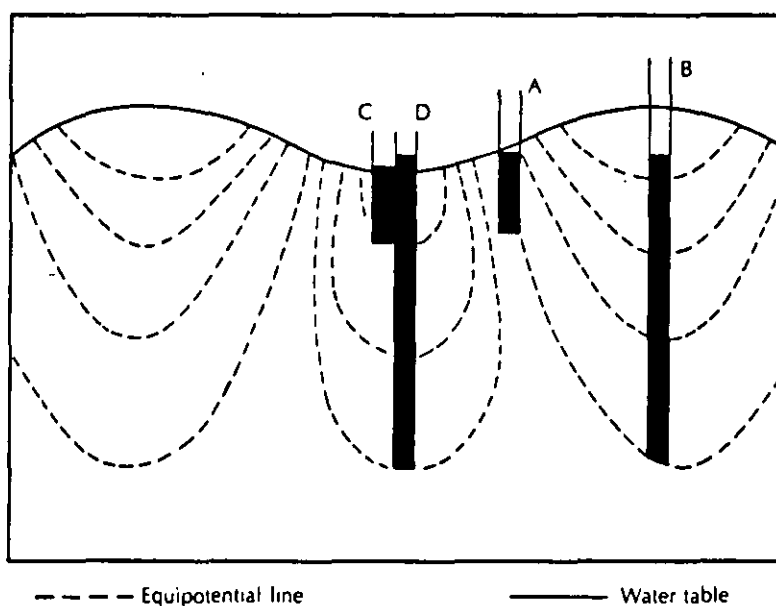
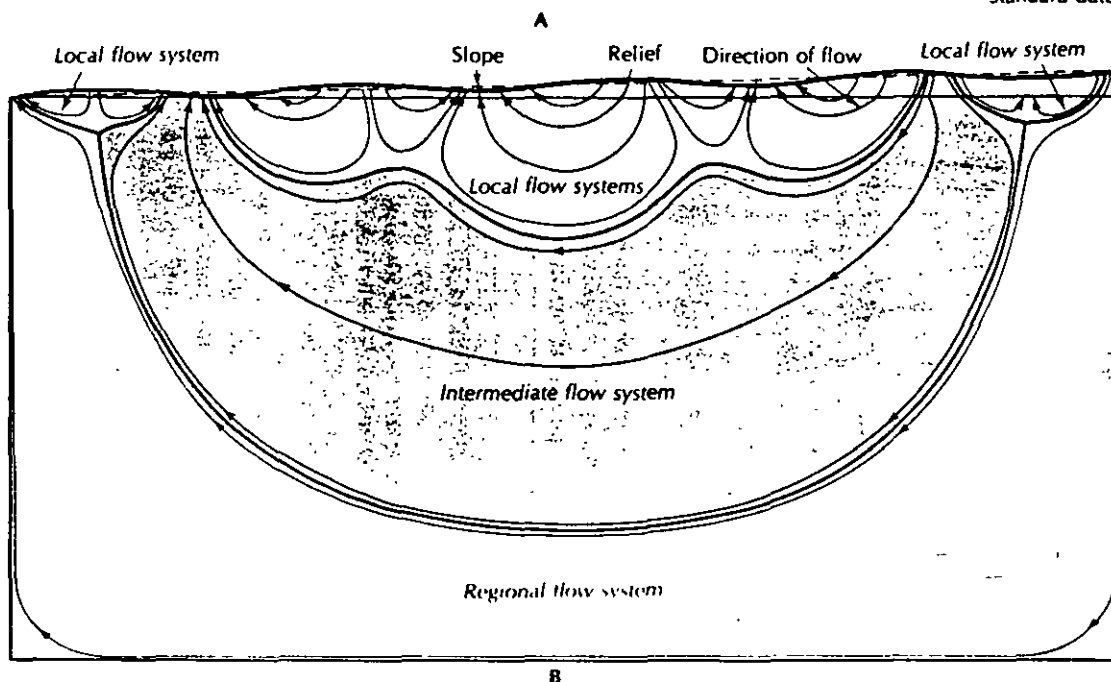
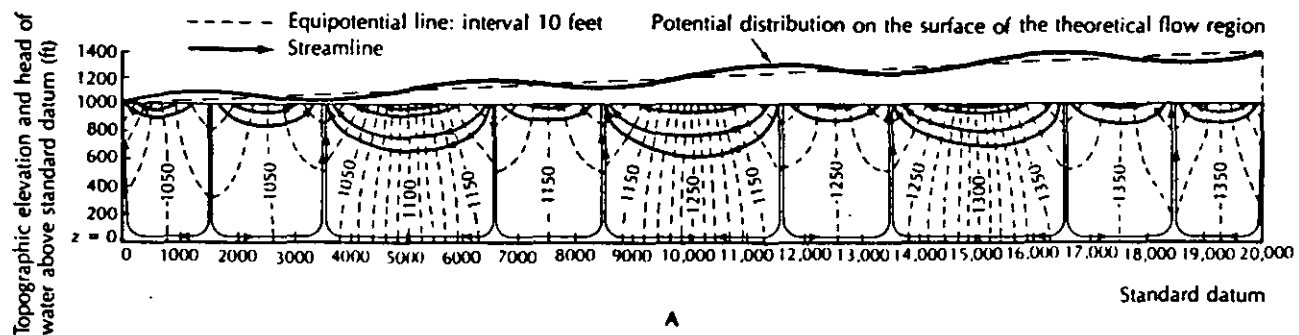
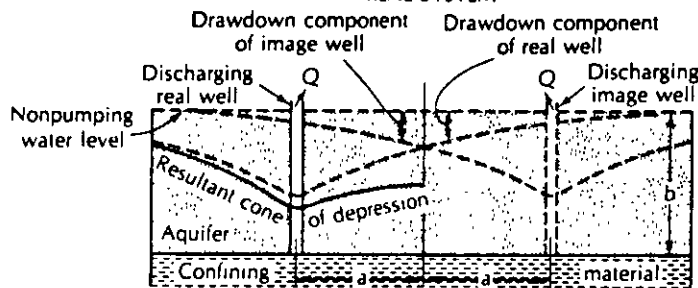
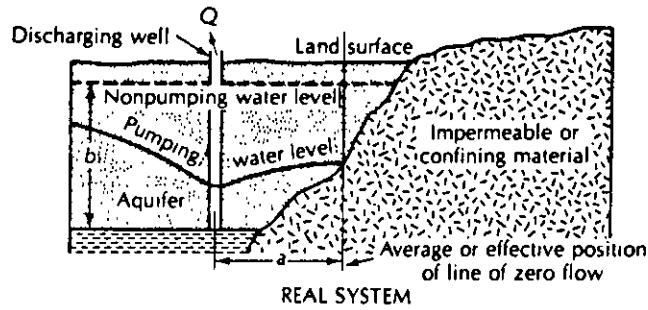
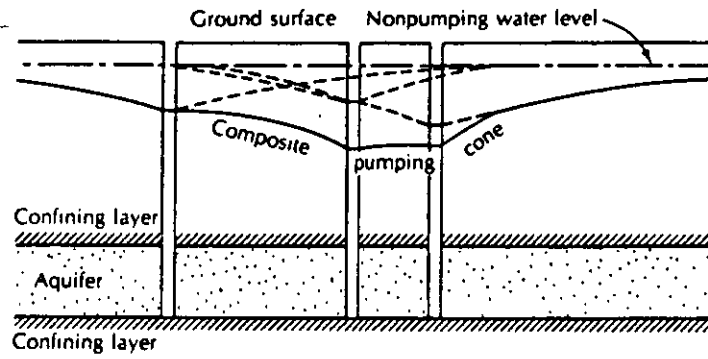


Figure 6.17 Mechanisms of delivery of rainfall to a stream channel from a hillslope in a small tributary watershed (after Freeze, 1974).





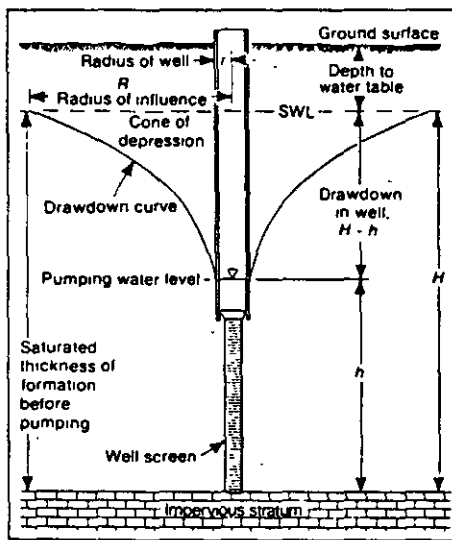
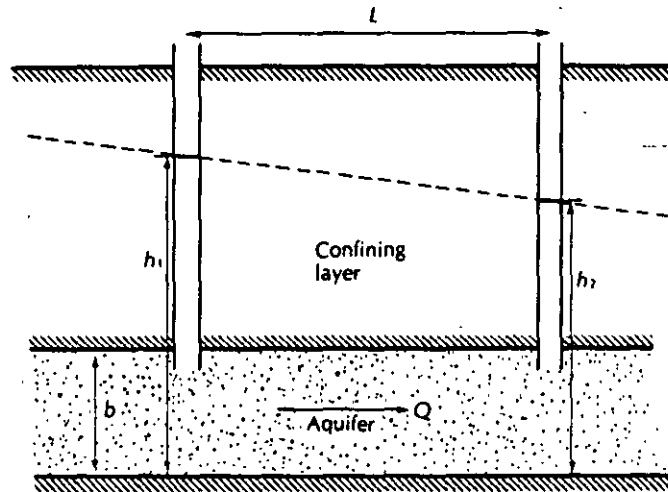


Figure 9.8. Well in an unconfined aquifer showing the meaning of the various terms used in the equilibrium equation.

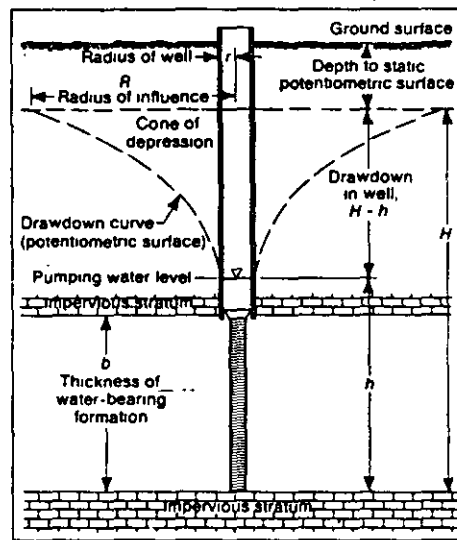
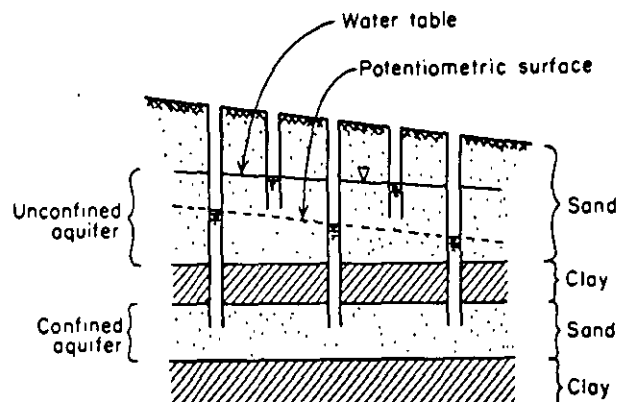
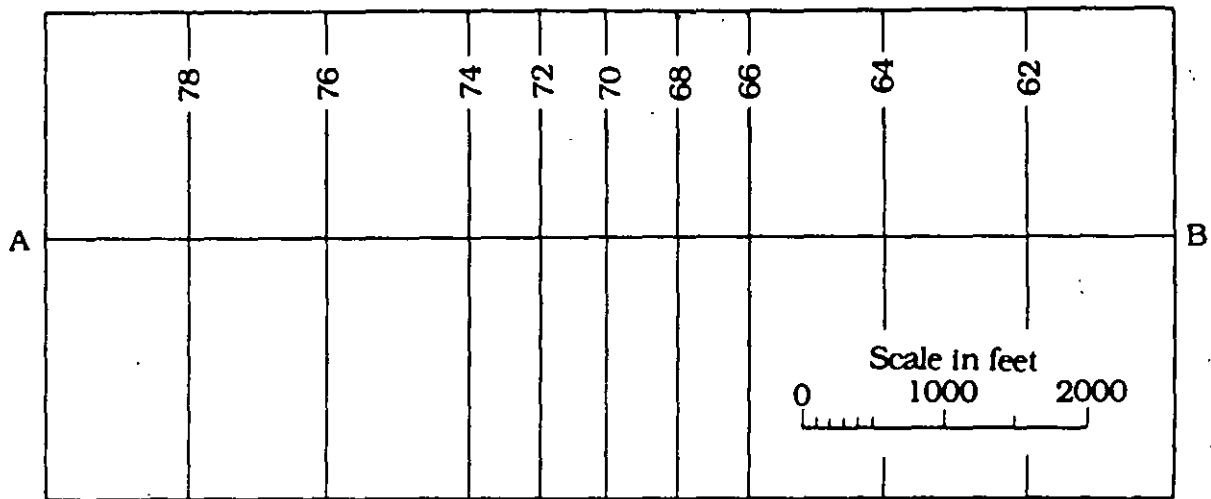
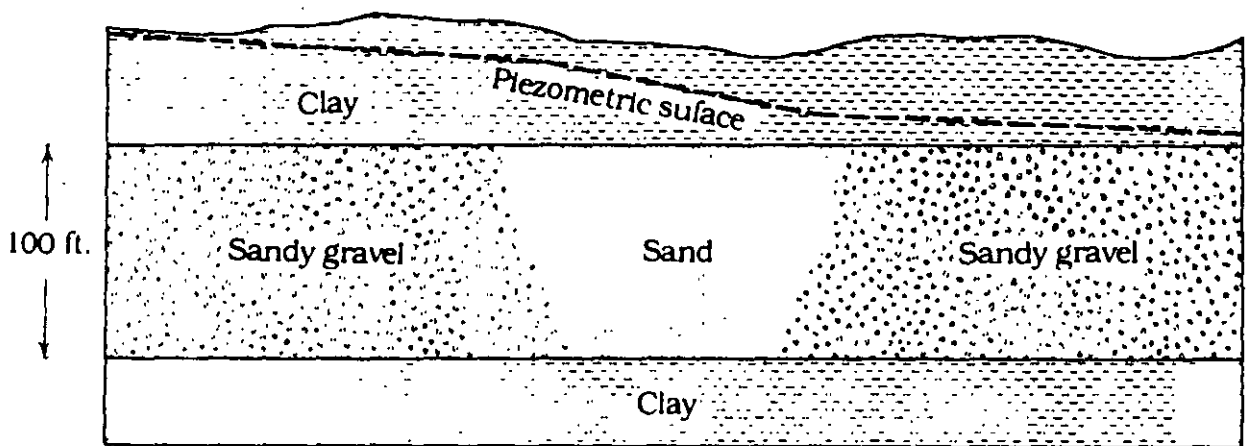


Figure 9.9. Well in a confined aquifer showing the meaning of various terms used in the equilibrium equation.





(A)



(B)

REDES DE FLUJO SUBTERRANEO

CAPITULO 8.7

DEL LIBRO: HIDROLOGIA SUBTERRANEA

POR: EMILIO CUSTODIO Y M. LLAMAS

Capítulo 8.7

Superficies piezométricas

7.1 INTRODUCCIÓN

La superficie piezométrica es el lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero referidas a una determinada profundidad. Se las representa mediante líneas de igual altura piezométrica, de forma similar a la representación de una superficie topográfica mediante curvas de nivel⁶⁵. A estas curvas se las llama *isopiezas* o *hidroisohipsas*⁶⁶; se trata pues de líneas proporcionales a las equipotenciales, y así se las designa también en ocasiones.

En principio se admite que las superficies equipotenciales del flujo del agua en un acuífero son superficies verticales de modo que el potencial es el mismo en cualquier punto de una misma vertical; en este caso la superficie piezométrica es única, al no depender de la profundidad que se considera.

En muchos casos normales de hidrología subterránea las superficies equipotenciales son planos verticales a efectos prácticos, en especial teniendo en cuenta que las dimensiones horizontales son mucho mayores que las verticales. Sin embargo, existen casos en que el potencial varía notablemente en una misma vertical tal como sucede en las cercanías de zonas de recarga, en acuíferos con gran pendiente, en las proximidades de captaciones de agua o ríos parcialmente penetrantes, etc.; en este caso las superficies equipotenciales son planos inclinados y entonces es posible dibujar una infinidad de superficies piezométricas según la profundidad que se considere (fig. 8.78).

La superficie freática es la que define el límite de

saturación de un acuífero libre⁶⁷, y coincide con la superficie piezométrica correspondiente a los puntos situados en el límite de saturación. Se supone que la elevación capilar es muy pequeña (ver capítulo 8.8); de no ser así es preciso definir la superficie sobre la que la presión del agua es igual a la atmosférica, y es la que se observa en pozos y sondeos.

Las superficies piezométricas de los acuíferos confinados son más elevadas que el techo de los mismos acuíferos; algunas veces en las proximidades de captaciones que producen un gran descenso del nivel del agua⁶⁸.

Si se admite que el potencial hidráulico no varía con la profundidad, en acuíferos libres cualquier superficie piezométrica coincide con la superficie freática o superficie lugar geométrico de puntos a presión atmosférica. Sin embargo, si tal suposición no es admisible, se pueden definir superficies piezométricas con zonas más altas o más bajas que la superficie freática, e incluso con zonas cuya superficie piezométrica está por encima del nivel del terreno.

La superficie piezométrica en los acuíferos permeables por fisuración con grietas verticales notablemente espaciadas o en acuíferos muy heterogéneos con zonas extensas impermeables, es una superficie discontinua y que sólo existe sobre dichas grietas; en general se dibuja continua y entonces debe tomarse como superficie virtual (fig. 8.79). Por debajo de la superficie freática virtual las cavidades del terreno están llenas de agua; sólo cabe esperar cavidades vacías cuando éstas tienen una relativamente fácil comunicación con el exterior y están así continuamente drenadas dando origen a un manantial; este manantial puede pasar inadvertido por ser muy pequeño y quedar enmascarado por el terreno.

⁶⁵ Equivale a las curvas resultantes de cortar la superficie piezométrica por un conjunto de planos horizontales igualmente espaciados.

⁶⁶ Curvas de igual altura de agua.

⁶⁷ «Water table» en la literatura anglosajona

⁶⁸ Drenado local del acuífero

rreno de recubrimiento, por una rápida evaporación en superficie o por la salida en forma de aire húmedo en el caso de cuevas abiertas al exterior.

El estudio del movimiento del agua en cualquier acuífero precisa del conocimiento de la superficie piezométrica (superficies piezométricas en caso de existencia de flujo vertical), que así se convierte en una herramienta esencial, la cual debe dibujarse correctamente e interpretarse, con criterio.

Cuando existen flujos verticales que hacen que la superficie piezométrica no sea única en ciertas zonas, puede trazarse una superficie piezométrica determinada y complementarla con perfiles verticales en los que se señalen las líneas equipotenciales. Ello sólo suele suceder en lugares concretos y lo más frecuente es que la superficie piezométrica se pueda tomar como única.

Por debajo del nivel del mar el terreno está naturalmente saturado de agua por razones obvias; los niveles por debajo del nivel del mar son a causa de extracciones por bombeo. Excepcionalmente pueden aparecer pequeñas depresiones transitorias en rocas consolidadas duras muy poco permeables cuando ha aumentado la porosidad del terreno rápidamente por ejemplo por creación de fracturas de descompresión las áreas de canteras con extracción intensiva y frecuentes barrenamientos (trabajos en curso en el Macizo de Garraf, Barcelona; Custodio, Galofré y otros) o en minas.

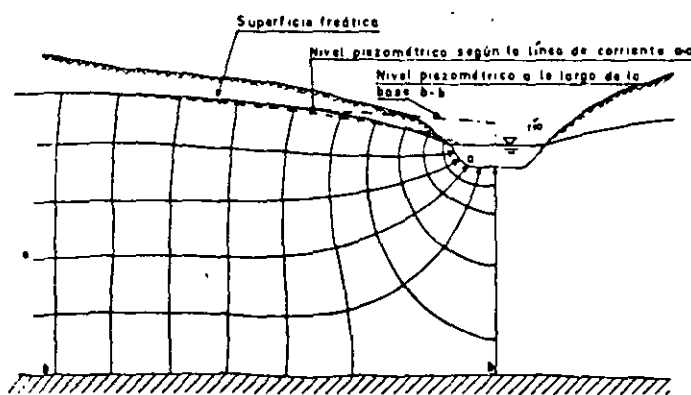


FIGURA 8.78

Red de flujo aproximada en un acuífero libre drenado por un río poco penetrante. En las proximidades del río se crea un flujo con componentes verticales de velocidad. La superficie piezométrica es única lejos del río pero varía con la profundidad cerca del mismo, y puede llegar a quedar por encima del terreno.

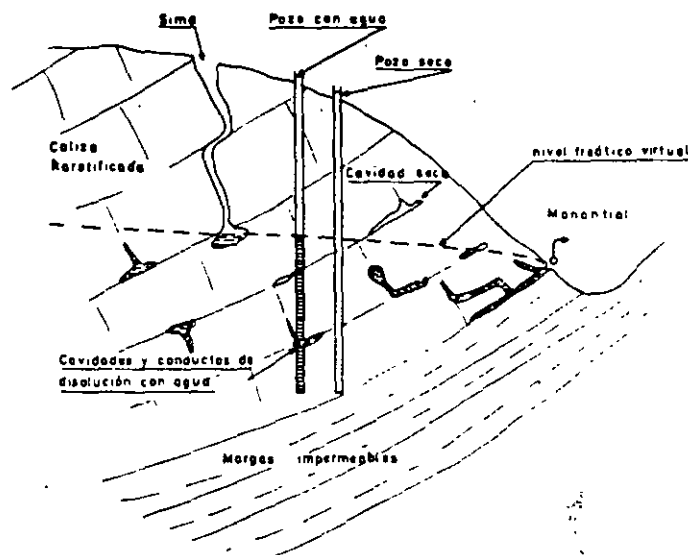


FIGURA 8.79

Nivel piezométrico virtual de un macizo calcáreo karstificado.

7.2 DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS

La única forma disponible para medir los niveles piezométricos en un acuífero es mediante una perforación que permita un acceso directo al mismo. En el caso de acuíferos libre, sólo en raras ocasiones los métodos geofísicos de superficie permiten determinar con una garantía aceptable la posición de la superficie freática.

Las perforaciones para medir los niveles piezométricos son los pozos existentes en la zona, excavaciones hasta el nivel del agua y los piezómetros que son a modo de pozos, en general de pequeño diámetro, contruidos especialmente con este objetivo.

La construcción de piezómetros es costosa y debe reducirse al mínimo indispensable. En acuíferos no consolidados de escasa profundidad se pueden instalar a hincia directa, de forma rápida y relativamente económica, pero en acuíferos más profundos o en rocas consolidadas se precisa de maquinaria costosa y la construcción es a veces lenta y no exenta de dificultades e imprevistos (ver sección 17).

Por las razones aludidas debe tratarse de aprovechar los accesos al acuífero que ya existan y sean suficientemente representativos tales como pozos, galerías, zonas pantanosas, fuentes, ríos conectados con el acuífero, etcétera. Los pozos y galerías en producción provocan

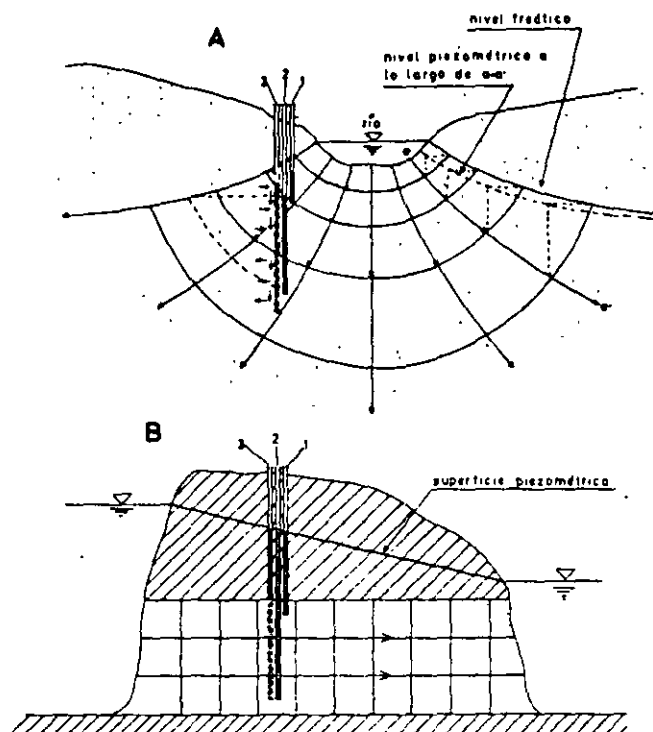


FIGURA 8.80

A) Existen componentes verticales del flujo; los niveles piezométricos varían con la profundidad. B) El flujo es horizontal; los niveles piezométricos no varían con la profundidad. 1 y 2 son piezómetros puntuales y el 3 es un piezómetro con zona ranurada larga. En el caso B los tres señalaban el mismo nivel, pero no es así en el caso A, donde además en el piezómetro 3 existe una circulación interna de agua.

afecciones a los niveles piezométricos y dan valores dinámicos que varían según el régimen de explotación. Las zonas pantanosas y lagunas indican una salida de agua y en general son una superficie de nivel constante. Las fuentes son rebosaderos naturales y señalan niveles de base si son permanentes; a veces pueden dar lugar a confusiones si drenan zonas no saturadas o acuíferos suspendidos; por eso deben seleccionarse fuentes de caudal importante y con geología bien conocida. Deben considerarse como fuentes las zonas de surgencias en ríos. En ocasiones la verdadera salida de la fuente puede quedar enmascarada por depósitos químicos tales como travertino y la salida observada se produce en otro lugar y a menor cota.

En pozos y piezómetros, el nivel del agua se mide en general con una cinta metálica y un dispositivo o artefacto para delatar el nivel del agua (ver apéndice A.9.9 de la sección 9). Trabajando correctamente se puede medir con la precisión del mm; para mayores precisiones son necesarios dispositivos más delicados. En general basta con medir con la precisión del cm y en ocasiones basta con errores de ± 10 cm si el gradiente piezométrico es elevado; sólo en acuíferos con gradientes muy pequeños es preciso medir con gran precisión tal como sucede en acuíferos en calizas muy fracturadas o karstificadas.

La profundidad del nivel piezométrico se mide desde una determinada referencia; para conocer el nivel piezométrico es preciso conocer la cota de la referencia respecto a un cierto punto fijo tal como el nivel del mar, una señal determinada, etc. Ello supone una nivelación topográfica de las distintas referencias. Esta nivelación debe tener por lo menos la precisión con que se desean conocer los niveles piezométricos. En general se realiza con un equipo de topografía (nivel y mira). En trabajos preliminares en los que un error de algunos dm es tolerable, puede bastar la nivelación obtenida en planos topográficos existentes, si la equidistancia en curvas de nivel y la precisión de situación son suficientes.

Se dice que un piezómetro es puntual cuando sirve para determinar el nivel piezométrico en un punto, es decir cuando sólo está en comunicación con el acuífero en un punto o longitud muy corta (fig. 8.80). Si la comunicación con el acuífero se establece en una cierta longitud, el nivel obtenido es un valor medio de las alturas piezométricas en esa longitud (fig. 8.80) y si está comunicado con el acuífero en toda su longitud se obtiene el nivel piezométrico medio en todo el espesor del acuífero; en este caso se dice que el piezómetro es imperfecto; cuando está abierto sólo en un punto o en una corta longitud se dice que es perfecto⁶⁹.

Si el nivel piezométrico no varía a lo largo de una vertical, el nivel observado en un piezómetro completo es igual al observado en un piezómetro incompleto.

Cuando el nivel piezométrico varía a lo largo de una misma vertical, esta variación debe determinarse. Si interesa, por medio de una serie de piezómetros puntuales a diferentes profundidades. Los piezómetros con zona ranurada larga, tal como se ha dicho, dan valores promedio en una longitud; dentro de los mismos se establece una circulación de agua que va desde las zonas de mayor nivel piezométrico a las de menor nivel

⁶⁹ No debe confundirse la designación perfecto e imperfecto con la completa e incompleta. Estas últimas se refieren a la longitud filtrante en relación con el espesor del acuífero (ver capítulo 9.1).

piezométrico; esta circulación supone unas pérdidas de carga de circulación en el acuífero, en la zona ranurada y a lo largo del tubo, de modo que en acuíferos homogéneos el nivel observado tiende a ser menor que el nivel piezométrico medio, teniendo como límite el nivel piezométrico menor.

Los piezómetros pueden dar a veces lecturas falseadas en acuíferos con variación vertical de nivel piezométrico, cuando por un defecto de construcción puede establecerse una circulación de agua entre el tubo del piezómetro y el terreno.

Como se vio en el capítulo anterior (capítulo 6) el nivel piezométrico de un acuífero puede sufrir variaciones temporales, de modo que la superficie piezométrica se refiere a un cierto instante de tiempo; los valores que sirven para definirla deben ser simultáneos, tomando esta palabra como comprendiendo un intervalo de tiempo en el cual no se produzcan variaciones de nivel piezométrico importantes. Los piezómetros deben seguir con fidelidad esas variaciones: ello supone la entrada y salida del tubo de pequeños volúmenes de agua: si la comunicación con el acuífero es muy deficiente, el equilibrio de presiones puede hacerse muy lentamente, introduciéndose errores. Este hecho es especialmente importante en el estudio de ensayos de bombeo⁷¹.

Es muy importante considerar la densidad, y a veces la temperatura, del agua que llena el piezómetro por las razones expuestas en el apartado 1.4. De no ser así se pueden tener errores importantes en zonas costeras con agua salada o en acuíferos salinos o cuando el piezómetro esté lleno de lodo de perforación, o cuando se ha extraído agua de un acuífero profundo con agua caliente (ver capítulo 10.4), etc.

7.3 TRAZADO DE LAS CURVAS ISOPIEZAS

En general sólo es posible obtener valores del potencial o nivel piezométrico en una serie de puntos del acuífero. A partir de ellos deben trazarse las curvas de nivel que sirvan para definir la superficie piezométrica. A partir de estas curvas se pueden trazar las líneas de corriente que deben ser normales a las isopiezas. Los puntos seleccionados no deben mostrar, si es posible, efectos de flujo vertical.

Las curvas equipotenciales deben cumplir las condiciones de contorno del problema o sea que deben ser normales a los límites impermeables y paralelas a las

superficies y líneas de nivel constante tales como ríos, lagos, mares, etc., que tengan conexión en el acuífero. Deben también reflejar los cambios bruscos de permeabilidad. En definitiva, deben respetar las mismas condiciones que las redes de flujo.

En principio el trazado de las curvas isopiezas a partir de los datos puntuales se realiza por métodos análogos a los empleados en topografía. La equidistancia entre líneas depende de las condiciones del problema o sea del número y repartición espacial de los datos, pendiente de la superficie piezométrica y precisión de los niveles piezométricos medidos. En planos de detalle a escalas grandes, por ejemplo 1/10 000 ó 1/25 000 se suelen dibujar con equidistancia de 1 m intercalando a veces curvas de intervalo 0,5 m. A escalas menores, hasta 1/200 000 la equidistancia puede ser cada 5 m y a escalas aún menores, todavía más separadas. No obstante en cada caso hay que elegir la equidistancia más conveniente. En un acuífero muy transmisor puede convenir dibujar curvas con equidistancia de 0,5 m o menos mientras que en acuíferos poco transmisores puede bastar con curvas cada 5 m. En zonas muy montañosas y muy poco transmisoras puede bastar el trazado de curvas cada 100 m en planos de escalas 1/100 000 ó 1/200 000⁷².

Conviene señalar en el mapa piezométrico los puntos de medida e incluso el nivel piezométrico en ellos, para poder valorar la bondad de lo representado.

Si se tienen tres puntos en los que se conoce la superficie piezométrica y entre ellos el nivel del agua varía gradualmente y no existen límites ni cambios de medio, las curvas isopiezas se pueden trazar por el método del triángulo o sea a base de unir los puntos de igual cota sobre los lados del triángulo de acuerdo con las divisiones efectuadas sobre los mismos. Estas divisiones se pueden hacer con cualquiera de los procedimientos utilizados en geometría o bien utilizando una cinta elástica graduada que al estirarse se adapta a los valores extremos del segmento. También puede emplearse un papel transparente con un conjunto de escalas radiales. Con un poco de experiencia es posible trazar las curvas a estima y adaptarlas directamente a las condiciones del problema.

En acuíferos libres, la superficie freática no puede estar más alta que el terreno, aunque sí que lo pueden estar las superficies piezométricas de partes profundas

⁷¹ Véase apéndice A.9.8 de la sección 9

⁷² La experiencia del autor en Canarias muestra que en los macizos basálticos antiguos, poco permeables, basta con tomar intervalos entre curvas de 100 m, pero en zonas llanas, con basaltos modernos o roca fisurada por descompresión, al ser elevada la permeabilidad y muy baja la recarga es preciso tomar intervalos de 1 m o menos, sin variar la escala del plano

8.96 Flujo del agua en los medios porosos

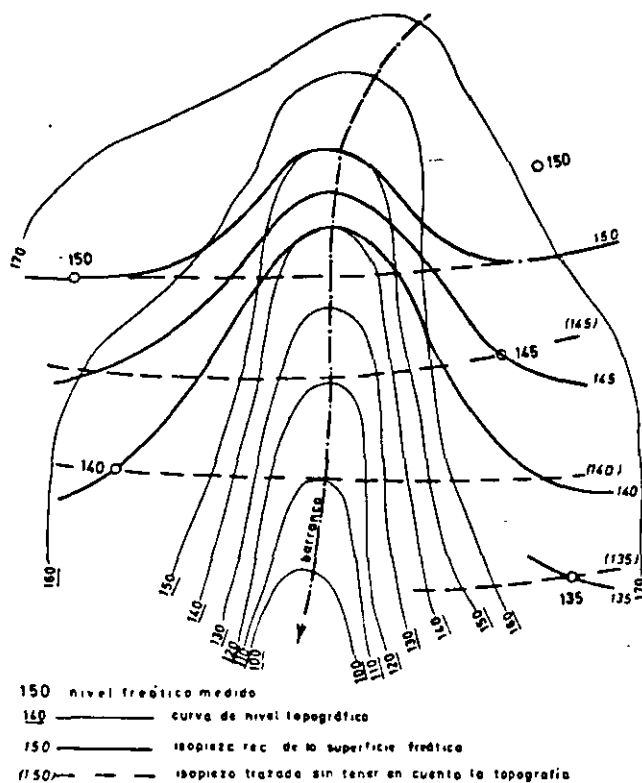


FIGURA 8.81

Diferencia en el trazado de isopiezas al tener en cuenta la topografía en una zona muy accidentada. El barranco es una línea de drenaje, aunque el agua puede que no sea visible si existe un aluvión muy permeable o la evaporación o evapotranspiración es superior al aporte. Se supone que las isopiezas son las de la superficie freática y que los niveles corresponden a datos de pozos abiertos cerca de la misma. Si se trata de niveles profundos, lo dicho puede no ser cierto.

del acuífero en zonas próximas a las de descarga (figura 8.78). Esta circunstancia debe vigilarse en el trazado de isopiezas en zonas de topografía accidentada con pocos puntos de medida y no situados en los centros de los valles (fig. 8.81).

Ejemplo 1

Se tienen los cinco puntos con determinación del nivel piezométrico de la figura 8.82. Trazar las curvas isopiezas que ellos definen, con equidistancia de 1 m.

En la propia figura 8.82 se ha dibujado con trazo la división en 5 triángulos, habiendo dividido sus lados de acuerdo con las cotas de los extremos de sus lados. Se ca de trazos el procedimiento empleado sólo para los 1 de FE y FC; las divisiones auxiliares se han obtenido una regla graduada. Las curvas isopiezas se han obtenido como unas curvas quebradas; posteriormente se pasan a curvas continuas y se adaptan a las condiciones particulares del problema.

Cuando se tienen pocos puntos para definir la superficie piezométrica y/o ésta tiene una superficie irregular por la presencia de zonas de drenaje o bombeo, es preciso efectuar una interpretación a la del conocimiento de la existencia de esas zonas, lo da cierto carácter subjetivo al trazado final (fig. 8.81).

Si la sección del acuífero varía, es preciso tenerlo cuenta para definir el espaciado de las curvas si no suficientes puntos para el dibujo sin interpretación. En ciertas zonas conviene tener en cuenta el modo de construcción de una red de flujo y a veces conviene ayudarse en el trazado del dibujo de algunas líneas de corte, las cuales son perpendiculares a las isopiezas, acordando que el medio es isótropo en sentido horizontal.

En las figuras 8.83, 8.84 y 8.85, se dan algunas formas indicativas de superficies piezométricas en condiciones frecuentes.

Es frecuente indicar en las superficies piezométricas la dirección del flujo mediante flechas y también la existencia de divisiones o vaguadas de agua subterránea (fig. 8.86).

Es importante indicar en el plano base de la superficie piezométrica todos aquellos detalles que la afectan tales como bordes impermeables, ríos, canales, presas,

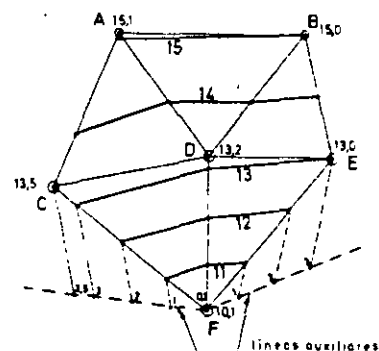


FIGURA 8.82

Trazado de las isopiezas (hidroisohipsas) dados 5 puntos con los respectivos niveles piezométricos.

zonas pantanosas, fuentes, núcleos de bombeo, costas, accidentes geológicos de interés hidrogeológico, etc.

Las curvas interpretativas, basadas en deducciones más que en mediciones reales, deben indicarse como hipotéticas (en trazos).

En general es peligroso y poco razonable basar la conformación de una superficie piezométrica en un solo punto de valor diferente de la tónica general, a menos que se tenga la seguridad de que tanto la medición como la representatividad son correctas (fig. 8.87).

Es evidente que debe tenerse especial cuidado en que todos los datos de niveles correspondan a un mismo acuífero y que dentro del mismo correspondan a un mismo subacuífero en caso de que exista una notable estratificación. Debe tenerse cuidado en la elección de los puntos de observación para no tomar aquellos que afecten a la vez a varios acuíferos de diferente potencial.

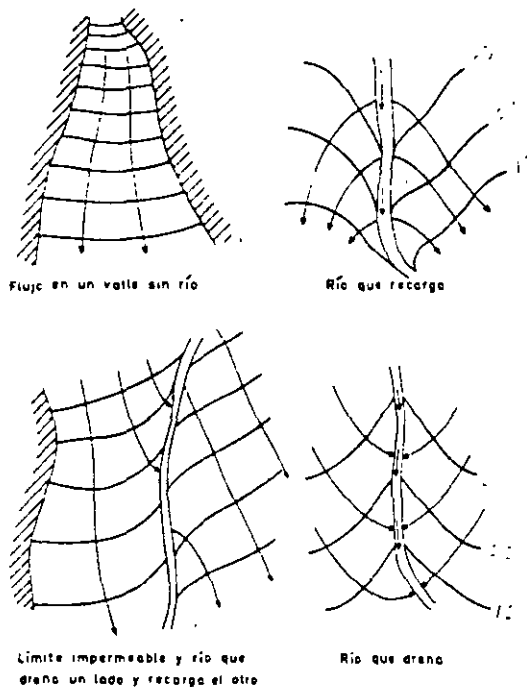


FIGURA 8.83

Forma de las isopiezas y líneas de corriente en las proximidades de límites impermeables y ríos conectados al acuífero. En el río, las isopiezas tienen cota similar a la del nivel del agua del río, salvo que las isopiezas se hayan determinado con piezómetros profundos y el río sea poco penetrante.

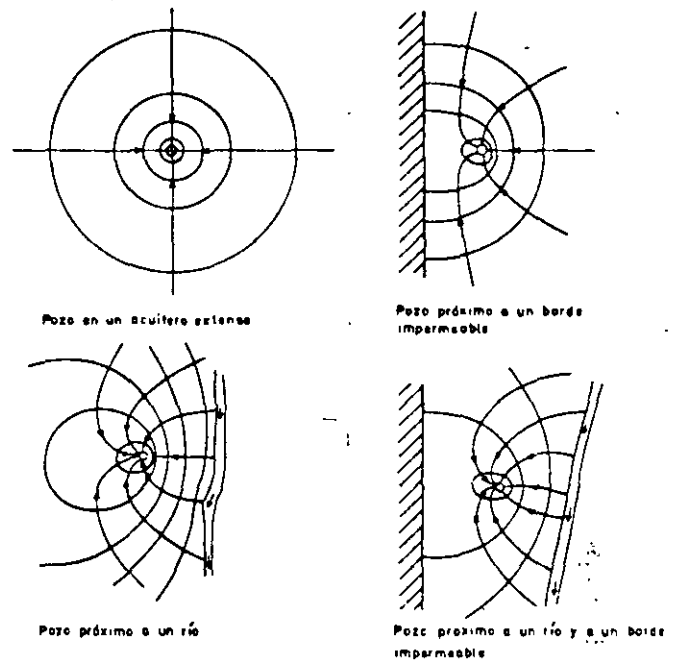


FIGURA 8.84

Pozo en un acuífero con pequeño gradiente natural.

7.4 TIPOS DE SUPERFICIES PIEZOMÉTRICAS

Según la separación de las isopiezas y su concavidad o la disposición relativa de las líneas de corriente se suelen señalar varios tipos de superficies piezométricas. Estas designaciones son corrientes en la bibliografía francesa especializada en hidrología y están particularmente desarrolladas en los textos de Castany (1963, 1968); son designaciones de carácter morfológico y responden a los siguientes criterios:

Superficie cilíndrica. Las isopiezas son rectas paralelas.

Superficie radial. Las isopiezas son curvas y las líneas de corriente tienden a converger; si convergen aguas arriba (isopiezas convexas desde aguas abajo) se dice que la superficie es radial divergente y se llama radial convergente si las líneas de corriente tienden a converger aguas abajo (isopiezas cóncavas desde aguas abajo).

Superficie plana. La separación entre isopiezas es constante.

Superficie parabólica. La separación entre isopiezas disminuye hacia aguas abajo.

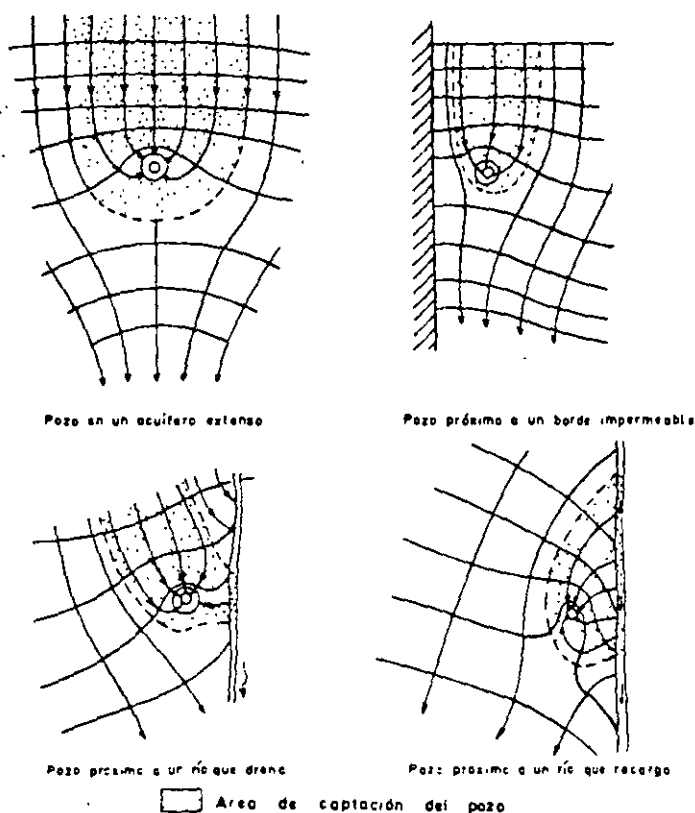


FIGURA 8.85

Isopiezas aproximadas creadas por el bombeo en pozos en acuíferos con flujo natural.

Superficie hiperbólica. La separación entre isopiezas aumenta hacia aguas abajo.

Superficie elíptica. La separación entre isopiezas aumenta tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo a partir de una de ellas.

En la figura 8.88, se ilustran estas definiciones con algunos ejemplos simples. Las superficies reales pueden ser simples, mixtas o complejas si participan de varios tipos según las zonas que se consideren.

7.5 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA DE SUPERFICIES PIEZOMÉTRICAS

El estudio de las superficies piezométricas permiten obtener datos básicos sobre el movimiento y comportamiento del agua subterránea. No sólo puede realizarse

una interpretación cualitativa, sino también una interpretación cuantitativa, ya sea por métodos simples, ya sea a través del estudio de una colección de las mismas en diferentes épocas, con o sin modelos.

Como la superficie piezométrica, en los lugares con escasez relativa de datos, puede contener una interpretación del que la ha trazado, es preciso no caer en el error de deducir de la superficie piezométrica como resultado, aquellos supuestos que se establecieron para su trazado.

Se facilita la interpretación de las superficies piezométricas si éstas se complementan con el trazado de algunas líneas de corriente divisorias, etc. Las líneas de corriente se trazan ortogonalmente a las isopiezas, admitiendo tácitamente que se trata de un sistema de permeabilidad isotropa en el plano horizontal que se considera, lo cual es en general admisible a escala suficientemente grande. En rocas fisuradas y en sistemas kársticos puede no ser válido; en sistemas kársticos con canales subterráneos, el nivel piezométrico afectado por uno de esos canales puede representar sólo una parte de la energía del agua, si la velocidad de circulación es elevada. Como la altura dinámica viene representada

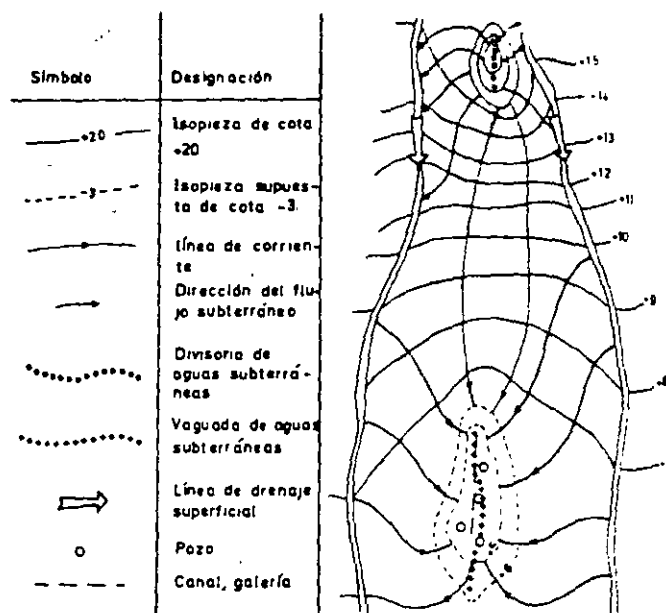


FIGURA 8.86

Simbolos para planos de isopiezas. El ejemplo muestra un acuífero entre dos ríos con área de recarga y un área de extracciones. La porción de los ríos frente al área de recarga son líneas de drenaje pero no el resto.

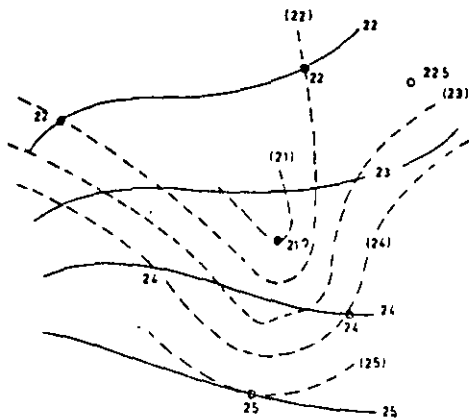


FIGURA 8.87

Alteración en el trazado de las isopiezas al considerar un punto anómalo. Si el punto anómalo (cota 21) hubiese sido un error de medición por haber tomado un pozo en bombeo con grandes pérdidas en el pozo, su consideración deformaría el trazado.

por $v^2/2g$ (fórmula 8.3), en un canal con $v = 1$ m/seg. es $v^2/2g = 5$ cm. y para $v = 3$ m/seg es $v^2/2g = 46$ cm. lo que da una idea del error máximo cometido. Únicamente en situaciones excepcionales, en grandes estrangulamientos y con carácter local se tienen velocidades mayores que den lugar a alturas dinámicas importantes, como mucho de unos pocos m.

La superficie piezométrica representa la situación en un instante determinado, y puede variar de una época a otra, variando el almacenamiento de agua, pero ello afecta poco, en general, a la interpretación cualitativa.

En ocasiones conviene tener presente la superficie topográfica para localizar zonas surgentes, zonas con posibles movimientos verticales, etc. Cuando se trata de establecer relaciones con ríos, lagos, etc., conviene conocer la posición topográfica de la superficie de los mismos.

Cuando la superficie topográfica es cortada por la superficie piezométrica de acuíferos libres, allí se producen fuentes y manantiales, o se descarga agua a un río. Cuando la evaporación es muy intensa y la transmisividad del acuífero es pequeña, puede ser que esas surgencias no se manifiesten claramente, excepto por un cambio de vegetación. La existencia de materiales muy permeables en el fondo de los valles puede disimular fuentes y surgencias, las cuales pueden no aparecer hasta otros lugares alejados (fig. 8.89); algo similar puede suceder si existen depósitos de travertino.

La relación entre la forma de la superficie freática en acuíferos libres y la topografía es una función de la infiltración anual y de la transmisividad (producto de la permeabilidad por el espesor del acuífero). En general la superficie freática es parecida a la superficie topográfica en zonas con recarga abundante y baja transmisividad (baja permeabilidad y/o escaso espesor de zona permeable) mientras que en zonas con menor recarga y materiales suficientemente permeables hasta gran pro-

TIPO	Cilíndrica plana	Parabólica cilíndrica	Parabólica radial convergente	Hipérbólica radial divergente	Elíptica cilíndrica
PERFIL SEGUN EL FLUJO					
ISOPIEZAS					

FIGURA 8.88

Ilustraciones simples de algunos tipos sencillos de superficies piezométricas.

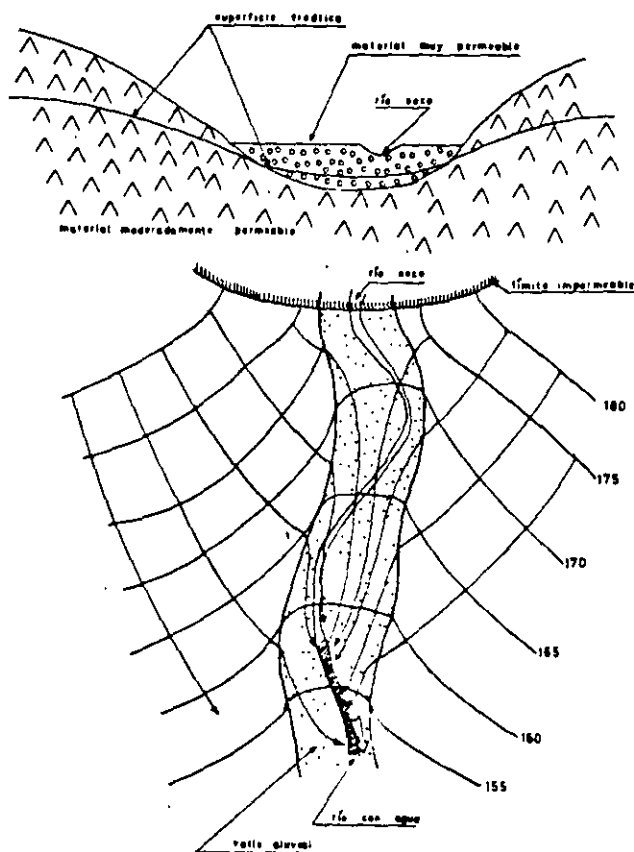


FIGURA 8.89

Ejemplo esquemático de drenaje por una zona de mayor permeabilidad. El río lleva agua cuando el relleno aluvial no es capaz de transmitir toda el agua aportada por las laderas del valle.

fundidad, la superficie freática es muy tendida. La figura 8.90 ilustra estas afirmaciones.

Cuando el flujo se dirige hacia una línea, en general debe interpretarse como un drenaje a lo largo de la misma (río efluente, canal efluente, galería, zona de fractura permeable por la que se escapa agua a la superficie o a otro acuífero, etc.). Cuando éstas se alejan de la misma, significa lo contrario (río o canal influente, zona de fractura permeable por la que entra agua desde la superficie u otro acuífero, etc.). En ambos casos las isopiezas tienden a ponerse paralelas a dicha línea, tal como se mostró en las figuras 8.83 y 8.86.

La presencia de curvas cerradas indican áreas de recarga o de descarga localizadas, pero no necesariamente

las zonas de descarga o recarga dan origen a curvas cerradas como se ve en la figura 8.85. Su existencia queda señalada por el comportamiento de las líneas de corriente y la densidad de datos.

Si en una zona con líneas de corriente aproximadamente paralelas las isopiezas se acercan hacia aguas abajo, es a consecuencia de una disminución de la transmisividad (disminución de la permeabilidad, del espesor o de ambos a la vez); si se separan hacia abajo es a consecuencia de un aumento de transmisividad (ver fig. 8.91).

En la figura 8.92 se ilustran efectos similares por resaltos o depresiones en la base de un acuífero libre.

Cuando las líneas de corriente son convergentes el análisis cualitativo es algo más complicado ya que juegan a la vez cambios de transmisividad y la existencia de recarga o descarga. Si no hay recarga ni descarga y la transmisividad es constante, las líneas isopiezas deben aumentar su espaciado en el sentido de la divergencia

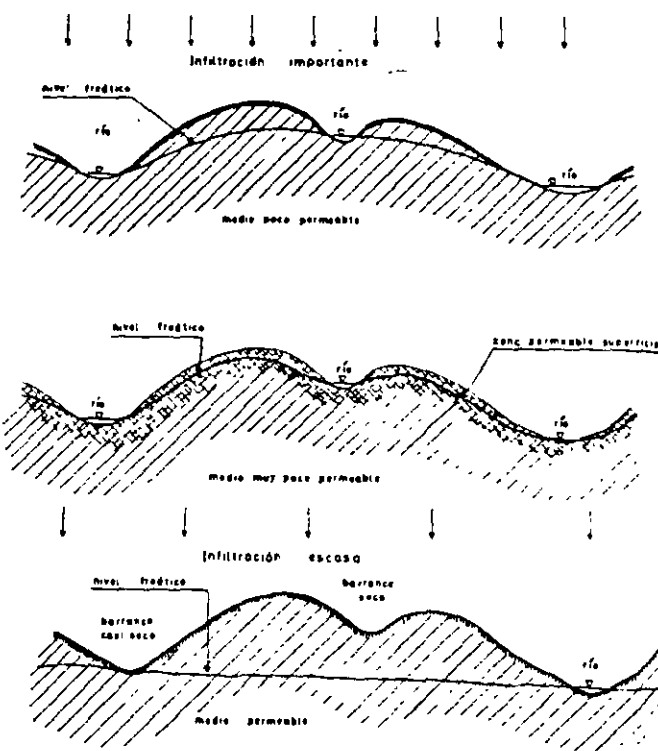


FIGURA 8.90

Diferentes formas de relación de la superficie freática con la topografía. 9

de las líneas de corriente tal como se pudo apreciar en el esquema superior izquierdo de la figura 8.83. Con frecuencia, la convergencia está ligada a la descarga a un río o a una zona de bombeo o evapotranspiración mientras que la divergencia es una consecuencia de recarga localizada o distribuida. (Véanse las figuras 8.81, 8.83, 8.85 y 8.89). Si en un flujo divergente, el espaciado de las isopiezas es constante o disminuye es que existe una recarga distribuida y/o la transmisividad disminuye progresivamente; si el flujo es convergente y el espaciado de las isopiezas es constante o disminuye es que existe una descarga distribuida (zona pantanosa, evapotranspiración por freatofitas, área de bombeo, etc.) y/o la transmisividad aumenta progresivamente.

En una zona de fuertes extracciones no delatada por curvas cerradas, existe un espaciamiento brusco de las líneas isopiezas aguas abajo si la captación es una gale-

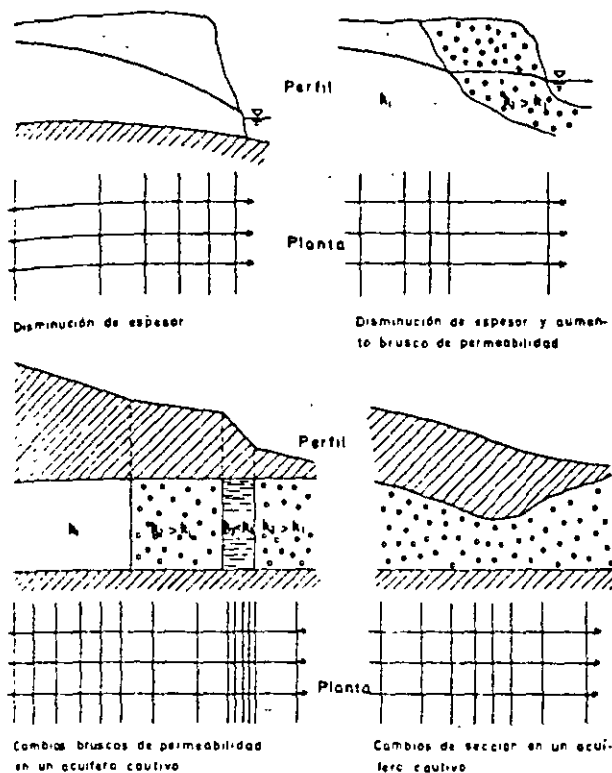


FIGURA 8.91

Efectos de cambios de espesor o de permeabilidad en la separación de las líneas isopiezas en un sistema de líneas de corriente paralelas.

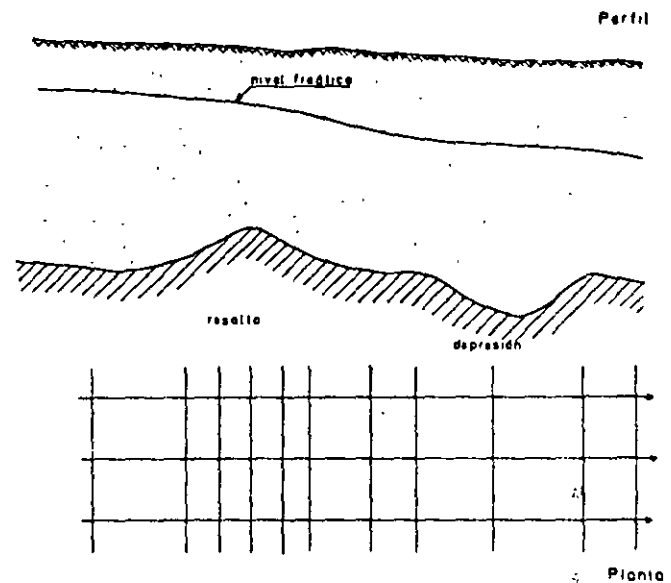


FIGURA 8.92

Efecto de un resalto y de una depresión en la base de un acuífero libre de espesor progresivamente decreciente.

ría o dren transversal; si se trata de un grupo de pozos puede observarse el espaciamiento de las líneas isopiezas aguas abajo que aparece en los esquemas de la figura 8.85.

En las proximidades de los ríos y masas de agua que cambian de nivel con rapidez se tienen efectos dinámicos ya expuestos en el capítulo anterior⁷²; en los planos de isopiezas pueden aparecer como depresiones o crestas paralelas a las orillas en las proximidades de las mismas. Estas formas son rápidamente cambiantes y en general no aparecen igual en mapas correspondientes a diferentes épocas. Desde luego, la altura o profundidad de esas anomalías es menor que la semi-amplitud de la oscilación del agua libre. Si los cambios son muy rápidos el mapa de isopiezas, cuyas mediciones pueden haber sido hechas a lo largo de dos o tres días, puede no reflejarlas y en su lugar aparecer malformaciones por no simultaneidad de las mediciones.

La existencia de la interfase agua dulce-agua salada en las regiones costeras reduce notablemente el espesor saturado útil al acercarse a la línea de costa⁷³, por lo que el gradiente piezométrico aumenta rápidamente y pueden tener cotas de agua dulce en acuíferos libres de incluso algunos metros en la misma playa⁷³.

⁷² Esquema de la figura 8.57.

⁷³ Véase capítulo 13.1.

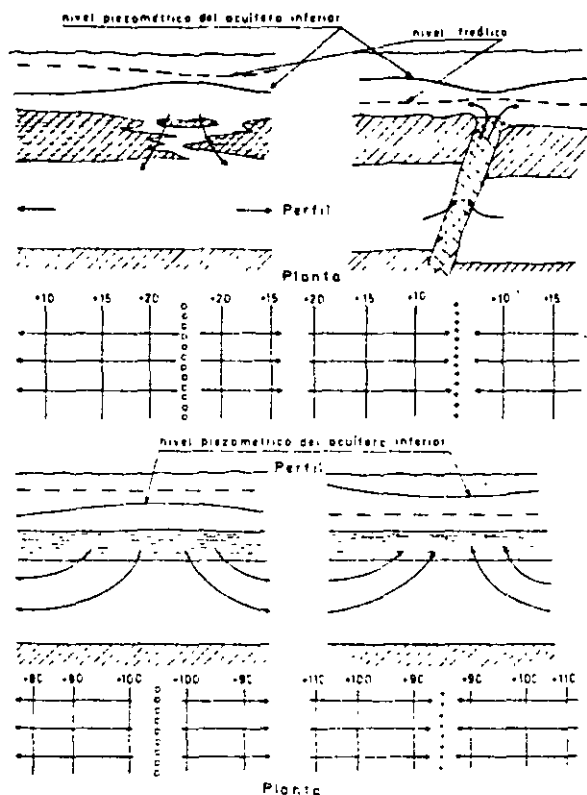


FIGURA 8.93

Explicación de ciertas divisorias o vaguadas de aguas subterráneas en las superficies piezométricas de algunos acuíferos cautivos y semiconfinados.

En los acuíferos cautivos o semiconfinados aparecen a veces divisorias o vaguadas de aguas que no corresponden a líneas de pozos de recarga o de bombeo. Estas zonas pueden ser interpretadas de dos formas: a) existe allí una discontinuidad en el confinamiento que permite una fácil entrada o salida de agua (zona fallada permeable, adelgazamiento del techo, etc.) b) es una línea de caudal cero de forma que sólo representa la línea sobre la cual el caudal circulante es cero porque a partir de ella el caudal infiltrado circula hacia un lado u otro o el caudal circulante se ha escapado al llegar a la misma (fig. 8.93). La interpretación basada en la existencia de una zona alargada de gran permeabilidad en el acuífero semiconfinado no es posible ya que ello exige que el agua circule a su largo con aumento progresivo del caudal, por lo que las líneas de corriente deben ser cada vez más oblicuas a la divisoria en vez

de ser casi normales (Margat 1967). La existencia de estas divisorias puede servir para diferenciar acuíferos cautivos de acuíferos semiconfinados.

La observación de superficies piezométricas puede señalar ciertas estructuras geológicas que supongan un cambio notable de permeabilidad. Tales pueden ser las fallas, zonas falladas y diques que actúen como una barrera poco permeable o como una zona de permeabilidad preferente, todo ello dependiendo de la permeabilidad de la roca encajante y de la dirección de flujo (fig. 8.94).

También se pueden localizar lentejones menos permeables o más permeables teniendo en cuenta que en éstos las isopiezas se concentran y en aquellos se separan (fig. 8.95). En formaciones sedimentarias extensas se pueden también a veces identificar ejes de flexión o proximidad a la superficie del zócalo (Castany, 1968, págs. 104-106).

En todas estas interpretaciones es esencial que la superficie piezométrica esté bien dibujada a partir de un número suficiente de datos, y que se tenga cierta base geológica para la interpretación.

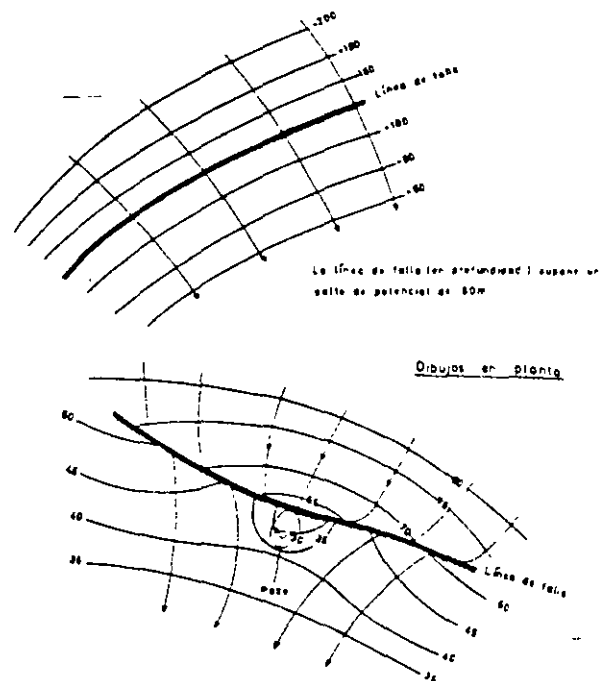


FIGURA 8.94

Esquemas del efecto de las fallas poco permeables.

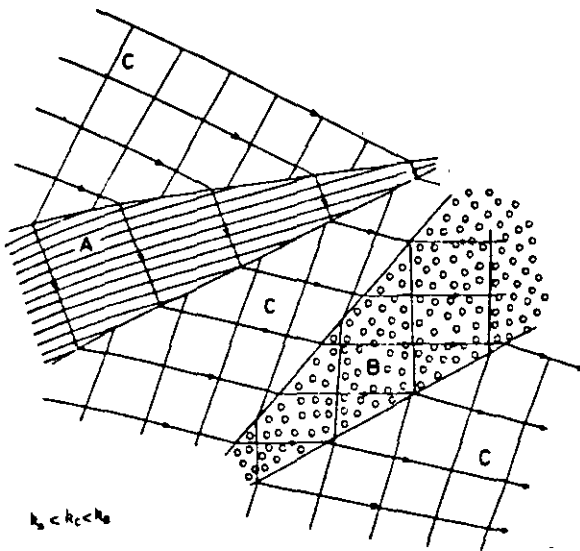


FIGURA 8.95

Esquema de isopiezas de un conjunto con dos cuñas de diferente permeabilidad, una menos permeable (A) y otra más permeable (B).

7.6 EJEMPLOS DE SUPERFICIES PIEZOMÉTRICAS

En la figura 8.96 se representan algunos perfiles geológicos que muestran la estructura del delta del Valle Bajo del río Llobregat; en el valle, que acaba en Cornellá, existe un único acuífero que en el delta se divide en un acuífero superficial, en general libre, y un acuífero profundo, semiconfinado por una formación de limos, espesa en el centro y que desaparece en los bordes (MOP, 1966, Custodio, Bayó y Peláez, 1971). Las superficies piezométricas de estos dos acuíferos vienen representadas en las figuras 8.97 y 8.98 (MOP, 1971; Custodio y otros).

La superficie piezométrica del acuífero superior no corta en ningún momento a la superficie del terreno excepto junto al tramo final del río. En el valle existe un flujo aguas abajo con recarga local procedente de infiltración del río (está suspendido sobre el acuífero pues su fondo está parcialmente colmatado) y de los riegos. En la margen derecha del delta existe un domo de agua (originado en recarga local por riegos, infiltración de canales y pozos de vertido de aguas residuales) que se distribuye radialmente; una parte de esta agua

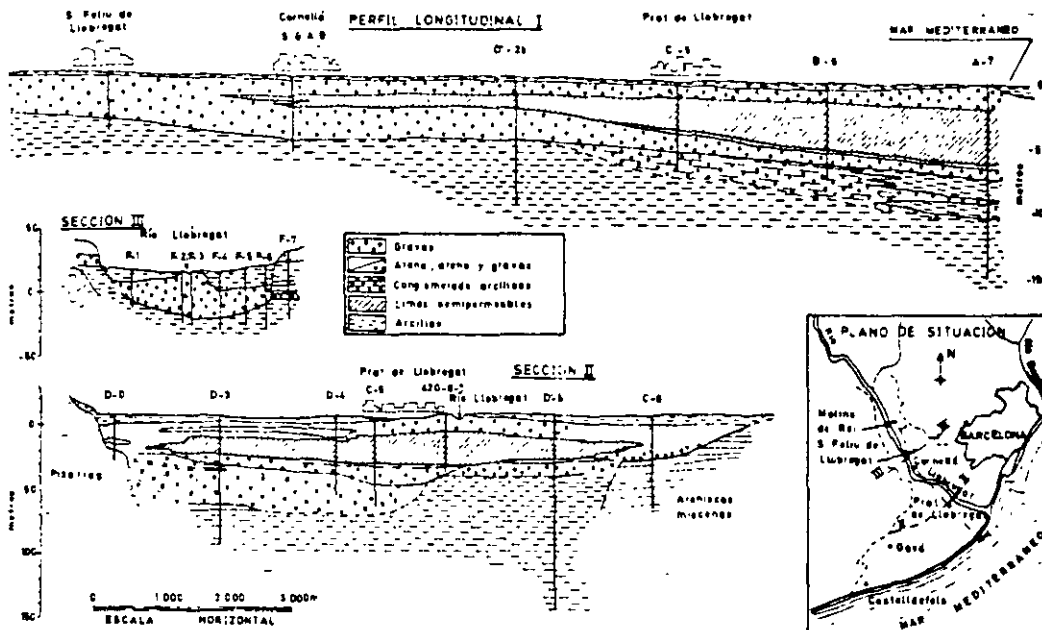


FIGURA 8.96

Perfiles geológicos típicos del delta y Valle Bajo del Llobregat (Según Bayó y Custodio).

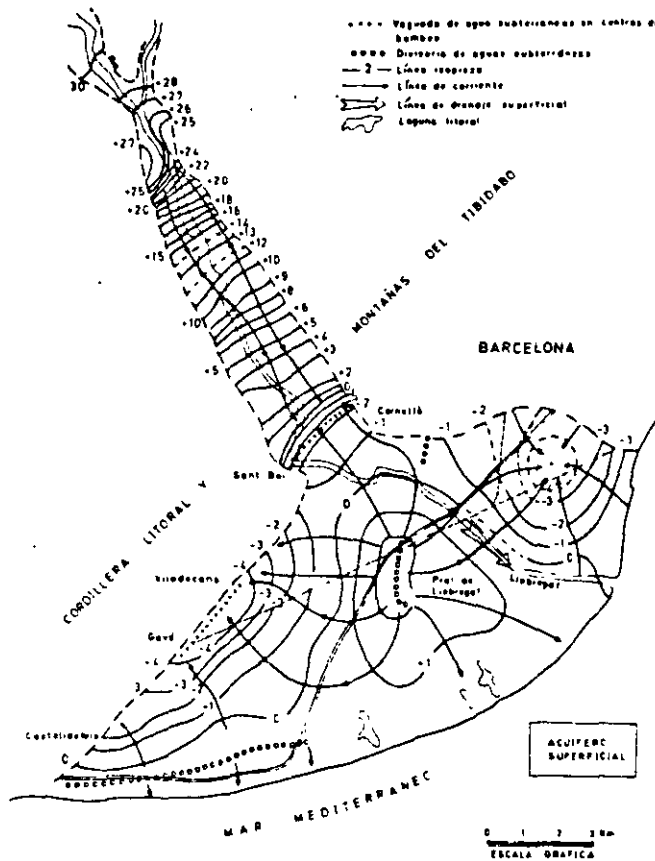


FIGURA 8.97

Superficie piezométrica del Valle Bajo y del acuífero superficial del delta, en el río Llobregat, en julio de 1970 (Custodio, Galofré e Iglesia).

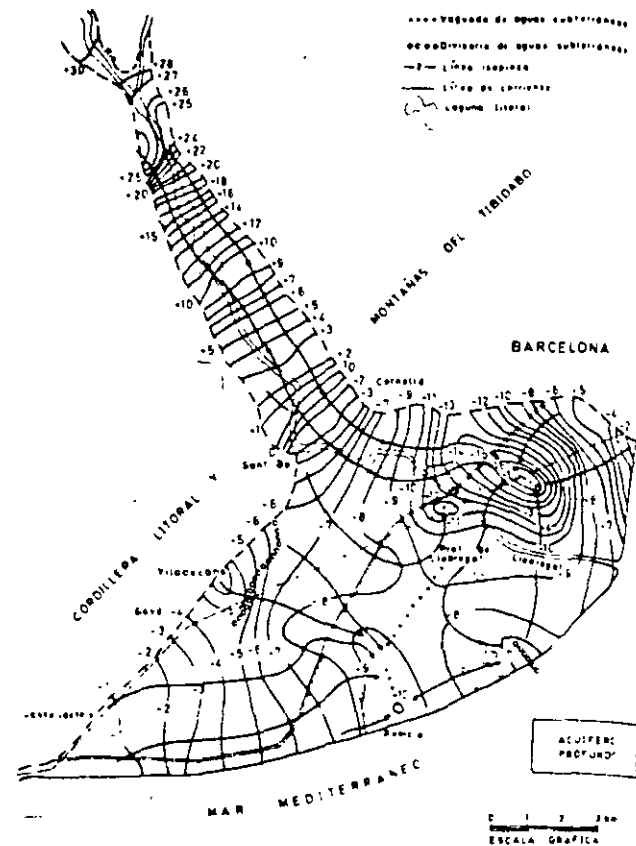


FIGURA 8.98

Superficie piezométrica del Valle Bajo y del acuífero profundo (semiconfinado) del delta, en el río Llobregat, en julio de 1970 (Custodio, Galofré e Iglesia).

va a parar al mar, otra parte es drenada por el río, otra parte fluye hacia los centros de bombeo en la zona de Gavá-Viladecans y una pequeña última parte se dirige hacia el estrecho de Cornellá, para allí recargar el acuífero profundo o ser captado en los pozos allí existentes. Los intensos bombeos a lo largo del borde de Gavá-Viladecans, produce una depresión alargada que además explica la formación de una divisoria de aguas próxima al mar en una zona en que la lluvia recarga un cordón de dunas litorales.

Las lagunas litorales ayudan a deprimir el nivel freático cerca de la costa. En la margen izquierda existe una notable depresión creada por infiltración al acuífero profundo (casi no existe intercalación limosa) que

se recarga a partir de vertidos locales del río (recarga inducida) y del mar (intrusión marina en inicio).

La superficie piezométrica del acuífero profundo difiere de la del acuífero superficial excepto aguas arriba de Cornellá donde coinciden pues se trata de un único acuífero. En el acuífero profundo existen muy intensos bombeos concentrados en la margen izquierda (Puerto Franco) Prat de Llobregat, Gavá-Viladecans y Laguna de Remolar como lugares más importantes. Esto produce una notable depresión general de niveles, mucho más marcada en la margen izquierda, donde la transmisividad es menor. El agua necesaria para mantener el flujo hacia los pozos procede de infiltración del acuífero superficial, la cual es tanto mayor cuanto

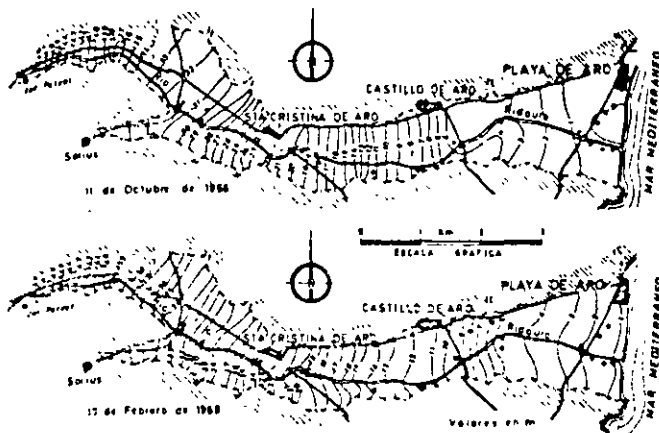


FIGURA 8.99

Superficie piezométrica del acuífero aluvial del Valle del río Rida (Costa Brava, Gerona) en dos fechas diferentes. Los puntos indican los pozos de bombeo más importantes. (Según Doménech y Llamas, 1969).

mayor es la permeabilidad vertical de los limos, menor su espesor y mayor la diferencia de niveles piezométricos; también se toma agua directamente del acuífero del valle a través del estrecho de Cornellá y del mar a través del extremo E.

Alrededor de la cota +25 m el ancho del relleno aluvial es muy pequeño y además allí existe una pequeña presa en la que se hicieron inyecciones de cemento; por ello el flujo de agua de otras unidades de aguas arriba es muy pequeño.

En la figura 8.99 se muestran las curvas isopiezas en dos épocas diferentes de un acuífero aluvial sencillo, con la parte próxima al mar semiconfinada. En las isopiezas de octubre, final de la temporada de verano, se aprecia el efecto de las fuertes extracciones de las semanas anteriores.

La figura 8.100 es también un ejemplo de acuífero aluvial único y libre (cubeta de La Llagosta) a la que confluyen los valles con terrenos aluviales de varios afluentes del río principal. Se indican las principales áreas de bombeo y se aprecia como éstas disminuyen el flujo circulante aguas abajo, indicado por la mayor separación entre las isopiezas. Se puede ver también la disminución de la separación entre las isopiezas en los estrechamientos y el efecto de una galería transversal y de un paso de tubería en sifón con refuerzos (reduce el espesor útil de gravas) en el estrecho inferior (MOP, 1971, b).

En la figura 8.101 se muestran las isopiezas en un macizo calcáreo costero limitando con formaciones miocénicas (geología no señalada). Se aprecia el drenaje realizado por los barrancos y los pozos en ellos estable-

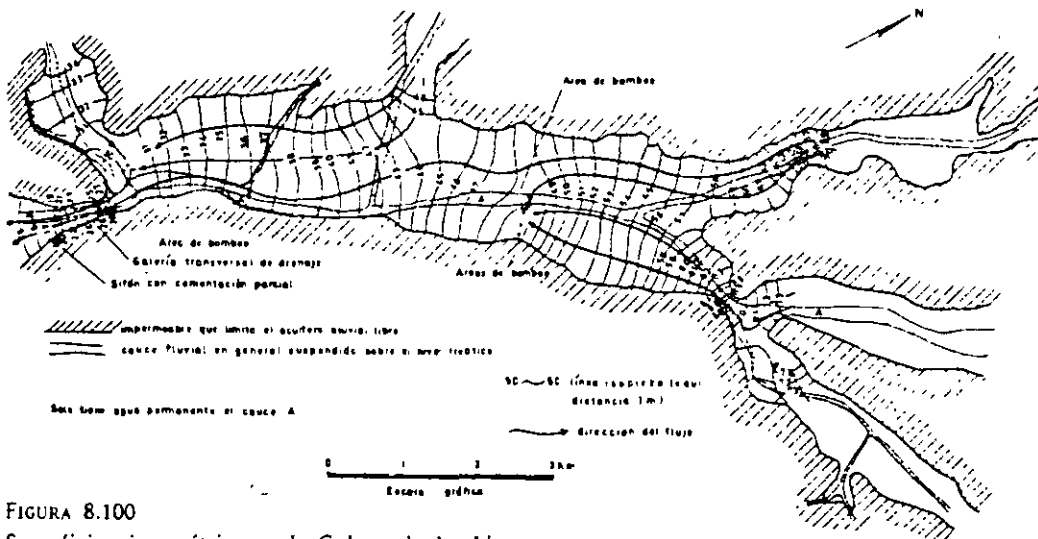


FIGURA 8.100

Superficie piezométrica en la Cubeta de La Llagosta (río Besòs, cerca de Barcelona) en el verano de 1970. La gran concentración de líneas de corriente en la zona próxima a la salida es debido a que allí el espesor de gravas es grande comparado con el resto del perfil.

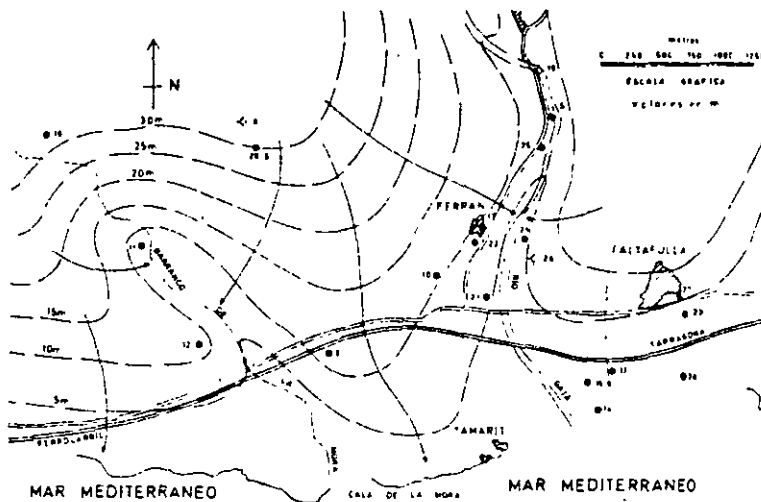


FIGURA 8.101

Isopiezas tentativas en la parte costera del macizo calcáreo de Gaià (Tarragona) en 1970 (Según Torrents y Del Pozo, 1970).

cidos; el agua drenada no llega en general al río pues o se evapora antes o es absorbida por el relleno cuaternario.

7.7 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE SUPERFICIES PIEZOMÉTRICAS

El análisis cuantitativo de superficies piezométricas se basa en la aplicación de la ley de Darcy cuando puede admitirse que ésta es válida y que el medio puede suponerse de permeabilidad isótropa.

El flujo que atraviesa la línea AB (fig. 8.102) vale $q = k \cdot AB \cdot i$ siendo k la permeabilidad e i el gradiente piezométrico. Se supone que k e i no varían a lo largo de AB; si así fuese se divide el segmento en porciones y en cada uno de ellos se determina el caudal que la cruza; el caudal total es la suma de caudales parciales.

El gradiente piezométrico en zonas de variaciones suaves puede determinarse a partir de las isopiezas antecedente y siguiente. Si h_i es el potencial correspondiente a la isopieza sobre la que se quiere determinar el gradiente

$$i = \frac{h_{i-1} - h_{i+1}}{CD}$$

siendo CD la distancia (en las mismas unidades que h) entre esas dos isopiezas. Puede determinarse con un poco más de precisión dibujando el perfil piezométrico a lo largo de una línea de corriente que corta en un punto central al segmento AB y trazando la tangente a la misma en el punto de nivel correspondiente a la isopieza considerada.

Debe tenerse en cuenta que lo expresado se refiere a flujo horizontal. Para el cálculo de i debe evitarse que entre h_{i-1} y h_{i+1} existan recargas o drenajes importantes.

Si en una superficie piezométrica estacionaria se consideran dos líneas contiguas perpendiculares a las líneas isopiezas, en ausencia de recarga y descarga son líneas de corriente y el flujo entre ellas es constante. Si hay recarga o descarga el flujo entre las mismas varía en esas cantidades pero no hay intercambio con los tubos enmarcados por las líneas contiguas. Sea la malla ABCD de superficie S_i (fig. 8.103). El balance en la misma establece que:

$$\begin{aligned} \text{entrada por AB} - \text{salida por CD} &= \\ = \text{descarga en } S_i - \text{recarga en } S_i \end{aligned}$$

o sea:

$$T_i \cdot AB \cdot i_i - T_{i+1} \cdot CD \cdot i_{i+1} = q \cdot S_i$$

en la que

T_i = transmisividad media a lo largo de AB

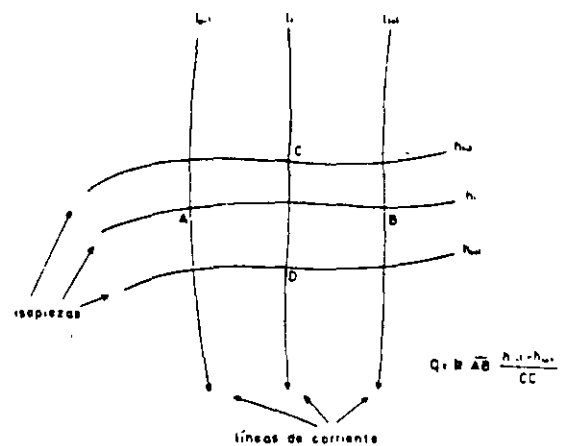


FIGURA 8.102

Cálculo del flujo que atraviesa AB o que circula por el tubo $l_{i-1} - l_{i+1}$ en ausencia de recarga.

T_{i+1} = transmisividad media a lo largo de CD
 i_i = gradiente a lo largo de AB
 i_{i+1} = gradiente a lo largo de CD
 q = caudal neto saliente (salidas-entradas, negativo si es entrante) por unidad de superficie en la superficie ABCD.

Esta simple ecuación permite calcular cómo varía T en el acuífero conociendo el valor en un punto cuando no hay recarga ni descarga o se conoce en el acuífero el valor de las mismas en cada zona. Si se conoce T en cada punto del acuífero es posible calcular la recarga o la descarga neta a partir de una superficie piezométrica, siempre y cuando la variación de la misma en el tiempo sea lenta y pequeña.

En un acuífero de ancho constante l con $q = 0$, en dos puntos A y B debe cumplirse que

$$T_A i_A = T_B i_B$$

y si la transmisibilidad es constante, debe ser $i_A = i_B$.

Si el acuífero es de bordes divergentes en el sentido del flujo (fig. 8.104) debe cumplirse si $q = 0$:

$$l_A T_A \cdot i_A = l_B T_B \cdot i_B$$

o aproximadamente

$$l'_A \cdot T_A \cdot i_A = l'_B \cdot T_B \cdot i_B$$

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{l'_B}{l'_A} \cdot \frac{i_B}{i_A}$$

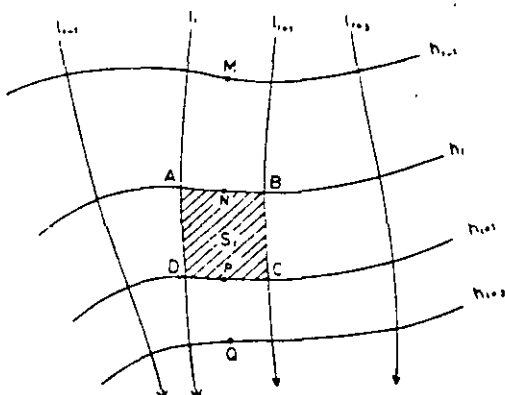


FIGURA 8.103

Esquema de aplicación del método del balance.
Las líneas h son isopiezas y las l , líneas de corriente.

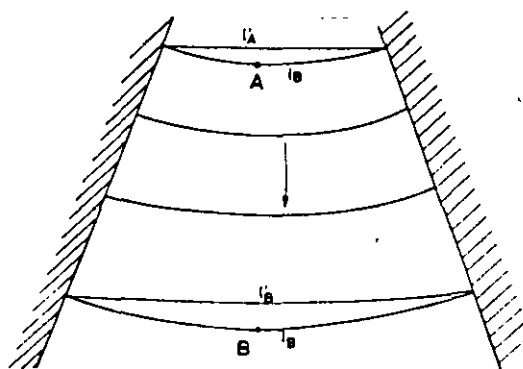


FIGURA 8.104

Esquema de un acuífero que diverge en el sentido del flujo.

Ejemplo 2

En la superficie piezométrica de la figura 8.105, que representa un acuífero recargado y drenado por un río y con un borde impermeable, se sabe que a lo largo de la curva isopieza + 40 m el espesor saturado es de 5.50 m y que a lo largo de la curva isopieza + 30 m el espesor saturado es de 11,5 m. Se sabe además que la permeabilidad a lo largo de la curva isopieza + 40, la permeabilidad media es de 200 m/día. Calcular la permeabilidad media a lo largo de la curva isopieza + 30, la transmisividad media a lo largo de la curva isopieza + 37 y el caudal medio recargado por el río en el tramo AB. Se supone que existe un aporte constante de agua de riego y lluvia de 100 mm/año.

Las líneas de flujo que parten de los puntos A y B sobre el río definen un tubo de flujo cuyo ancho es de:

850 m en la curva + 40

800 m en la curva + 37

320 m en la curva + 30

Las superficies son (planimetrando)

770 000 m² entre las curvas + 40 y + 30

264 000 m² entre las curvas + 40 y + 37

Los gradientes medios son:

$$i \approx \frac{2}{200} = 0,01 \quad \text{en la curva de + 40}$$

$$i \approx \frac{2}{250} \approx 0,008 \quad \text{en la curva de + 37}$$

$$i \approx \frac{2}{350} = 0,0057 \quad \text{en la curva de + 30}$$

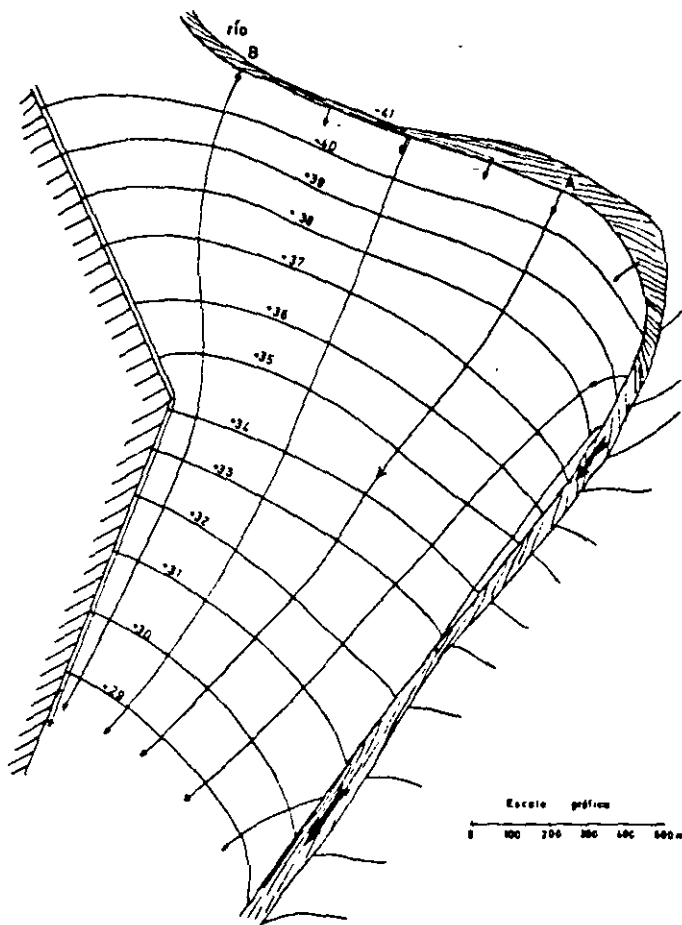


FIGURA 8.105
Superficie piezométrica con un borde impermeable y un río. Corresponde al ejemplo 2.

Entre la curva de +40 y de +30 puede establecerse:

$$850 \text{ m} \cdot 200 \text{ m/día} \cdot 5,5 \text{ m} \cdot 0,01 = 320 \text{ m} \cdot k \cdot 11,5 \text{ m} \cdot 0,0057 = -\frac{0,1}{365} \text{ m/día} \cdot 770\,000 \text{ m}^2$$

$$k = 456 \text{ m/día sobre la curva de +30}$$

Entre la curva de +40 y de +37 puede establecerse

$$850 \text{ m} \cdot 200 \text{ m/día} \cdot 5,5 \text{ m} \cdot 0,01 = 800 \cdot T \cdot 0,008 = -\frac{0,1}{365} \text{ m/día} \cdot 264\,000 \text{ m}^2$$

$$T = 1472 \text{ m}^2/\text{día}$$

El río aporta entre A y B el agua que atraviesa la curva de +40, ya que el aporte por infiltración de lluvia y riego es muy pequeño por la reducida superficie de recarga.

$$Q = 850 \text{ m} \cdot 200 \text{ m/día} \cdot 5,5 \text{ m} \cdot 0,01 = 9350 \text{ m}^3/\text{día}$$

7.8 MÉTODO DEL BALANCE PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA Y DE LA POROSIDAD EFICAZ

Si en un acuífero se tienen variaciones de altura en la superficie piezométrica pero sin que la forma general de las isopiezas se altere notablemente, o lo que es lo mismo, que las líneas de corriente apenas modifican su posición, es posible entonces realizar un balance temporal. Sea la figura 8.106 que representa una porción de acuífero entre dos líneas de corriente cuya posición varía poco en el tiempo y entre dos líneas isopiezas cuya forma varía también poco en el tiempo aunque varíen sus valores. Si T , i y l son respectivamente la transmisividad, gradiente y ancho entre dos líneas de flujo, indicando el subíndice e, entrada y el s, salida es:

$$\text{entrada} - \text{salida} + \text{aportaciones} = \text{incremento de almacenamiento}$$

Efectuando el balance entre el tiempo t_1 y el tiempo t_2 y llamado W a la recarga por unidad de superficie en

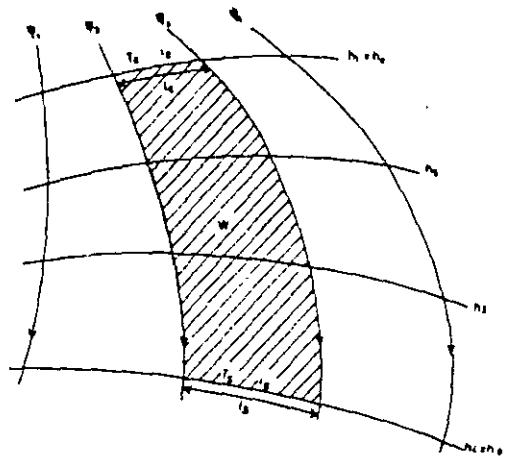


FIGURA 8.106
Esquema para establecer el balance temporal en una superficie piezométrica de altura variable pero de forma constante.

altura de agua por unidad de tiempo, B el bombeo en volumen por unidad de tiempo y S el coeficiente de almacenamiento:

$$(I_c \cdot T_c \cdot i_c - I_s \cdot T_s \cdot i_s) (t_2 - t_1) + \\ + W \cdot A \cdot (t_2 - t_1) - \int_{t_1}^{t_2} B \cdot dt = A \cdot \Delta h \cdot S$$

siendo A el área del balance y Δh el incremento de altura piezométrica supuesta uniforme en toda la superficie.

En general las incógnitas son T_c , T_s , W y S que se pueden determinar si se plantean cuatro ecuaciones independientes. En general conviene manejar más ecuaciones para contrastar los errores que se cometen.

En ciertas circunstancias pueden obtenerse simplificaciones $W = 0$, si se trabaja en un período en que no hay recarga, pero deben tomarse precauciones en definir este período ya que el agua de lluvia o de riego puede tardar a veces algunas semanas o incluso meses en alcanzar el acuífero si éste es profundo.

$S = 0$ si se trata de un acuífero cautivo y entonces $W \approx 0$; si es $W \approx 0$ es que el acuífero es semiconfinado. Si $\Delta h = 0$, no existe segundo miembro y es más fácil calcular W.

Si el límite superior es una divisoria de aguas subterráneas fija puede prescindirse del término de entrada subterránea.

Se tiene aún poca experiencia sobre este método como método manual de análisis de superficies piezométricas, pero en algunos casos los errores parecen aceptables (Llamas, 1967).

Llamas y Custodio han aplicado el método de forma independiente al estudio del acuífero del valle bajo del río Llobregat (Barcelona) y los resultados son aceptables y encajan aceptablemente con los obtenidos con un modelo matemático (MOP, Cuenca y Custodio, 1971; Custodio, Cuenca y Bayó, 1971), que no es más que un análisis similar programado con mayor número de datos y efectuado balance en varias áreas contiguas Molist en MOP 1971, también ha obtenido resultados aceptables con el mismo método en la cubeta de La Llagosta, en el río Besós, próximo a Barcelona.

Ejemplo 3

En un acuífero aluvial se toman dos secciones separadas 1 km. En la sección de aguas arriba el ancho es de 150 m y en la de aguas abajo es de 250 m.

Se han trazado superficies piezométricas el 15 de junio, el 15 de julio y el 15 de septiembre encontrándose un descenso general de niveles freáticos de 0,5 m entre las dos primeras fechas y de 0,6 m entre las dos últimas. Los gradientes en el límite de agua arriba en esas fechas han sido 2‰, 2‰, 2,5‰, y en el límite de aguas abajo de 2,5‰, 2,5‰ y 3‰, respectivamente.

Se trata de una época seca, sin lluvias desde abril y con el río sin agua circulante. El bombeo es de 600 000 m³/mes y se usa para riego, estimándose que el 20 % del caudal vuelve al acuífero en el primer período y el 15 % en el segundo. Varios ensayos de bombeo realizados hacen suponer que la transmisibilidad es de 1000 m²/día en el límite de aguas arriba y de 800 m²/día en el límite de agua abajo, cuando el espesor saturado es de 20 m. El 15 de junio este espesor saturado era de 22 m. Calcular la porosidad eficaz del acuífero (coeficiente de almacenamiento). La ecuación del balance para el primer período es:

$$\left\{ \left[150 \text{ m} \frac{1000 \text{ m}^2/\text{día}}{20 \text{ m}} \left(22 - \frac{0,5}{2} \right) \text{ m} \cdot 0,002 \right] - \right. \\ \left. - \left[250 \text{ m} \frac{800 \text{ m}^2/\text{día}}{20 \text{ m}} \cdot \left(22 - \frac{0,5}{2} \right) \text{ m} \cdot 0,0025 \right] \right\} 30 \text{ días} - \\ - \frac{600\,000 \cdot 0,8 \text{ m}^3/\text{mes}}{30 \text{ días}/\text{mes}} = \\ = - 1000 \text{ m} \cdot \frac{250 + 150}{2} \text{ m} \cdot 0,5 \cdot S \\ S = 0,162$$

La ecuación del balance para el segundo período es:

$$\left\{ \left[150 \text{ m} \frac{1000 \text{ m}^2/\text{día}}{20 \text{ m}} \left(22 - \frac{0,6}{2} \right) \text{ m} \frac{2 + 2,5}{2 \cdot 1000} \right] - \right. \\ \left. - \left[250 \text{ m} \frac{800 \text{ m}^2/\text{día}}{20 \text{ m}} \left(22 - \frac{0,6}{2} \right) \text{ m} \frac{2,5 + 3}{2 \cdot 1000} \right] \right\} \times \\ \times 30 \text{ días} - \frac{600\,000 \cdot 0,85 \text{ m}^3/\text{mes}}{30 \text{ días}/\text{mes}} = \\ = 1000 \text{ m} \frac{250 + 150}{2} \text{ m} \cdot 0,6 \text{ m} \cdot S \\ S = 0,144$$

Los valores de S obtenidos en ambos períodos son relativamente similares y por lo tanto puede tomarse que S varía entre ellos. En el valor de S, lo que más influye en este caso son las extracciones.

7.9 MAPAS DERIVADOS DE LAS SUPERFICIES PIEZOMÉTRICAS

Comparando la superficie piezométrica (freática) con A se puede obtener B.

A	B
Superficie piezométrica (freática) en otra época	Mapa de variación de niveles; mapa de variación del volumen saturado en un acuífero libre
Superficie topográfica	Profundidad del nivel de agua o de la superficie freática si el acuífero es libre.
Mapa de la base del acuífero	Mapa de espesor saturado si el acuífero es libre

Los mapas de variación de nivel en acuíferos libres son especialmente interesantes para estudiar las variaciones totales del agua almacenada y puede poner de relieve ciertas particularidades del funcionamiento del acuífero. En la figura 8.107 se muestra el plano de variación de niveles correspondientes a las dos superficies piezométricas de la figura 8.99, puede apreciarse un ascenso general de niveles excepto en una pequeña área en la que se produce un descenso quizás debido a una intensificación del bombeo. Los ascensos mayores corresponden a una zona de notables bombeos veraniegos, que en invierno cesan; la variación de nivel supone sólo

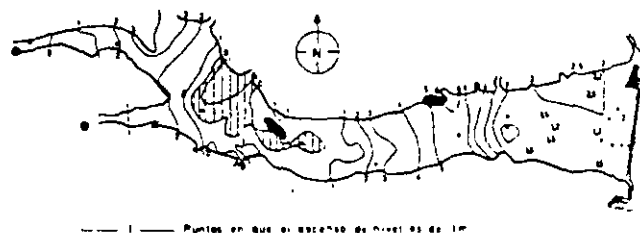


FIGURA 8.107

Plano de curvas de igual variación de nivel correspondiente a las superficies piezométricas de la figura 8.99. Las zonas rayadas son de descenso de nivel y las no rayadas son de ascenso de nivel.

un pequeño aumento de reserva puesto que en esa zona el acuífero estudiado es semiconfinado.

Los mapas de máxima variación de nivel tienen interés para el proyecto de pozos. Los planes de espesor saturado máximo pueden condicionar la ubicación de captaciones permanentes en un acuífero libre.

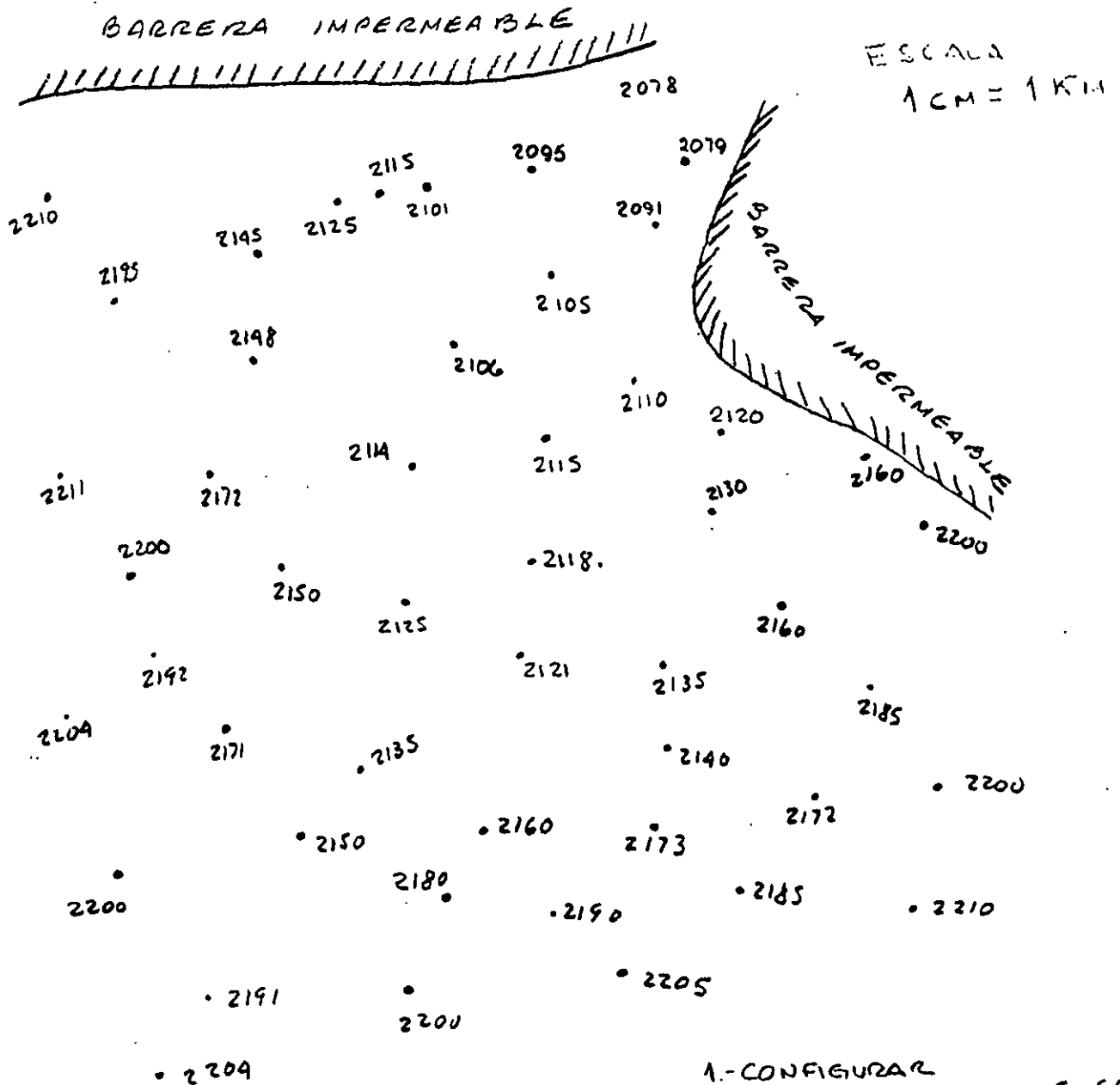
El trazado de estos mapas se facilita en gran medida si se tienen sobre papel transparente los dos planos base y se determinan las cotas diferenciales en los puntos de intersección de las isopiezas entre sí o con las cotas de nivel, estos puntos sirven para trazar directamente las nuevas curvas (isolíneas) que deben pasar por ellos. En algunas zonas puede ser necesario determinar puntos adicionales por trazado de curvas intermedias.

CUANTIFICACION DEL FLUJO SUBTERRANEO

EXPLICACION

• P020

2220 - ELEVACION DEL NIVEL ESTADICO EN M.S.N.M.

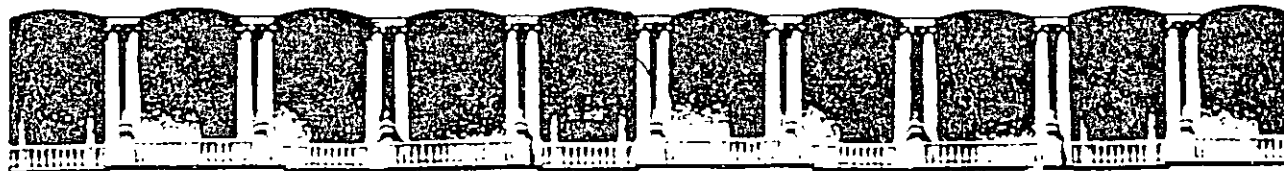


$$Es + I = Ss + Ex \pm \Delta S$$

$$\text{EXTRACCION} = 4.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\Delta S = 0$$

- 1.- CONFIGURAR
- 2.- MARCAR LINEAS DE CORRIE Y CELOS
- 3.- CALCULAR ENTRADAS Y SALIDAS SUBTERRANEAS
 $Q = T \Delta h$; $T = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sag}$
- 4.- ESTABLECER ECUACION DE BALANCE VOLUMETRICO



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.

GEOHIDROLOGÍA

Geología del Agua Subterránea. Complemento

Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.

ADAPTADO PARA EL CURSO DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS, 1998

CAPITULO 2.- GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA

POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

2.1.- ROCAS Y ACUIFEROS DE LA CIUDAD DE MEXICO

La corteza terrestre se encuentra formada por diferentes rocas y materiales que varían en su capacidad geohidrológica. Mientras que algunas tienen porosidad y permeabilidad, permitiendo el paso del agua, otras se presentan compactas e impermeables.

En la zona metropolitana de la Ciudad de México, se agruparon los diferentes tipos de rocas y/o materiales en relación a su composición y a sus características geohidrológicas en: rocas fracturadas y piroclásticos; materiales granulares; rocas impermeables; materiales impermeables y; materiales semipermeables. A continuación se describen estas unidades.

2.1.1.- ROCAS FRACTURADAS Y PIROCLASTICOS

El tipo de *roca fracturada* existente en el área de estudio corresponde a los *basaltos*. Estos, son el producto de erupciones volcánicas. Existen centros eruptivos alrededor de la Ciudad de México, que estuvieron activos en épocas recientes, dando origen a acumulaciones de rocas que actualmente forman la Sierra del Chichinautzin, la Sierra de Santa Catarina y el Cerro de La Estrella.

A partir de dichos centros eruptivos, fueron eyectadas corrientes de lavas de composición basáltica, muchas de las cuales forman los flancos de los volcánes. Algunas de dichas coladas de lava se extendieron hacia el Valle de México, en donde actualmente se encuentran formando el acuífero y están cubiertas por las arcillas de los antiguos lagos.

Las coladas de basalto, al enfriarse, se enjutan provocando el fracturamiento de la roca, lo que ocasiona que permitan fácilmente la infiltración, circulación y almacenamiento de agua.

compactarse forman las *tobas*. Fragmentos de mayor tamaño y que son importantes para el caso que nos ocupa son los denominados *tezontles*. Estos, corresponden en esencia a la misma roca basáltica que, en el momento de ser eyectada, incluye abundantes gases. Ello, hace que el basalto presente una textura de apariencia de esponja. En ocasiones se define al *tezontle* como la espuma del basalto. Es común que, durante las erupciones volcánicas de tipo explosivo, los fragmentos de la lava basáltica sean lanzados al aire, acumulándose sobre los flancos de los conos volcánicos. Los tezontles asociados con las lavas fracturadas, presentan una alta permeabilidad y permiten la fácil infiltración y circulación del agua en el subsuelo.

2.1.2.- MATERIALES GRANULARES

Como su nombre lo indica, los *materiales granulares* corresponden a fragmentos de rocas que semejan granos, los cuales se clasifican de acuerdo a su tamaño. Se originan por la erosión y transporte de rocas que forman elevaciones topográficas. El principal agente erosivo lo constituyen las corrientes superficiales, las cuales mueven o transportan los fragmentos de roca de las partes altas de las sierras hacia las porciones bajas, donde son acumulados o depositados. Durante su trayecto, los fragmentos son redondeados obteniendo la apariencia de granos. El tamaño de estos puede variar desde fracciones de milímetro hasta varios centímetros. Los materiales granulares más finos (con diámetros menores de 1/16 mm) se conocen con el nombre de *arcillas y limos*. Los materiales granulares de mayor tamaño (entre 1/16 y 2 milímetros) se denominan *arenas*; tamaños mayores de 2 milímetros se denominan *gravas y cantos rodados*.

Al encontrarse sueltos los granos se denominan "materiales"; cuando se encuentran consolidados reciben el nombre de "roca".

Los materiales granulares finos (arcillas y limos) presentan una baja permeabilidad y se clasifican como impermeables al flujo subterráneo. Por lo que respecta a las arenas y gravas, éstas presentan permeabilidades altas y constituyen buenos acuíferos. Generalmente las arenas y gravas incluyen cierto porcentaje de arcilla; su permeabilidad esta en relación a la mezcla resultante.

2.1.3.- ROCAS IMPERMEABLES

ROCA QUE IMPIDE EL PASO DE AGUA A TRAVES DE ELLA.

Cuando las rocas se presentan densas y sin fracturamiento, impiden el flujo de agua a través de ellas lo cual hace que se comporten como *impermeables*. En la zona metropolitana de la Ciudad de México solo en algunas porciones aisladas se encuentran rocas de este tipo, como en la Sierra de Guadalupe y en algunos sitios de la Sierra Nevada.

2.1.4.- MATERIALES IMPERMEABLES

MATERIAL QUE IMPIDE EL FLUJO DE AGUA A TRAVES DE EL.

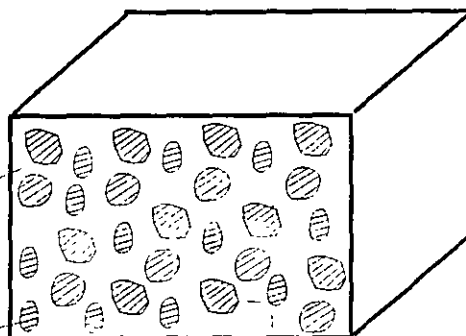
Conforme se mencionó en párrafos anteriores se hace la distinción entre roca (cuerpo de material compacto) y materiales, siendo estos últimos los constituidos por fragmentos no consolidados:

Cuando estos materiales son de tipo arcilloso, como es el caso de los antiguos sedimentos lacustres arcillosos de los lagos de México, entonces presentan una baja permeabilidad y pueden clasificarse como impermeables; en ciertas zonas, su permeabilidad puede llegar a permitir el paso de reducida cantidad de agua y se clasifican como materiales semipermeables (ver inciso siguiente).

Las arcillas están constituidas por fragmentos de tamaños menores de $1/256$ mm. El agua que satura a estos materiales, en su mayor parte es retenida por atracción molecular hacia cada uno de los granos de arcilla, como se ilustra en la figura No. 2.1 y solamente un porcentaje muy reducido de agua circula a través de ellas. Por ello, en general las arcillas se consideran como material impermeable, especialmente para propósitos prácticos, ya que los pozos perforados en estos materiales rinden caudales de agua muy reducidos, generalmente menores de 1 lps.

ESPACIOS POROSOS
50% DEL VOLUMEN
TOTAL

GRANOS DE ARCILLA
50% DEL VOLUMEN
TOTAL



ESPACIOS POR
DONDE PUEDE
CIRCULAR EL AGUA
EN EL ACUÍFERO

AGUA PELICULAR
ADHEPIDA POR
RETENCION
MOLECULAR

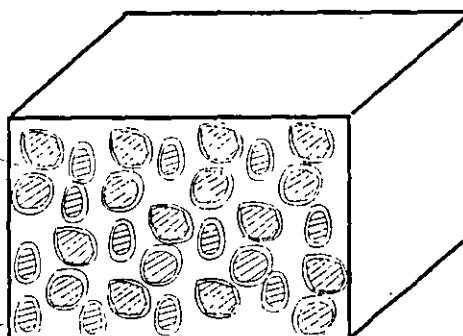


FIGURA 2.1 - RETENCION DE AGUA PELICULAR

2.1.5.- MATERIALES SEMIPERMEABLES

MATERIAL QUE PERMITE EL PASO DE REDUCIDA CANTIDAD DE AGUA.

Cuando los materiales granulares consisten en una mezcla de arcillas y arenas, los espacios libres entre granos permiten la circulación de cierta (aunque reducida) cantidad de agua, ocasionando que la permeabilidad del material sea mayor que en las arcillas pero menor que en las arenas.

2.1.6.- ACUIFERO

Se denomina *acuífero* a un cuerpo de roca que se encuentra saturado y presenta una permeabilidad tal que permite la circulación de agua en cantidades económicamente significativas y que puede ser explotada a través de pozos. Existen diferentes acuíferos entre los cuales destacan los siguientes: *acuífero libre*; es aquel en el que la superficie de nivel estático se encuentra a la presión atmosférica. *Acuífero confinado*; es aquel que se encuentra sujeto a una presión, generalmente ocasionada por el encajonamiento de agua entre dos cuerpos impermeables. *Acuífero colgado*; es aquel que circula sobre una capa impermeable localizada arriba del nivel estático de un acuífero regional.

Acuífero semiconfinado, es aquel que se encuentra cubierto por un material semipermeable (figura 2.2).

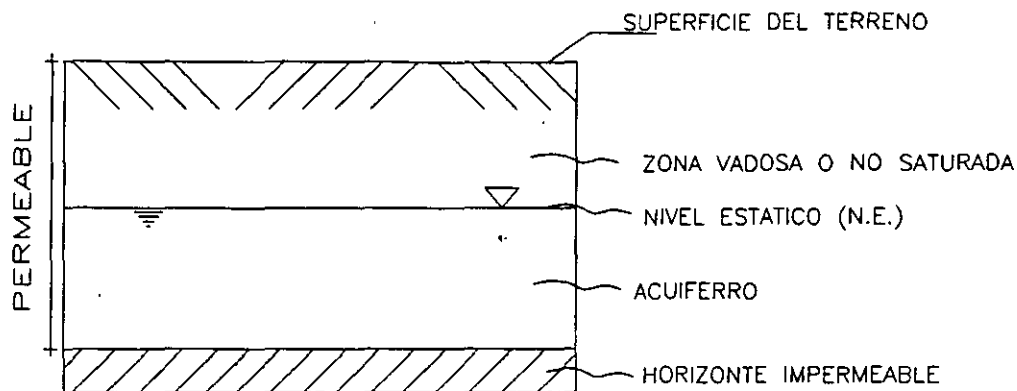
2.1.6.- ACUITARDO

Es una capa que retiene pero no evita el flujo del agua hacia un acuífero adyacente. El acuitardo no permite un paso rápido del flujo del agua pero puede servir como una zona de alta capacidad de almacenamiento.

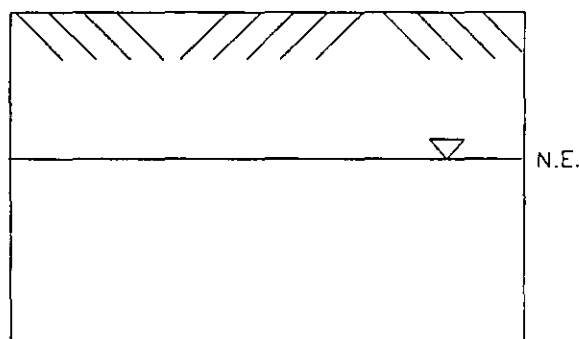
2.2.- FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUIFEROS

2.2.1.- CICLO HIDROLOGICO

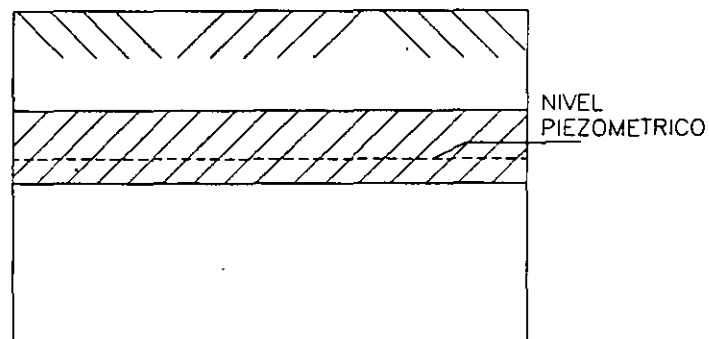
En la corteza terrestre el agua en su gran mayoría se encuentra formando parte del ciclo hidrológico.



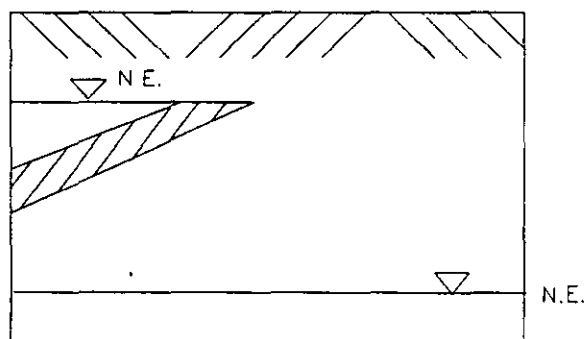
ACUIFERO LIBRE



ACUIFERO CONFINADO



ACUIFERO COLGADO



ACUIFERO SEMICONFINADO

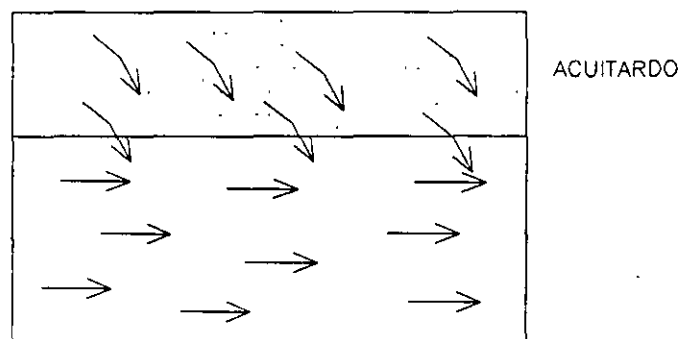


FIGURA 2.2

TIPOS DE ACUIFEROS

El agua de lluvia que se precipita sobre los continentes tiene tres caminos a seguir: Evaporarse para formar las nubes; escurrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar e; infiltrarse en el subsuelo para formar acuíferos. Esta agua infiltrada posteriormente es drenada por corrientes superficiales o aflora en forma de manantiales, para evaporarse o seguir su camino al mar donde también parte de ésta se evapora y continua en su ciclo natural conforme se ilustra en la figura No. 2.3. Las aguas que no se encuentran en movimiento dentro del ciclo hidrológico se caracterizan por incrementar su contenido salino y se conocen como aguas fósiles; la proporción de agua fósil respecto a agua dentro del ciclo hidrológico es sumamente baja.

El agua subterránea que forma los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, donde parte de esta al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. El agua infiltrada, en ocasiones pasa por zonas cercanas a cámaras magmáticas donde incrementa su temperatura o puede permanecer atrapada entre sedimentos en forma de agua fósil.

2.2.2.- DISTRIBUCION DEL AGUA EN EL SUBSUELO

La distribución del agua en el subsuelo se ilustra en la figura 2.4, donde se muestra el límite de la zona saturada que se denomina nivel estático. La porción que se encuentra bajo el nivel estático en la roca saturada se denomina acuífero. La zona no saturada que corresponde a la porción entre la superficie del terreno y el nivel estático recibe también el nombre de zona vadosa. Cuando los acuíferos corresponden a materiales granulares, en los pozos se produce un efecto de capilaridad que permite la ascensión del agua, dando origen a una zona denominada de aguas capilares.

2.2.3.- ZONAS DE RECARGA

Las porciones permeables ubicadas topográficamente altas, permiten la infiltración y circulación de agua hacia los acuíferos. Estas áreas son las principales zonas de recarga. En los valles también se infiltra y recarga agua al acuífero, en la Ciudad de México, las áreas cubiertas impiden o limitan la recarga en el valle.

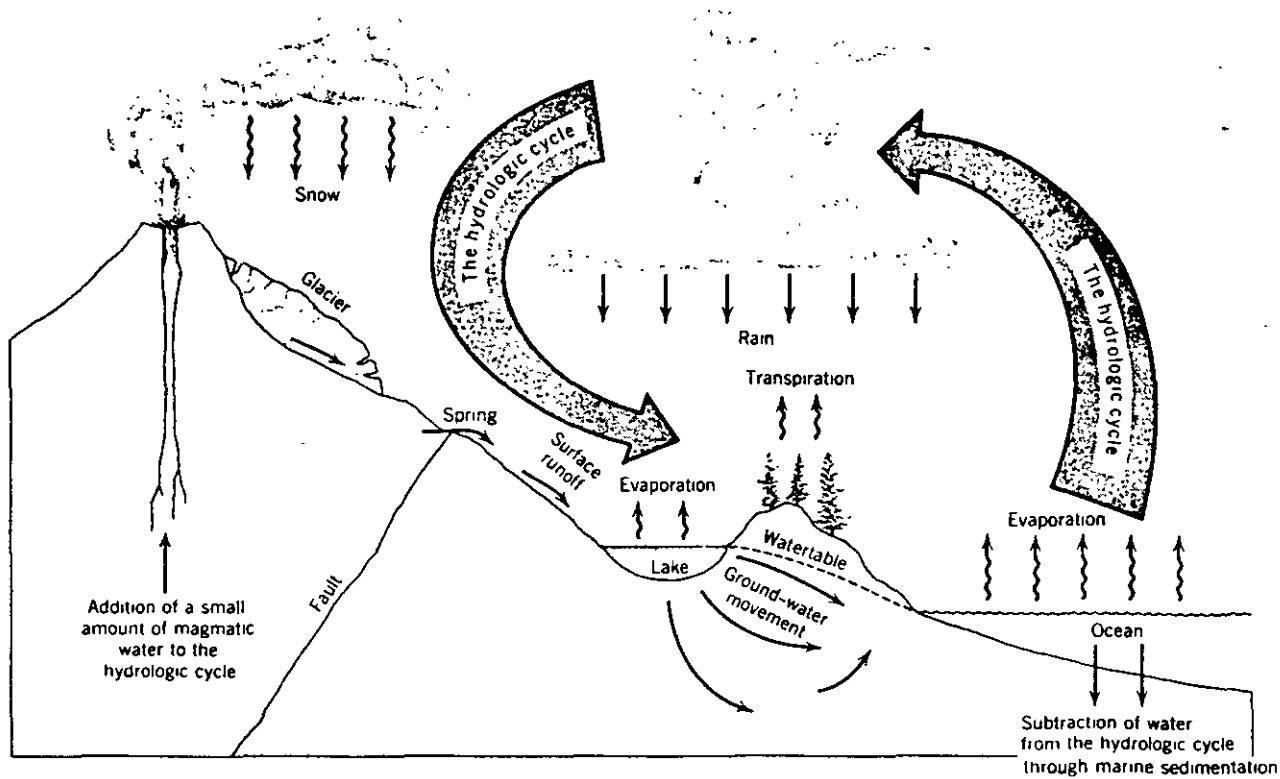
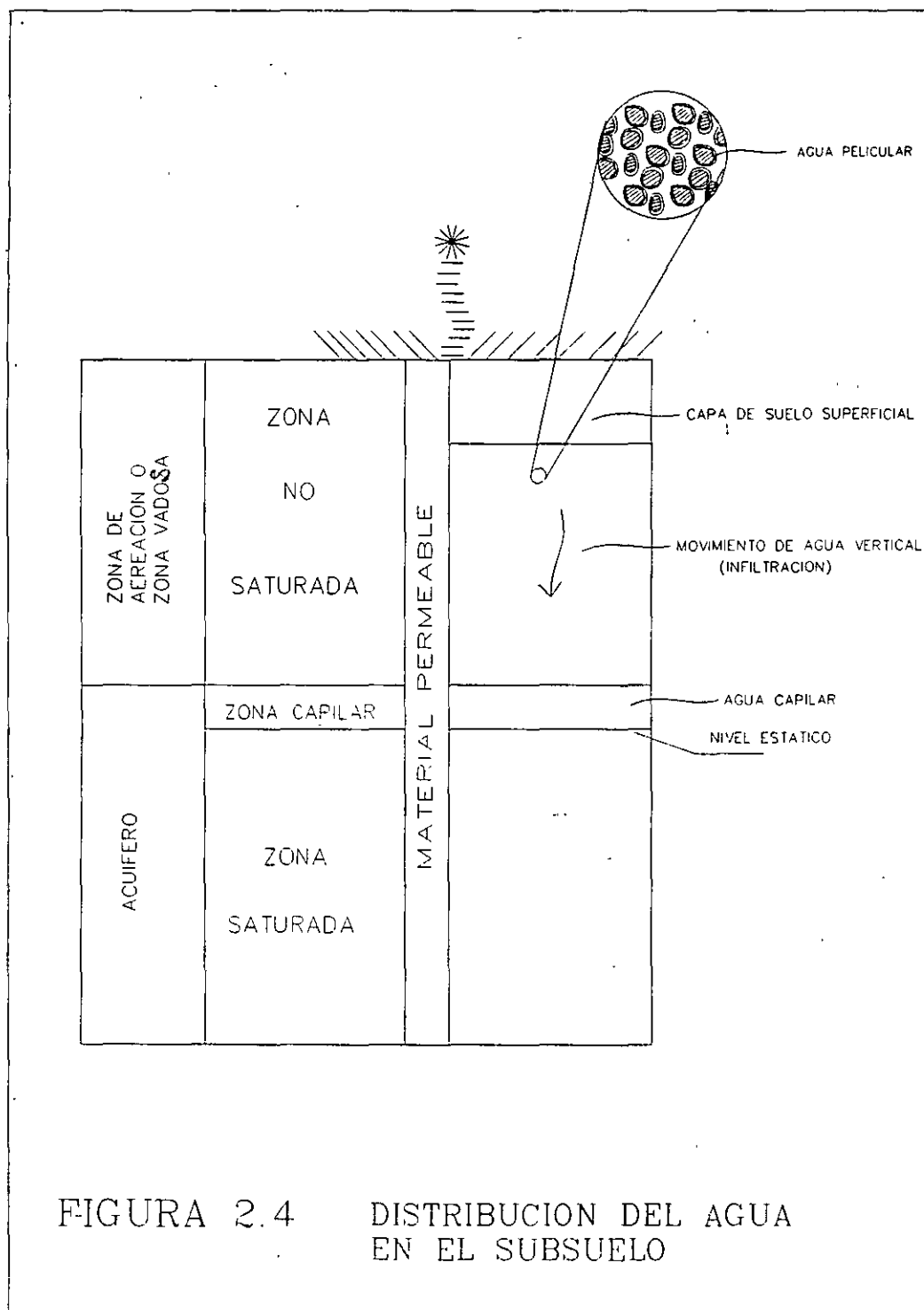


Figure 23 The hydrologic cycle.



Los acuíferos son recargados en forma prácticamente continua y principalmente en las épocas de lluvia.

2.2.4.- ZONAS DE DESCARGA

La salida o descarga natural del agua de los acuíferos, se realiza en forma natural a través de manantiales, así como o del drenado por medio de ríos. Actualmente, la salida del agua de la mayor mayor parte de los acuíferos, se realiza mediante la extracción por el bombeo de pozos.

2.2.5.- PERMEABILIDAD

Dentro de los conceptos fundamentales de las características de las rocas que forman acuíferos, se encuentra el concepto de *permeabilidad*, el cual es la propiedad de un medio poroso o fracturado para permitir el paso de un fluido. Se define como el flujo de agua por unidad de tiempo que cruza una sección unitaria bajo un gradiente también unitario. Se expresa en metros por segundo.

En la tabla No. 2.1 se muestran valores de permeabilidad para diferentes materiales, haciéndose notar que en la Ciudad de México las arcillas tienen una permeabilidad del orden entre 10^{-7} y 10^{-9} m/seg, los materiales granulares 1×10^{-3} m/seg y, los basaltos 5×10^{-2} m/seg

2.2.6.- TRANSMISIBILIDAD

La *transmisibilidad* es otra forma de expresar la facilidad con que puede circular el agua en un acuífero. Se define como la cantidad de agua que puede fluir a través de una sección unitaria bajo un gradiente unitario y un tiempo instantáneo. En la figura No. 2.5 se muestra la diferencia entre la transmisibilidad y la permeabilidad, siendo la transmisibilidad la descarga que ocurre a través de un segmento unitario respecto a la anchura pero una altura (b) que equivale al espesor del acuífero, mientras que la permeabilidad corresponde a una descarga que ocurre a través de una sección unitaria y, para ambos casos, bajo un gradiente hidráulico unitario.

Table 2. Range of Values of Hydraulic Conductivity and Permeability

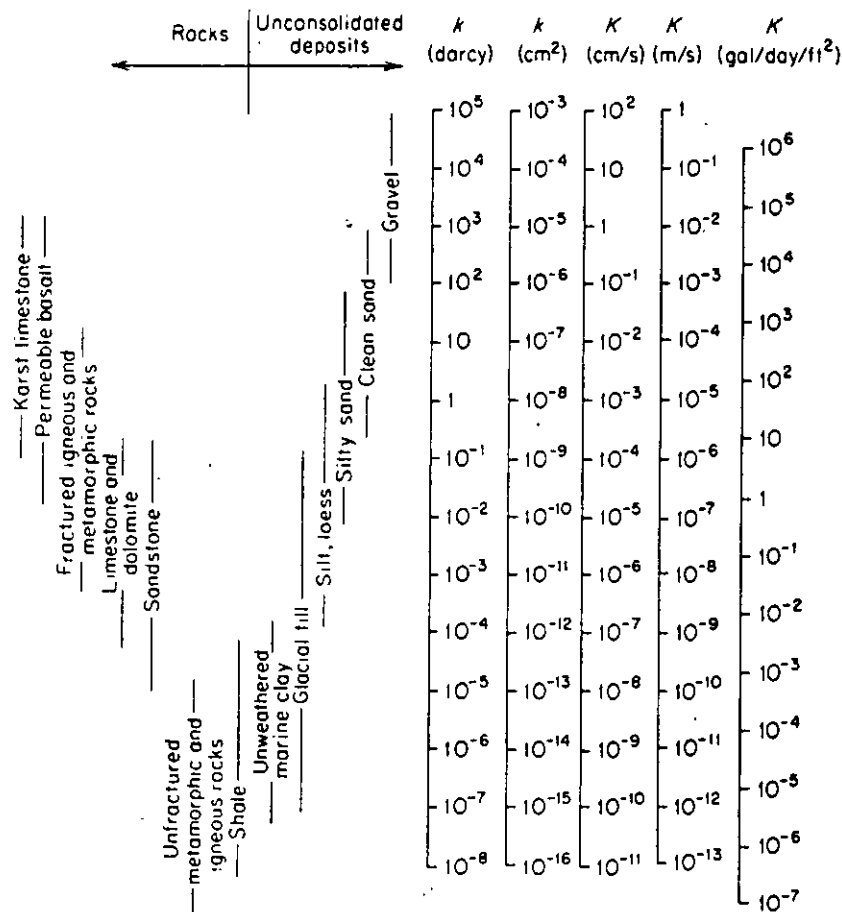
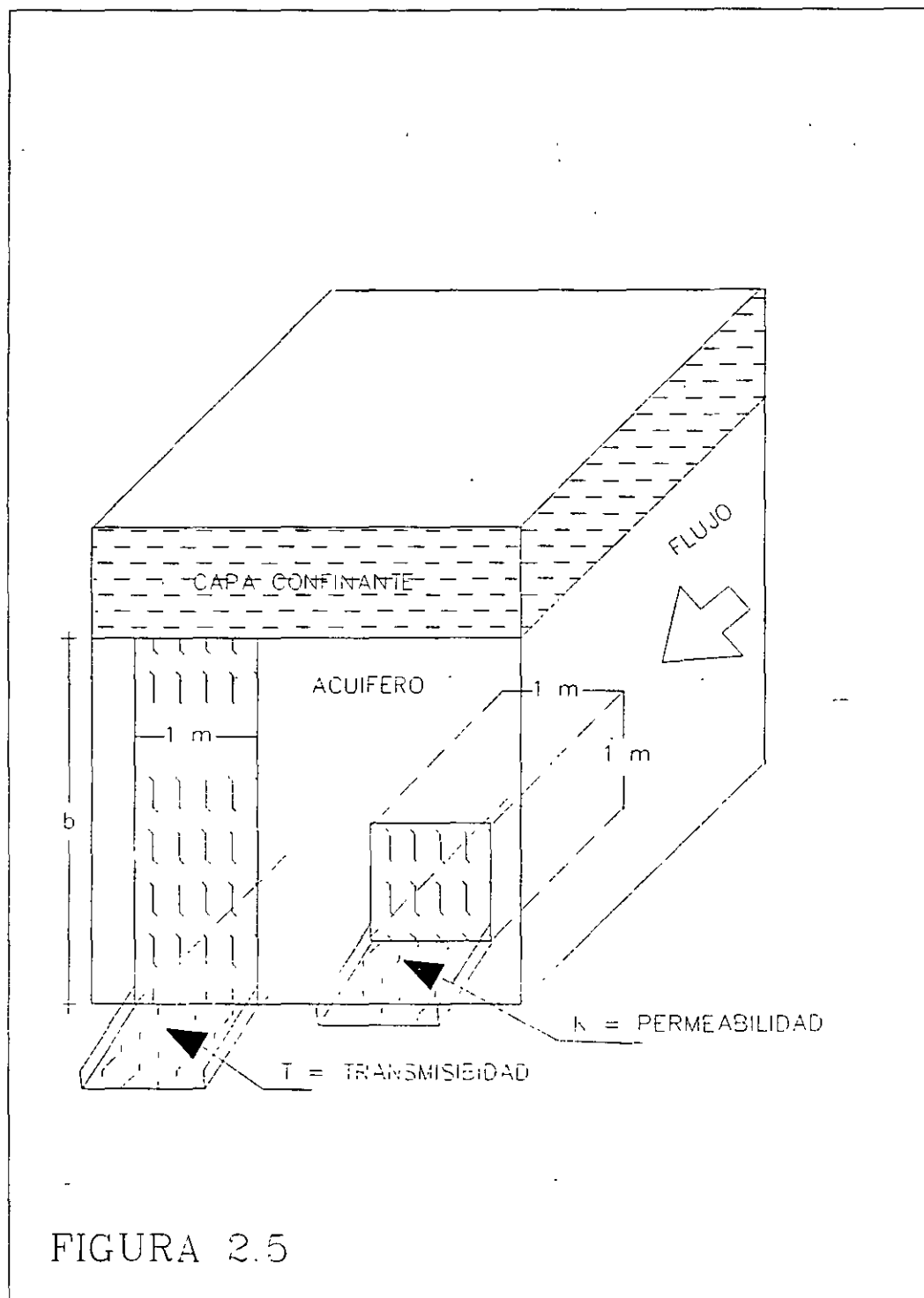


Table 2.1 Conversion Factors for Permeability and Hydraulic Conductivity Units

	Permeability, k^*			Hydraulic conductivity, K		
	cm^2	ft^2	darcy	m/s	ft/s	U.S. gal/day/ft ²
cm^2	1	1.08×10^{-3}	1.01×10^8	9.80×10^{-2}	3.22×10^3	1.85×10^9
ft^2	9.29×10^2	1	9.42×10^{10}	9.11×10^3	2.99×10^6	1.71×10^{12}
darcy	9.87×10^{-9}	1.06×10^{-11}	1	9.66×10^{-6}	3.17×10^{-5}	1.82×10^1
m/s	1.02×10^{-3}	1.10×10^{-6}	1.04×10^3	1	3.28	2.12×10^6
ft/s	3.11×10^{-4}	3.35×10^{-7}	3.15×10^4	3.05×10^{-1}	1	6.46×10^5
U.S. gal/day/ft ²	5.42×10^{-10}	5.83×10^{-13}	5.49×10^{-2}	4.72×10^{-7}	1.55×10^{-6}	1

De: Freeze and Cherry, 1979.



2.2.7.- NIVELES ESTATICO, DINAMICO Y FREATICO

En un acuífero libre, se define como *nivel estático* la porción superficial del acuífero (figura 2.6). En contraste, se define como *nivel dinámico* al que se refleja en un pozo al encontrarse operando, razón por la que también se le denomina *nivel de bombeo*.

Nivel piezométrico generalmente se utiliza para los acuíferos confinados donde el nivel corresponde a la presión a que está sujeta el agua del acuífero.

Recibe el nombre de *nivel freático* el nivel que presentan los acuíferos someros, cuya agua en ocasiones se denomina también como aguas freáticas.

2.3.- FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUITARDOS

En contraste con el funcionamiento de los acuíferos tratados en el inciso 2.2, en el presente inciso se mencionan las características de los acuitardos.

Una *acuitardo* corresponde a una roca o material de baja permeabilidad que retarda pero no previene el flujo del agua de o hacia el acuífero adyacente. En la Ciudad de México las arcillas lacustres que se encuentran cubriendo la parte plana, constituyen un acuitardo.

2.3.1.- RECARGA Y DESCARGA DE LOS ACUITARDOS

La recarga de los acuitardos se genera por la infiltración de las aguas de lluvia o bien de las aguas que circulan a través de arroyos y canales, en forma similar a la recarga de los acuíferos pero con la diferencia de que la recarga de un acuitardo es muy lenta.

Su descarga se lleva a cabo también en forma muy lenta, generalmente como "lloraderos" que llegan a formar manantiales insipientes.

En la Ciudad de México, el acuitardo en las arcillas lacustres presenta un drenado vertical hacia el acuífero que se encuentra a mayor profundidad. Esta descarga del acuitardo corresponde a una recarga del acuífero.

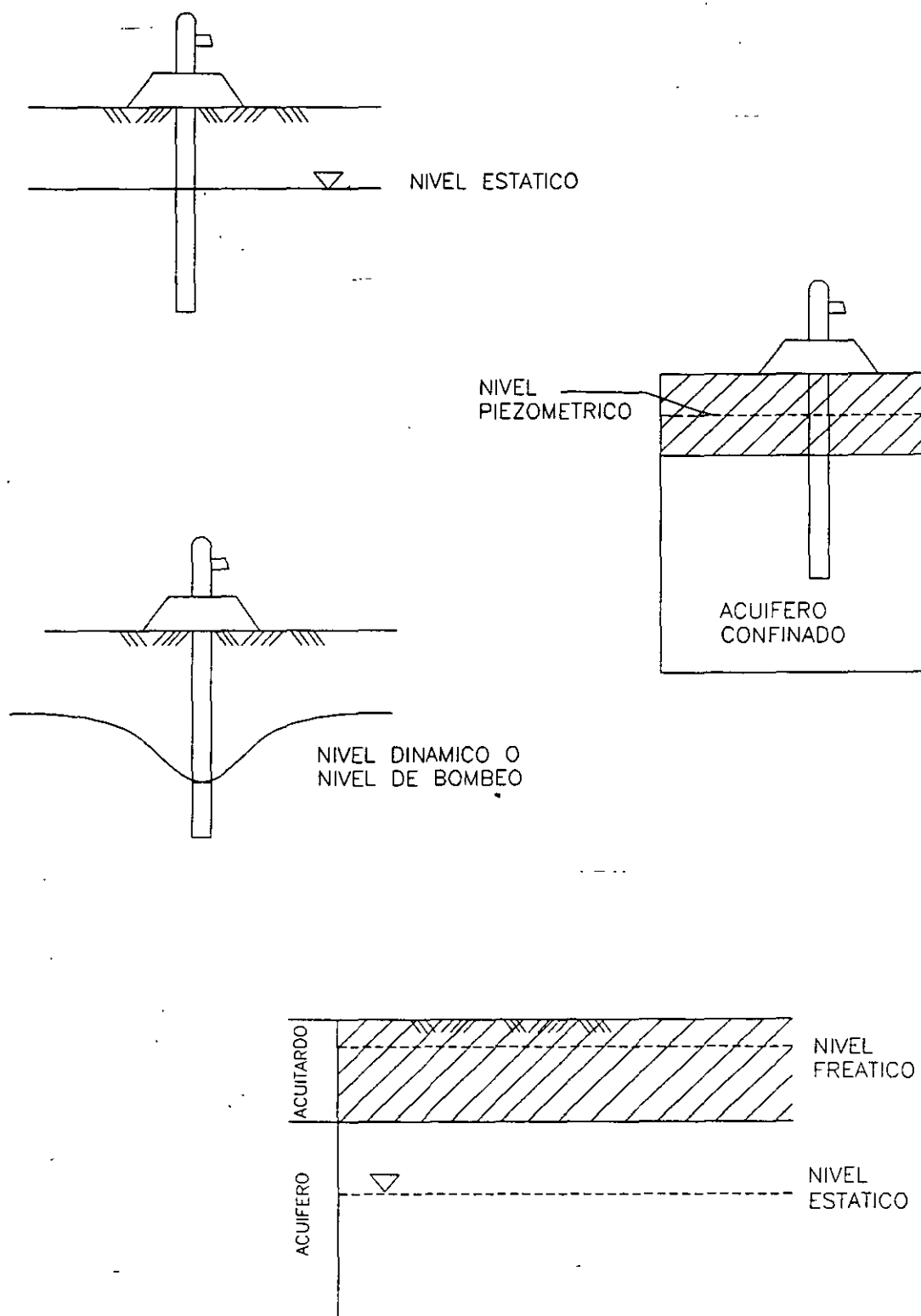


FIGURA 2.6

2.3.2.- PERMEABILIDAD DE LOS ACUITARDOS

La permeabilidad de los acuitardos y en especial de las arcillas que se encuentra cubriendo la parte plana del Valle de México, presentan valores de entre 10^{-7} y 10^{-9} m/seg.

2.3.3.- NIVEL FREÁTICO

El nivel de saturación en las arcillas que forman el acuitardo de la Ciudad de México se encuentra muy cerca de la superficie, por lo general a profundidades del orden de 3 metros. A este nivel somero se le denomina *nivel freático*.

2.3.4.- ASENTAMIENTOS DEL TERRENO

Las arcillas que se encuentra cubriendo la parte plana del Valle de México corresponden a sedimentos de los antiguos lagos. Tienen un espesor que fluctúa entre 40 y 60 metros en la mayor parte del valle, el cual se acuña hacia las elevaciones topográficas. En las partes centrales de las zonas de Texcoco y Tlahuac-Chalco, las arcillas se encuentran intercaladas y/o mezcladas con horizontes de arenas, y llegan a presentar espesores de más de 100 metros. Las arcillas están saturadas y presentan un nivel freático a entre 2.5 y 3.5 metros de profundidad. Bajo ellas, se encuentra un acuífero que actualmente, funciona como libre, teniendo el nivel estático a cierta profundidad bajo del acuitardo, lo que provoca que éste último presente un "goteo" o drenado vertical hacia el acuífero. La pérdida de agua del acuitardo ocasiona una pérdida de su volumen, que se traduce en el asentamiento del terreno que es típico en la Ciudad de México.

Las arcillas tienen una compresibilidad que va de 0.11 a 6 centímetros cuadrados por kilogramo; una relación de vacíos que varía de 2 a 15 y; una permeabilidad entre 1×10^{-7} y 1×10^{-9} m/seg.

Para mayor información sobre los hundimientos del terreno en la Ciudad de México se recomienda consultar el capítulo 4 del contrato 4-33-1-2531 de la DGCOH.

2.4.- CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS NATURALES

El agua de lluvia que se infiltra al subsuelo circula a través de las rocas disolviendo las sales y minerales que las forman, produciendo cambios en su composición química. Por lo tanto, la composición química del agua subterránea dependerá del tipo y grado de solubilidad de las rocas y sales naturales con las que el agua tiene contacto al circular por el subsuelo.

2.4.1.- COMPOSICION QUIMICA DEL AGUA DE LLUVIA

El agua de lluvia al precipitarse sobre la corteza terrestre arrastra materiales finos que se encuentran suspendidos en la atmósfera y que en muchos casos son transportados por el viento. La composición química general del agua de lluvia según Garrels y Mackenzie (1971), es la siguiente:

Na	1.98 ppm	Ca	0.09 ppm	HCO ₃	0.12 ppm
K	0.30 ppm	Cl	3.79 ppm		
Mg	0.27 ppm	SO ₄	0.58 ppm		

La contaminación de la atmósfera produce modificación en la composición química de las aguas de lluvia, generalmente ocasionando la presencia de lo que se denomina como "lluvia ácidas". Sin embargo, la concentración total de sales en un agua de lluvia se caracteriza por presentar valores bajos, generalmente menores de 40 miligramos por litro.

2.4.2.- CALIDAD DEL AGUA EN ACUIFEROS BASALTICOS

Los basaltos son rocas fracturadas constituidas por minerales ferromagnesianos. Presentan bajo grado de solubilidad, la alta permeabilidad de las rocas disminuye la capacidad de disolución de sales por el agua.

Por lo tanto, el agua de lluvia que se infiltra y circula por rocas basálticas se va a caracterizar por presentar bajos contenidos salinos, principalmente de bicarbonatos y sodio (del agua de lluvias), y en algunos casos magnesio, fierro y manganeso (de los minerales ferro-magnesianos).

Durante las erupciones volcánicas son comunes las emisiones de gases que contienen sales, las cuales se acumulan por lo general alrededor de los cráteres o centros eruptivos. Ocasionalmente éstas sales pueden ser transportadas y depositadas a lo largo de fallas y fracturas, por medio de soluciones hidrotermales. Por ello, ocasionalmente el agua de los acuíferos basálticos llega a tener contacto con dichos horizontes salinos e incrementa notablemente su concentración, como es el caso de los flancos de la Sierra de Santa Catarina y algunas porciones del pie de la Sierra del Chichinautzin, como fue detectado mediante este trabajo y se menciona en capítulos posteriores.

2.4.3.- ORIGEN DE ACUIFEROS CON AGUA SALADA

Otro origen de sales en el subsuelo se puede encontrar en la circulación de flujos de agua regional. Es común que estos flujos, después de circular grandes distancias y a gran profundidad, tengan contacto con sales las cuales son disueltas por el agua. Pueden existir también focos termales que ocasiona el incremento de temperatura en el agua, lo que a su vez facilita la disolución de sales. El agua de flujos regionales puede circular y en muchas ocasiones llegar a ascender hasta la superficie o cerca de ella, a través de fallas o fracturas. El agua con altos contenidos salinos se llega a manifestar en varias formas: (1) la presencia de manantiales, en ocasiones termales, con agua salada; (2) el depósito de sales a lo largo de fracturas con mecanismos semejantes a los que en minería son comunes y se conocen como depósitos hidrotermales y; (3) la acumulación o entrapamiento de agua salada en ciertos horizontes.

Durante la perforación de un pozo, se puede llegar a atravesar una falla o un horizonte donde se encuentre atrapada el agua salina o las sales que se puede incorporar al acuífero a través del pozo.

Las aguas naturales generalmente tienen un largo tiempo de estancia en el subsuelo. Las aguas saladas naturales, se caracterizan por la ausencia de organismos.

2.5.- VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS A LA CONTAMINACION

Cada lugar presenta diferentes características químicas y físicas que permiten en mayor o menor grado la contaminación de los acuíferos. Los principales factores a través de los cuales se puede evaluar la vulnerabilidad de un acuífero son los siguientes:

- Profundidad al nivel estático.
- Recarga neta.
- Tipo de roca.
- Tipo de suelo.
- Pendiente del terreno.
- Zona vadosa.
- Permeabilidad.

2.5.1.- PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTATICO

La profundidad al nivel del agua es un factor importante en la vulnerabilidad de los acuíferos, debido a que está en relación con la distancia que el contaminante va a viajar antes de alcanzar al acuífero, dando oportunidad para que existan procesos como la oxidación, adsorción y en general la atenuación del contaminante. Por otra parte, las aguas que se encuentran a profundidad implican mayores tiempos de estancia en el subsuelo. Mientras mayor sea la profundidad al nivel estático, la vulnerabilidad será menor.

En la tabla 2.2 se muestran los valores con que el programa DRASTIC de la EPA clasifica la vulnerabilidad de los acuíferos. Cuando la profundidad al agua se encuentra a entre 0 y 1.5 metros se le asigna un valor de 10 puntos, mientras que cuando el agua se encuentra a profundidades mayores de 30 metros, el valor con que se califica es de 1 punto.

2.5.2.- CANTIDAD DE RECARGA (RECARGA NETA)

La recarga típica de los acuíferos es la precipitación pluvial, la cual se infiltra a través del subsuelo hasta el acuífero. La recarga neta consiste en la cantidad de agua que se infiltra por

unidad de área. El agua que se infiltra transporta al contaminante. De acuerdo al volumen de agua existirá un parámetro de dispersión y dilución del contaminante. La cantidad de agua que se recarga es el principal vehículo para el transporte de contaminantes. Mientras mayores sean los volúmenes de recarga, mayor será el potencial de contaminación al subsuelo, lo cual se cumple hasta que la cantidad de recarga es tan grande que causa dilución del contaminante. En la tabla 2.3 se muestran valores para calcular la vulnerabilidad a partir de recargas netas de agua al subsuelo:

2.5.3.- TIPO DE ROCA

La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación está influenciada también por el tipo de materiales que constituyen el subsuelo. Materiales granulares pueden "filtrar" a los contaminantes presentes en el agua al existir procesos de adsorción, reacción o dispersión. En los acuíferos formados en rocas fracturadas prácticamente no se presenta la atenuación de contaminantes, por lo que estos son más vulnerables a la contaminación.

En la tabla 2.4 se presentan las calificaciones que el programa DRASTIC aplica a diferentes tipos de rocas, observándose que los basaltos son muy vulnerables, calificándose con el valor 9, en contraste con otros tipos como se indica en la tabla.

2.5.4.- TIPO DE SUELO

Incluye a la porción superficial del terreno donde generalmente existe una actividad biológica significativa. En esta clasificación, se considera al suelo como la porción superficial de terreno con una profundidad máxima de 2 metros. Los suelos tienen un impacto significativo en la cantidad de agua que se puede infiltrar en el subsuelo y por lo tanto en la habilidad para mover a un contaminante en forma vertical a través de la zona vadosa. La presencia de materiales finos tales como arcillas, disminuyen la permeabilidad y restringen el movimiento de contaminantes. Por otra parte, existen procesos de filtración, biodegradación, adsorción y volatilización, que remueven partículas contaminantes.

Otra variable es el tipo de suelos, el cual puede variar de una grava a arena y arcilla. En la figura 2.5 se muestra una tabla con calificaciones de acuerdo al tipo de suelos.

En el caso de la Ciudad de México, las arcillas que constituyen el acuitardo funcionan como una capa de suelo de gran espesor.

2.5.5.- PENDIENTE DEL TERRENO

La topografía del terreno ayuda a controlar que el contaminante permanezca en un sitio (donde la pendiente tiende a ser horizontal) o sea arrastrada hacia otros sitios (donde la pendiente es fuerte). Este efecto se encuentra asociado con el grado de infiltración, siendo este menor en las zonas donde la pendiente del terreno es fuerte y mayor donde la pendiente es moderada o nula. En la tabla No. 2.6 se muestran los rangos de calificaciones de acuerdo a la pendiente del terreno.

2.5.6.- ZONA VADOSA

La zona vadosa o zona de aereación, es la que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel estático. En esta porción se producen procesos de biodegradación, neutralización, filtración, reacciones químicas, volatilización y dispersión. El grado de biodegradación y volatilización decrece con la profundidad. De acuerdo a la composición de los materiales que constituyen a la zona vadosa, esta presenta un rango de calificación de vulnerabilidad el cual se muestra en la tabla No. 2.7.

2.5.7.- PERMEABILIDAD

La permeabilidad es la facilidad que presenta un medio para que circule el agua a través de él. En zonas donde la permeabilidad es alta, existirá mayor vulnerabilidad a la contaminación, tal como es el caso de las rocas basálticas que forman la Sierra del Chichinautzin. Donde los materiales presentan transmisibilidades bajas, el factor de contaminación disminuye.

Para calcular este factor, inicialmente se mide la permeabilidad del material, ya sea mediante pruebas de bombeo o bien en forma general utilizando tablas como la del tipo de la mostrada en la figura No. 2.8. Posteriormente y conociendo el valor de permeabilidad, se obtiene la calificación de la vulnerabilidad respecto a este parámetro, la cual se muestra en la tabla No. 2.9.

2.5.8.- CALCULO DE LA VULNERABILIDAD DE UNA ZONA

Aplicando los valores de vulnerabilidad para cada uno de los factores mencionados, en los párrafos anteriores se obtiene un valor de vulnerabilidad para un sitio. Así por ejemplo, en una zona con rocas basálticas y una porción de medios granulares las calificaciones serían de 164 y 35 conforme se muestra en la tabla 2.10, siendo los basaltos de mayor vulnerabilidad que los materiales granulares.

**TABLA 2.2.- VALORES DE VULNERABILIDAD
DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTATICO**

RANGO EN METROS	VALOR
0-1.5	10
1.5-4.5	9
4.5-9.0	7
9.0-15.2	5
15.2-23.0	3
23.0-30.0	2
30.0-0+	1

PESO ESPECIFICO : 5

TABLA 2.3.- RECARGA NETA

RANGO EN mm	VALOR
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250-+	9

PESO ESPECIFICO : 4

TABLA 2.4.- TIPO DE ROCA

TIPO	RANGO	VALOR TIPICO
LUTITA	1-3	2
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS	2-5	3
ROCAS IGENAS Y METAMORFICAS INTEMPERIZADAS	3-5	4
SECUENCIAS DE CAPAS DE ARENISCA CALIZA Y LUTITA	4-6	5
TILITA	5-9	6
ARENISCA	4-9	6
CALIZA	4-9	6
ARENA Y GRAVA	4-9	8
BASALTO	2-10	9
CALIZA CASTICA	9-10	10

PESO ESPECIFICO: 3

TABLA 2.5.- TIPO DE SUELO

TIPO	VALOR
CAPA DELGADA O AUSENTE	10
GRAVA	10
ARENA	9
CARBON	8
AGREGADO DE ARCILLAS	7
MEZCLA ARENOSA	6
MEZCLA	5
MEZCLA LIMOSA	4
MEZCLA ARCILLOSA	3
ABONO	2
ARCILLA	1

PESO ESPECIFICO : 2

**TABLA 2.6.- PENDIENTE DEL TERRENO
(ANGULO DE INCLINACION EN %)**

RANGO	VALOR
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1

PESO ESPECIFICO : 1

TABLA 2.7.- ZONA VADOSA

TIPO	RANGO	VALOR TÍPICO
CAPA CONFINANTE	1	1
LIMO O ARCILLA	2-6	3
LUTITA	2-5	3
CALIZA	2-7	6
ARENISCA		6
HORIZONTES DE CALIZA, ARENISCA Y LUTITA	4-8	6
ARENA Y GRAVA CON ALTO CONTENIDO DE LIMO Y ARCILLA	4-8	6
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS	4-8	4
ARENA Y GRAVA	6-9	8
BASALTO	2-10	9
CALIZA CARSTICA	8-10	10

PESO ESPECIFICO: 5

**TABLA 2.8.- PERMEABILIDAD EN VARIOS TIPOS DE ROCA
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA
(m/s)**

RANGO	VALOR
$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5}$	1
$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	2
$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$	4
$3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$	6
$5 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$	8
$9 \times 10^{-4} +$	10

PESO ESPECIFICO : 3

TABLA 2.9.- CALCULO DE VOLNERABILIDAD

FACTOR	BASALTOS AL PIE DE LA SIERRA DEL CHICHINAUTZIN	ACUIFERO AL CENTRO DE LA ZONA METROPOLITANA
NIVEL ESTATICO	5	5
RECARGA NETA	36	4
TIPO DE ROCA	27	6
TIPO DE SUELO	20	2
PENDIENTE DEL TERRENO	1	10
ZONA VADOSA	45	5
PERMEABILIDAD	30	3
SUMA	164	35
CLASIFICACION	ALTAMENTE VULNERABLE	REDUCIDA VULNERABILIDAD

2.6.- CARACTERISTICAS DEL ACUIFERO DE LA CIUDAD DE MEXICO

El presente trabajo tiene como referencia el agua subterránea contenida en el acuífero que subyace a la Ciudad de México y sus alrededores, por lo que se incluye a continuación las características generales del acuífero, las cuales fueron tomadas de los estudios DGCOH-5-111-1-181-1 y DGCOH-5-111-1-0415.

2.6.1.- GEOLOGIA GENERAL

La zona estudiada se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico, caracterizada por existir en ella numerosos volcanes que han dado origen a sierras volcánicas y

cuencas lacustres. En las primeras, predominan lavas y piroclásticos, mientras que en las cuencas lacustres se interdigitan aluviones, sedimentos lacustres, lavas y piroclásticos de edad que va del Terciario al Reciente. Estas, sobreyacen a rocas calcáreas marinas de edad cretácica.

El Valle de México se encuentra limitado al oeste por sierras andesíticas terciarias (Sierra de Las Cruces); al sur por basaltos cuaternarios (Sierra del Chichinautzin); al norte por rocas volcánicas terciarias (Sierra de Guadalupe); hacia el noreste se abre una planicie lacustre (Exlago de Texcoco) y; en la porción central-este se encuentra una sierra de basaltos cuaternarios (Cerro de La Estrella y Sierra de Santa Catarina). El valle, de forma prácticamente plana, está formado por los sedimentos arcillosos de los antiguos lagos de Texcoco, México, Xochimilco y Chalco.

El valle está formado por sedimentos lacustres que sobreyacen a aluviones y basaltos que forman en conjunto un paquete de materiales de varios cientos de metros de espesor. A profundidades del orden de 1600-2000 metros, se han detectado, mediante perforaciones, rocas sedimentarias marinas del Cretácico.

La zona estudiada es eminentemente volcánica. Está circundada en su mayor parte por sierras que, por su actividad volcánica, formaron cuencas cerradas donde se originaron lagos con sus consecuentes depósitos.

ESTRATIGRAFIA E HISTORIA GEOLOGICA CRETACICO

Las rocas más antiguas corresponden a sedimentos calcáreos marinos de edad Cretácica, las cuales no afloran pero han sido encontrados a profundidades de entre 1600 y 2000 metros en perforaciones realizadas por PEMEX en el año de 1986.

Las rocas calcáreas han sido correlacionadas con los sedimentos cretácicos que afloran en el Estado de Morelos, donde por lo general se comportan como impermeables al flujo subterráneo, ya que los pozos perforados en calizas han resultado en su mayoría negativos por bajo rendimiento. Por lo anterior, las rocas calcáreas marinas que han sido detectadas a alrededor de 1600 - 2000 metros de profundidad en el Valle de México, podrían ser pobres geohidrológicamente.

TERCIARIO

Sobre los sedimentos cretácicos se encuentra una alternancia de productos volcánicos y aluviales que alcanzan espesores de alrededor de 2000 metros.

Las rocas aflorantes más antiguas que forman el Valle de México, consisten en rocas volcánicas y material granular del Terciario. Estas, forman las sierras del norte, este y oeste. Dentro de la secuencia volcánica terciaria, F. Mosser (1974) en su cartografía geológica ha distinguido vulcanitas del Mioceno constituyendo a lo que denomina como Sierras Mayores, Tmv. Le sobreyacen andesitas y dacitas también del Grupo Sierras Mayores, así como la Formación Tarango constituida por tobas, aglomerados, depósitos fluviales, delgadas capas de pómez, horizontes de cenizas y arenas, y en algunos sitios intercalaciones de lahares y lacustres, las cuales han sido asignadas al Plioceno Inferior. Culmina la secuencia terciaria con lavas y piroclásticos que forman los principales conos volcánicos.

CUATERNARIO

Sobre los depósitos mencionados en el inciso anterior, se encuentran productos volcánicos, sedimentos lacustres y aluviones, todo ello del Cuaternario. Forman la mayor parte de los afloramientos y constituyen el acuífero que es explotado en el valle.

Emisiones volcánicas del cuaternario cerraron la cuenca del Valle de México, la que antes de esta época drenaba hacia el sur. Los productos volcánicos dieron origen a la Sierra del Chichinautzin con el emplazamiento de numerosas lavas y piroclásticos eyectados a través de un gran número de conos volcánicos de tamaño que varía de menos de uno a varios kilómetros de diámetro. Al mismo tiempo, se formó la Sierra de Santa Catarina.

Antes y durante el cierre hidrológico del sur por los volcanes de la Sierra del Chichinautzin, se depositaron aluviones intercalados con corrientes lávicas. El cierre de la cuenca formó grandes lagos que propiciaron el depósito de materiales finos que actualmente funcionan como un acuitardo.

En los lagos formados hacia Texcoco, predominaba el agua salada y la evaporación originaba horizontes salinos o bien agua salobre. En los lagos del centro de México Tenochtitlán y del sur, existía una continua alimentación de aguas provenientes principalmente de los basaltos y piroclásticos de la Sierra del Chichinautzin, lo que dio origen a lagos de agua dulce. Los depósitos arcillosos lacustres producto de los lagos y que actualmente forman la porción superficial del valle, no son homogéneos e incluyen horizontes arenosos. Su estudio ha sido detallado por mecanistas de suelos, debido a su importancia en el asentamiento de la ciudad y su repercusión a obras civiles.

ACUITARDO Y ACUIFERO

ARCILLAS LACUSTRES RECIENTES (ACUITARDO)

Los sedimentos recientes en el Valle de México, están representados por arcillas de los antiguos lagos de Texcoco, México, Xochimilco, Tlahuac y Chalco. Desde su origen, se distinguieron los depósitos de Texcoco por incluir altos contenidos salinos, aparentemente producto de manantiales, en contraste con el agua "dulce" hacia el centro y sur.

El espesor de las arcillas lacustres es variable. Va desde más de 100 metros en algunas zonas como Tlahuac-Chalco y Texcoco hasta acuñarse y desaparecer en el borde del antiguo lago.

Las arcillas se encuentran saturadas. Presentan una baja permeabilidad, del orden de 10^{-9} m/seg y geohidrológicamente funcionan como un acuitardo.

BASALTOS Y ALUVIONES (ACUIFERO)

Los productos volcánicos y aluviones cuaternarios mencionados anteriormente, presenta permeabilidad media o alta. Al encontrarse constituyendo el subsuelo en la zona del valle, forman el acuífero de la región. Cuando afloran en las zonas topográficamente altas, dan origen a zonas de recarga de agua subterránea.

2.6.2.- PIEZOMETRIA

2.6.2.1.- PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTATICO

Con los valores relativos a la profundidad al nivel estático medidos en cada uno de los pozos piloto para el presente año de 1995, se trazó una configuración (figura 2.7) que muestra la distribución de valores, la cual va de 30 a 180 metros. Los valores menores, se encuentran hacia la parte central de los valles, mientras que los valores más altos se ubican hacia los flancos de las sierras que circundan al valle.

Zona Metropolitana de la Ciudad de México

En la zona metropolitana de la Ciudad de México que enmarca esencialmente al Distrito Federal, se observan curvas de profundidad entre 100 y 180 metros al pie de la Sierra de Las Cruces. Esto es debido a que los pozos se encuentran perforados en partes altas. Una distribución de valores similar, se observa en los pozos del sistema sur, entre Xochimilco y Tecomitl, donde varios pozos se ubican en zonas topográficamente altas, por lo que la profundidad al nivel estático se encuentra a entre 80 y 130 metros de profundidad, como se marca en las curvas de la configuración piezométrica. En algunos puntos locales como en el pozo del reclusorio Sur la profundidad al nivel del agua es de 172 metros de profundidad.

Los valores de profundidad disminuyen hacia el valle. Por lo general, en una franja alargada norte-sur en la zona de lomeríos del poniente, que va desde Azcapotzalco pasando por la Avenida

Constituyentes y a lo largo del anillo periférico hasta Perisur y el estadio azteca, se encuentran valores de profundidad al nivel estático que van de 50 a 80 metros.

Valores menores de 60 metros dominan la parte central de los valles. En los alrededores del aeropuerto Internacional Benito Juárez, la profundidad al nivel del agua es de 40 metros; al oeste del aeropuerto, entre la Avenida Eduardo Molina y la Calzada Ignacio Zaragoza, se encuentra una zona con valores de 30 metros; hacia el centro histórico y entre la Avenida Insurgentes, el Viaducto Miguel Alemán, el aeropuerto Internacional Benito Juárez y Los Indios Verdes, se encuentra la zona con profundidades de entre 30 y 40 metros.

Hacia el valle de Xochimilco-Tlahuac, el nivel del agua se encuentra a profundidades de entre 30 y 50 metros. En la batería de pozos Tlahuac-Neza, se presentan valores de alrededor de 50 metros de profundidad al nivel estático.

Valle de Chalco

En la porción suroriental de la zona de trabajo se encuentra el valle de Chalco, donde las profundidades máximas al nivel del agua se ubican hacia los flancos de las sierras. Al norte del valle, en los alrededores de San Francisco Acuatla, el nivel estático se encuentra a poco más de 80 metros de profundidad. En las estribaciones de las sierras de Santa Catarina y El Pino, el nivel se encuentra a 60-70 metros de profundidad y en la Sierra del Chichinautzin a 50-60 metros.

Los valores disminuyen hacia el valle, donde se registraron profundidades en algunos casos menores de 30 metros. En los pozos que constituyen la batería Mixquic-Santa Catarina, localizados en el límite entre el Distrito Federal y el Estado de México, las profundidades al nivel del agua varían alrededor de 30 metros. Al sur de Chalco, se encuentran varios pozos con niveles estáticos más someros, posiblemente debido a la influencia de un acuífero colgado, freático, ya que alrededor de ellos se presentan valores de entre 30 y 40 metros de profundidad al nivel estático.

Valle de Texcoco

En la zona noreste del área estudiada se encuentra el valle de Texcoco, donde la profundidad al nivel estático presenta las características siguientes:

Hacia el centro del vaso del exlago de Texcoco, se encuentra los niveles más someros los cuales son menores de 30 metros. Prácticamente en todo el vaso del lago de texcoco el nivel estático se encuentra a profundidades de entre 30 y 40 metros

Hacia los flancos de la sierra y conforme la topografía se eleva, se presentan profundidades al nivel estático ligeramente mayores que en el valle. En el poblado de Texcoco y en una franja orientada norte-sur que se extiende desde Chiconcuac y Papalotla hasta Chicoloapan de Juárez, las profundidades al nivel estático varían entre 40 y 60 metros.

Area de Chiconautla

En el extremo norte de la zona estudiada se localizan en el poblado de Ojo de Agua y el Cerro de Chiconautla, en cuyos alrededores se encuentran perforados varios pozos cuyos niveles estáticos se ubican a alrededor de 50 metros de profundidad.

2.6.2.2.- ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO

Se obtuvieron las elevaciones del nivel estático referidas al nivel del mar para los pozos piloto que cuentan con cota de brocal, y con ellos se construyó la configuración de la figura 2.8.

La configuración de la elevación del nivel estático sobre el nivel del mar, es una forma de representar al acuífero que se encuentra alojado en los materiales que constituyen el subsuelo de la ZMCM.

Zona Metropolitana de la Ciudad de México

Por lo que se refiere al área correspondiente al Distrito Federal, se observan elevaciones que van de 2230 metros sobre el nivel del mar en la zona sur-poniente (Contreras, Pie del Ajusco) y que disminuyen paulatinamente hacia el oriente y nor-oriente. En general, al pie de las sierras del poniente y sur, se encuentran las equipotenciales 2230 a 2180, indicando una zona de alimentación por flujo subterráneo que va de las elevaciones topográficas hacia el valle.

Dentro del acuífero alojado en el valle de la Ciudad de México, las curvas piezométricas permiten la diferenciación de tres zonas: Azcapotzalco, centro y centro-este, Tlalpan-Xotepingo.

En el área de Azcapotzalco se encuentra un cono piezométrico delimitado por las curvas con valores 2190, 2180 y 2175 msnm. Se hace notar de que esta distribución de curvas cerradas formando el cono piezométrico, se ha venido observado desde el año de 1984, siendo notorio que en los últimos años el nivel se ha recuperado.

Por lo que se refiere a la zona centro-este, delimitada por la curva 2195 msnm, que tiene un trazo aproximado que va de la Calzada de Tlalpan hacia el oriente rumbo al aeropuerto Internacional

Benito Juárez. Hacia la parte central de esta área, se encuentran tres curvas cerradas con valores de 2200 msnm que forman en general una zona piezométrica ligeramente más alta que su entorno. De acuerdo al conocimiento obtenido mediante los diversos estudios que se han realizado, se deduce que este "domo" piezométrico (o elevaciones ligeramente mayores) ubicados hacia el Centro Histórico, son debidas a la presencia de espesores fuertes de materiales arcillosos, cuyo drenado es lento; además, en esta zona la extracción de agua del subsuelo es mínima, mientras que hacia sus alrededores se encuentran un mayor número de pozos con su consecuente extracción y abatimientos.

Hacia el área de Tlalpan-Xotepingo, se encuentra un cono piezométrico que se ha venido formando y agrandando en los últimos años. Este, está delimitado actualmente por la curva 2180 msnm y se extiende desde el Cerro de La Estrella al noreste, hasta el Estadio Azteca al suroeste. Su formación ha sido la consecuencia de la concentración de la extracción de agua subterránea en esta porción.

Valle de Chalco

En el Valle de Chalco se trazaron curvas piezométricas que van de 2220 a 2200 metros sobre el nivel del mar. Los valores mayores se ubican hacia los flancos de las sierras y disminuyen hacia el centro del valle, de donde se deduce un gradiente piezométrico de: el norte al sur o sea de las Sierras de Santa Catarina y El Pino, hacia el Valle de Chalco; del este al oeste o sea de la Sierra Nevada a la altura de San Martín Cuautlalpan hacia Chalco; de sur a norte o sea de los poblados de Tecomitl y Temamatla hacia Chalco y; del poniente al oriente o sea de Tlahuac hacia Chalco.

Esta zona forma un subsistema acuífero que se puede estudiar en forma independiente a los descritos anteriormente. Presenta un puerto topográfico hacia el norte, entre las Sierras de Santa

Catarina y El Pino. Hacia el oeste, a la altura de Tlahuac, existe un parteaguas subterráneo que indica que no hay movimiento o paso del agua de este valle hacia el oeste.

Al oriente del valle, se encuentran algunos puntos con cotas piezométricas arriba de 2220 msnm, que permiten el trazo de curvas aisladas. Estas zonas podrían estar influenciadas por condiciones locales, posiblemente horizontes arcillosos de menor permeabilidad comparativamente con las

áreas circundantes, lo que motiva movimientos de agua con diferentes velocidades y el establecimiento de variaciones en los gradientes hidráulicos.

Valle de Texcoco

Hacia el noreste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México se encuentra el poblado de Texcoco, así como la zona plana del exvaso del Lago de Texcoco. En su conjunto, se denominó en el presente trabajo como "Subsistema Acuífero de Texcoco". En ésta área se delimitaron curvas piezométricas que van de 2195 a 2240 msnm. Los valores mayores se localizan al pie de las elevaciones topográficas que se encuentran al este de Texcoco, a partir de donde disminuyen en dirección al poniente indicando un flujo de agua subterránea en la misma dirección. A partir de las Sierras de Santa Catarina y El Pino (que limitan a éste valle en su porción sur), se presentan curvas de 2220 msnm que disminuyen en dirección al norte.

Alrededor de la Sierra de Guadalupe (en la porción occidental de éste valle), existe también un flujo o recarga de agua subterránea hacia el Valle de Texcoco, el cual fue marcado con las curvas 2195 y 2200 msnm.

Como se observa en el plano de la figura 3.2, existe un parteaguas subterráneo al noroeste del Aeropuerto Internacional Benito Juárez de la Ciudad de México, que ocasiona una bifurcación; un flujo que se establece hacia Azcapotzalco y otro que se dirige al Valle de Texcoco. Hacia el sureste del aeropuerto, existe comunicación entre los dos subsistemas acuíferos mencionados, aunque hacia Texcoco el gradiente hidráulico es prácticamente nulo. Por ello, se optó por dividir a los valles de la Ciudad de México y el de Texcoco, trazando una línea divisoria entre la Sierra de Guadalupe, el Aeropuerto Internacional, El Peñón del Marqués y la Sierra de Santa Catarina.

El flujo dentro del Valle de Texcoco, es en general de tipo radial, tendiendo a fluir hacia el centro del mismo. Presenta dos salidas subterráneas. La primera al suroeste (hacia la Ciudad de México) y la segunda hacia el noroeste (hacia Chiconautla). En Chiconautla por considerarse conveniente se cerró el sistema acuífero de Texcoco marcando un parteaguas subterráneo que cruza el valle entre las dos elevaciones topográficas.

2.6.2.3.- EVOLUCION DEL NIVEL ESTATICO

Las configuraciones piezométricas son una forma de representar gráficamente al acuífero. El estudio de estas configuraciones en diferentes fechas, permite deducir las variaciones que ha sufrido como consecuencia esencialmente de la extracción de agua por bombeo.

Utilizando los valores obtenidos en el presente año de 1995, se calcularon evoluciones del nivel estático para un periodo de 1985-1995 y 1993-1995.

Evolución del período 1985-1995

Se trazó una configuración (figura 2.9) observándose valores que van de 0 a -15 metros.

En la Ciudad de México, en la porción comprendida por el Distrito Federal, las menores evoluciones registradas se encuentran en la parte norte mientras que las evoluciones negativas o abatimientos más fuertes se registraron hacia el sur.

En el norte, alrededor de Azcapotzalco, se trazó la curva 0 que indica que el nivel estático no ha variado en los últimos 10 años. Hacia el sur de Azcapotzalco o sea entre la Calzada México-Tacuba y continuando al sur hasta aproximadamente la Avenida Río Churubusco, la evolución fue negativa o sea que existió un abatimiento de entre 5 y 10 metros.

Continuando hacia el sur y en una zona entre El Río Churubusco y el anillo periférico sur, se encuentran abatimientos mayores, los que en general van de 10 a 13 metros con algunas áreas donde alcanzan los 15 metros.

La evolución del nivel estático en los últimos 10 años es un reflejo de la extracción de agua subterránea, la cual ha sido comparativamente mayor hacia el sur. Al centro y norte de la ciudad, la extracción ha disminuido, además de que el rendimiento de los pozos es menor.

En los alrededores del Valle de Chalco, se presentan abatimientos que van de 0 a 13 metros. Los valores que predominan en prácticamente todo el valle son de -10 a -12 metros para el periodo mencionado, lo que equivale a un abatimiento medio anual de 1 metro por año. En este valor

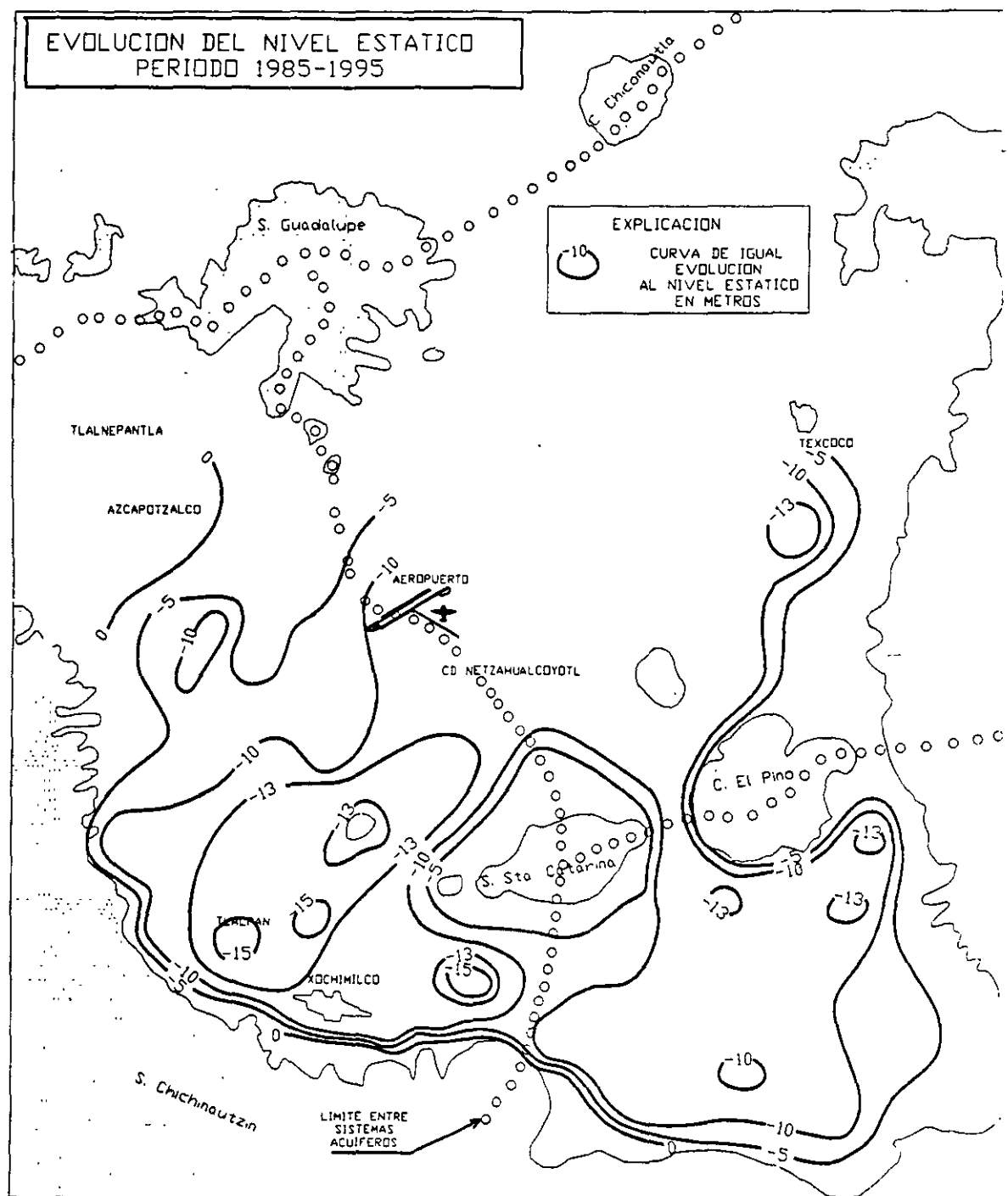
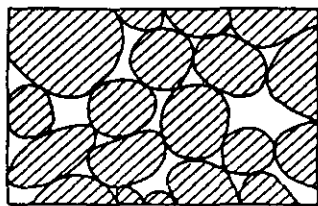


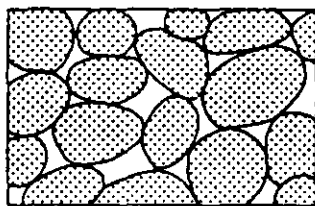
FIGURA 2.9

medio, se debe de tomar en consideración que hacia el año de 1985 la extracción de agua en esta zona era baja y por lo tanto la evolución del nivel fue mínima, mientras que, hacia 1995 las extracciones se presentan en mayor rango y consecuentemente los abatimientos son mayores.

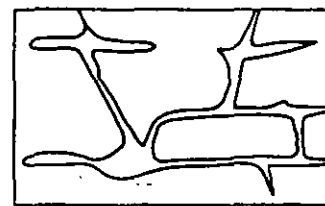
En el área de Texcoco la historia piezométrica permite obtener solo datos parciales de la evolución para el periodo de 1985-1995. Solamente al sur del poblado mencionado se marcan las evoluciones de -5 a -13 metros.



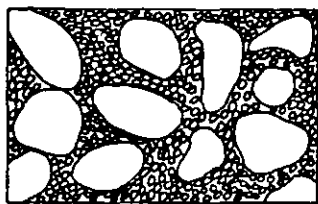
(a)



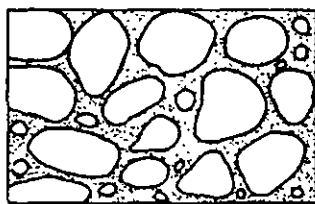
(c)



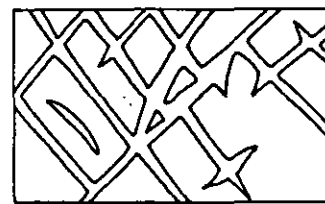
(e)



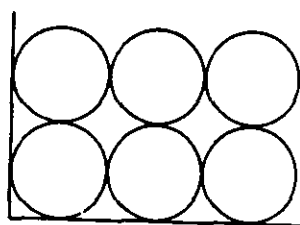
(b)



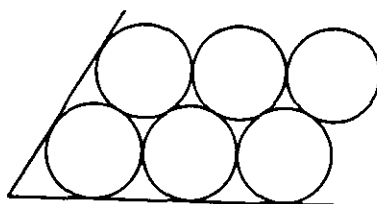
(d)



(f)

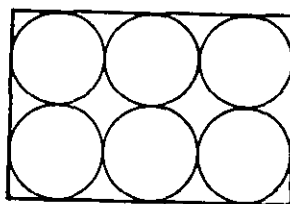


A

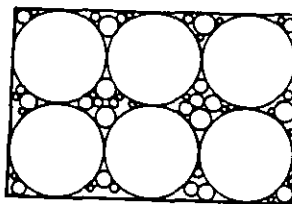


B

FIGURE 4.1 A. Cubic packing of spheres with a porosity of 47.65 percent. B. Rhombohedral packing of spheres with a porosity of 25.95 percent.



A



POROSIDAD

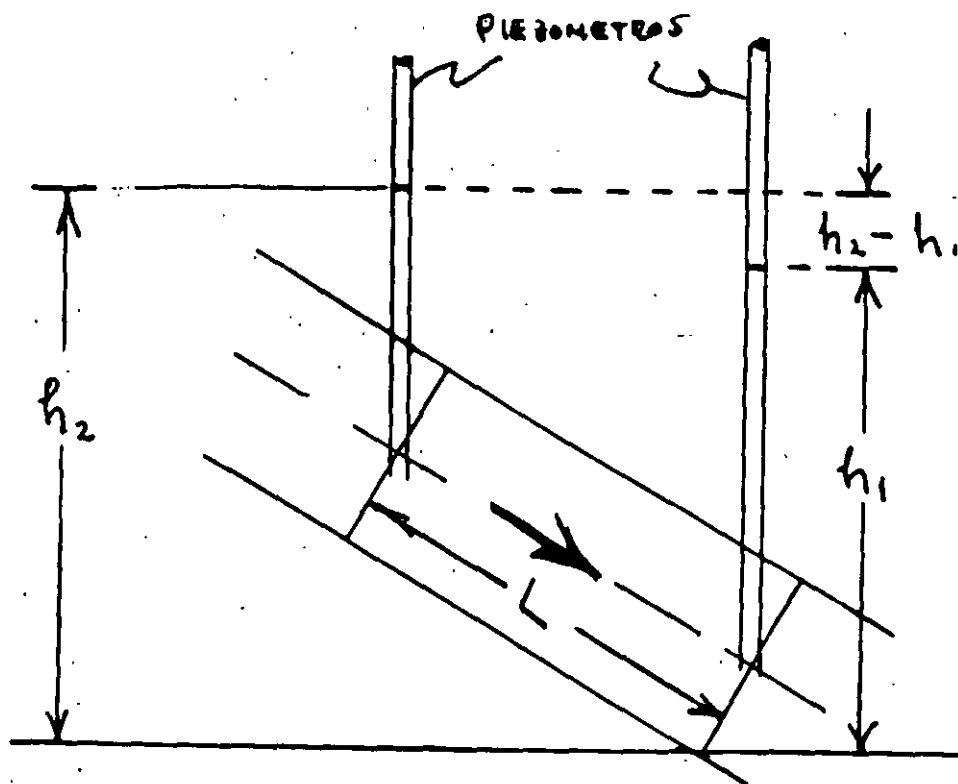
ARCILLA < 1/256 mm
 LIMO 1/256-1/16 mm
 ARENA 1/16-2 mm
 GRAVA > 2 mm
 CANTOS RODADOS Y BLOQUES

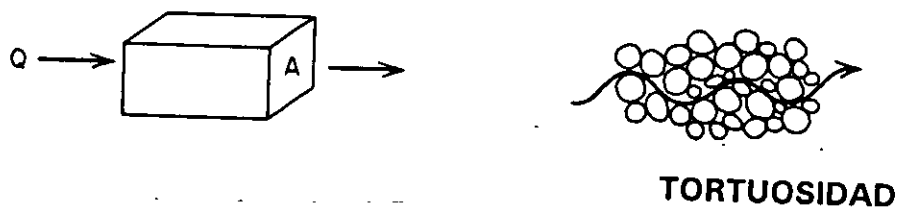
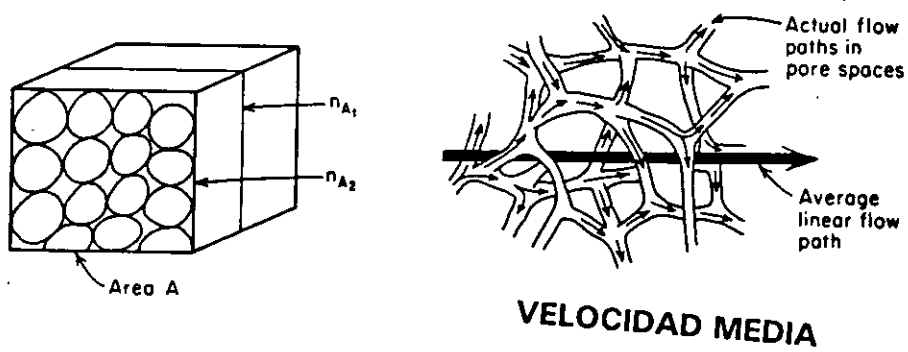
POROSITY OF EARTH MATERIALS

Limiting particle diameter		Size	Class	
(mm)	(ϕ units)			
2048	-11	V. Large	Boulders	1 m
1024	-10	Large		
512	-9	Medium		
256	-8	Small		
128	-7	Large	Cobbles	10 ⁻¹
64	-6	Small		
32	-5	V. Coarse	Pebbles	10 ⁻²
16	-4	Coarse		
8	-3	Medium		
4	-2	Fine		
2	-1	V. Fine	Sand	10 ⁻³
1	0 (Microns μ)	V. Coarse		
1/2	+1	Coarse		
1/4	+2	Medium		
1/8	+3	Fine		
1/16	+4	V. Fine	Silt	10 ⁻⁴
1/32	+5	V. Coarse		
1/64	+6	Coarse		
1/128	+7	Medium		
1/256	+8	Fine		
1/512	+9	V. Fine	Clay	10 ⁻⁵

FIGURE 4.3 Standard sizes of sediments with limiting particle diameters and the ϕ scale of sediment size, in which ϕ is equal to $\log_2 s$ (the particle diameter). Source: G. M. Friedman and J. E. Sanders, *Principles of Sedimentology* (New York: John Wiley & Sons, 1978). Used with permission.

ROCA	POROSIDAD n (%)	RENDIMIENTO ESPECÍFICO O S_y (%) POROSIDAD EFFECTIVE
Arcilla	45 - 55	1 - 10
Arena	35 - 40	10 - 30
Grava	30 - 40	15 - 30
Arena y grava	20 - 35	15 - 25
Arenisca	10 - 20	5 - 15
Lutita	1 - 10	0.5 - 5
Caliza	1 - 10	0.5 - 5





DISPERSION MECANICA

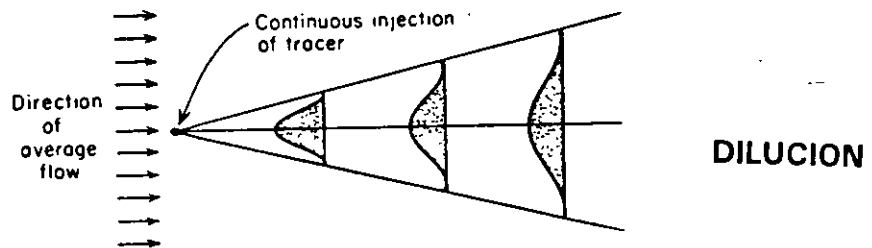


Figure 2.29 Schematic representation of the dilution process caused by mechanical dispersion in granular porous media.

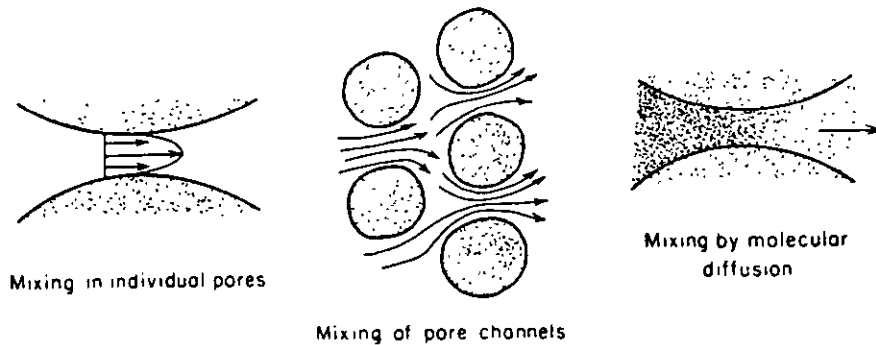
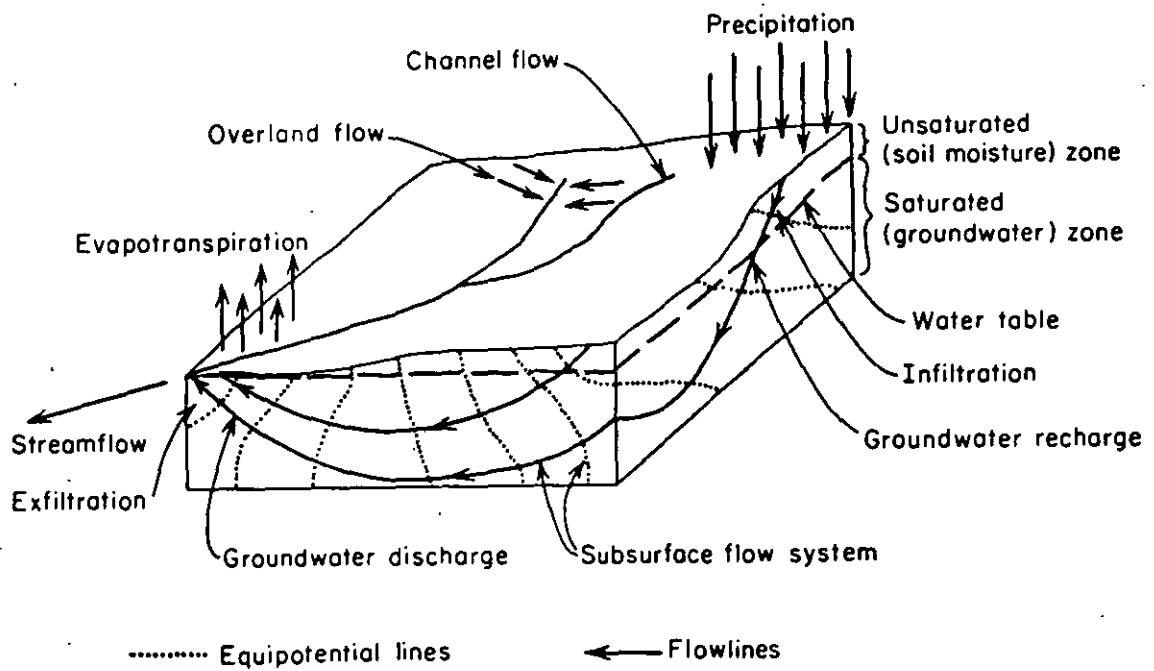
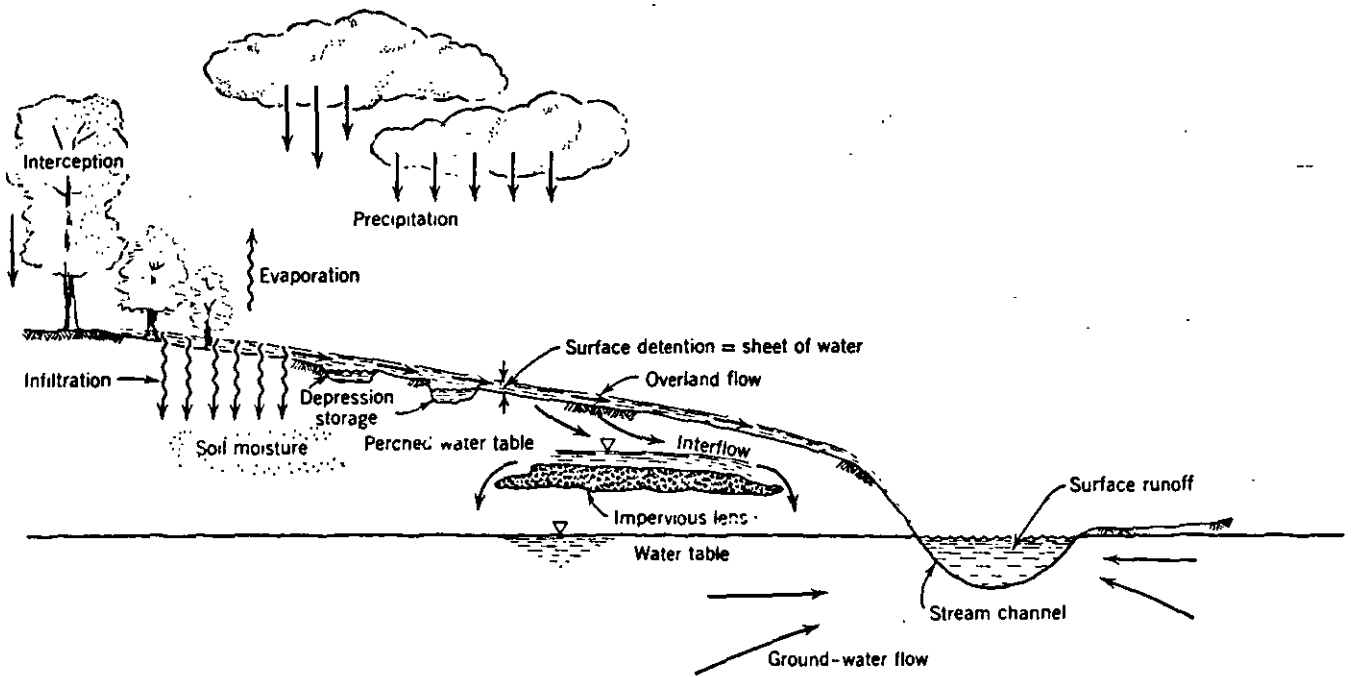


Figure 2.30 Processes of dispersion on a microscopic scale.

CICLO HIDROLOGICO



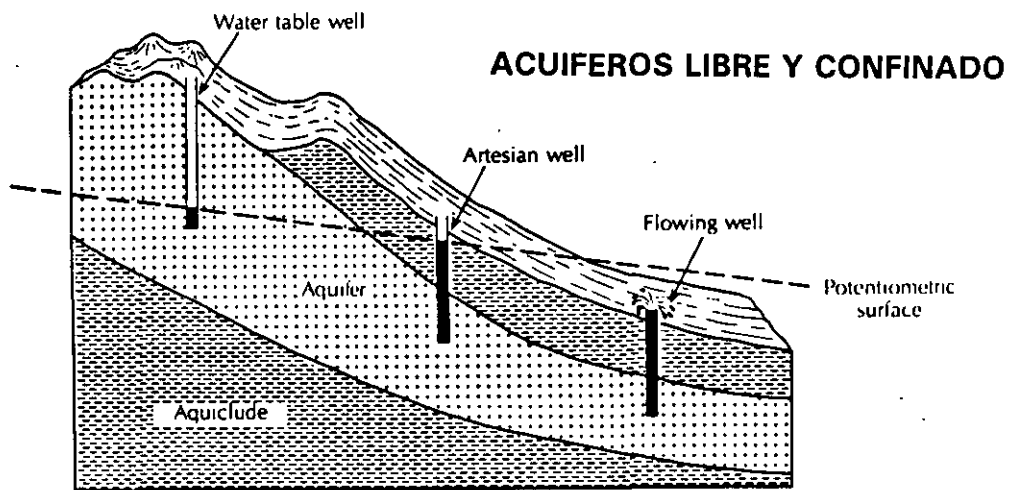
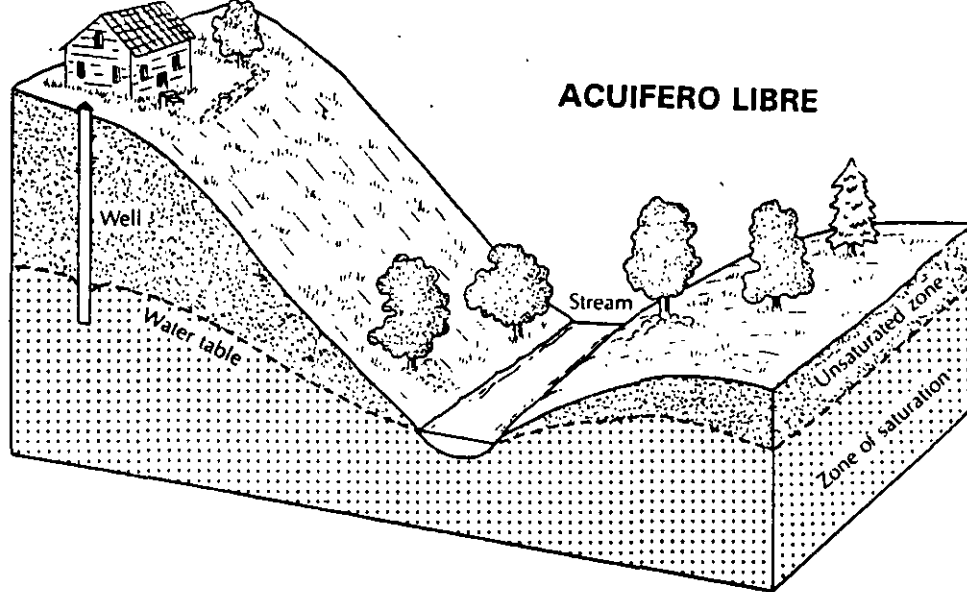
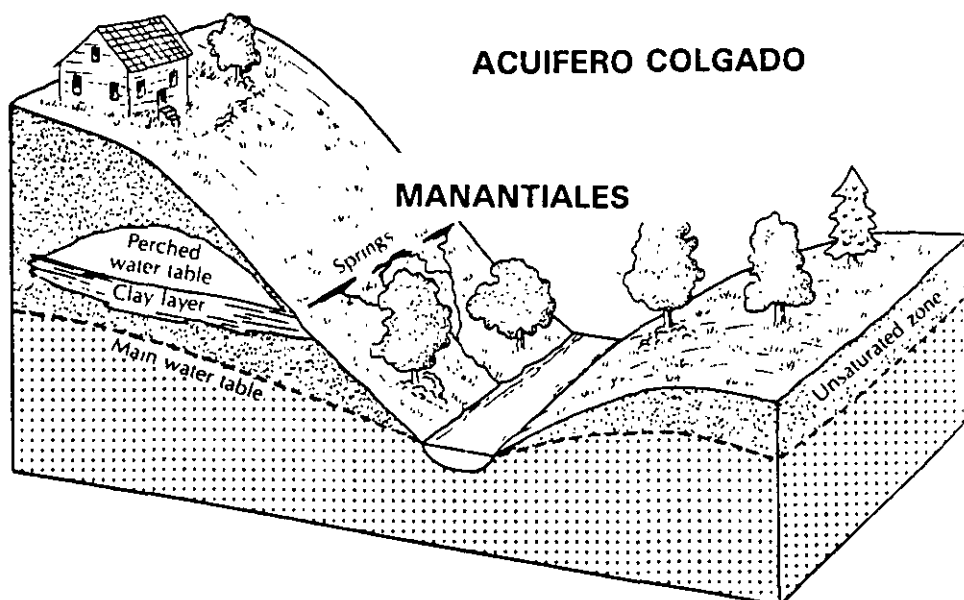
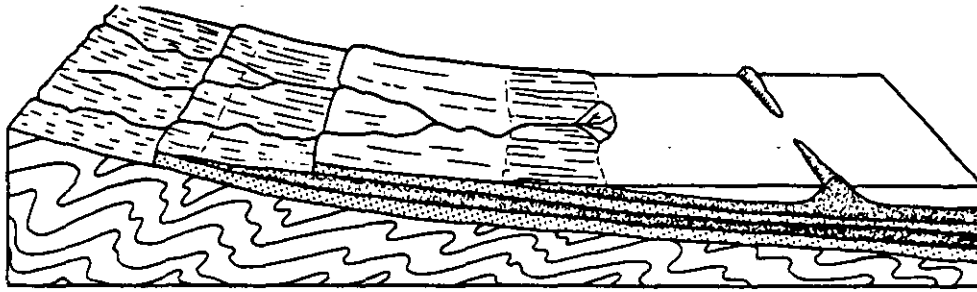


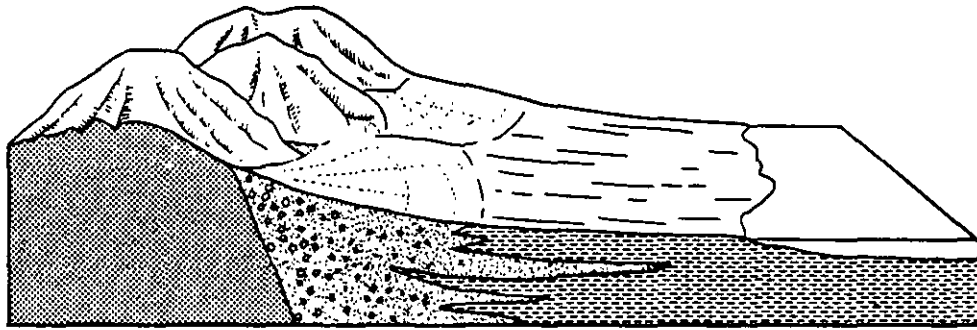
FIGURE 4.29 Artesian and flowing well in confined aquifer.



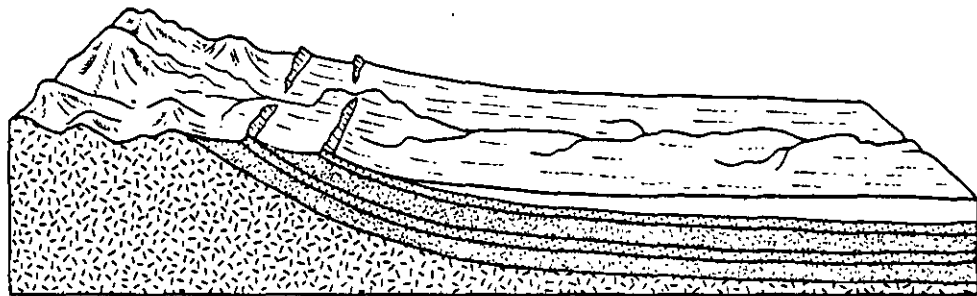
ASPECTOS GEOLOGICOS PARA LA FORMACION DE ACUIFEROS CONFINADOS



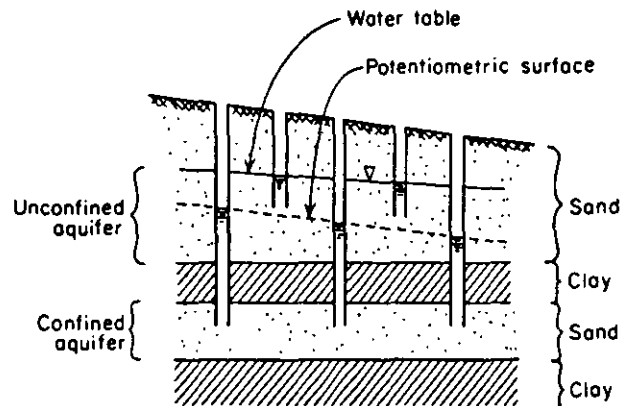
Confined aquifers created by alternating aquifers and confining units deposited on a regional dip.



Confined aquifers created by deposition of alternating layers of permeable sand and gravel and impermeable silts and clays deposited in intermontane basins.



Confined aquifer created by upwarping of beds by intrusions.

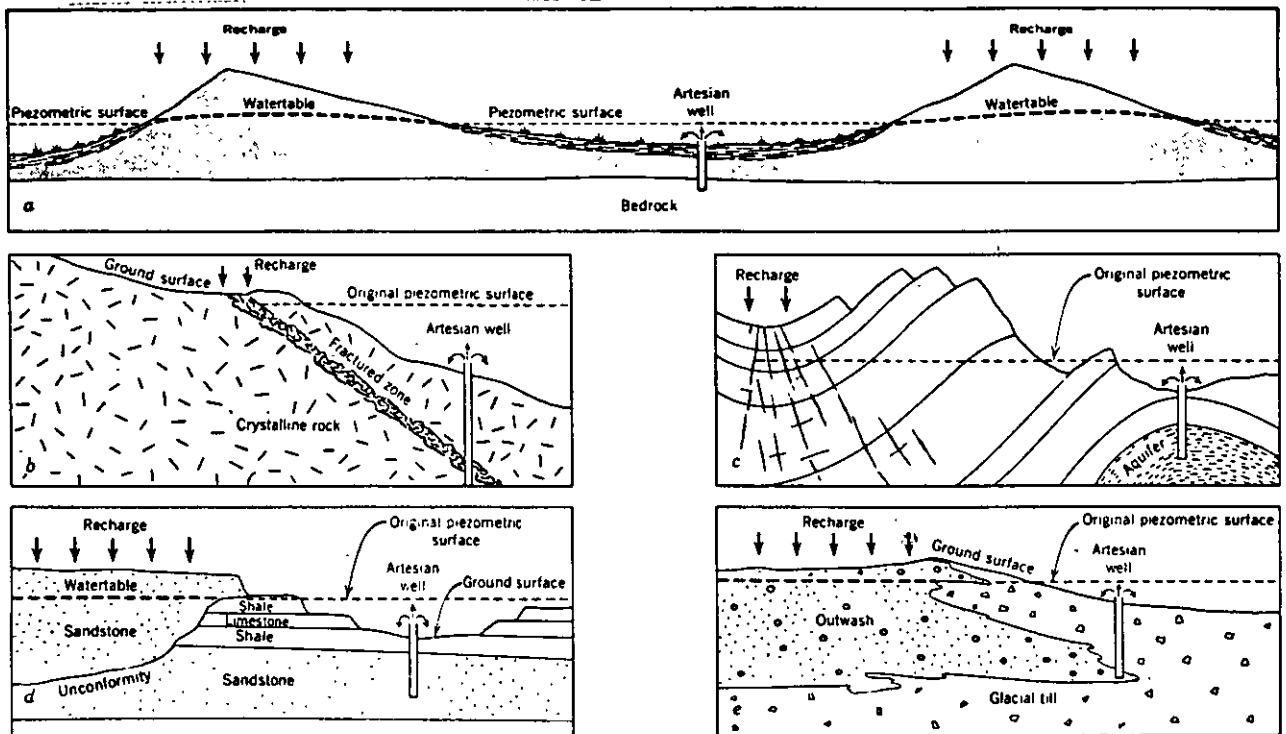


ACUIFERO LIBRE

ACUIFERO CONFINADO

Figure 2.16 Unconfined aquifer and its water table; confined aquifer and its potentiometric surface.

ASPECTOS GEOLOGICOS QUE ORIGINAN POZOS ARTESIANOS



POROSIDAD

$$n = V_h/V_t$$

POROSIDAD EFECTIVA = (Sy) RENDIMIENTO EFECTIVO

$$S_y = V_d/V_t$$

V_d = Volumen drenado

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

ACUIFERO LIBRE 2 - 30%

ACUIFERO CONFINADO 0.001 - 0.00001

**(K) PERMEABILIDAD = CONDUCTIVIDAD HIDRAÚLICA
FLUJO EN UNA SECCION UNITARIA**

(T) TRANSMISIBILIDAD

FLUJO SOBRE UNA FRANJA DE L = b

b = ESPESOR DEL ACUIFERO

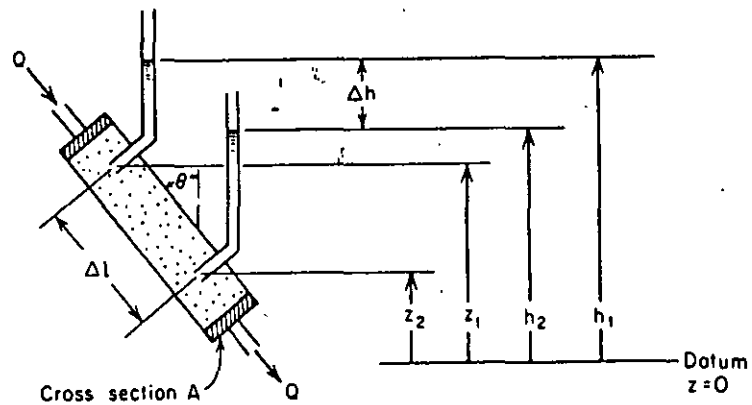
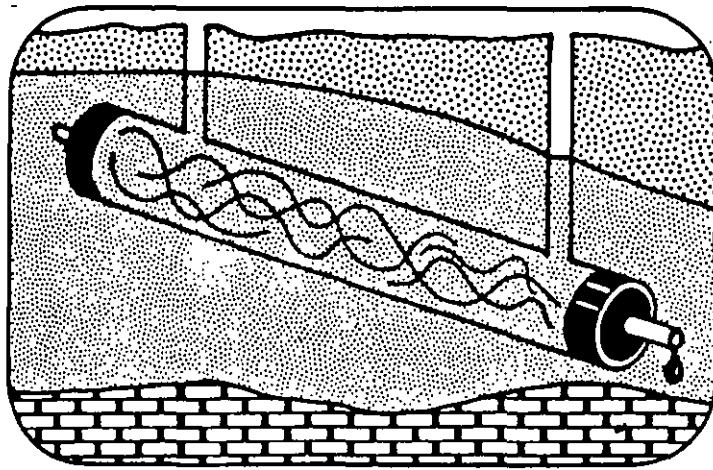


Figure 2.1 Experimental apparatus for the illustration of Darcy's law.

LEY DE DARCY

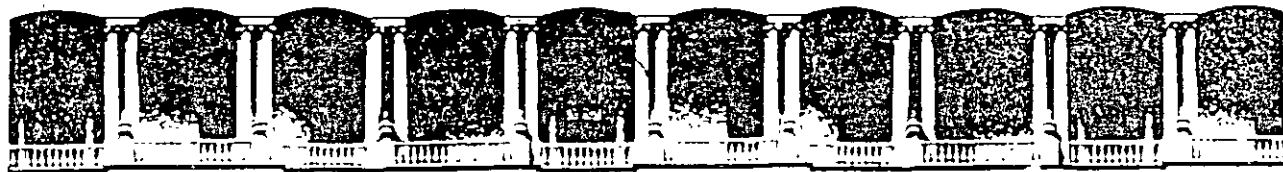
$$V = Q/A$$

$$T = K/b$$

$$V = Ki$$

$$I = L/l$$

$$Q = Tbi$$



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

GEOHIDROLOGÍA

Geofísica Aplicada

Ing. Alfonso Álvarez Manilla Aceves
Guanajuato, Guanajuato
1998.

**IX CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGIA Y
CONTAMINACION DE ACUIFEROS (1997)**

GEOFISICA APLICADA

Alfonso Alvarez Manilla Aceves
Geo Ingeniería Alfven, SA de CV
Circuito Jardín 356-8 Alamos 3ª
Querétaro, 76160, Qro. Tel (42) 127209

CONTENIDO

1. Introducción

- 1.1 Exploración geofísica
- 1.2 Factores que gobiernan la aplicación de los métodos geofísicos
- 1.3 Profundidad de exploración de los métodos geofísicos

2. Estructura de las rocas y suelos

- 2.1 Parámetros relevantes de rocas y suelos

3. Prospección Eléctrica

- 3.1 Clasificación de los métodos eléctricos
- 3.2 Potencial Natural (SP).
- 3.3 Química electrodica
- 3.4 Sobrevoltaje.
- 3.5 Doble Capa electroquímica.
- 3.6 Trayectorias Farádicas (corrientes conducción) y no farádicas (corrientes de desplazamiento).
- 3.7 Circuito equivalente, una explicación del comportamiento eléctrico de los materiales geológicos.
- 3.8 Fórmulas elementales.
- 3.9 Ecuación diferencial de la Ley de Ohm.
- 3.10 El Potencial y su distribución en el medio.
- 3.11 Anisotropía eléctrica
- 3.12 Los campos eléctricos de excitación.
- 3.13 Técnicas del sondeo y perfilaje.
- 3.14 Arreglos de electrodos.
- 3.15 Cortes Geoeléctricos.
- 3.16 Principios de Equivalencia y Supresión.
- 3.17 Ejemplos de aplicación.
- 3.18 Polarizaciones de membrana y electrodo.
- 3.19 Relaciones entre magnitudes de polarización y resistividad.
- 3.20 Casos de historia

4. Prospección Sismológica.

- 4.1 Métodos de Reflexión y Refracción.
- 4.2 Metodología de campo.
- 4.3 Casos históricos

BIBLIOGRAFIA

GEOFISICA APLICADA

1. Introducción

La *Geofísica* puede ser definida como la aplicación y estudio de las propiedades físicas en la investigación de la estructura y composición de la Tierra. En tanto que la *Exploración Geofísica* es considerada el arte de aplicar las ciencias físicas al estudio de la estructura y composición de aquellos estratos contenidos en la corteza terrestre que poseen algún recurso natural económicamente explotable por el hombre.

1.1 Exploración geofísica

Diferentes estadísticas muestran que el 80% del agua consumida en los ámbitos público urbano, pecuario, industrial y agrícola proviene del subsuelo; por lo que las actividades antropogénicas han contribuido a su deterioro por contaminación y sobre explotación.

En los últimos 15 años, la Exploración Geofísica ha tenido un nuevo y amplio campo de aplicación, la Geotécnia Ambiental, donde es utilizada para:

- cuantificación de la velocidad de filtración de diferentes fluidos
- determinación de las trayectorias de movimiento de lixiviados
- detección de fugas de presas, tanques
- particularización y mapeo de plumas de contaminantes
- mapeo de salmueras asociadas a derrames
- detección de contenedores metálicos sepultados
- caracterización de fracturas dónde se lleva a cabo el proceso de transporte
- mapeo de salmueras en pozos de inyección
- ubicación de sitios para la construcción de pozos de monitoreo
- definición de las interfaces agua dulce-salada-salobre
- ubicación de sitios para la construcción de pozos de remediación
- localización de zonas propias para la construcción de confinamientos
- bajar costos de exploración y caracterización de marcos geológicos

La tabla 1.1 muestra las propiedades fundamentales y relaciones en las cuales se basan diversos métodos geofísicos.

METODO	CAMPO DE FUERZA	PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS
Magnetometría	Campo magnético terrestre	Permeabilidad magnética (μ)
Gravimétrico	Campo gravitacional terrestre	Densidad (ρ)
Eléctrico	Campo eléctrico natural Campos eléctricos, electromagnéticos y Magnéticos artificiales	Conductividad eléctrica (σ) Potenciales REDOX, pH Permeabilidad magnética (μ)
Sísmico	Naturales y artificiales generadores de ondas	Densidad (ρ) y elasticidad
Radioactivo	Radiación radioactiva	Radionúcleos y radiación gamma
Geotérmico	Gradientes de temperatura	Conductividad térmica (c)
Geoquímica	Emanaciones de vapores y Ascenso y descenso de soluciones acuosas	

Tabla 1.1. Diversos métodos geofísicos y sus propiedades geofísicas

1.2 Factores que gobiernan la aplicación de los métodos geofísicos

La aplicación de diversos métodos geofísicos depende en gran porcentaje de la medida en que los contrastes de una o varias propiedades físicoquímicas se den en las estructuras sepultadas.

Algunas técnicas de prospección aparecen como modas y su período máximo de actividad comercial dependen de la publicidad que se le brinde; entre tanto, los métodos geofísicos probados continúan su vertiginoso desarrollo tecnológico (instrumentación y proceso).

Si no existe un contraste asas en las propiedades físicoquímicas de los cuerpos en el medio prospectado, la Geofísica queda limitada en su aplicación, esto es: los materiales geológicos que componen el subsuelo poseen diferentes propiedades físicas que afectan a los campos de fuerza naturales o artificiales de acuerdo a las características físicas propias de cada material; la afectación de los campos de fuerza depende de la medida, masa y disposición estructural de la Unidades o Formaciones Geológicas. La aplicabilidad y selección de algún método en particular depende de muchos factores entre los que destacan:

- tamaño del área a prospectar
- geología estructural disponible
- propósito de la exploración
- profundidad de investigación
- condiciones topográficas del terreno
- propiedades físicas más importantes de los cuerpos objetivo y roca huésped
- costo de la exploración directa
- costo de la exploración geofísica
- localización geográfica de la área a prospectar
- acceso
- estabilidad política

1.3 Profundidad de exploración de los métodos geofísicos

De manera general, la profundidad de investigación en cualquier método de prospección geofísica puede ser definida como:

“profundidad a la cual una delgada capa horizontal, paralela a la superficie del terreno y con un contraste suficiente en sus propiedades físico químicas contribuye con una señal medible”

2. Estructura de las rocas y suelos

La mayoría de las rocas están formadas por agregados de minerales metálicos y no metálicos que constituyen aisladores eléctricos; bajo la acción del metamorfismo, alteración química e intemperismo , se incrementa su conductividad.

La conductividad en un sistema roca-suelo-agua es de dos tipos: electrolítico (mediante iones) y electrónica (a través de partículas minerales metálicas) y está regulada por:

- Porosidad; forma y medida de los poros y su interconexión,
- Espacio del poro ocupado por agua o humedad,
- Concentración del electrolito,
- Temperatura y fase del agua de poro, y
- Cantidad y composición de los coloides.

En los diagramas triangulares presentes en la figura 2.1 aparecen los principales constituyentes de las rocas ígneas de grano grueso, fino y sedimentarias.

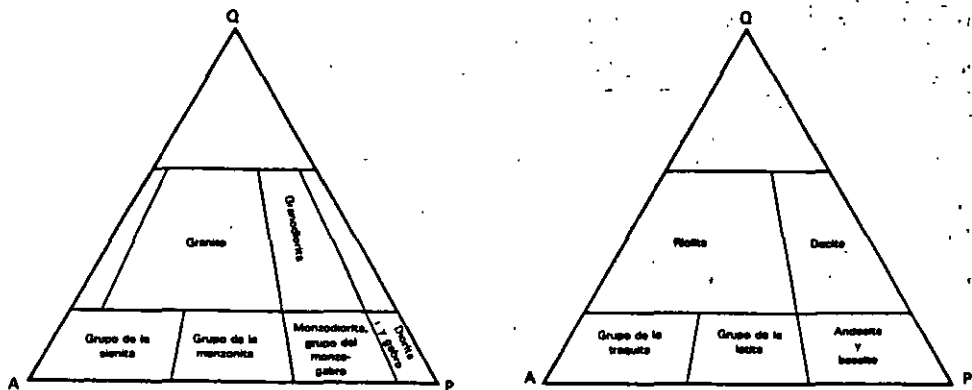


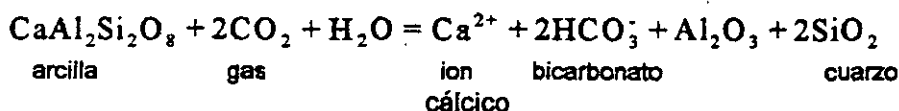
Figura 2.1 La International Union of Geological Societies presenta la clasificación de las rocas ígneas de grano grueso, fino y sedimentarias. Para todos los casos: Q, cuarzo; A, Feldespato Alcalino y P, Plagioclasas.

Debido a la acción de agentes mecánicos (producción de arenas y limos) y químicos (generación de arcillas) las rocas pasan a formar suelos depositados en diferentes ambientes. Se observa que la descomposición de las rocas forma suelos de partículas minerales con cierto arreglo en sus átomos e iones tales que:

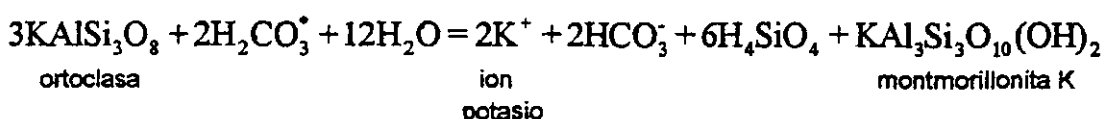
Silicatos	→	Feldespatos: Sódico, Potásico y Cálculo
	→	Micas: olivinos y serpentina
Óxidos	→	Cuarzo, limolita, magnetita y corindón
Carbonatos	→	Calcita y Dolomita
Sulfatos	→	Anhidrita
	→	Yeso

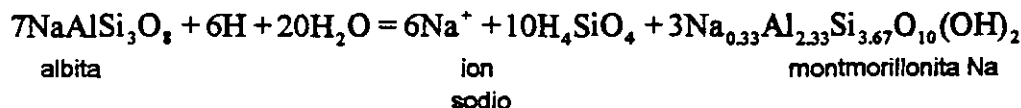
Los productos finales de los procesos fisicoquímicos en el suelo y subsuelo van acompañados de liberación de energía en las formas de calor y electricidad. En las reacciones químicas subsecuentes son mostradas las sustancias originales, productos finales y los tipos de energía liberados.

Pese a que el CO₂ es soluble en el agua y no genera presión de poro, provoca alteraciones en las arcillas, tal que:

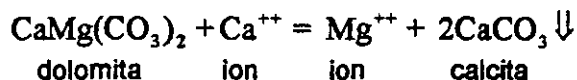


los feldespatos potásicos (ortoclasa) y sódicos (albita) son transformados en montmorillonita de las formas:

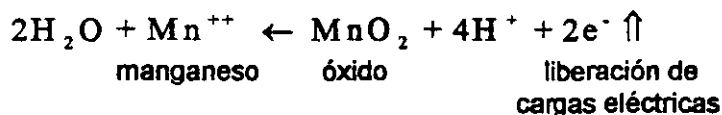




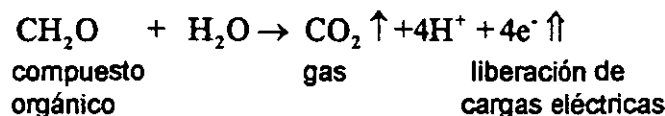
en suelos ricos en carbonatos cálcico-magnésicos, se precipita la calcita:



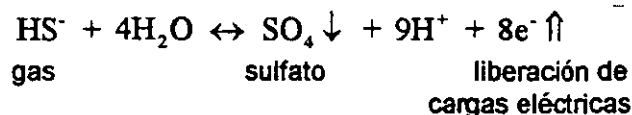
y liberación de energía como potenciales eléctricos de la forma siguiente:



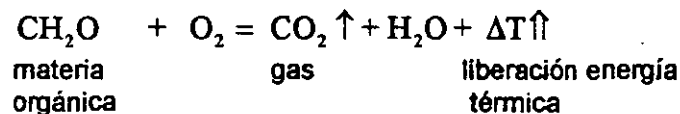
los óxidos de manganeso aparecen en forma de nódulos incrustando tortuosidades, capilares, fracturas y ademes de pozos,



el gas es removido por humectabilidad y pasa a formar presión en el poro. La precipitación de sulfatos ocasiona blanqueamiento de suelos,



la oxidación de la materia orgánica es:



la naturaleza de las anomalías debidas a los procesos electroquímicos que pueden ser mapeadas y cuantificadas mediante diversas técnicas de la prospección geoelectrica son: precipitación de sales \downarrow ; desprendimiento y migración de gases \uparrow ; disolución; acción bacteriana (anaerobias), algas verde y azul; producción de iones; liberación e intercambio de cargas eléctricas \uparrow , blanqueamiento de suelos, alteración química de arcillas, etc.

2.1 Parámetros relevantes de rocas y suelos

Lo más relevante en los materiales geológicos tales como suelos, tobas, tobas híbridas y aluviones es su compacidad, orientación de granos, porosidad y relación de vacíos.

A mayor compacidad le corresponde una permeabilidad baja.

3. Prospección Eléctrica

Tomando en cuenta la composición, estructura y reacciones electroquímicas que se dan en un ámbito geológico, se puede visualizar la bondad que brindan los diferentes métodos eléctricos de prospección.

Los métodos eléctricos ofrecen tres ventajas contundentes en las investigaciones geohidrológicas y geoquímicas: i) cubre grandes áreas en poco tiempo, ii) es una técnica no destructiva y iii) ahorro económico considerable.

Las aplicaciones de la Prospección Eléctrica en problemas relacionados con el agua subterránea y geotécnia ambiental son:

1. Mapeo de fugas de contenedores,
2. Mapeo y demarcación de plumas de contaminación,
3. Monitoreo de fugas de contenedores de hidrocarburos,
4. Monitoreo del agua de inyección,
5. Localización de contenedores enterrados,
6. Caracterización geométrica de acuíferos,
7. Caracterización química de acuíferos,
8. Localización de fugas en presas,
9. Definición de barreras agua dulce-agua salada.

A través de las corrientes naturales y artificiales se estudian las causas y efectos en las Unidades Geológicas de la corteza terrestre. Si el campo eléctrico es natural, la corriente eléctrica que fluye es electroquímica y se denomina autpotencial. Si la fuerza de campo es creada de manera artificial, la corriente puede ser inductiva o conductiva.

3.1 Clasificación de los métodos eléctricos

Una manera sencilla de llevar a cabo una clasificación burda de las diversas técnicas de prospección eléctrica es considerando tanto la fuente de energía como la de medida; de la cual resultan dos grandes grupos descritos a continuación:

METODOS CONDUCTIVOS: La fuente de excitación puede ser corriente alterna o directa; existe contacto directo entre el suelo y los electrodos de transmisión y medición. En ellos se incluye al potencial natural o polarización espontánea (SP), resistividad, ELTRAN y telúrico.

METODOS ELECTROMAGNETICOS: Este grupo se basa en monitorear las propiedades magnéticas del medio asociadas al flujo de corriente eléctrica en corriente alterna; puede o no haber contacto directo entre la fuente de excitación y el medio, a la vez, puede ser parcial. Están incluidos el magnetotelúrico, TEM, audiomagnetotelúrico de fuente controlada, PIM, etc.

3.2 Potencial Natural (SP).

Cuando en los poros del suelo entran en contacto soluciones electrolíticas diversas o existen diferencias en la concentración, se genera un potencial o fuerza electromotriz (fem) denominado "*Potencial de Difusión*".

Los iones mono, di o trivalentes de signo distinto tienen movilidades diferentes que causan una diferencia de potencial ΔV medible en superficie con un voltmetro de alta impedancia y electrodos impolarizables. El potencial está dado por:

$$\Delta V = \frac{u-v}{u+v} \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_1}{C_2}$$

u , v son las movilidades del anión y catión; n es la valencia; R , la constantes de los gases; T , es la temperatura absoluta y F la constante de Faraday. El potencial de difusión sirve para determinar las zonas de aporte en agujeros exploratorios.

Otra manera de generación del potencial natural es debido a los potenciales REDOX generados por la variación vertical del pH en los estratos; es relativo solo a la humedad volumétrica (θ) en donde θ y ω está determinado por cualquier fluido y no solamente agua..

En las figuras 3.1 y 3.2 son presentados los mecanismos que regulan el potencial natural, ya sea por contacto entre electrolitos o por los potenciales REDOX.

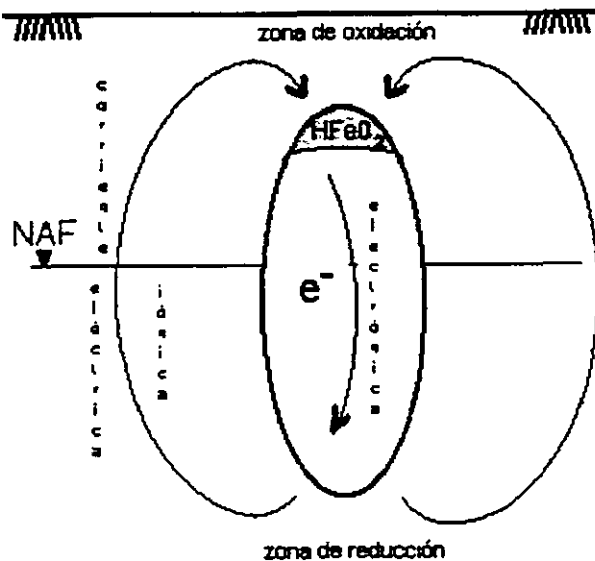


Figura 3.1 SP debido a electrolitos con diferente movilidad.

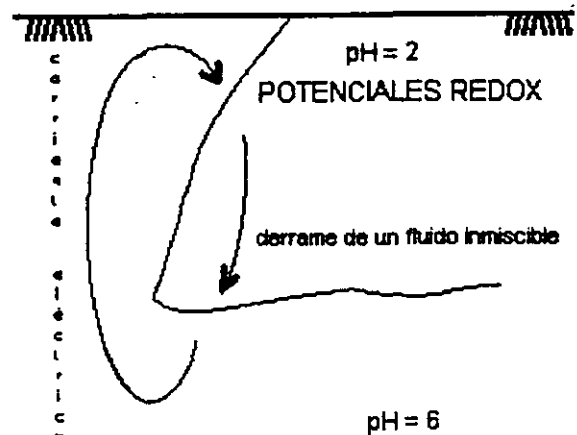


Figura 3.2 SP debido a potenciales REDOX.

La toma de datos es hecha con un potenciómetro de alta impedancia, cables y electrodos impolarizables; existen dos procedimientos básicos: el de Potenciales que consiste en evaluar directamente la diferencia de potencial en estaciones respecto a un punto de referencia y el de gradientes, el cual mide la diferencia de potencial sucesivamente entre dos estacas contiguas de la sección. La figura 3.3 muestra las dos técnicas de levantamiento.

a. método de potenciales

b. método de gradientes

Figura 3.3 Procedimientos de campo para medir el SP.

3.3 Química electroquímica

Las reacciones electroquímicas que resultan del contacto entre sustancias, son estudiadas por la química electroquímica.

Los electroquímicos saben que en la interface de un electrodo metálico y un electrolito se desarrolla una diferencia de potencial aunque no exista un flujo de corriente.

Esta caída de potencial a flujo de corriente cero es un fenómeno reversible y su observación es difícil. En el electrolito la conducción es iónica y en el electrodo metálico es electrónica.

La figura 3.4 muestra al sistema del electrodo y solución en equilibrio, así como el potencial cero, según Grahame (1947).

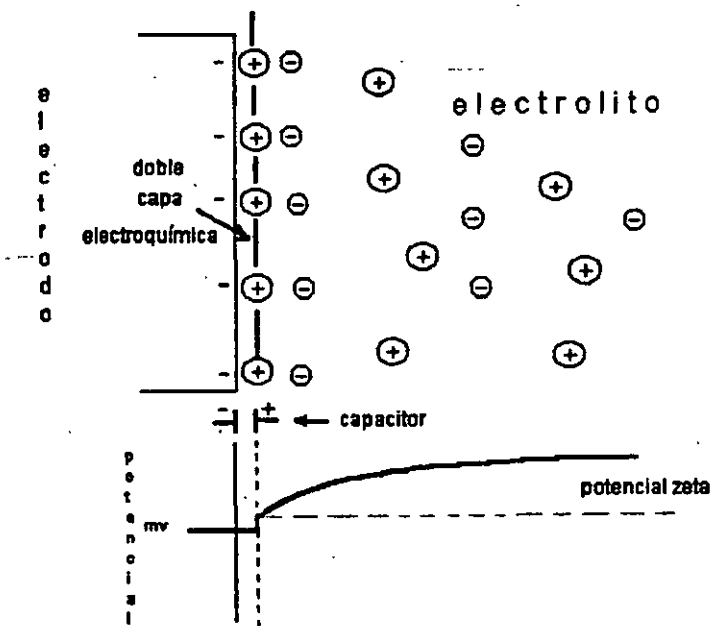


Figura 3.4 Potencial Cero en la interface del electrodo y electrolito.

3.4 Sobrevoltaje.

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de la interface, la caída de potencial cero cambia a uno de características irreversibles. La diferencia algebraica entre el potencial nuevo y el inherente a flujo cero de corriente se le denomina sobrevoltaje (η), es descrito como:

$$\eta = \text{potencial nuevo irreversible (observable)} - \text{potencial cero reversible (no observable)}$$

El sobrevoltaje es la energía potencial extra requerida para iniciar un proceso electroquímico que envuelve transferencia de cargas. La actividad química en interfaces y el sobrevoltaje guardan una relación directa, esto es: si la primera es grande, la segunda también.

A partir del valor de la relación $26/n$, donde n es el número de equivalentes molares, el sobrevoltaje presenta un comportamiento no lineal.

3.5 Doble Capa electroquímica.

Contiguo al electrodo y capa fija existe una zona difusa de iones cuya existencia y carácter depende del flujo de corriente a través de la interface. Dependiendo de la densidad de corriente y dirección del flujo, los iones de la capa difusa pueden tener signo opuesto o igual. La concentración de iones en la capa difusa disminuye de manera exponencial a distancia del electrodo. La caída de potencial en la zona difusa se le denomina "potencial zeta".

Nernst demostró que para los sobrevoltajes producidos con corrientes pequeñas, las condiciones de equilibrio permanecen y el sobrevoltaje puede ser valuado como función de la corriente:

$$\eta = - J (RT/nFJ_0)$$

donde el término (RT/nFT_0) es conocido como "resistencia de polarización"; R , es la Constante de los gases; T , temperatura; F , constante de Faraday; J_0 , densidad de corriente inicial, y n el número de moles.

3.6 Trayectorias Farádicas (corrientes conducción) y no farádicas (corrientes de desplazamiento).

De manera ideal, la corriente puede ser transportada por dos diferentes trayectorias en un electrolito en contacto con un electrodo. La primera trayectoria es directa o farádica, debida a la transferencia de cargas electroquímica regulada por los potenciales REDOX, así como por la difusión de iones a través de la interface. La segunda trayectoria o por corrientes de desplazamiento, consiste de la carga y descarga de la doble capa electroquímica de una manera no farádica que envuelve una capacitancia eléctrica.

3.7 Circuito equivalente, una explicación del comportamiento eléctrico de los materiales geológicos.

Asumiendo que el cuerpo de cualquier material geológico aparece en la figura 3.5; en la tortuosidad existe la presencia de minerales metálicos (pirita) y no metálicos (arcilla); las trayectorias y comportamiento eléctrico pueden ser a través del análisis del circuito equivalente de la figura 3.6.

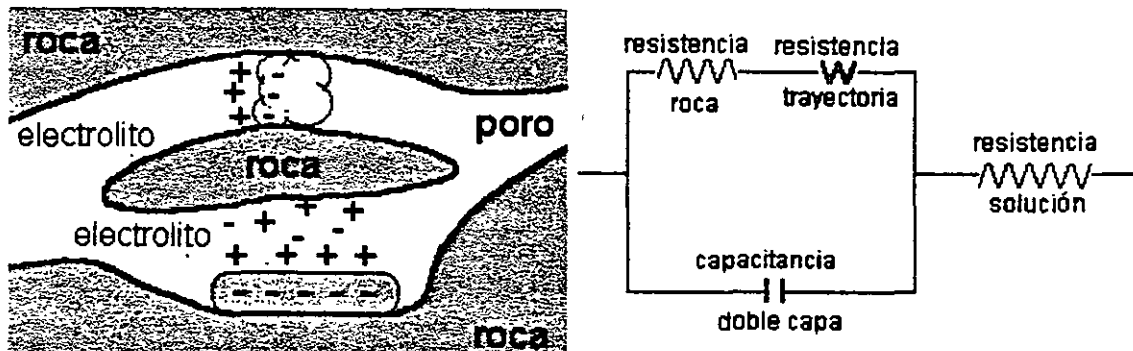


Figura 3.5 Idealización de un material geológico. Figura 3.6 Circuito equivalente de un material geológico

La impedancia o resistencia compleja debida a la difusión de iones en la trayectoria farádica no es una simple conexión entre resistores y capacitores. Grahame en 1952 la denominó como Warburg (W) la que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia (f), a mayores magnitudes de f , $W \rightarrow 0$.

La figura 3.7 muestra la respuesta del circuito equivalente del sistema, se aprecian las trayectorias farádicas o galvánicas y su respuesta eléctrica, la impedancia Warburg y las trayectorias no farádicas o de las corrientes de desplazamiento.

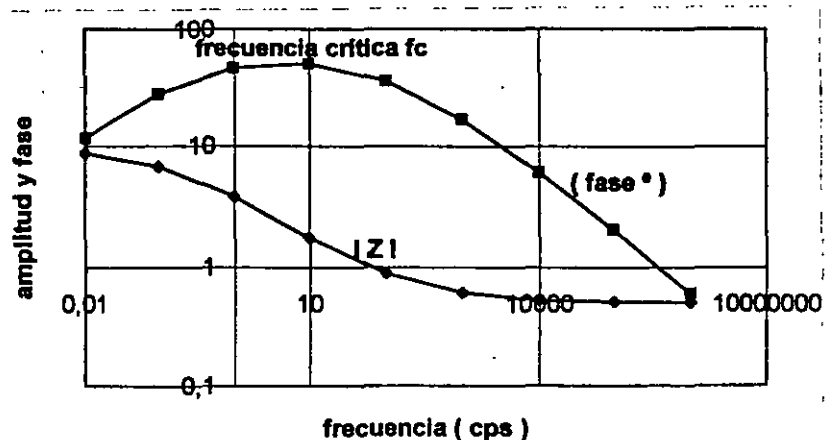


Figura 3.7 Respuesta Eléctrica del Circuito Equivalente.

3.8 Fórmulas elementales.

Ohm estableció que la corriente (I) que circula en un circuito es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica (R): $I = \Delta V/R$; la diferencia de potencial es ΔV . Para cualquier aislante o conductor, se puede definir a la resistencia eléctrica característica (ρ) como: $R = \rho(L/A)$, siendo L la longitud de la muestra y A la sección perpendicular al flujo de la corriente.

Al combinar las dos expresiones anteriores se tiene que la resistencia eléctrica característica de un material es:

$$\rho = (\Delta V \cdot A) / (I \cdot L)$$

3.9 Ecuación diferencial de la Ley de Ohm.

Asumiendo un elemento suficientemente pequeño de material geológico por donde circula la corriente i perpendicular a los planos Q a P separados una distancia dL , así considerando una muestra de material de resistividad característica ρ y de sección transversal A , la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

La que cumple con las condiciones de régimen establecido, el flujo de corriente de ninguna manera modifica la resistividad característica del medio. Aplicando la ecuación forma diferencial de la Ley de Ohm, resulta:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

Es la ecuación de Laplace que relaciona el paso de la corriente eléctrica, la resistividad del medio y su conductividad eléctrica.

Para resolver la ecuación diferencial, se toman las condiciones de frontera, considerando que el valor de $V(r)$ en el infinito es cero, el flujo es radial a través de una semiesfera, etc. Por tanto la solución es de la forma:

$$V(r) = I\rho/4\pi r$$

Que es el valor del potencial en cualquier punto r en un medio isotrópico y homogéneo.

3.10 El Potencial y su distribución en el medio.

Al normalizar la función potencial $V(r)$ por un factor igual a $I\rho/4\pi$, queda que : $V(r) = 1/r$, en donde r es la distancia que existe entre el punto de medida y la fuente.

La siguiente tabla muestra los valores de $V(r)$ para diferentes estaciones de r , la gráfica de la figura 3.8.

r	0	1	2	3	4	5	10
$V(r)$	Infinito	1	.5	.333	.25	.21

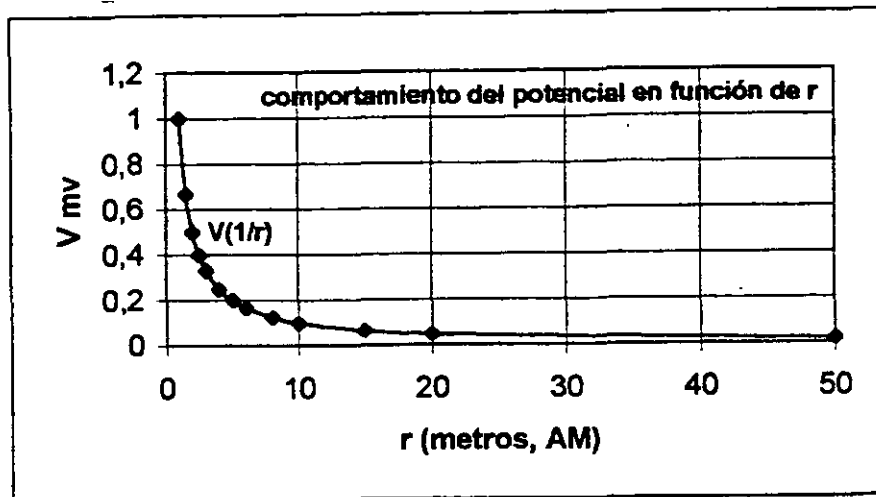


Figura 3.8 Variación del potencial en función de r en los electrodos +I e -I.

3.11 Anisotropía eléctrica

La forma y orientación de las elipses equipotenciales en la vecindad de un electrodo inyectando una corriente eléctrica están relacionadas al echado y grado de anisotropía del material geológico.

La resistividad verdadera presenta un máximo en cierta dirección, usualmente en la dirección perpendicular a los estratos, se define como "resistencia transversal, ρ_t " y otro valor mínimo paralelo a la estratificación conocida como "resistencia longitudinal, ρ_l ". Si se define $\lambda^2 = \rho_t / \rho_l$. En un medio isotrópico la resistividad media está dada como $\rho_m = (\rho_t / \rho_l)^{1/2}$, lo que significa que la resistencia transversal será λ veces mayor que ρ_m y la resistencia longitudinal será $1/\lambda$ la referencia citada. El coeficiente $\lambda = (\rho_t / \rho_l)^{1/2}$ es denominado "coeficiente de anisotropía".

La macroanisotropía está dada para las resistencias transversal y longitudinal como :

$$\rho_t = \frac{\sum \rho_i / h_i}{\sum h_i}$$

$$1 / \rho_l = \frac{\sum h_i / \rho_i}{\sum h_i}$$

3.12 Los campos eléctricos de excitación.

Existen dos grandes grupos para el estudio de los fenómenos eléctricos, uno es el de la Corriente Continua (CC) y otro el de Corriente Alterna (CA).

Una corriente continua permanece constante en el tiempo figura 3.9, es considerada "la frecuencia 0", tiene la desventaja de polarizarse y recibe el acoplamiento fácilmente del ruido electromagnético. El circuito equivalente para simular el comportamiento de un material geológico es una resistencia.

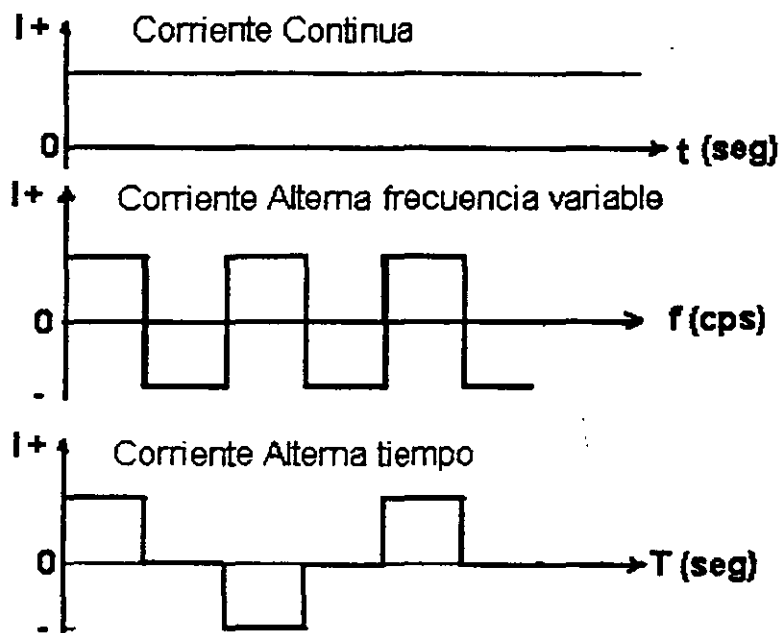


Figura 3.9 Campos de excitación para materiales geológicos.

En corriente alterna, figura 3.9, la energía de excitación varía en el tiempo, presenta dos modalidades básicas: i) Dominio del Tiempo (DT); ii) Dominio de la Frecuencia (DF). Ambos son equivalentes mediante las Transformadas de Fourier o Laplace.

La relación entre el período T (DT) y la frecuencia f en (DF) está dada por : $f = 1/T$. Para que cualquiera de ellos se aproxime a la Corriente Directa, es necesario que $T \rightarrow \text{ifinito}$ y $f \rightarrow 0$.

La profundidad hasta la que se propagan las ondas electromagnéticas está dada por la profundidad skin (δ) como:

$$\delta = (2 \rho / \omega \mu)^{1/2} \quad \text{ó} \quad \delta = 1 / \{2 \pi (10 \rho T)^{1/2}\}$$

3.13 Técnicas del sondeo y perfilaje.

De acuerdo a los objetivos del levantamiento de resistividad, existen dos procedimientos básicos, son:

1. SONDEO DE RESISTIVIDAD. El centro del arreglo permanece fijo mientras que el intervalo del espaciamiento entre el electrodo de transmisión y recepción cambia. La profundidad de exploración se incrementa conforme se aumenta la distancia entre electrodos. En el sondeo de resistividad se conoce la variación de esta a profundidad.
2. PERFILAJE DE RESISTIVIDAD. En la práctica del perfilaje el centro del arreglo cambia y el intervalo permanece fijo. La profundidad de exploración permanece constante. En el perfilaje la variación horizontal de la resistividad se conoce.

3.14 Arreglos electródicos.

Existen tres arreglos de electrodos básicos para la toma de datos durante el sondeo y perfilaje; en todos ellos los electrodos de transmisión o corriente se denominan A y B; mientras que los de recepción o voltaje corresponden a M y N.

En orden de importancia los arreglo de electrodos son el Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Wenner.

El arreglo Schlumberger presenta los cuatro electrodos colineales; en el interior están los de potencial y externos los de corriente. Se debe cumplir la relación $AB > 5MN$. Lo que permite que las mediciones estén libres de efectos de anisotropía. La expresión para el cálculo de la resistividad es:

$$\rho_{sch} = R \cdot \pi a^2 \left(\frac{L}{a} \right)^2 \cdot .25$$

Para el arreglo Dipolo-Dipolo los electrodos se agrupan en dipolos de potencial y corriente, con un espaciamento entre electrodos de x y entre dipolos de nx , donde $n = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ según la profundidad de exploración. La expresión de la resistividad es:

$$\rho_{dd} = R \cdot 2\pi x^2 \left(\frac{1}{1/n} - \frac{2}{(n+1)} + \frac{1}{(n+2)} \right)$$

En el arreglo Wenner se debe cumplir la relación de que $AB = MN/3$. Tiene la desventaja de que al mover los electrodos de potencial aumenta la vulnerabilidad de la caída de potencial. La resistividad aparente está dada por:

$$\rho_w = R \cdot 2\pi a$$

3.15 Cortes Geoelectricos.

Valuando las expresiones del cálculo de la resistividad según el tipo de arreglo, son conformadas las curvas de resistividad aparente en papel bilogarítmico. H. Mooney y E. Orellana determinaron que existen seis tipos de curvas principales, considerando los casos de dos y tres capas, esto es:

1. Curvas tipo ascendente, $\rho_1 < \rho_2$
2. Curvas tipo descendente $\rho_1 > \rho_2$
3. Curva tipo A $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$
4. Curva tipo Q $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$
5. Curva tipo H $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$
6. Curva tipo K $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$

Existen las combinaciones lógicas de ellas, como ejemplo se puede hablar del tipo KH, AKQH; pero no existe una curva tipo AQ. La figura 3.10 muestra los seis tipos de curvas principales.

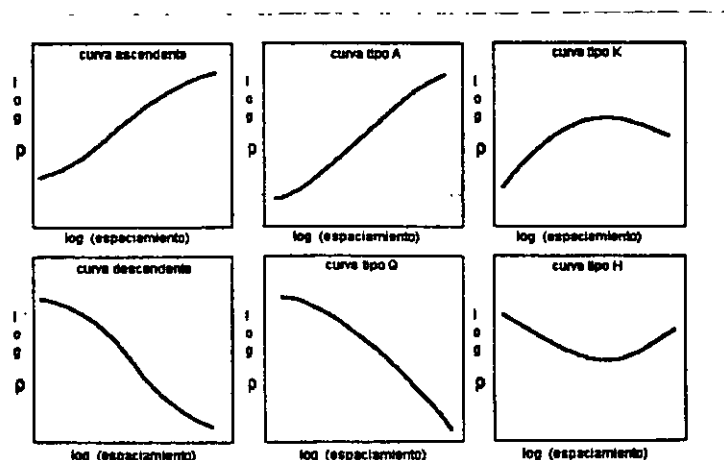


Figura 3.10 Curvas ascendentes, descendentes, A, Q, H y K.

3.16 Principios de Equivalencia y Supresión.

"Un corte geoelectrico produce una sola curva de resistividad aparente; una curva de resistividad aparente puede representar varios cortes geoelectricos"

Esta afirmación queda bien explicada por los principios de equivalencia y supresión.

Principio de Equivalencia. Un estrato resistivo encajonado por dos conductores puede ser sustituido por otro que presente la misma resistividad transversal; o bien, un estrato conductor inmerso en dos resistivos dará la misma curva de resistividad con un estrato que presente la misma conductancia longitudinal. Ver figura 3.11.

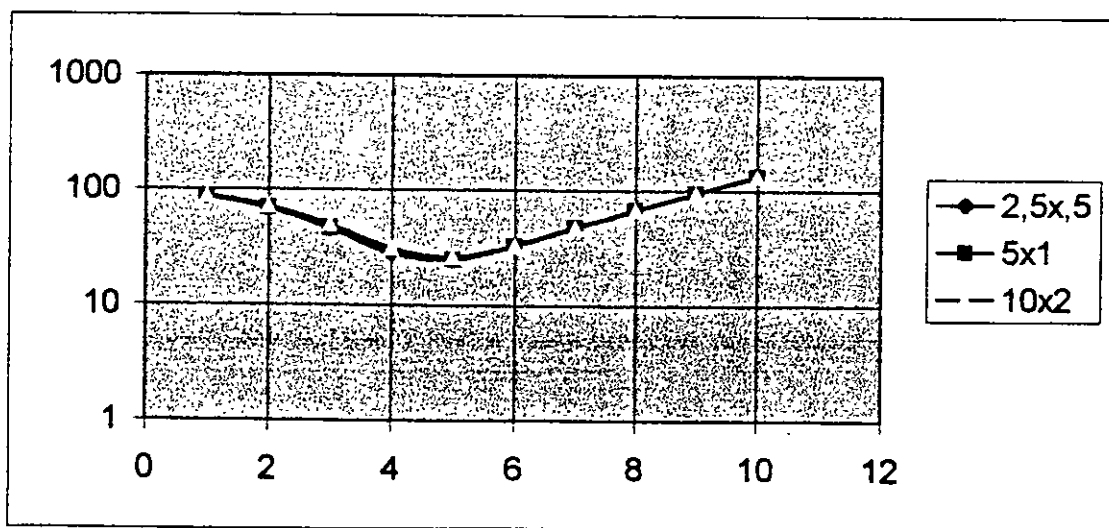
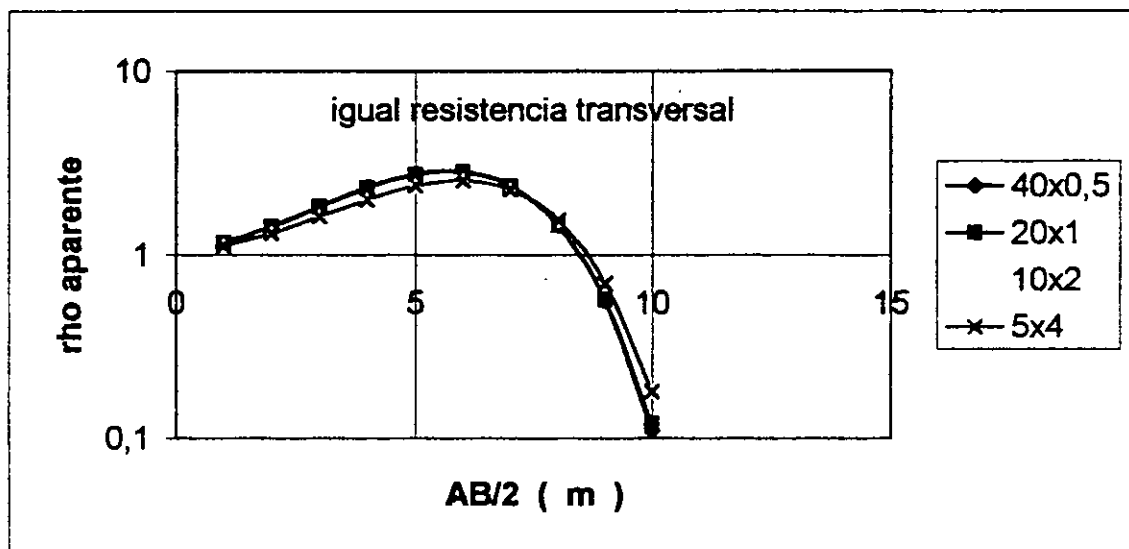


Figura 3.11 Curvas de resistividad aparente mostrando el Principio de Equivalencia, 14

Principio de Supresión. Cuando un estrato de resistividad media no tiene suficiente espesor, no imputará la curva de resistividad aparente final, por tanto ese estrato será prácticamente suprimido.

Este tipo de falla, aparece en estudios de agua subterránea donde existe una capa de aluvión seco sobre otro húmedo reposando sobre en un estrato conductor, donde es imposible definir la profundidad a la que se encuentra este último. Ver figura 3.12.

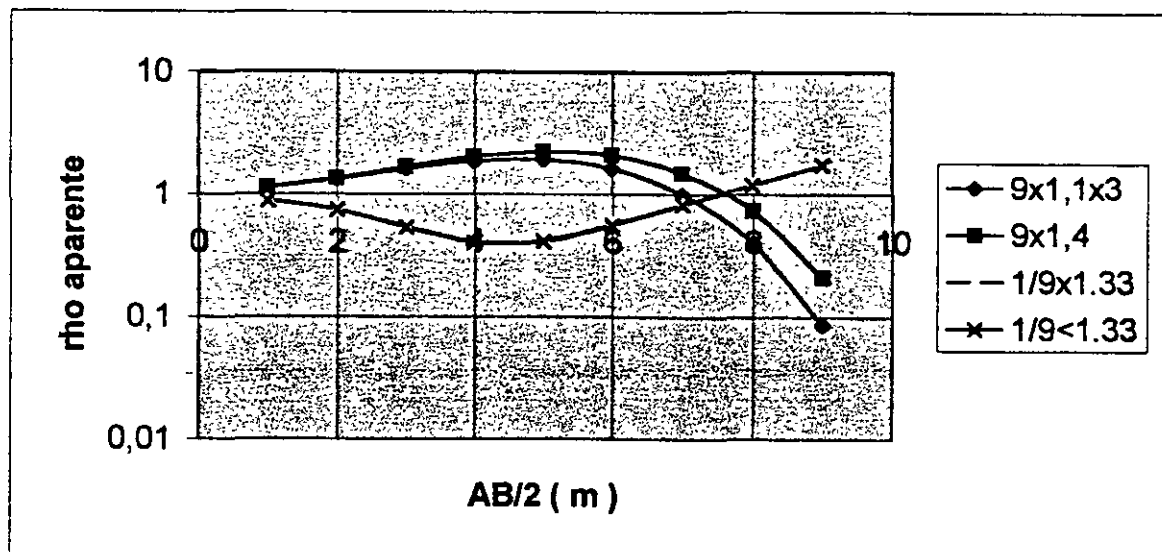
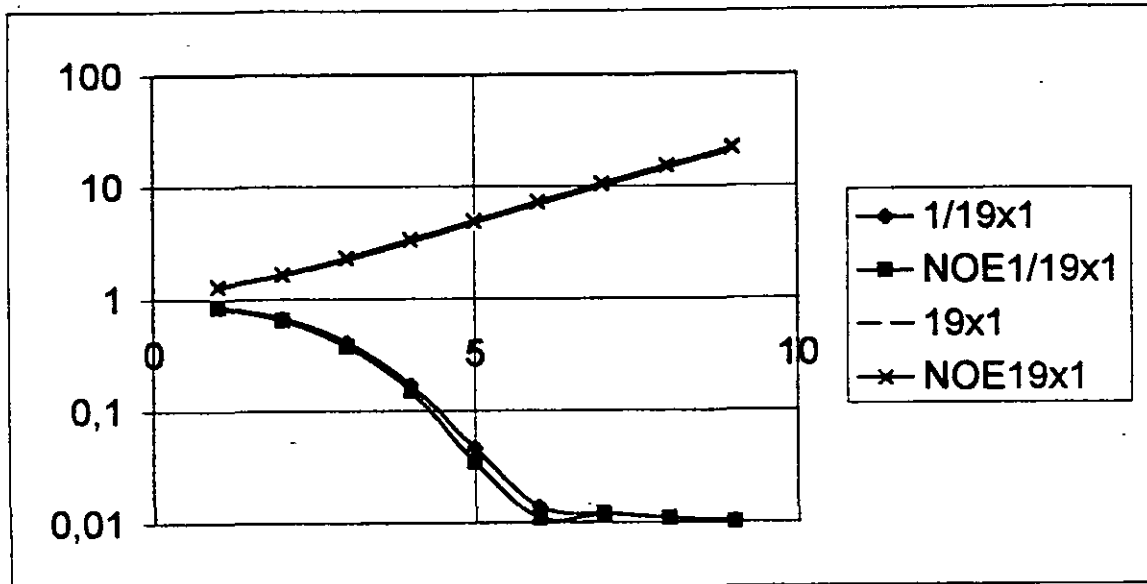


Figura 3.12 Curvas del tipo Q, A, K y H mostrando el Principio de Supresión.

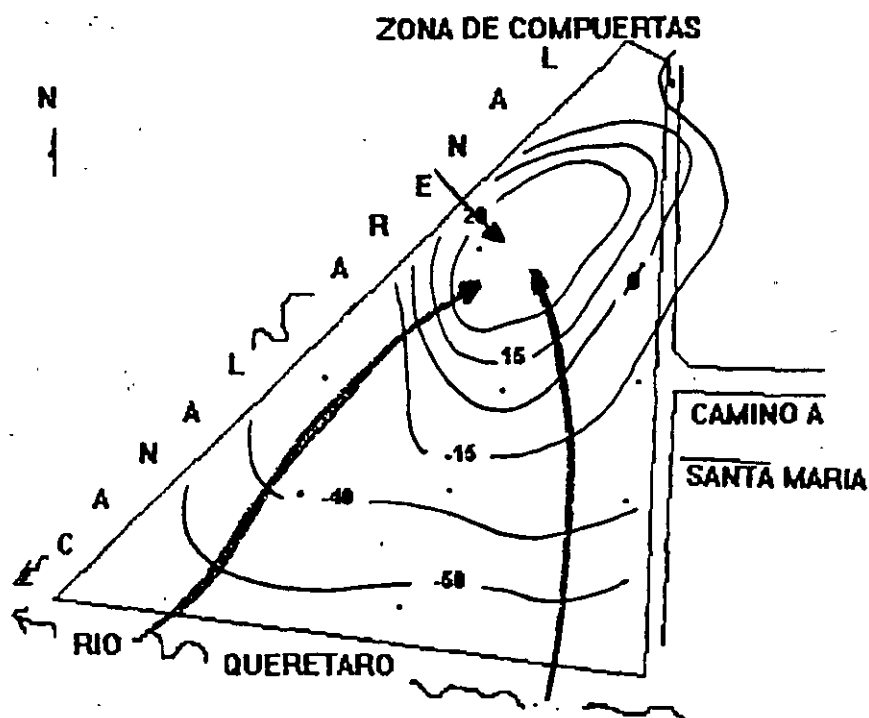
La interpretación automática de los SEV fue originalmente formulada por Zohdy en 1974 y 1975, el proceso envuelve dos pasos para cada espaciamento electródico - AB/2, AB/3, nx -, el primero calcula la función Kernel $T(x)$ para el corte geoelectrico y la segunda es la su convolución con el filtro de Gosh para el arreglo de electrodos a fin de obtener la curva de resistividad aparente;

$$\rho_a = \sum_{j=-3}^5 b_j T(x)_{m-j}$$

Donde \sum es la sumatoria, b_j son los coeficientes del filtro de Gosh y $T(x)_{m-j}$ es la función Kernel discreta.

3.17 Ejemplos de aplicación.

POTENCIAL NATURAL. El Río Querétaro es el receptor de los desechos sólidos y aguas negras provenientes de los asentamientos humanos ubicados a lo largo de su trayectoria. Algunos residuos quedan dispersos en antiguas cajas cuyas zonas vecinas elevan drásticamente su contaminación.



El pH del suelo es bajo, tomándolo agresivo para las estructuras que sean erigidas ahí. Los materiales geológicos en el cauce corresponden con arenas, gravas y boleas poco compactos y mal clasificados; estos materiales son muy permeables, facilitando la invasión del agua contaminada al subsuelo. Con objeto de observar la zona de invasión del agua negra al predio donde se proyecta construir una planta tratadora fue programado el levantamiento de potencial natural cuya anomalía aparece en la figura 3.13. El predio está limitado por los canales de agua negras denominados Arenal y Compuertas.

La invasión está representada por las flechas. Fue necesario proteger a los cimientos con anticorrosivos para brindarles una vida útil mayor.

Figura 3.13 Mapa de potencial natural en el predio de interés.

RESISTIVIDAD I. En la misma zona del estudio anterior fueron realizados 10 sondeos eléctricos verticales con objeto de establecer la estratigrafía y sus relaciones; las aberturas de electrodos fueron de 100 metros máximo, detectando el último contraste a una profundidad de 60 metros promedio, fueron definidas cuatro unidades geoelectricas, ellas son:

1. Arcillas montmorillonitas de 6 a 18 ohms-metro de espesor, presenta grietas por desecación.
2. Toba Mompaní arcillo arenosa de 6 a 17 ohms-metro, su permeabilidad es de 0.0005 m/seg.
3. Basalto Menchaca con resistividades que van de 21 a 73 ohms-metro, intensamente fracturado.
4. Zona saturada con agua de mala calidad percolada cuyas resistividades son < 2 ohms-metro.

La figura 3.14 muestra el bloque diagramático de los sondeos eléctricos verticales interpretados e integrados.

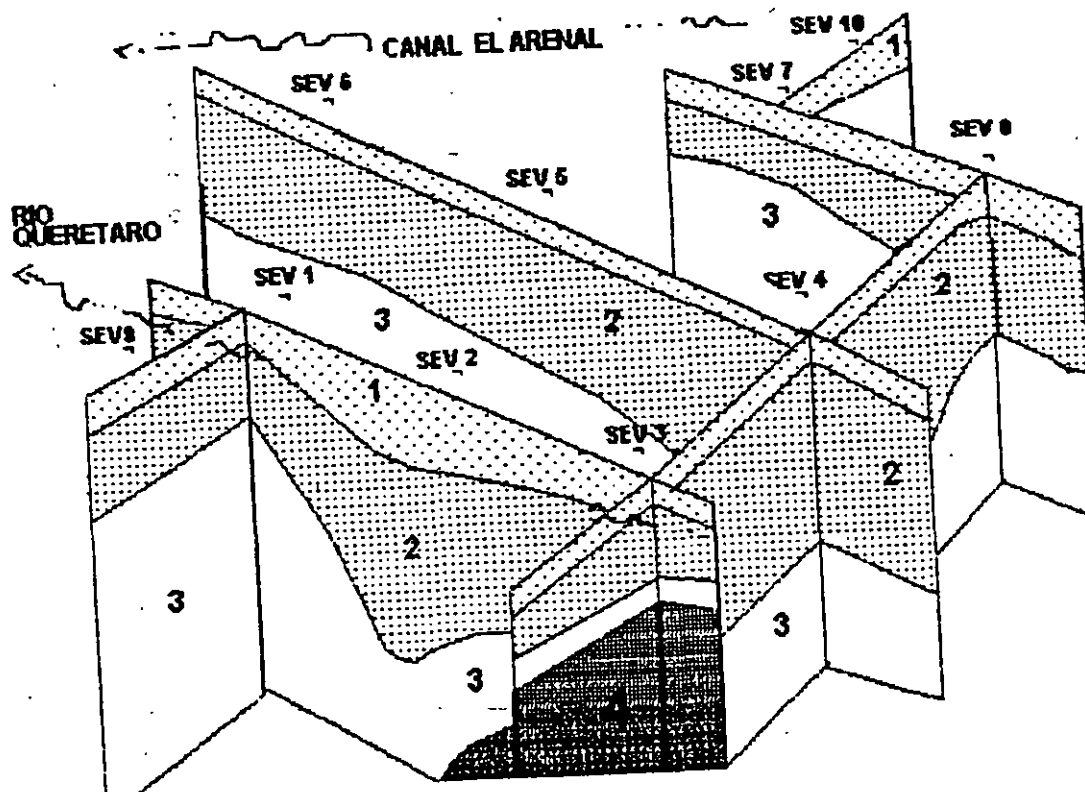


Figura 3.14 Bloque diagramático conformado con los SEV's.

RESISTIVIDAD II. En la porción Sur del Volcán de Tancítaro, Michoacán, afloran dos Unidades Geológicas: Unidades Uruetaro (Tmbu) y San Juanito (Ttsj); correspondiendo a basaltos de fractura cerrada y tobas arcillo arenosas depositadas en un medio acuoso. Con la exploración geoelectrica fueron diferenciadas tres capas – figura 3.15 - descritas como sigue:

- 1) Son cenizas con resistividades que van de 17 a 29 Ω -m, y polarizaciones que van de 35% a 47%; su espesor es de 12 metros y se asocia con materiales geológicos de poco interés geohidrológico
- 2) Presenta resistividades entre 360 y 1864 Ω -m, su polarización va de 1% a 4%, el espesor es de 140 metros y se correlaciona con lavas poco fracturadas y por tanto no saturadas.
- 3) Con resistividades que van de 56 a 96 Ω -m y polarizaciones medias del 15% al 24% esta unidad alcanza los 464 metros de profundidad explorados, se correlaciona con la Unidad San Juanito y resultó estar saturada, proporcionando un caudal de 13 lps.

SECCION GEOELECTRICA CAÑADA VERDE

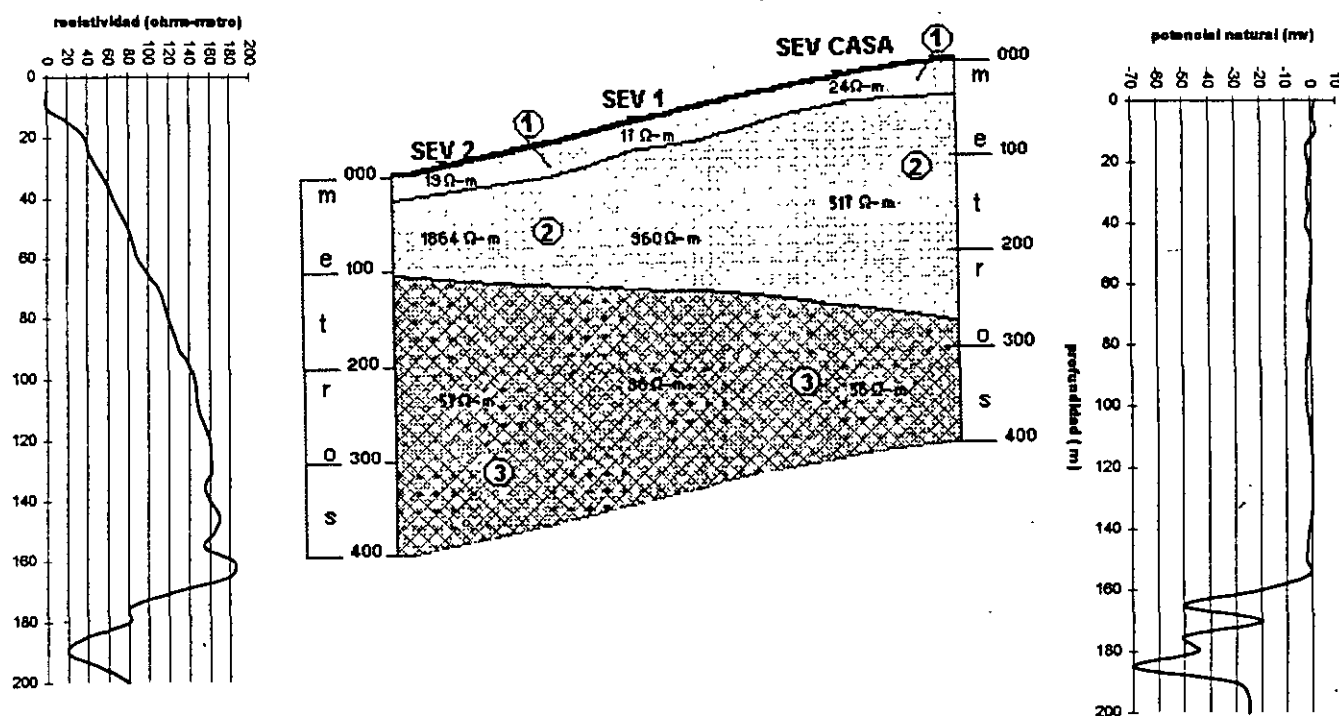


Figura 3.15 Registros geofísicos de pozos y sección geoelectrica interpretada.

La actividad eléctrica mostrada por el registro del potencial natural y la inherente baja resistividad a partir de 160 metros al fondo del agujero, confirma el intervalo de la Formación Acuifera.

De la superficie a 160 metros de profundidad, no existe actividad eléctrica, concordando con la curva de resistividad que en ese intervalo no existe la presencia de agua.

RESISTIVIDAD III. En el predio donde se construyó el relleno sanitario la los Municipios de Querétaro, El Pueblito y Hércules, se realizaron diferentes secciones geoelectrica con objeto de construir la disposición estructural de las unidades geológicas en el subsuelo y demarcar la contaminación residual del relleno anterior. En este caso de historia se presenta la Sección I realizada con dirección NNE-SSW en el límite poniente del predio de proyecto, está conformada por cinco sondeos y fueron diferenciadas cuatro unidades geoelectricas distribuidas como se muestra en la figura 3.16; ellas son:

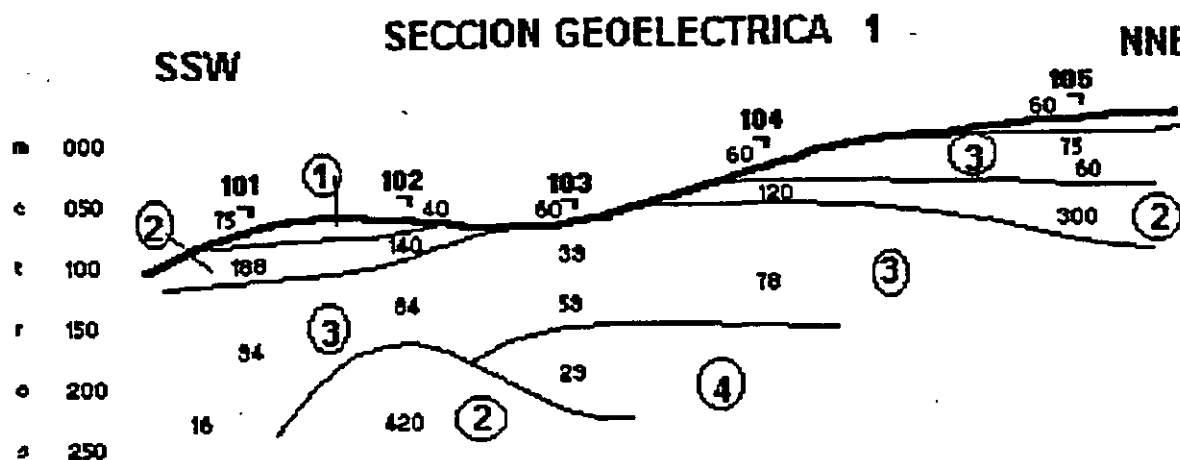


Figura 3.16. Sección Geoelectrica NNE-SSW en el predio de Mompaní, Querétaro; el cual es utilizado como vertedero de desechos sólidos. U1, suelo residual, caliche y tobas; U2, lava fracturada; U3, tobas de caída libre (pómez) muy permeables y U4, tobas humectadas con lixiviados.

UNIDAD 1. Comprende las resistividades entre 40 y 75 ohms-metro, su espesor es de 2 metros promedio, se correlaciona con tobas líticas, caliche y suelo residual.

UNIDAD 2. Comprende las resistividades entre 120 y 420 ohms-metro, su espesor promedio es de 12 metros, es correlacionada con una lava fracturada.

UNIDAD 3. Comprende las resistividades entre 35 y 94 ohms-metro, su espesor promedio es de 40 metros. Se distribuye de manera uniforme en toda la zona. Se correlaciona con tobas pumíticas de permeabilidad alta.

UNIDAD 4. Comprende las resistividades entre 16 y 29 ohms-metro, su espesor no fue detectado pero se sume alcanza la profundidad explorada que fue de 215 metros. Se correlaciona con las tobas de la Unidad 3 solo que aparentemente están humectadas con los lixiviados producto de la percolación de la basura descompuesta.

3.18 El método de polarización inducida.

Como se mostró en los incisos 3.6 y 3.7, en los materiales geológicos aparecen las trayectorias farádicas o galvánicas y las no farádicas; estas últimas presentan características particulares de polarización de acuerdo al volumen de arcilla o partículas minerales metálicas diseminadas.

Con el entendimiento de estos fenómenos y el nacimiento de las bases físico matemática a inicios de los 40's, el método de polarización inducida comenzó resolviendo problemas de ingeniería.

3.19 Polarizaciones de membrana y electrodo.

La corriente alterna que fluye en un sistema electrodo-electrolito produce una polarización debido a dos fenomenologías: i) Polarización de Electrodo y ii) Polarización de Membrana.

La Polarización de Electrodo - figura 3.17 - se produce en el contacto de partículas minerales metálicas y un electrolito, en la interface se produce la doble capa electroquímica cuyo comportamiento es similar al de un capacitor que almacena energía. Las anomalías debidas a la polarización de electrodo son las más importantes para la minería y geotécnia ambiental.

La Polarización de Membrana - figura 3.17 - es la polarización de fondo y se observa en ausencia de conductores minerales metálicos, es debida básicamente a los efectos de los minerales no metálicos como las arcillas. Las anomalías de la polarización de membrana son de interés en geotécnia ambiental y geohidrología.

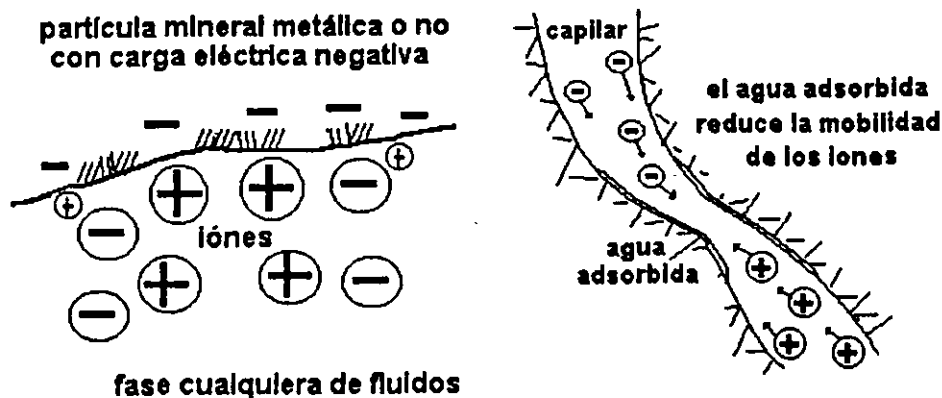


Figura 3.17 Polarizaciones de electrodo y membrana.

De la resolución del circuito equivalente de la figura 3.5, se deduce que la polarización puede ser observada por medio del efecto de frecuencia (EF), definido como el porcentaje de cambio de la impedancia a dos frecuencias diferentes; una baja (ρ_{cc}) y otra alta (ρ_{ca}) resultando la expresión:

$$PEF = (\rho_{cc}/\rho_{ca} - 1) \cdot 100$$

El parámetro equivalente en el Dominio del Tiempo es la Cargabilidad ($M=V_s/V_p$), es equivalente al Efecto de Frecuencia a través de la transformada de Laplace como:

$$EF @ M/(1 + M)$$

3.20 Relaciones entre magnitudes de polarización y resistividad.

La resistividad es un caso particular de la polarización inducida ($PEF = 0$), para comprender mejor la interconexión entre la polarización y la resistividad bastará analizar de manera cualitativa las relaciones entre máximos y mínimos dados en la tabla siguiente:

Resistividad	polarización	eventualidad geológica asociada
Alta	baja	Roca
Alta	alta	Arcilla dura y seca o roca con fracturas llenas de arcilla
Baja	baja	Intercalaciones de arcillas, limos y arenas o roca fracturada saturada con agua termal
Baja	alta	Paquete de arcillas o roca muy alterada

3.21 Casos de historia

POLARIZACION INDUCIDA. Por medio de la polarización inducida fue posible definir los contactos, estructura y características de arcillosidad en una sección geoelectrica realizada en el área de Ocampo – Nuevo Morelos, Estado de San Luis Potosí. La resistividad pone de manifiesto la disposición estructural de las Formaciones Geológicas, y la polarización discrimina las lutitas de calizas y areniscas.

La figura 3.18 muestra la sección interpretada y las curvas de resistividad aparente y efecto de frecuencia determinada en campo.

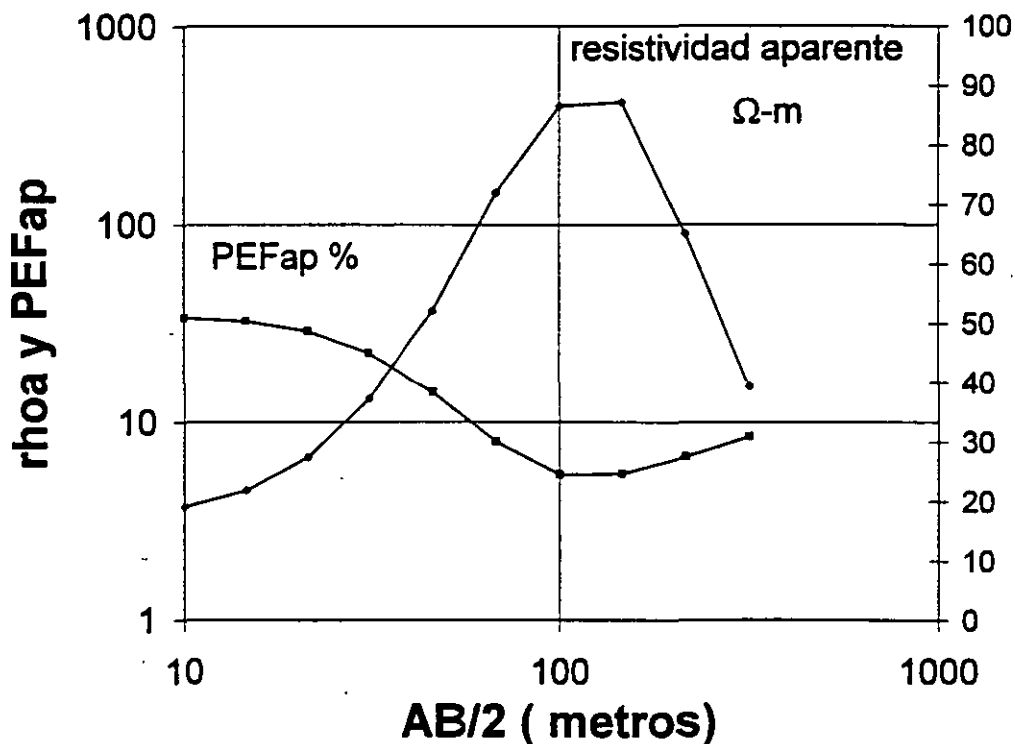


Figura 3.18. Sección Eléctrica, curvas de resistividad aparente y polarizabilidad.

4. Prospección Sismológica.

Cuando un terremoto o golpe perturba el interior de la tierra, el disturbio es transmitido punto a punto del "medio continuo" por medio de las ondas elásticas que dependen de los parámetros de Lammé y de la elasticidad del medio de propagación.

Las deformaciones pequeñas y proporcionales al esfuerzo son estudiadas mediante la Ley de Hooke; las constantes elásticas del material son definidas mediante cuatro módulos elásticos:

RELACION DE POISSON (ν). Relación entre el cambio unitario de área de la sección transversal y la deformación longitudinal unitaria.

MODULO DE YOUNG (E). Es la relación entre esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria.

MODULO DE RIGIDEZ (G). Es la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos de deslizamiento.

MODULO DE BULK (K). Es la relación entre la presión (hidrostática) y el cambio de volumen unitario.

La valuación de los módulos elásticos en laboratorio es con volúmenes muy pequeños de material y en condiciones estáticas que de ninguna manera representan al material de interés. Razón por la cual los módulos elásticos son cuantificados "in situ" mediante las magnitudes de ondas elásticas V_p (longitudinal o compresión) y V_s (cizalla o corte). Dado que las velocidades de propagación de las ondas sísmicas están relacionadas con la Relación de Poisson, está dada como:

$$\nu = \frac{[V_p/V_s]^2 - 2}{2[V_p/V_s]^2 - 2}$$

mientras que las constantes de Lammé y la densidad del material ρ están relacionadas a las velocidades de propagación por:

$$V_p = \left[\frac{K + 4\nu/3}{\rho} \right]^{1/2} \quad \text{y} \quad V_s = \left[\frac{\nu}{\rho} \right]^{1/2}$$

4.1 Métodos de Reflexión y Refracción.

Las ondas de compresión se propagan en la superficie y subsuelo, retornando por reflexión y refracción; poseen las más altas velocidades. Las ondas V_s se propagan de la misma manera que las de compresión, solo que su movimiento perpendicular a la dirección de viaje.

Se puede decir que las ondas longitudinales están asociadas a la compresión uniaxial y las de cizalla al esfuerzo cortante. Las ondas superficiales son en extremo mucho más lentas y de forma compleja que las ondas de cuerpo. Su tiempo de propagación es 20% menor a las V_s , son de baja frecuencia, existen dos tipos: las Rayleigh y las Love.

La velocidad de propagación de las ondas elásticas en los diferentes tipos de roca varía de acuerdo a: grado de acidez de la roca, silicificación, grado de saturación de cualquier fluido, consolidación, cantidad de agua retenida en los poros, fracturación, alteración, densidad y vejez. En la tabla 4.1 se presentan los rangos de densidad y velocidad de algunos materiales de la corteza terrestre según Parasnis (1971), Gurvich (1972) y Sharma (1976).

Las modalidades de refracción y reflexión aparecen en la figura 4.1. En Geotécnia Ambiental y Geología Económica es usual la práctica del método de refracción sísmica, por lo que serán mostrados tanto el trabajo de campo como la forma de interpretación.

MEDIO DE PROPAGACION	DENSIDAD ρ (gr/cm ³)	VELOCIDAD V_p (m/seg)
Aire	0.0013	330
Basalto	2.70-3.30	5500-6300
Arcilla	1.5-2.5	1100-2500
Granito	2.52-2.82	4750-6000
Caliza	2.58-2.80	3400-7000
Arena	1.60-1.90	600-1850
Arenisca	2.15-2.70	2100-4500
Agua	0.98-1.01	1430-1590

Tabla 4.1 Valores característicos de la densidad y velocidad de compresión.

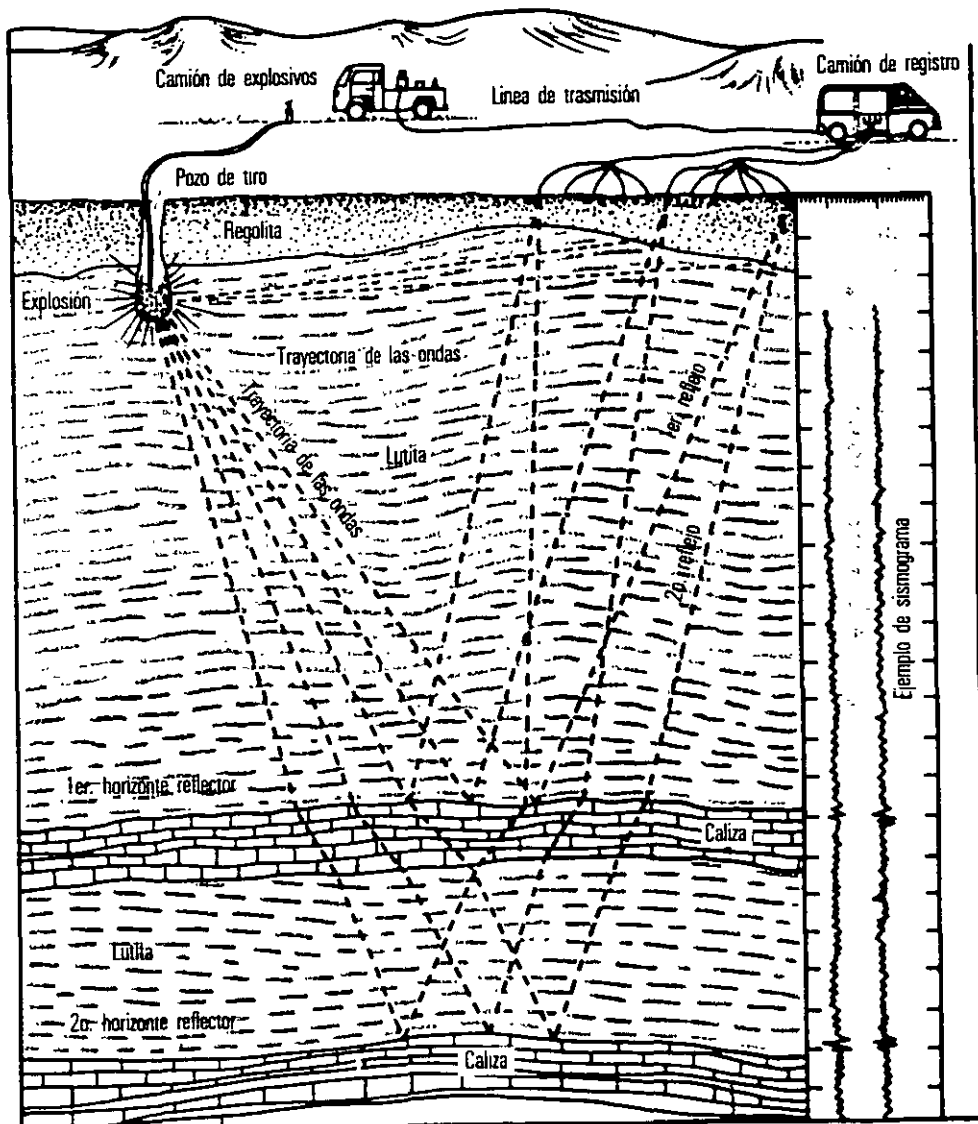


Figura 4.1 Modalidades de refracción y reflexión sísmológica.

4.2 Metodología de campo.

La figura 4.1 muestra los frentes de onda viajando a través de los estratos a un geófono desde la fuente -punto golpe de martillo, explosión o vibro-, el frente de onda alcanza el geófono después de un tiempo (t) que depende de la distancia (d) al martillo y de las velocidades características del medio. Los arribos de las ondas producen vibraciones en el geófono que son amplificadas por el sismógrafo y visualizadas en la pantalla del mismo. La mayor dificultad es la selección de la ondícula del primer aribo.

Una vez seleccionado el sitio del sondeo geosísmico (SG), son establecidos los intervalos de medida, se registran los tiempos de aribo desde cada fuente configurando las gráficas tiempo-distancia, conocidas como Curvas Dromocrónicas (figura 3.12)

La figura 4.2 muestra los sismogramas de un levantamiento de refracción, y su representación gráfica.

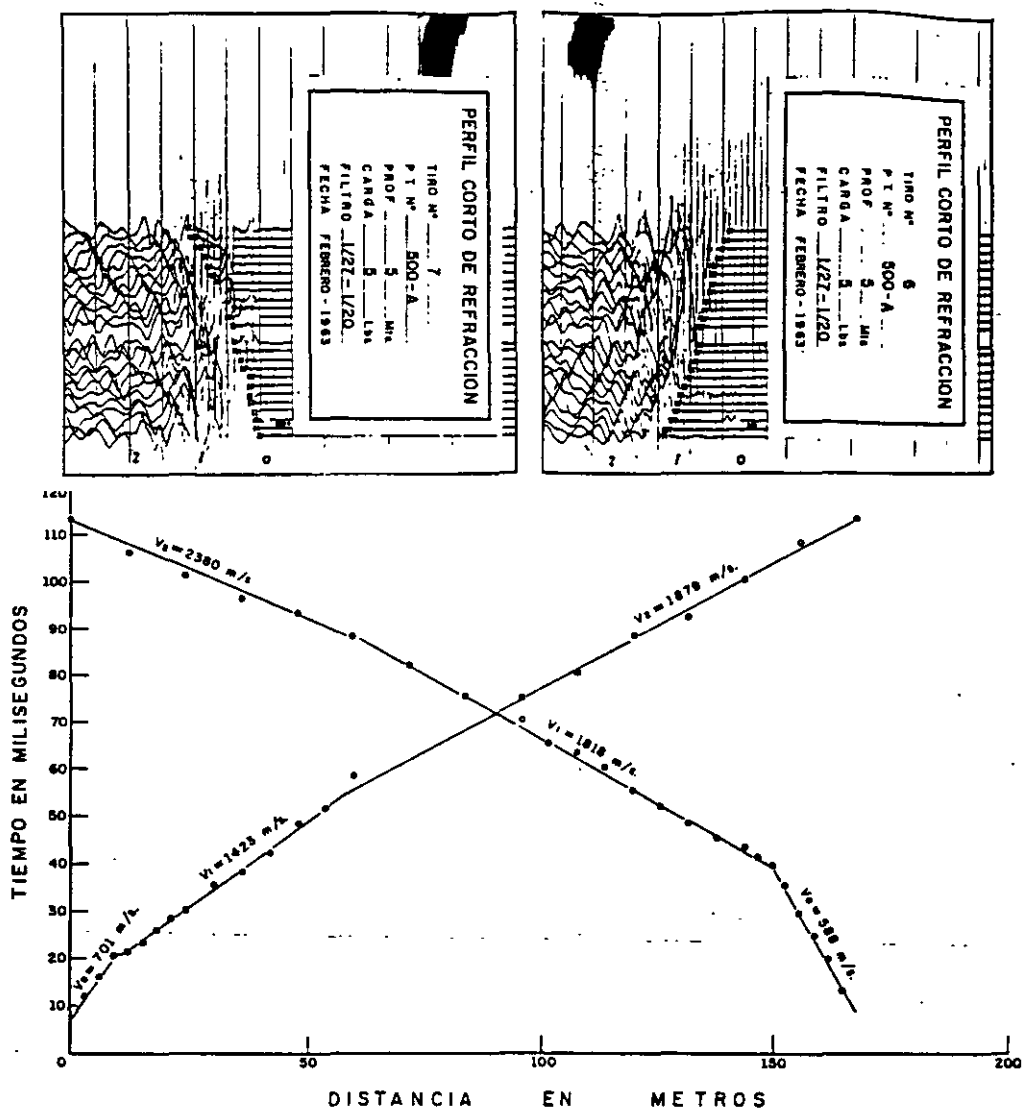


Figura 4.2 Sismogramas, primeros arribos y representación en la gráfica tiempo-distancia.

La belleza del procesamiento de los datos geofísicos es patente con la sencillez de sus expresiones, en la prospección sísmológica de refracción existen dos ecuaciones básicas que pueden ser utilizadas de manera recurrente para interpretar las velocidades pseudoverdaderas y espesor de cada capa.

1. pseudovelocidad de la *i*-ésima capa, curva dromocrónica $V_i = (\Delta d / \Delta t) \cdot 1000$
2. profundidad del estrato superior: $D_1 = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$

4.3 Casos históricos

Ubicación de la traza de una falla generada por los asentamientos debido a la sobre explotación del acuífero en Celaya, Gto.. En las gráficas tiempo distancia de la figura 4.3 se observa los retrasos en tiempo, que comparados con modelos teóricos manifiestan el sitio exacto donde está el eje de la falla buscado.

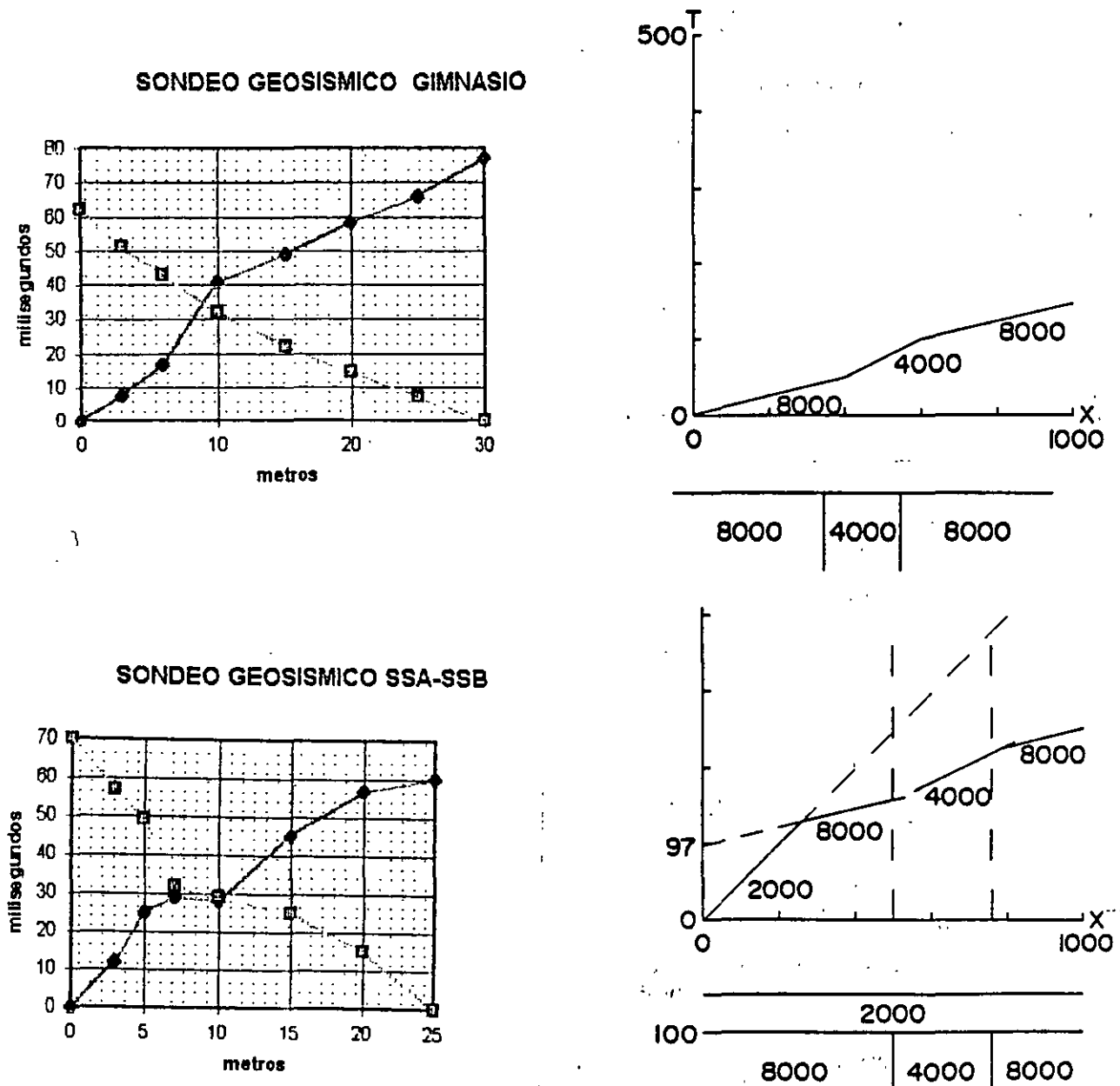


Figura 4.3 Gráficas tiempo-distancia y comparación con los modelos teóricos.

BIBLIOGRAFIA :

Alvarez Manilla A. A., 1994. Prospección Geofísica. Seminario Internacional en aplicaciones de la Geotécnica a aprovechamiento de los recursos pétreos. DEPI de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Alvarez Manilla A. A., 1995. Geofísica Aplicada a la Ingeniería Civil. Curso de Tópicos en Geotécnica, Colegio de Ingenieros Civiles en el Estado de Querétaro.

Brant A. A., 1981. A history of Induced Polarization Development as seen from the perspective of the Newmont Mining Group, 1946-1960 (The Jerome period). University of Arizona.

Geo Ingenieria Alfven, SA de CV, 1986-1996. Diversos Estudio Geohidrológicos, Geofísicos, Geotécnicos, Impacto Ambiental, en el Estado de Querétaro.

Geonics Limited., 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. Geonics Limited.

Hamid N. and Al-Said., 1980, Seismic Exploration, technique and processing. Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Stuttgart.

Hughes, L.J., Emer, D.F., and Zonge, K.L., 1986, The use of electrical techniques in locating sources of groundwater contamination: presented at the 48th EAEG., Oostende, Belgium.

Kunetz G. 1966., Principles of Direct Current Resistivity Prospecting. Geopublication Associates., Geopublication Monographs, Series 1-No 1.

Lesser Illades J. M., Sánchez, F., González, D., 1986. Hidrogeoquímica del Acuífero de la Ciudad de México. Revista de Ingeniería Hidráulica en México/ septiembre-diciembre de 1986.

López R. E., Geología General y de México, 1993. Editorial Trillas.

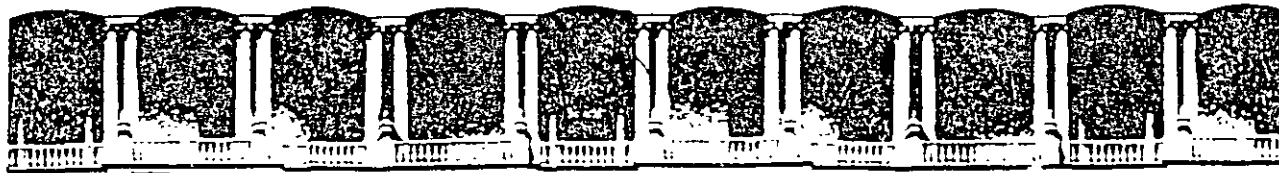
Robinson E. S., Geología física básica, 1990. Noriega Limusa.

Summer J.S., 1976. Principles of induced polarization for geophysical explorations. Elsevier Scientific publishing company.

Wait J. R. 1959., Overvoltage research and geophysical applications. Pergamon Press.

Zepeda G., J., A.; 1994. Notas correspondientes a las cátedras de Comportamiento de Suelos I. División de Estudios de Postgrado de la FI de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Zepeda ., J. A., y Alvarez Manilla, A., 1996. Los fenómenos de succión, difusión, dispersión y filtración a través de la Prospección Geoelectrica. Seminario Internacional de Suelos no Saturados, DEPI de la Universidad Autónoma de Querétaro y SMMS.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Contaminación de Acuíferos

Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.

C.H. 125

X CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS
MODULO 2.- CC CONTAMINACION DE ACUIFEROS

28 DE SEPTIEMBRE AL 2 DE OCTUBRE DE 1998

DIA	HORA	TEMA	PROFESOR
LUNES 28	9:00 A 12:00	GENERALIDADES SOBRE CONTAMINACION DE ACUIFEROS	ING. JUAN M. LESSER
	12:00 A 14:00	RADON	FIS. ALEJANDRA CORTES
	16:00 A 19:00	CALIDAD DEL AGUA	DRA. BLANCA JIMENEZ
MARTES 29	9:00 A 11:30	QUIMICA DEL AGUA, CICLOS DEL FIERRO Y DEL NITROGENO, QUIMICA ORGANICA	M. I. ANTONIO CARDONA BENAVIDES
	11:30 A 14:00	BIORREMEDIACION DE SUELOS Y AGUA	DRA. SUSANA SAVAL
	16:00 A 19:00	IMPACTO AMBIENTAL Y AUDITORIAS AMBIENTALES	BIOL. HECTOR LESSER HIRIART
MIERCOLES 30	9:00 A 14:00	CONTAMINACION DE ACUIFEROS Y ANALISIS DE RIESGO	DR. RAMIRO RODRIGUEZ
	16:00 A 19:00	CONTAMINACION DE ACUIFEROS Y ANALISIS DE RIESGO	DR. RAMIRO RODRIGUEZ
JUEVES 1	9:00 A 14:00	VISITA DE CAMPO	ING. JUAN M. LESSER
VIERNES 2	9:00 A 14:00	CONTAMINACION POR HIDROCARBUROS Y RELLENOS SANITARIOS	ING. JUAN M. LESSER
	16:00 A 19:00	MESA REDONDA	

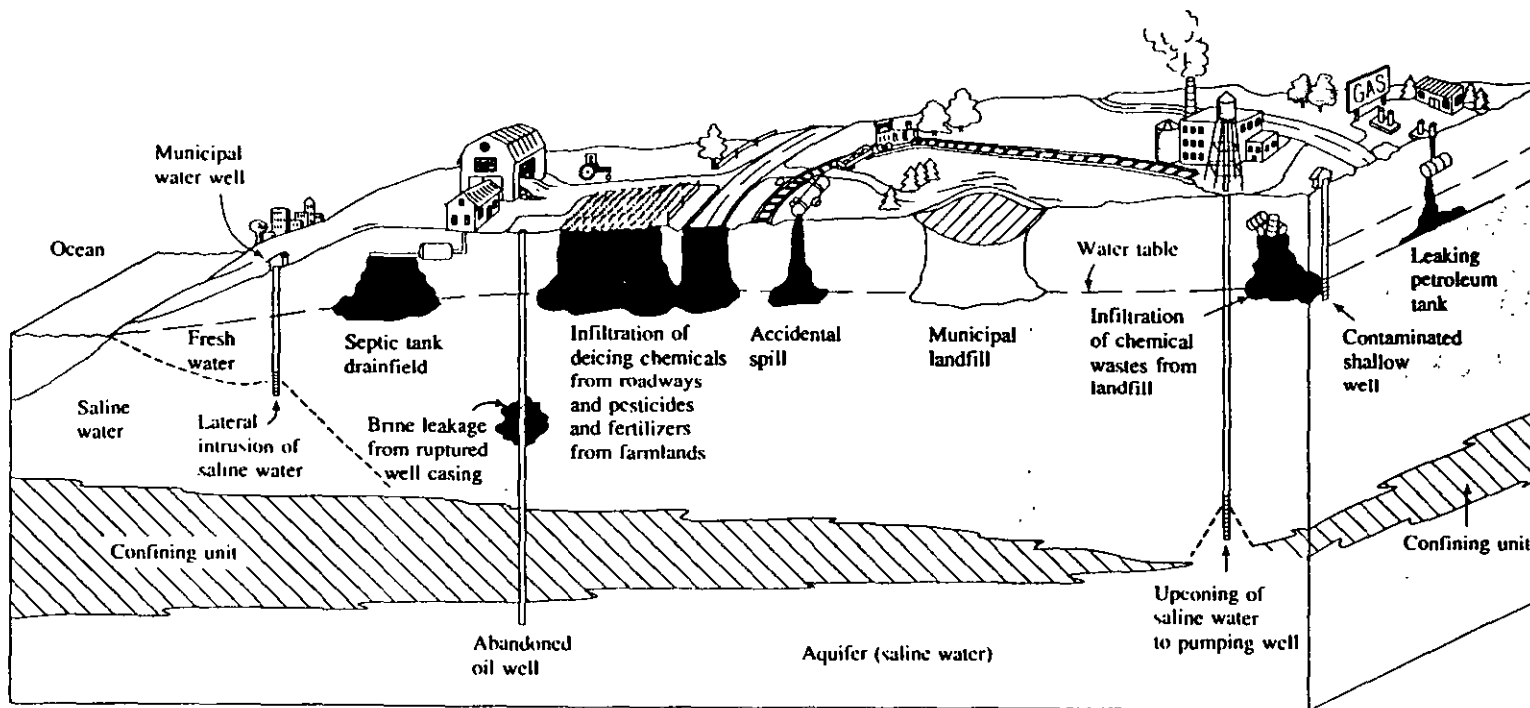


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.

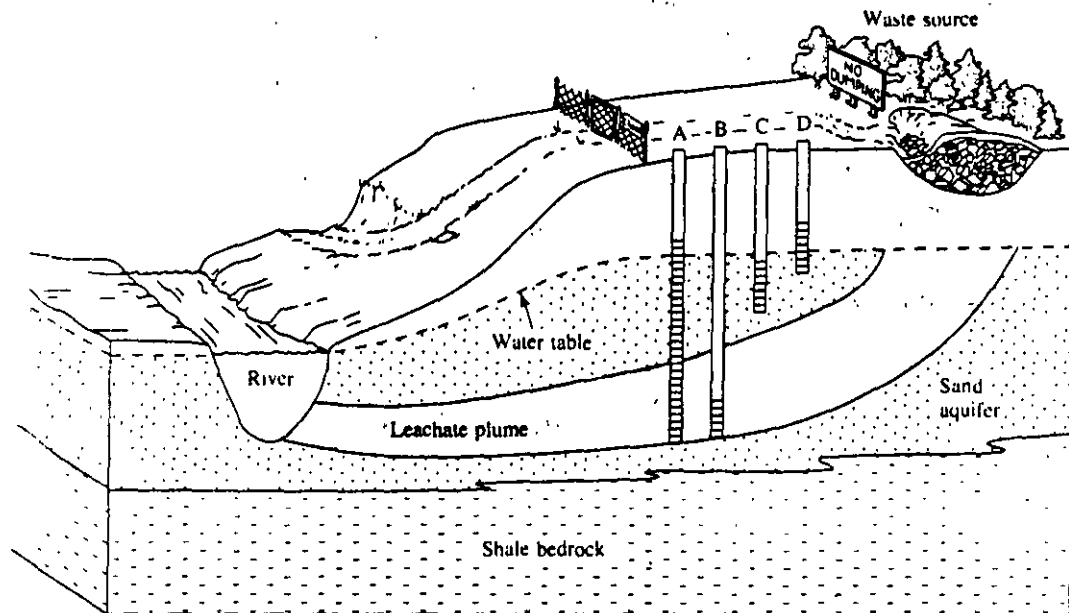
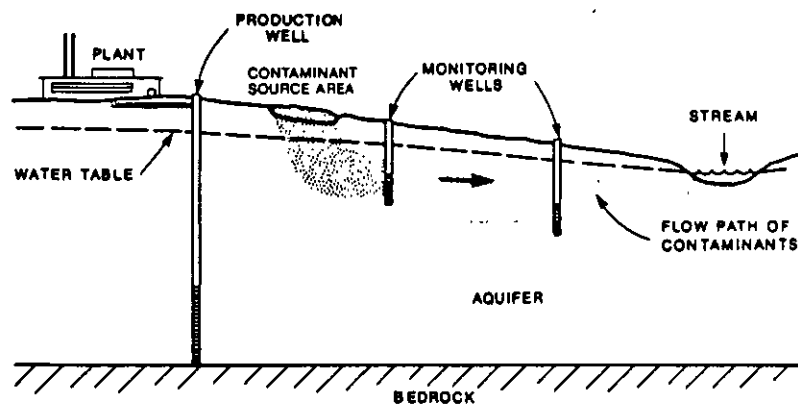
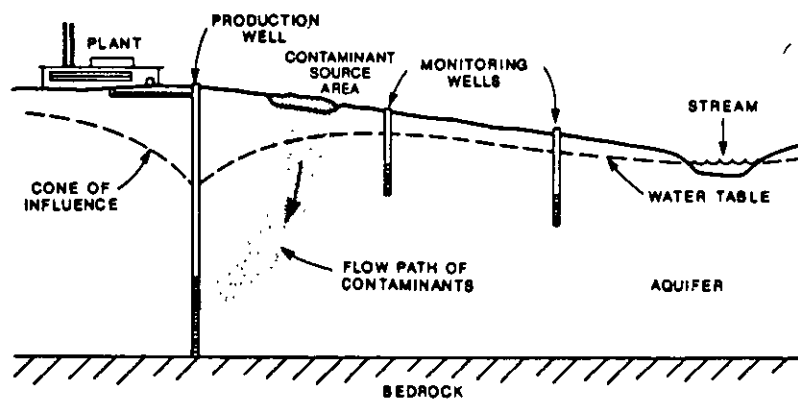


FIGURE 8.7 Effect of monitoring well—screen length on water-quality sampling. Monitoring well A is screened through the thickness of the aquifer. It intersects the plume of leachate but the reported concentration will be less than the actual concentration as water is withdrawn from both contaminated and uncontaminated parts of the aquifer. Piezometer B is also screened to intersect the plume of leachate. Reported concentration will be representative of the leachate. Piezometer C and water table monitoring D don't intersect the plume, indicating that it is deep in the aquifer.



A. IF NO PUMPING OCCURS



B. IF PUMPING OCCURS

Figure 3-46. Locating monitoring wells to map contaminants in an area affected by pumping w

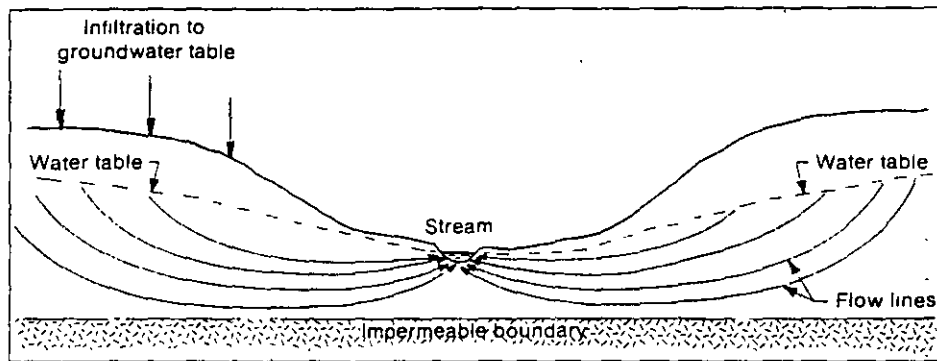


Figure 5.17a. Cross section through a stream valley showing flow lines in the groundwater system.

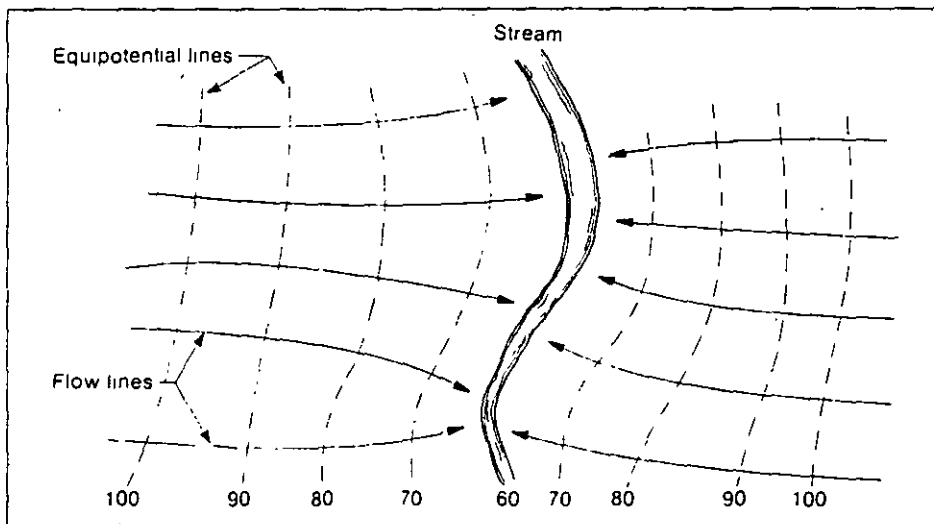
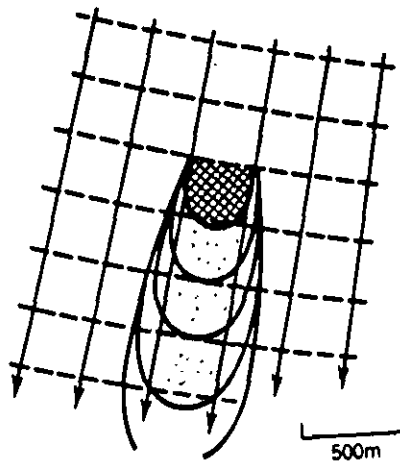
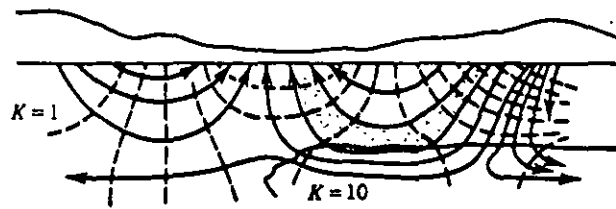
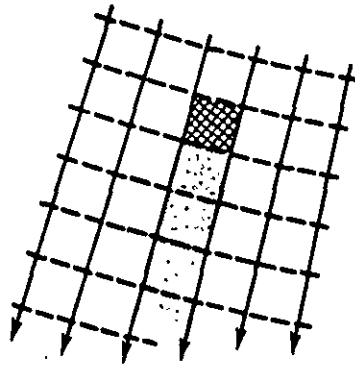
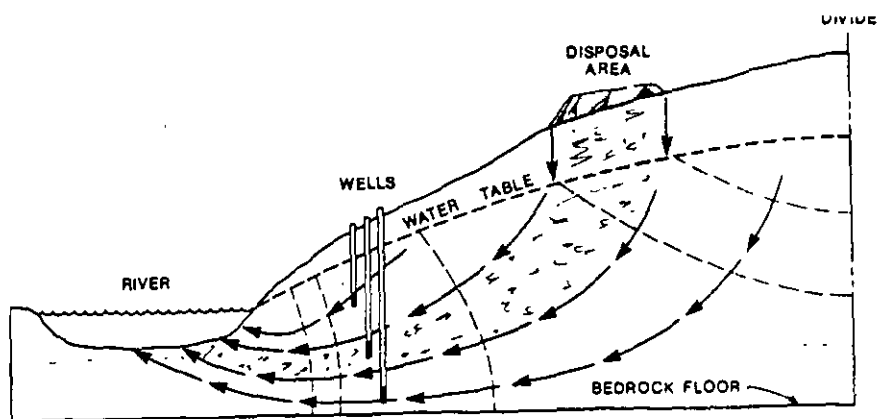
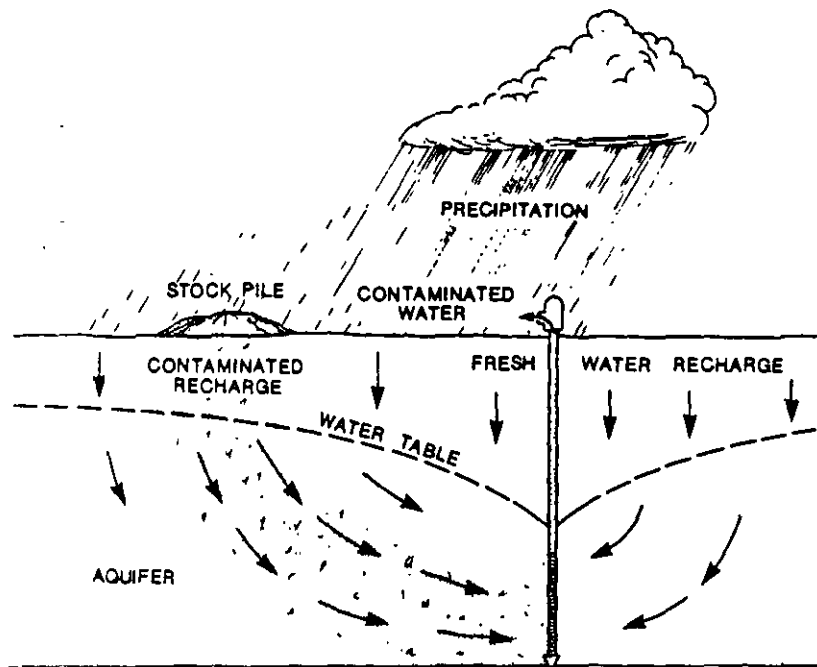


Figure 5.17b. Looking down on the stream valley from above with the water table exposed. The dotted lines represent points of equal groundwater elevation.





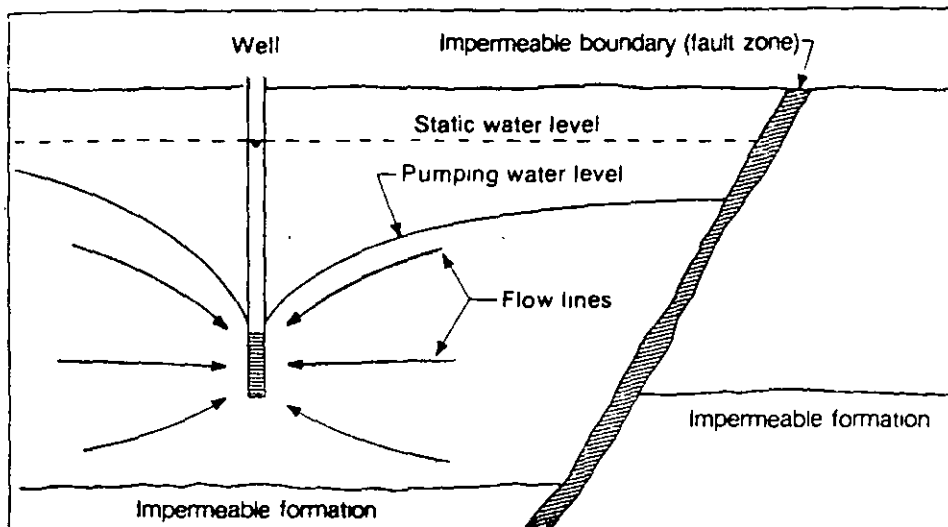


Figure 5.18a. Cross section near a pumping well showing the flow lines followed by water moving toward the well.

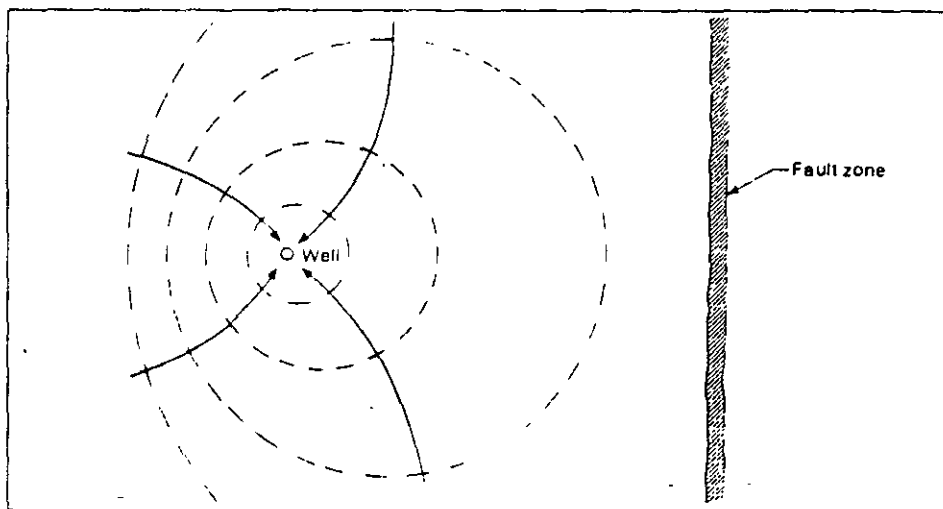
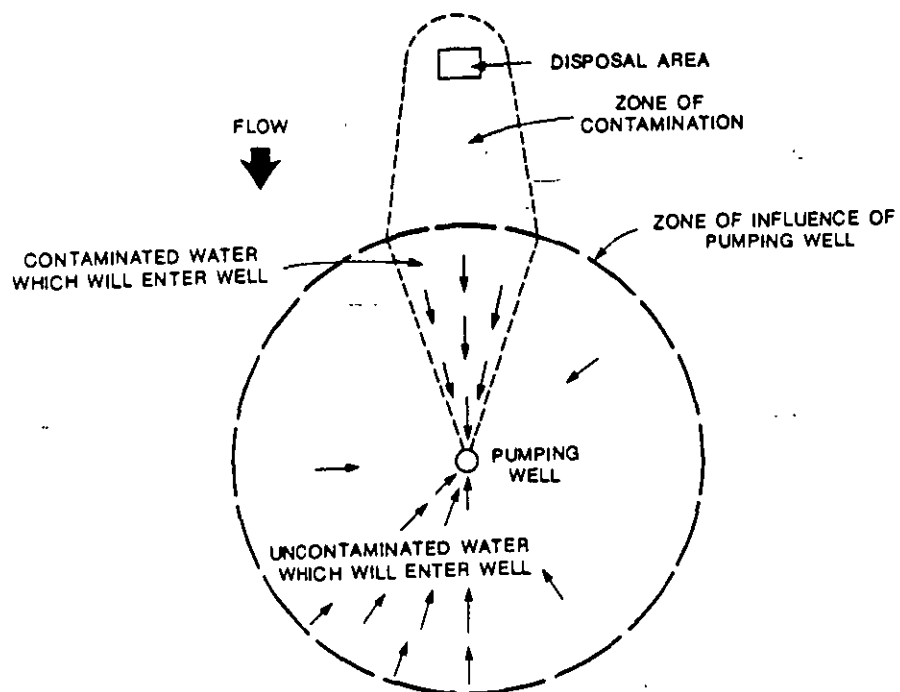
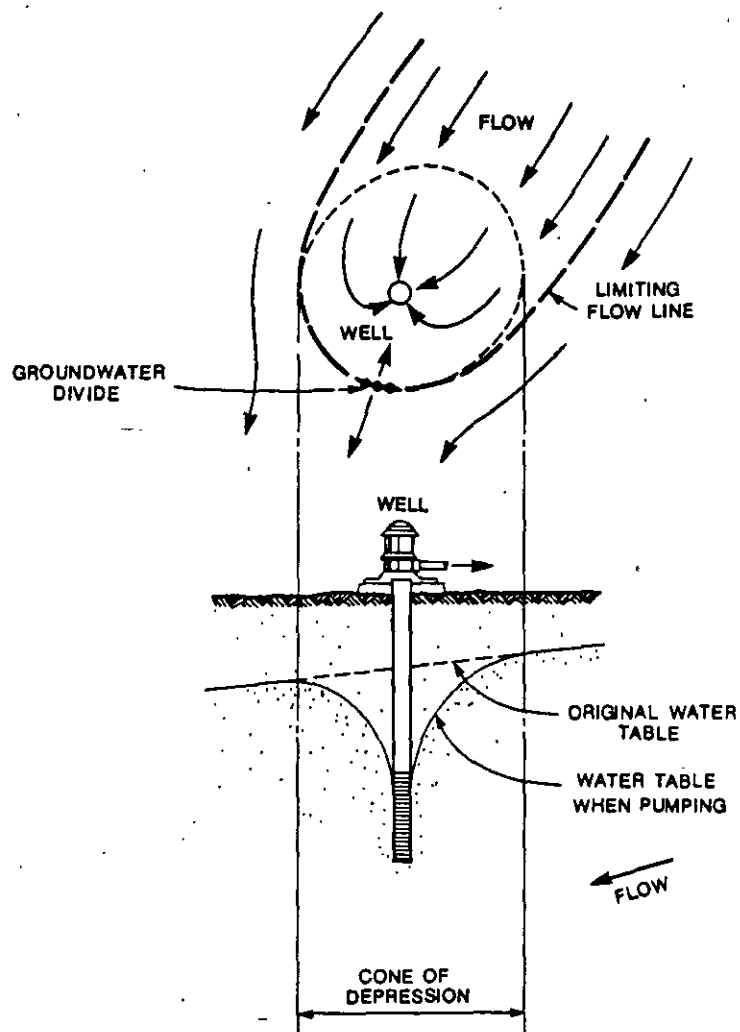
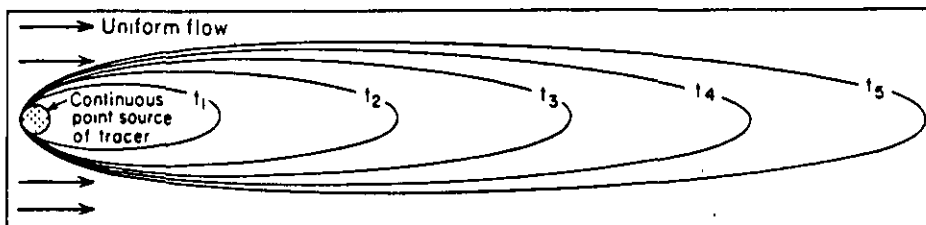
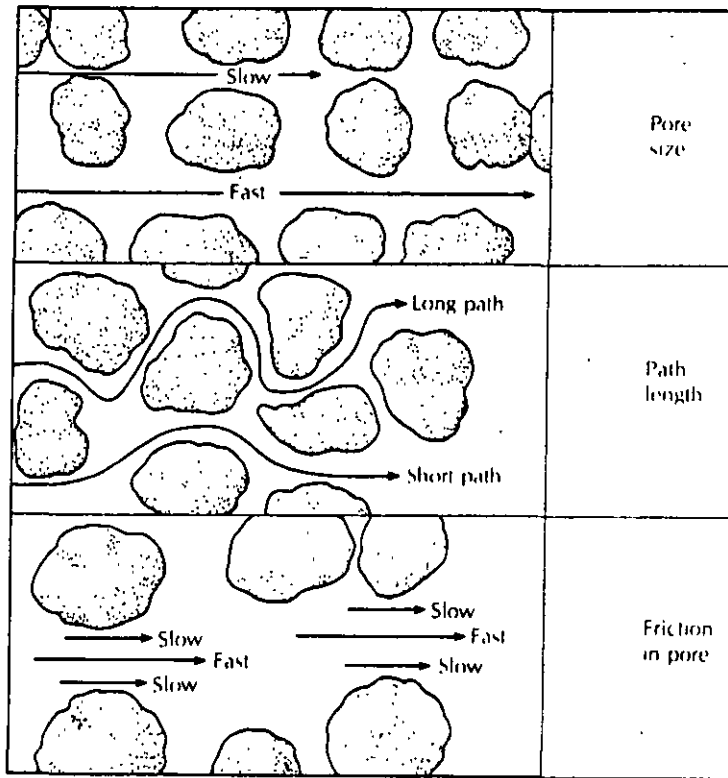
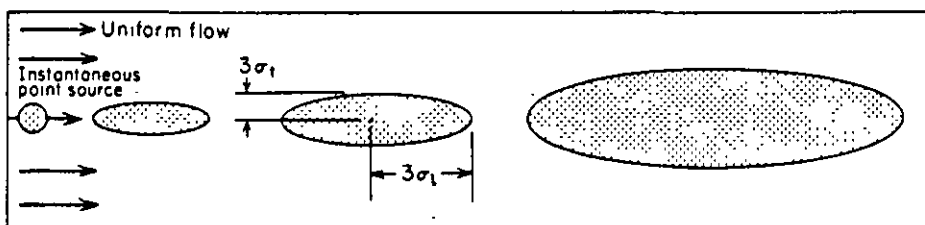


Figure 5.18b. Map of the potentiometric surface during long-term pumping shows that the impermeable boundary causes greater drawdown in the direction of the fault.



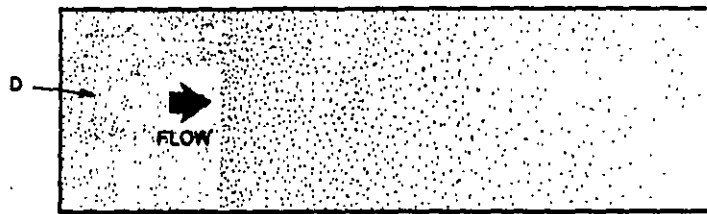


(a)

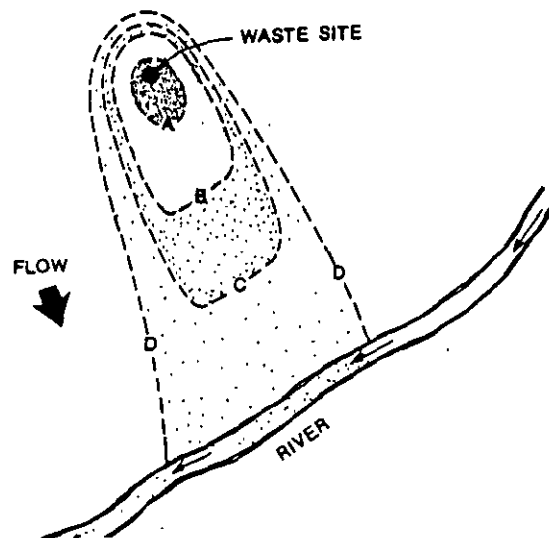
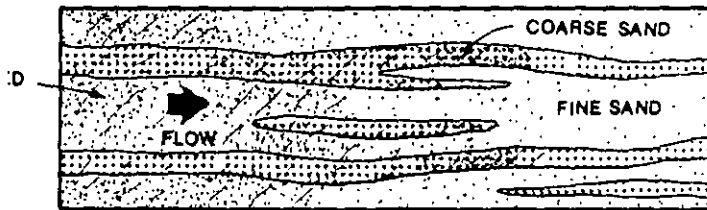


(b)

Figure 9.5 Spreading of a tracer in a two-dimensional uniform flow field in an isotropic sand. (a) Continuous tracer feed with step-function initial condition; (b) instantaneous point source.



A) HOMOGENEOUS SAND LAYER



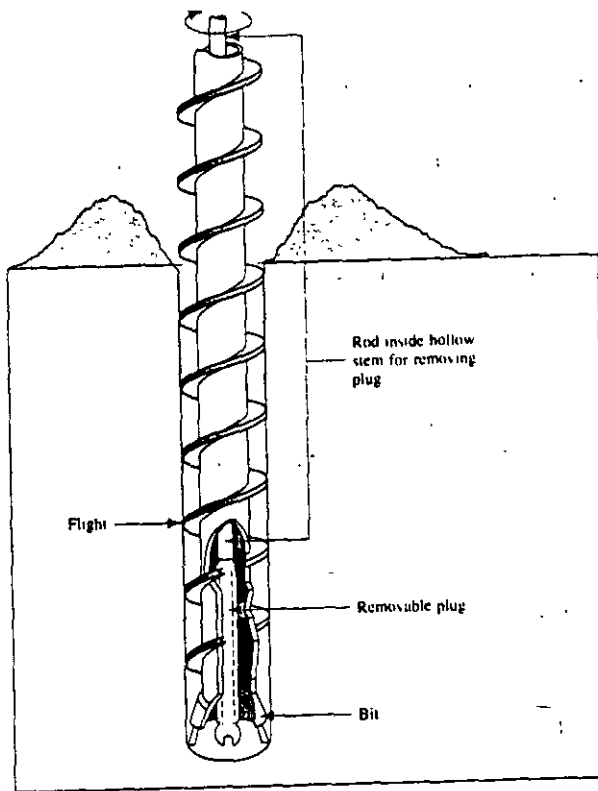


FIGURE 8.9 Hollow-stem auger drill rod and bit. Source: M. L. Scaff et al, *Manual of Ground Water Sampling Procedures*, 1981. National Water Well Association. Used with permission

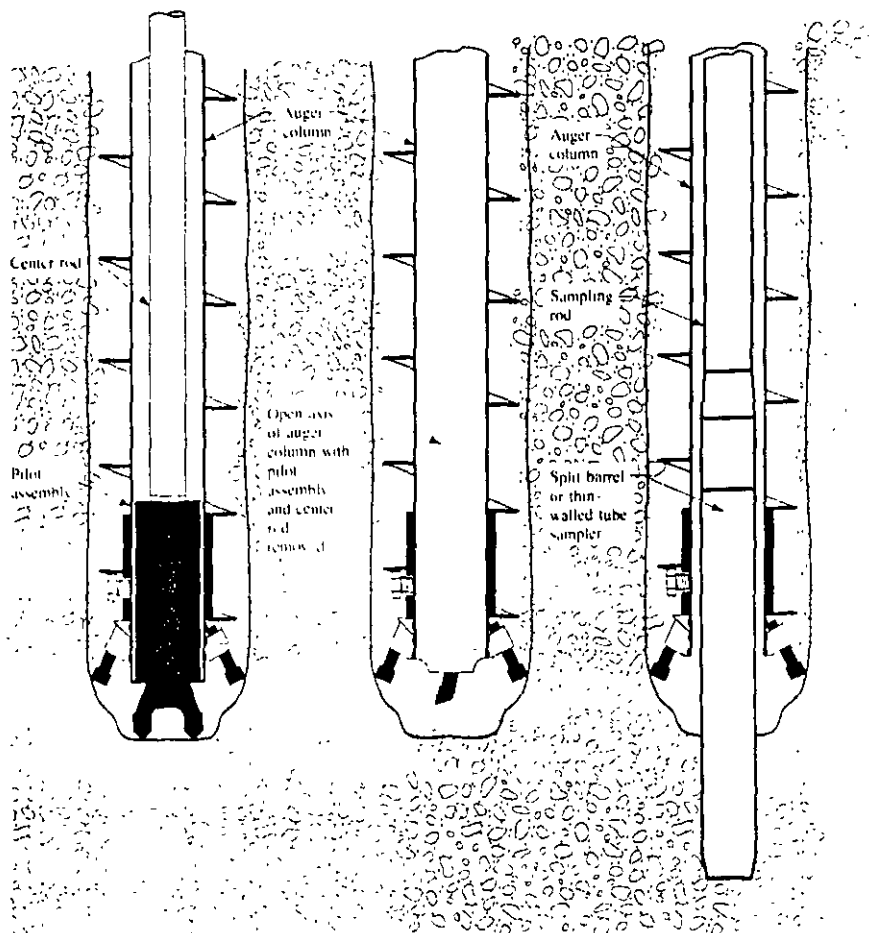


FIGURE 8.13 Sequential steps for the collection of a core sample through a hollow-stem auger. Source: Glen Hackett, *Ground Water Monitoring Review* 7, no. 4 (1987): 51-62. Used with permission. Copyright © 1987 Water Well Journal Publishing Co.

AN EQUATION WHICH RELATES DATA FROM THREE WELLS (X1, Y1, C1, X2, Y2, C2, X3, Y3, C3) WITH α_4 AND SOURCE DIMENSION γ - By David Edwards

Let $A1 = \frac{y_1 + \gamma/2}{2\lambda y x_1}$, $A2 = \frac{y_1 - \gamma/2}{2\lambda y x_1}$, $A3 = \frac{y_2 + \gamma/2}{2\lambda y x_2}$, $A4 = \frac{y_2 - \gamma/2}{2\lambda y x_2}$

$A5 = \frac{y_3 + \gamma/2}{2\lambda y x_3}$, $A6 = \frac{y_3 - \gamma/2}{2\lambda y x_3}$

C_0 = source strength γ = velocity of contaminant
 λ = decay constant
 N = dispersivity number. $N = \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}$

- 1) $C_2 = \frac{C_0}{2} \exp \left\{ \frac{x_1}{2\lambda x} [1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}] \right\} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 2) $C_1 = \frac{C_0}{2} \exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2\lambda x_1} \cdot x_1 \right\} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 3) $C_1 = \frac{C_0}{2} \left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2\lambda x_1} \right\} \right]^{x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$ Since $e^{ab} = (e^a)^b$
- 4) Likewise, $C_2 = \frac{C_0}{2} \left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_2/\gamma}]}{2\lambda x_2} \right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 5) And, $C_3 = \frac{C_0}{2} \left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_3/\gamma}]}{2\lambda x_3} \right\} \right]^{x_3} \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 6) $\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_0/2}{C_0/2} \left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2\lambda x_1} \right\} \right]^{x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} \left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_2/\gamma}]}{2\lambda x_2} \right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 7) $\frac{C_1}{C_2} = \frac{\left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2\lambda x_1} \right\} \right]^{x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{\left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_2/\gamma}]}{2\lambda x_2} \right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}} = \left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2} \right\} \right]^{x_1 - x_2} \frac{\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}$
- 8) $\ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) = \ln \left[\exp \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2\lambda} \right\} \right]^{x_1 - x_2} + \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} - \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 9) $\ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) = (x_1 - x_2) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2\lambda} \right\} + \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} - \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 10) $(x_1 - x_2) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2\lambda} \right\} = \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) - \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 11) Similarly, $(x_1 - x_3) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda x_1/\gamma}]}{2\lambda} \right\} = \ln \left(\frac{C_1}{C_3} \right) - \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 12) Dividing, $\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3} = N = \frac{\ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) - \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\ln \left(\frac{C_1}{C_3} \right) - \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}}$
- 13) $N \ln \left(\frac{C_1}{C_3} \right) = N \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} + N \ln \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} - \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) - \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 14) $N \ln \left(\frac{C_1}{C_3} \right) - \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) = - \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - N \ln \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 15) $\text{EXP} \left[N \ln \left(\frac{C_1}{C_3} \right) - \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \right] = \text{EXP} \left[- \ln \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - N \ln \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} \right]$
- 16) $\text{EXP} \left[\ln \left(\frac{C_1}{C_3} \right)^N - \ln \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \right] = \text{EXP} \left[\ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}^{N-1} + \ln \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N \right]$
- 17) $\frac{\left(\frac{C_1}{C_3} \right)^N}{\left(\frac{C_1}{C_2} \right)} = \frac{\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}^{N-1} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N} = \frac{\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} \left(\frac{y_2 - \gamma/2}{2\lambda y x_2} - \frac{y_2 + \gamma/2}{2\lambda y x_2} \right)^{N-1}}{\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} \left(\frac{y_3 - \gamma/2}{2\lambda y x_3} - \frac{y_3 + \gamma/2}{2\lambda y x_3} \right)^{N-1}}$

AND, VOILA, THE EQUATION:

$$18) \left(\frac{C_2}{C_1} \right) \left(\left[\frac{C_1}{C_3} \right] \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3} \right) = \frac{\left\{ \text{erf } \frac{y_1 + \gamma/2}{2\lambda y x_1} - \text{erf } \frac{y_1 - \gamma/2}{2\lambda y x_1} \right\}^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}} \left\{ \text{erf } \frac{y_2 + \gamma/2}{2\lambda y x_2} - \text{erf } \frac{y_2 - \gamma/2}{2\lambda y x_2} \right\}}{\left\{ \text{erf } \frac{y_3 + \gamma/2}{2\lambda y x_3} - \text{erf } \frac{y_3 - \gamma/2}{2\lambda y x_3} \right\}^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}}}$$

x_1 cannot equal x_3 and C_1, C_3 cannot equal zero

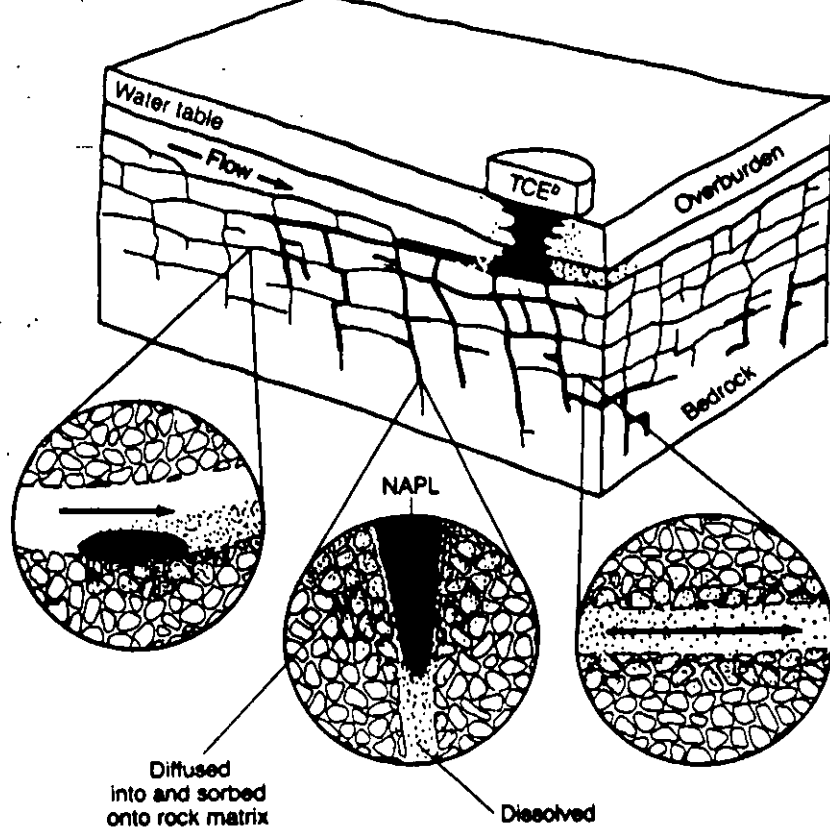


Figure 2.2 Schematic illustration of a DNAPL in a fractured porous medium showing geologic and pore scales. The DNAPL dissolves to create contamination in the fractures and in the low-permeability rock matrix (from Mackay and Cherry, 1989).

DE: PANKOU Y CHERRY, 1986

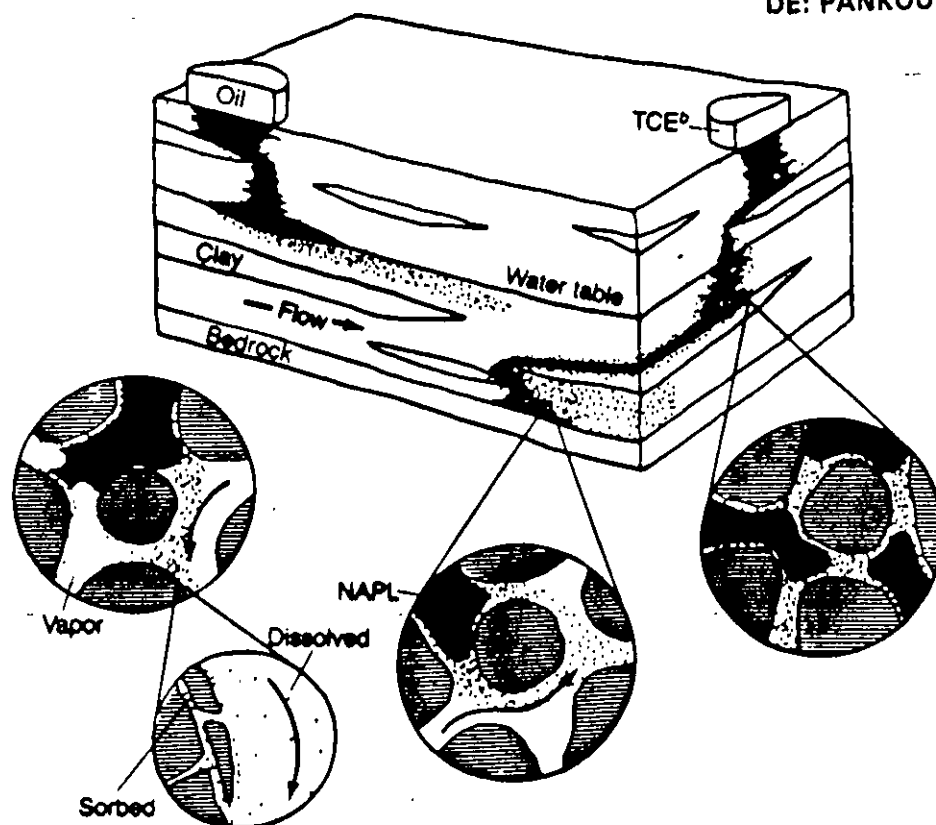


Figure 2.1 Schematic illustration of a DNAPL and a LNAPL in a porous medium, showing geologic and pore scales. A low-permeability clay layer deflects the DNAPL. DNAPL dissolution causes a plume (from Mackay and Cherry, 1989).

14

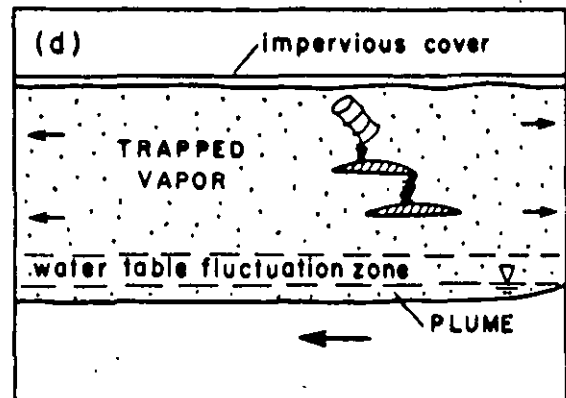
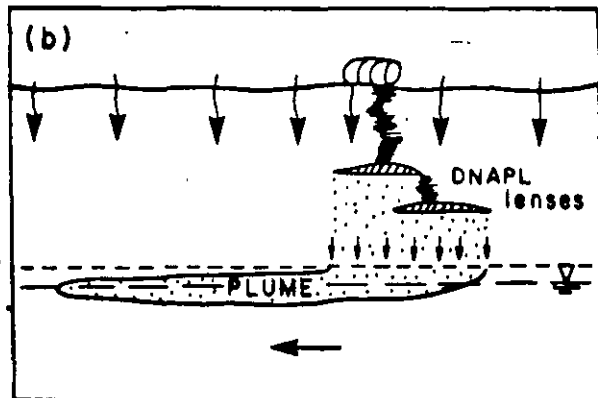
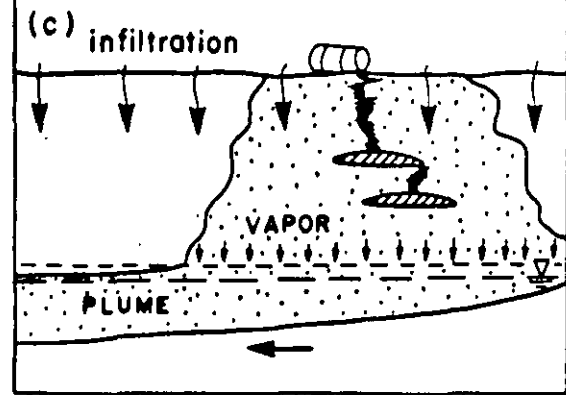
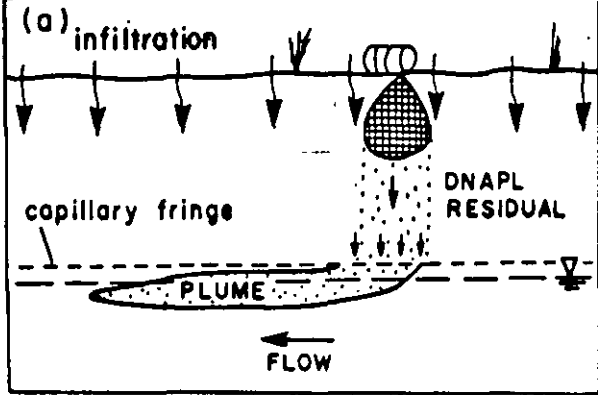


Figure 2.4 Conceptual scenarios for a DNAPL in the vadose zone in granular geologic deposits: a) homogeneous case - no vapor plume; b) heterogeneous case - no vapor plume; c) heterogeneous case - vapor plume; and d) effect of impervious ground cover over vapor-releasing DNAPL source.

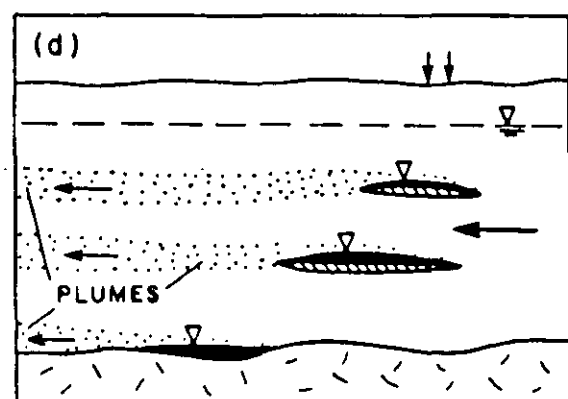
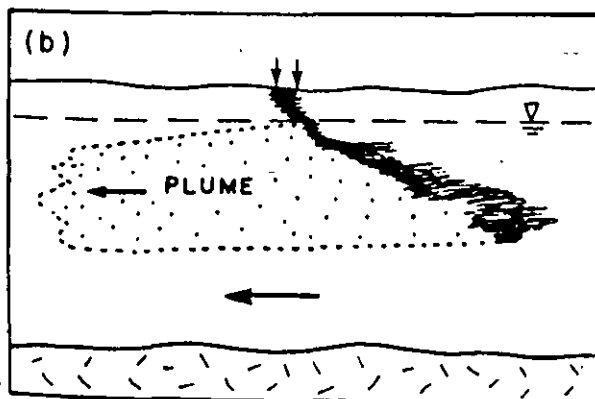
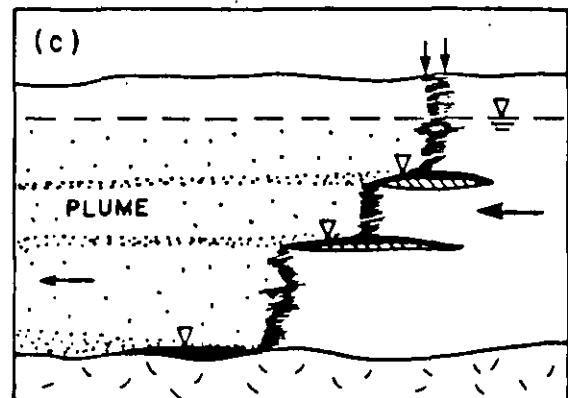
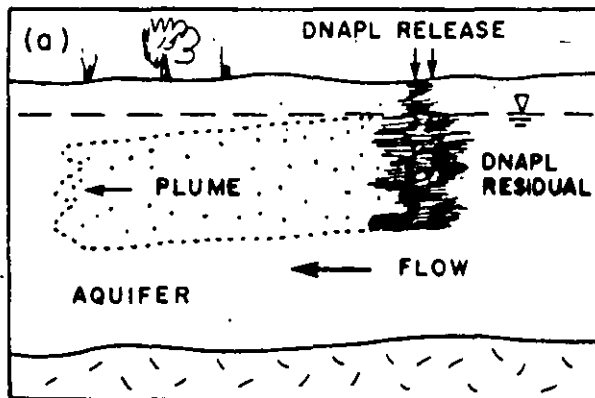


Figure 2.5 Conceptual scenarios for a DNAPL in the groundwater zone in granular aquifers: a) partial penetration; b) partial penetration with offset; c) full penetration with offset; and d) same as part c, but at a later stage after DNAPL residual has disappeared due to dissolution in flowing groundwater.

DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

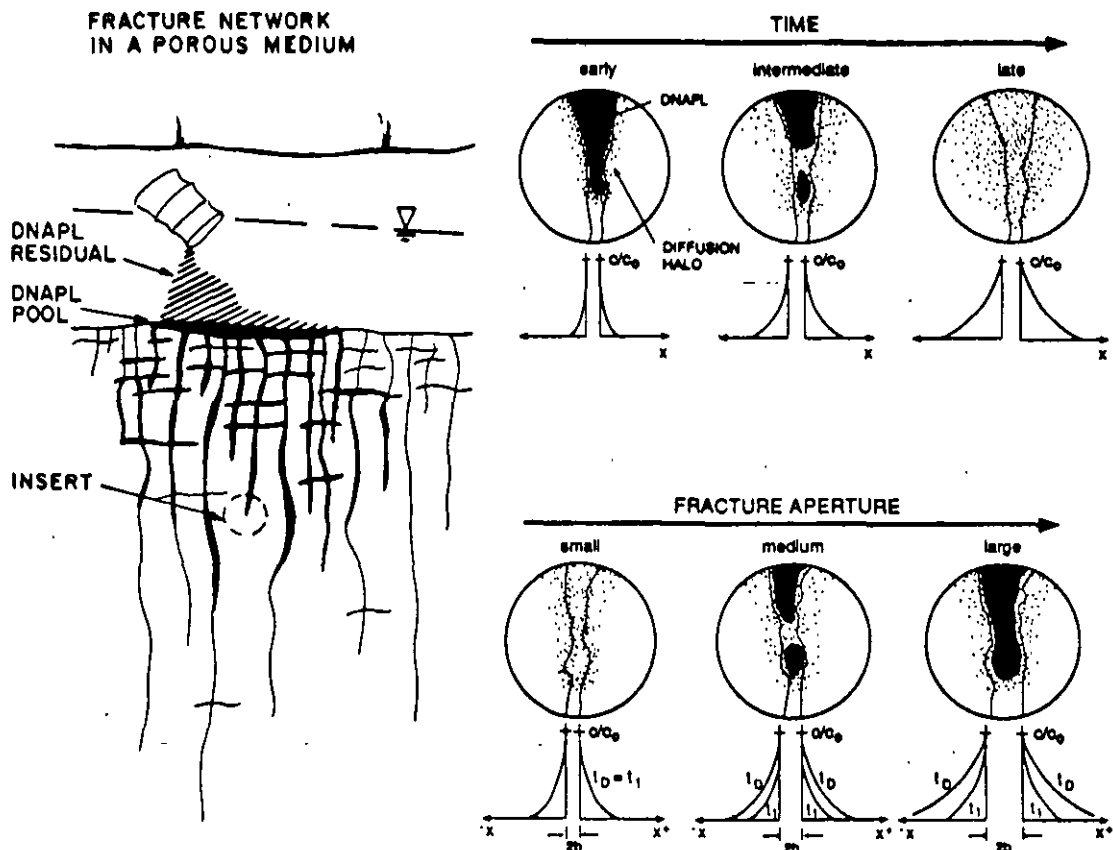
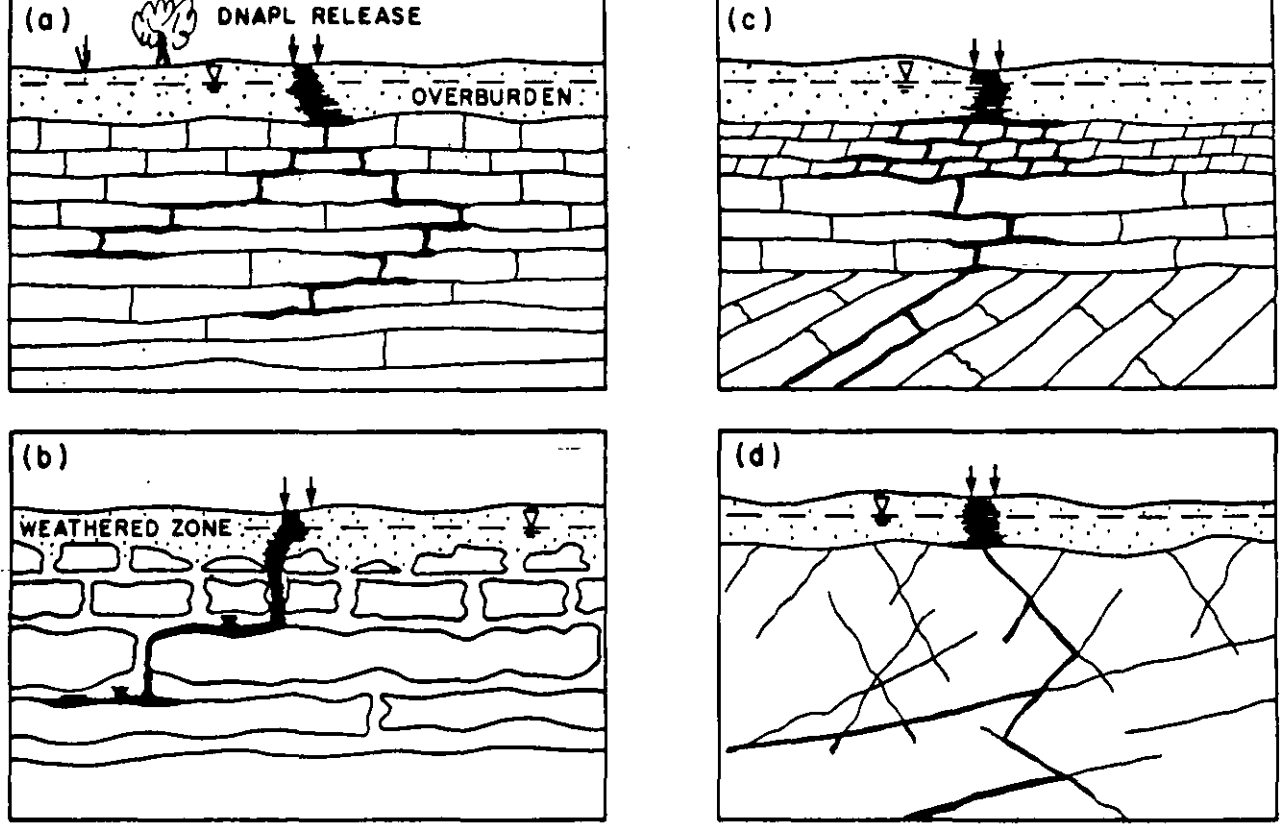


Figure 2.7 Conceptualization of DNAPL persistence and distribution with DNAPL mass loss due to diffusion in water-saturated fractures in a porous medium (such as a fractured clay till or sedimentary rock) as a function of: a) time; and b) fracture size (aperture). Diffusion halos around fractures containing DNAPL become large (more developed) with increases in time, as shown with the concentration vs. distance plots for the three relative time periods in part a. At any particular time t_1 , the DNAPL mass distribution will vary in different size fractures, with DNAPL disappearance occurring most rapidly in the smallest fractures; residual or disconnected DNAPL will be present in medium-sized fractures, and free DNAPL will be present in the largest fractures that are connected to overlying DNAPL pools. DNAPL disappearance times (t_D) increase with an increase with fracture aperture.

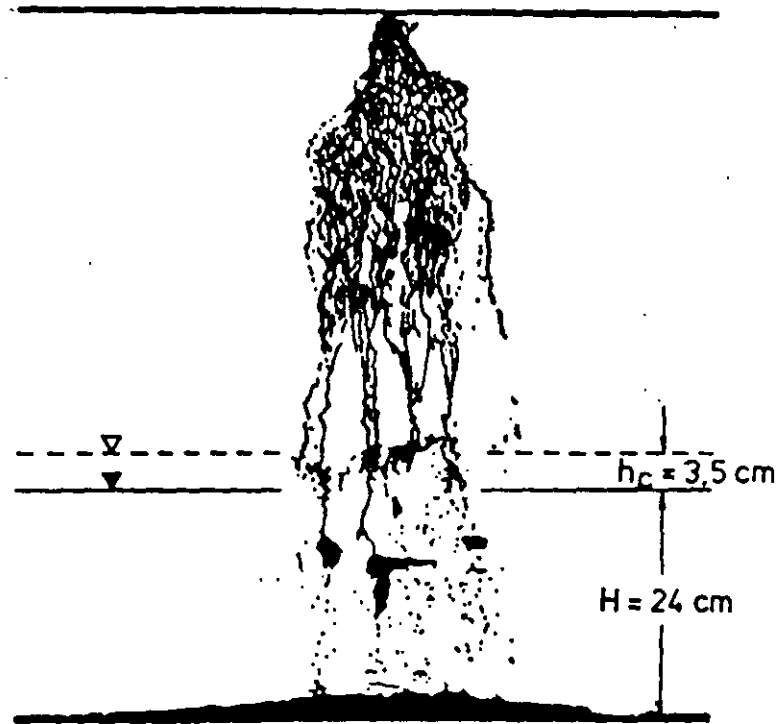


Figure 5.11 Tetrachloroethylene (PCE) release into a rough, unsaturated "fracture" with aperture 0.2 mm. (Reprinted with permission from Schville (1988a).)

DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

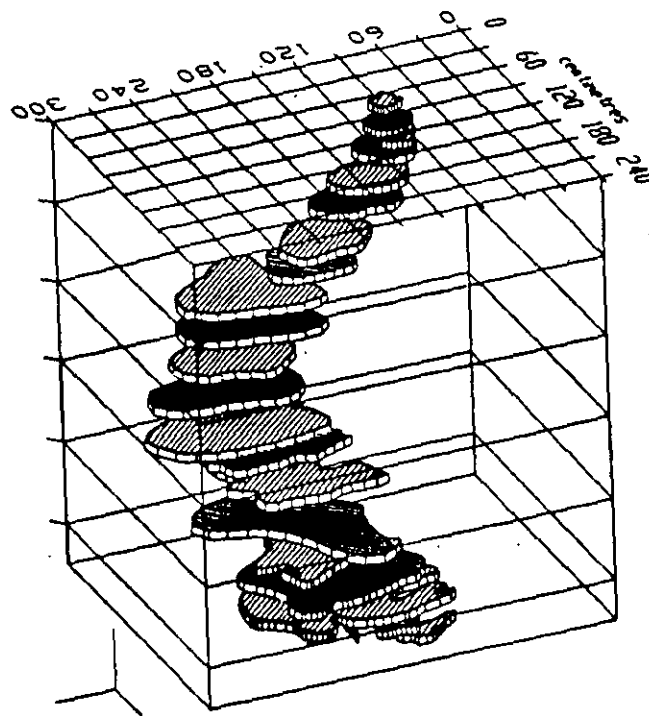


Figure 5.18 "Drip-like" infiltration of tetrachloroethylene (PCE) into Borden sand. (Reprinted with permission from Poulsen and Kueper (1992).)

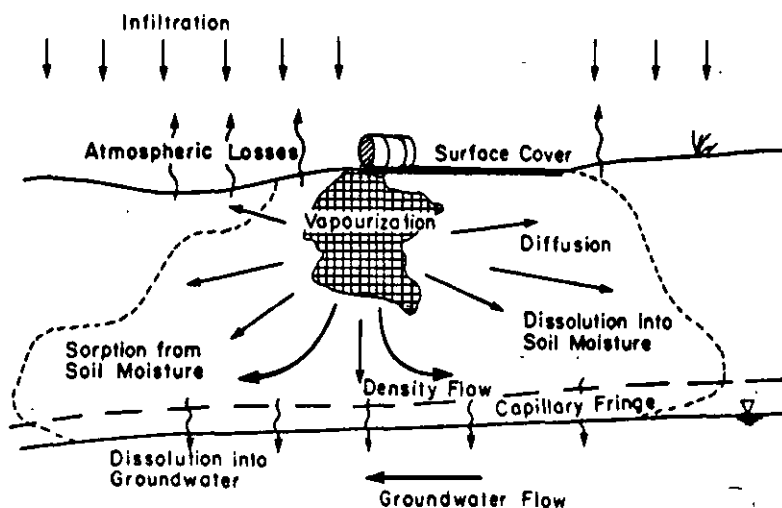


Figure 6.1 Conceptual model of vapor transport processes from a residual DNAPL source in the unsaturated zone. (Reprinted with permission from Mendoza and Frind, 1990a.)

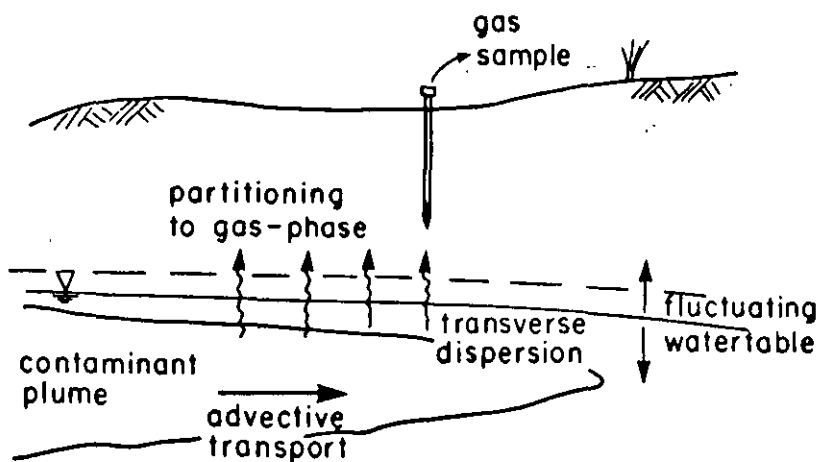


Figure 6.4 Conceptual model for processes involved in groundwater plume detection using soil-gas sampling techniques

DISPERSION

Fórmula que relaciona distancia, tiempo, dispersión, concentración inicial y concentración a diversas distancias.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) + \exp \left(\frac{V_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{L + V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) \right] \quad 1$$

Ecuación de la dispersión hidrodinámica (Fetter, 1988, pag.393).

Donde:

C_0 = Concentración inicial

L = Distancia

T = Tiempo

C = Concentración a la distancia L y el tiempo T

V_x = Velocidad linear media del agua subterránea

$$V_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \quad 2$$

K = conductividad hidráulica

n_e = porosidad efectiva

dh/dl = gradiente hidráulico

D_L = Coeficiente de dispersión longitudinal

$$D_L = \alpha_L V_x + D^* \quad 3$$

D^* = Difusión molecular (10^{-10} -- 10^{-11} para materiales finos, y 10^{-9} para grandes, en m^2/s)

mas

α_L = Dispersividad (unidades de distancia)

$$\alpha_L \approx 0.1L \quad 4$$

entonces:

$$\operatorname{erfc}(x) = 0.02$$

de la tabla (apendice 13, Fetter, 1988):

$$\operatorname{erfc}(1.6) = 0.023652$$

$$\operatorname{erfc}(1.7) = 0.016210$$

$$\text{por lo tanto: } \frac{0.023652 - 0.016210}{10} = 0.0007442 \quad \text{para cada incremento}$$

de 0.01 en el rango de 1.6 a 1.7

$$\text{por lo tanto: } \operatorname{erfc}(1.65) = 0.0199$$

$$\text{por lo tanto: } x = 1.65$$

$$\text{sustituyendo en (6): } 1.65 = \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028 \sqrt{T}} \right)$$

$$0.046 \sqrt{T} = 2000 - 10^{-6} T$$

elevando al cuadrado:

$$0.002T = 4 \times 10^6 - 0.004T + 10^{-12} T^2$$

$$10^{-12} T^2 - 0.006T + 4 \times 10^6 = 0$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{0.006^2 - 4 \times 10^{-12} \times 4 \times 10^6}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{3.6 \times 10^{-5} - 1.6 \times 10^{-5}}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm 0.0045}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T_1 = \frac{5.3 \times 10^{-3}}{10^{-12}}$$

$$T_2 = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{10^{-12}}$$

$$T_1 = 5.3 \times 10^9 \text{ seg}$$

$$T_2 = 7.5 \times 10^8 \text{ seg}$$

$$T_1 = 170 \text{ años}$$

$$T_2 = 24 \text{ años}$$

El valor de tiempo real obtenido de la deducción de la ecuación cuadrática anterior es de 24 años.

APPENDIX 13 Values of the error of x [$\text{erf}(x)$] and the complementary error function of x [$\text{erfc}(x)$]. Note that $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$.

x	$\text{erf}(x)$	$\text{erfc}(x)$
0	0	1.0
0.05	0.056372	0.943628
0.1	0.112463	0.887537
0.15	0.167996	0.832004
0.2	0.222703	0.777297
0.25	0.276326	0.723674
0.3	0.328627	0.671373
0.35	0.379382	0.620618
0.4	0.428392	0.571608
0.45	0.475482	0.524518
0.5	0.520500	0.479500
0.55	0.563323	0.436677
0.6	0.603856	0.396144
0.65	0.642029	0.357971
0.7	0.677801	0.322199
0.75	0.711156	0.288844
0.8	0.742101	0.257899
0.85	0.770668	0.229332
0.9	0.796908	0.203092
0.95	0.820891	0.179109
1.0	0.842701	0.157299
1.1	0.880205	0.119795
1.2	0.910314	0.089686
1.3	0.934008	0.065992
1.4	0.952285	0.047715
1.5	0.966105	0.033895
1.6	0.976348	0.023652
1.7	0.983790	0.016210
1.8	0.989091	0.010909
1.9	0.992790	0.007210
2.0	0.995322	0.004678
2.1	0.997021	0.002979
2.2	0.998137	0.001863
2.3	0.998857	0.001143
2.4	0.999311	0.000689
2.5	0.999593	0.000407
2.6	0.999764	0.000236
2.7	0.999866	0.000134
2.8	0.999925	0.000075
2.9	0.999959	0.000041
3.0	1.999978	0.000022
∞	1.00000	0.00000

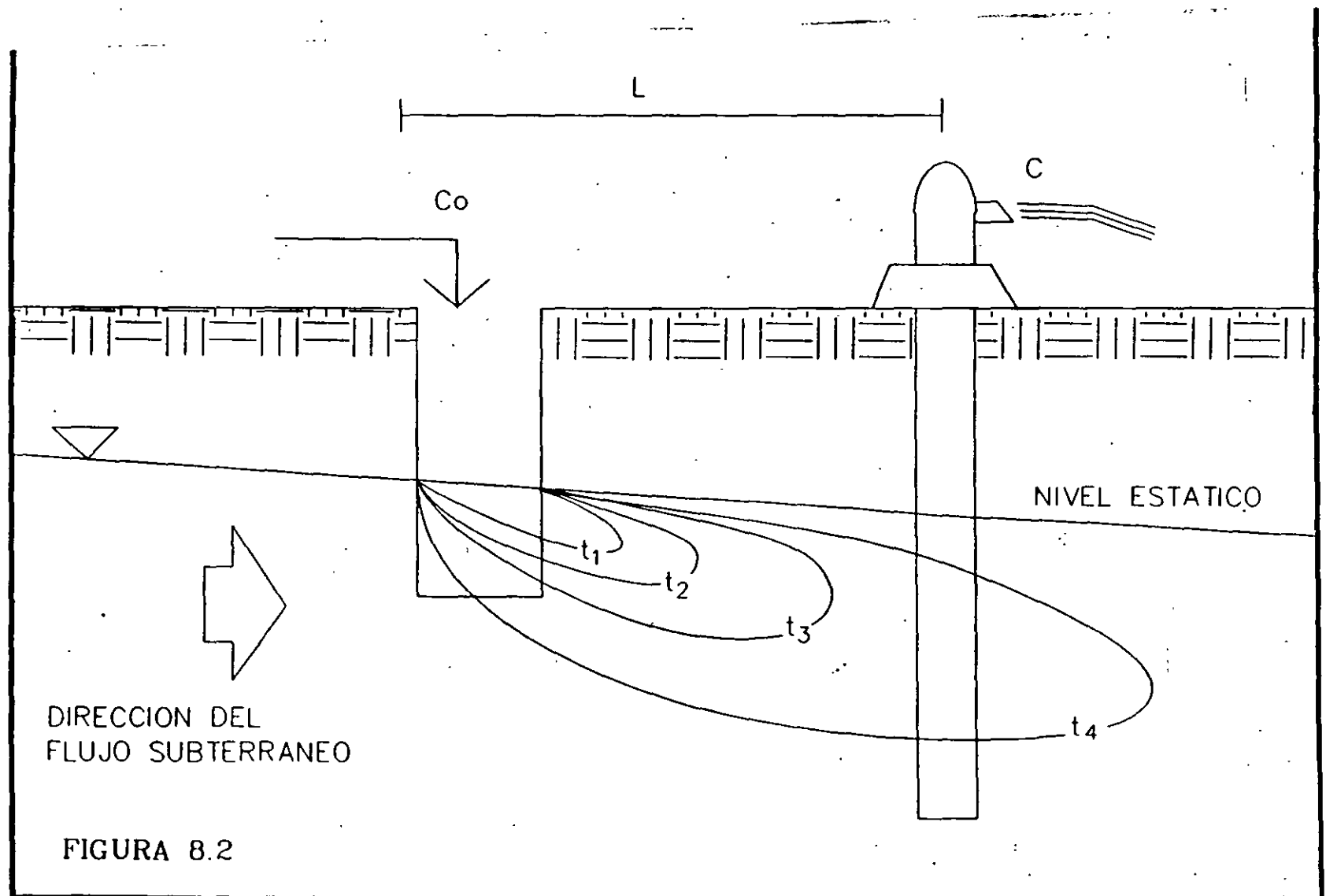


FIGURA 8.2

CONTAMINACION DE ACUIFEROS
POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

MODULO 2

**TABLA 2.2.- VALORES DE VULNERABILIDAD
DE ACUERDO A LA PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTATICO**

RANGO EN METROS	VALOR
0-1.5	10
1.5-4.5	9
4.5-9.0	7
9.0-15.2	5
15.2-23.0	3
23.0-30.0	2
30.0-0+	1

PESO ESPECIFICO : 5

TABLA 2.3.- RECARGA NETA

RANGO EN mm	VALOR
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250-+	9

PESO ESPECIFICO : 4

TABLA 2.4.- TIPO DE ROCA

TIPO	RANGO	VALOR TÍPICO
LUTITA	1-3	2
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS	2-5	3
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS INTEMPERIZADAS	3-5	4
SECUENCIAS DE CAPAS DE ARENISCA CALIZA Y LUTITA	4-6	5
TILITA	5-9	6
ARENISCA	4-9	6
CALIZA	4-9	6
ARENA Y GRAVA	4-9	8
BASALTO	2-10	9
CALIZA CASTICA	9-10	10

PESO ESPECÍFICO: 3

TABLA 2.5.- TIPO DE SUELO

TIPO	VALOR
CAPA DELGADA O AUSENTE	10
GRAVA	10
ARENA	9
CARBON	8
AGREGADO DE ARCILLAS	7
MEZCLA ARENOSA	6
MEZCLA	5
MEZCLA LIMOSA	4
MEZCLA ARCILLOSA	3
ABONO	2
ARCILLA	1

PESO ESPECÍFICO: 2

TABLA 2.6.- PENDIENTE DEL TERRENO
(ÁNGULO DE INCLINACIÓN EN %)

RANGO	VALOR
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1

PESO ESPECÍFICO: 1

TABLA 2.7.- ZONA VADOSA

TIPO	RANGO	VALOR TIPICO
CAPA CONFINANTE	1	1
LIMO O ARCILLA	2-6	3
LUTITA	2-5	3
CALIZA	2-7	6
ARENISCA		6
HORIZONTES DE CALIZA, ARENISCA Y LUTITA	4-8	6
ARENA Y GRAVA CON ALTO CONTENIDO DE LIMO Y ARCILLA	4-8	6
ROCAS IGNEAS Y METAMORFICAS	4-8	4
ARENA Y GRAVA	6-9	8
BASALTO	2-10	9
CALIZA CARSTICA	8-10	10

PESO ESPECIFICO: 5

TABLA 2.8.- PERMEABILIDAD EN VARIOS TIPOS DE ROCA
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA
(m/s)

RANGO	VALOR
$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5}$	1
$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	2
$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$	4
$3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$	6
$5 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$	8
$9 \times 10^{-4} +$	10

PESO ESPECIFICO : 3

MONITOREO RECARGA ARTIFICIAL SANTA CATARINA

TABLA 2.9.- CALCULO DE VOLNERABILIDAD

FACTOR	BASALTOS AL PIE DE LA SIERRA DEL CHICHINAUTZIN	ACUIFERO AL CENTRO DE LA ZONA METROPOLITANA
NIVEL ESTATICO	5	5
RECARGA NETA	36	4
TIPO DE ROCA	27	6
TIPO DE SUELO	20	2
PENDIENTE DEL TERRENO	1	10
ZONA VADOSA	45	5
PERMEABILIDAD	30	3
SUMA	164	35
CLASIFICACION	ALTAMENTE VULNERABLE	REDUCIDA VULNERABILIDAD

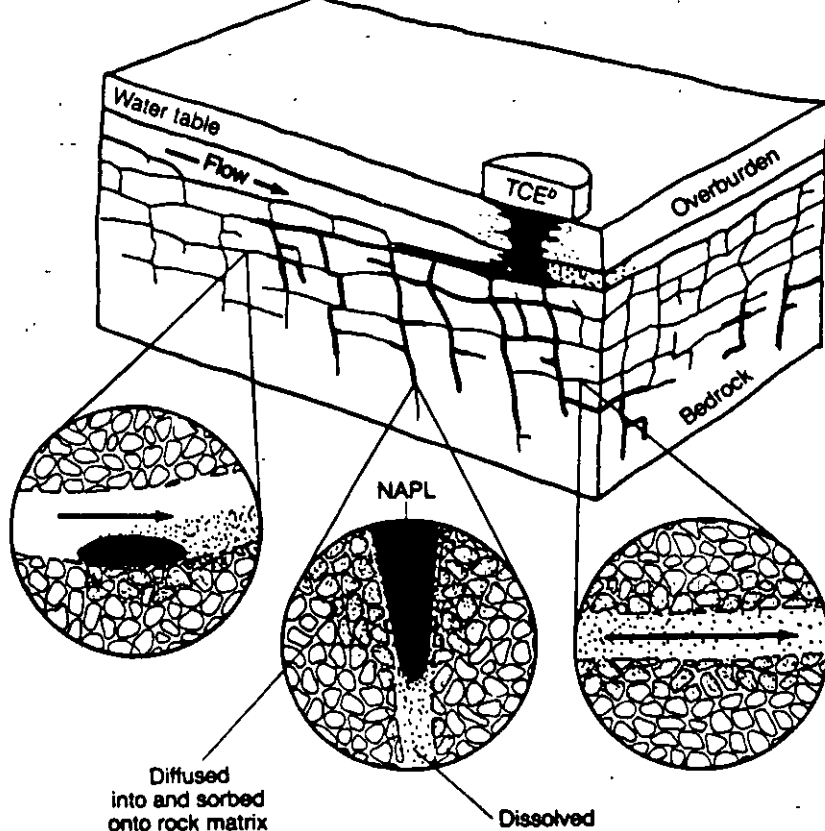


Figure 2.2 Schematic illustration of a DNAPL in a fractured porous medium showing geologic and pore scales. The DNAPL dissolves to create contamination in the fractures and in the low-permeability rock matrix (from Mackay and Cherry, 1989).

DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

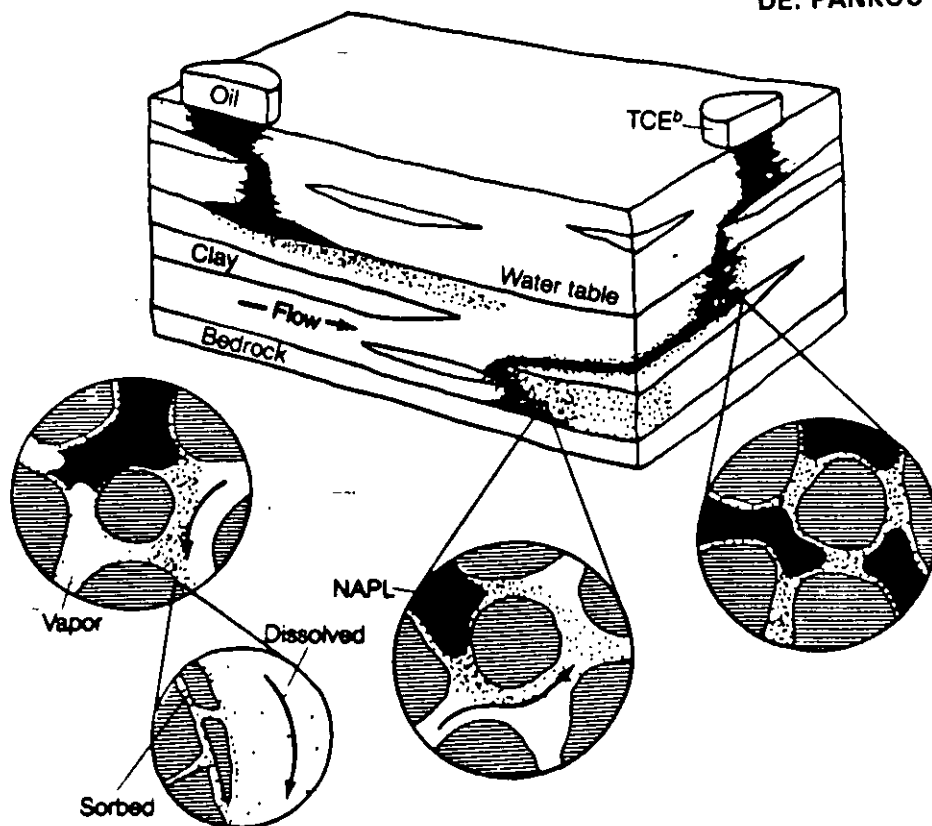


Figure 2.1 Schematic illustration of a DNAPL and a LNAPL in a porous medium, showing geologic and pore scales. A low-permeability clay layer deflects the DNAPL. DNAPL dissolution causes a plume (from Mackay and Cherry, 1989).

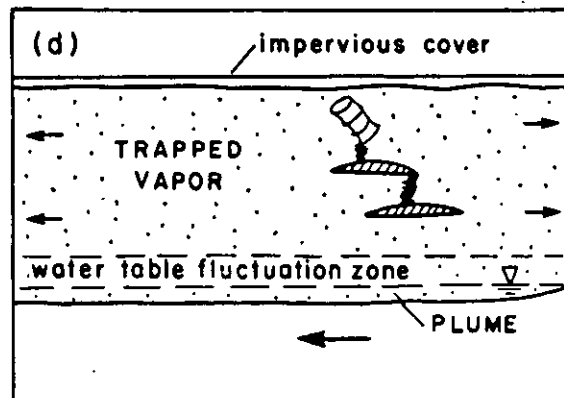
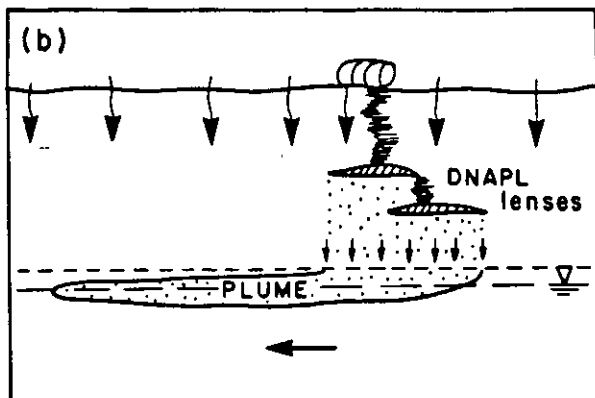
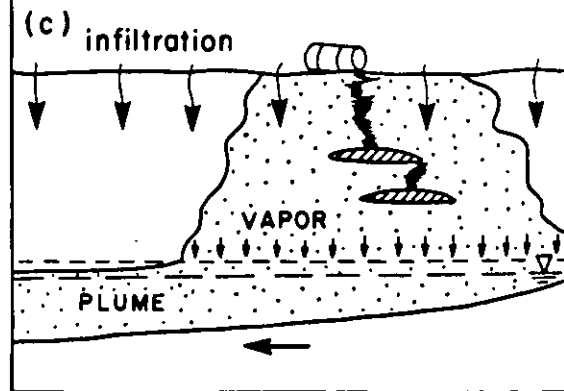
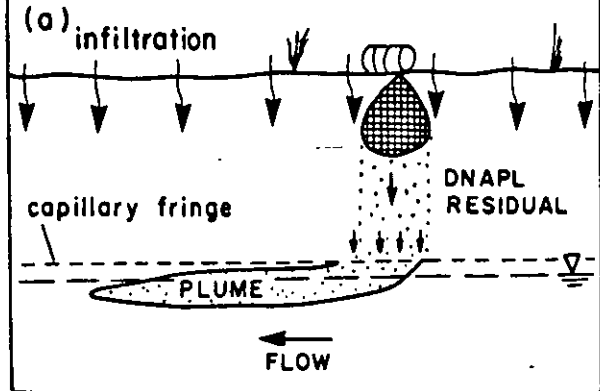
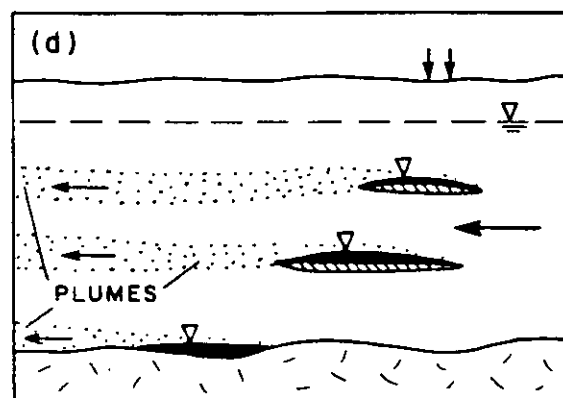
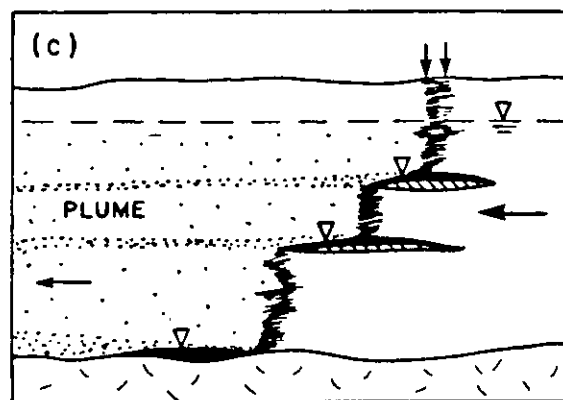
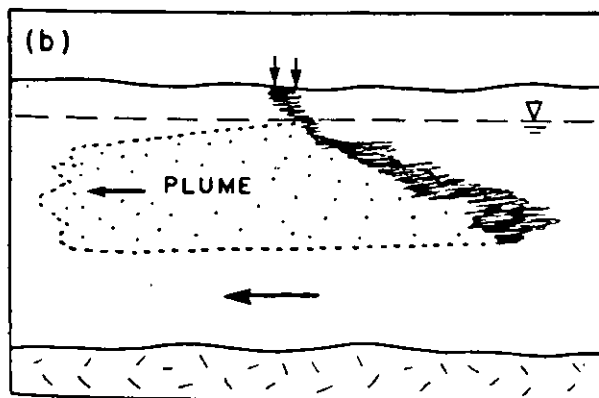
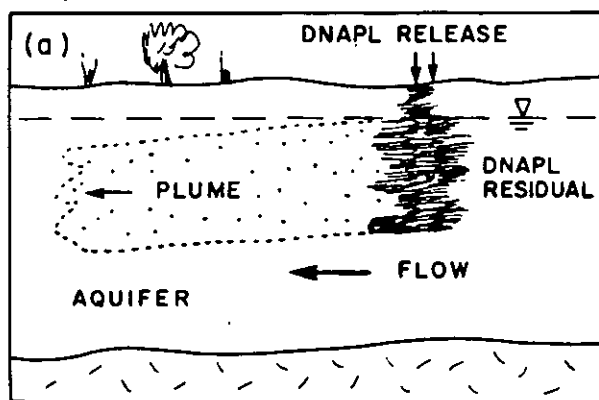


Figure 2.4 Conceptual scenarios for a DNAPL in the vadose zone in granular geologic deposits: a) homogeneous case - no vapor plume; b) heterogeneous case - no vapor plume; c) heterogeneous case - vapor plume; and d) effect of impervious ground cover over vapor-releasing DNAPL source.



DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

Figure 2.5 Conceptual scenarios for a DNAPL in the groundwater zone in granular aquifers: a) partial penetration; b) partial penetration with offset; c) full penetration with offset; and d) same as part c, but at a later stage after DNAPL residual has disappeared due to dissolution in flowing groundwater.

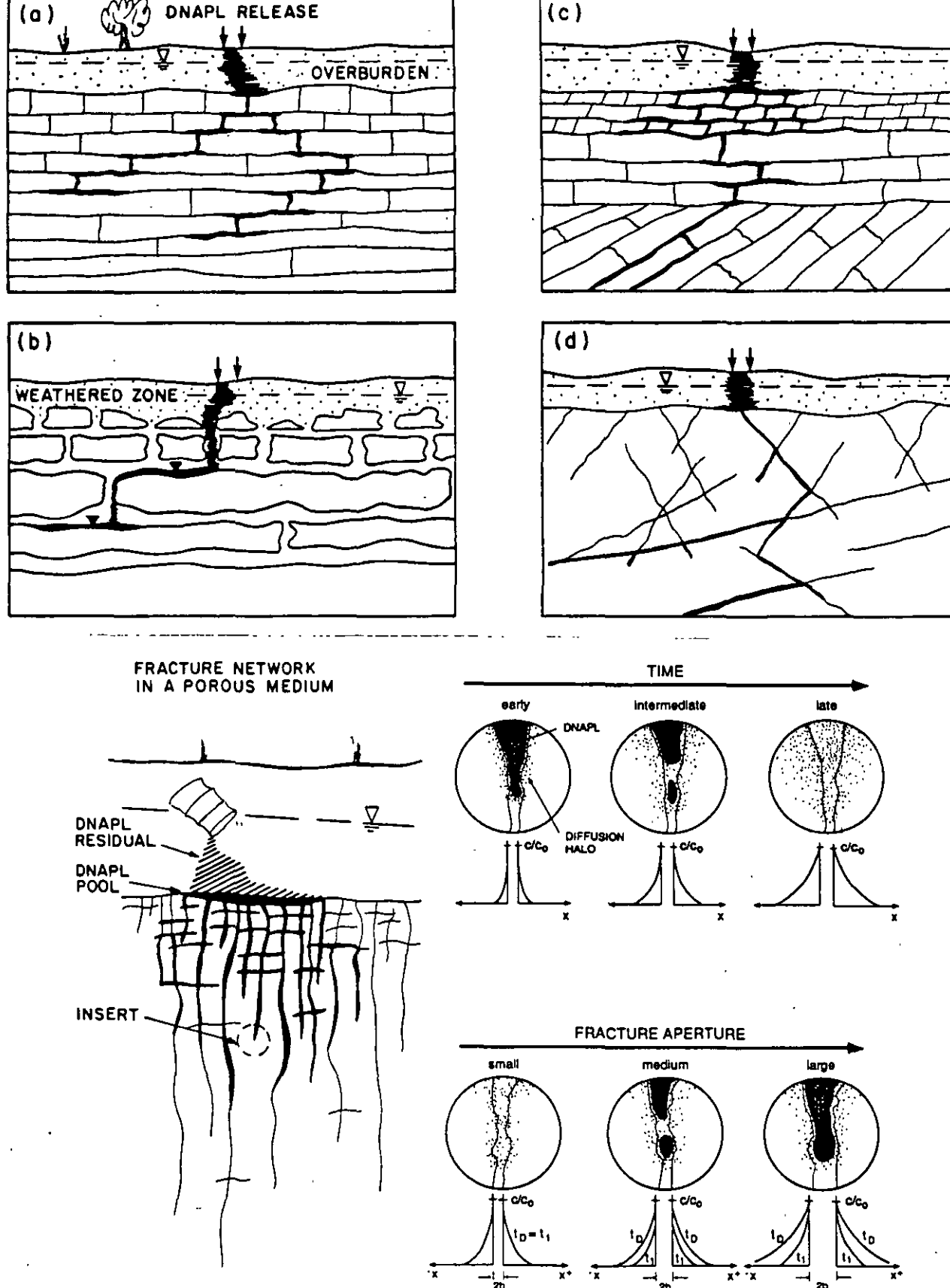


Figure 2.7 Conceptualization of DNAPL persistence and distribution with DNAPL mass loss due to diffusion in water-saturated fractures in a porous medium (such as a fractured clay till or sedimentary rock) as a function of: a) time; and b) fracture size (aperture). Diffusion halos around fractures containing DNAPL become large (more developed) with increases in time, as shown with the concentration vs. distance plots for the three relative time periods in part a. At any particular time t_1 , the DNAPL mass distribution will vary in different size fractures, with DNAPL disappearance occurring most rapidly in the smallest fractures; residual or disconnected DNAPL will be present in medium-sized fractures, and free DNAPL will be present in the largest fractures that are connected to overlying DNAPL pools. DNAPL disappearance times (t_D) increase with an increase with fracture aperture.

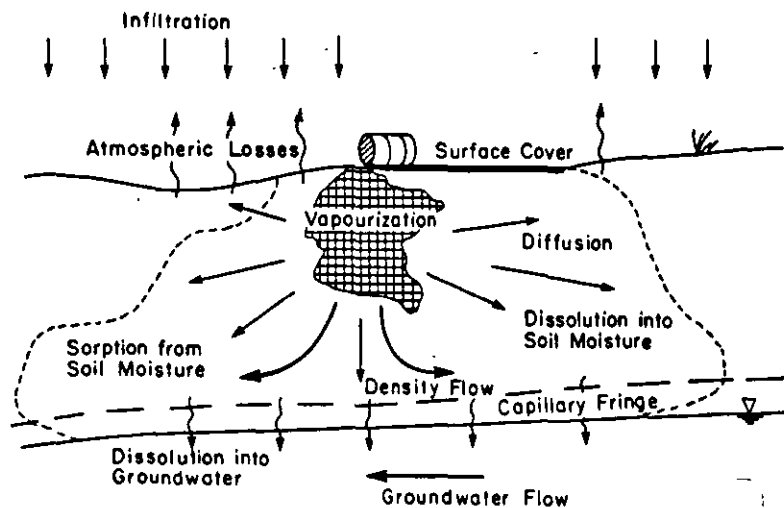


Figure 6.1 Conceptual model of vapor transport processes from a residual DNAPL source in the unsaturated zone. (Reprinted with permission from Mendoza and Frind, 1990a.)

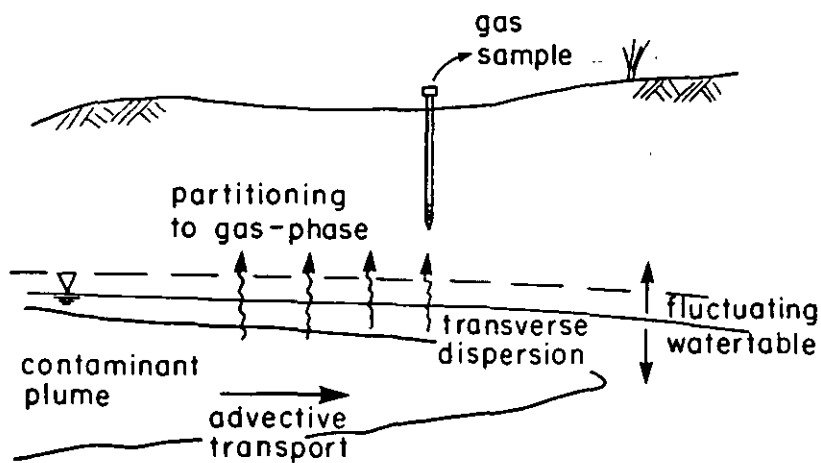


Figure 6.4 Conceptual model for processes involved in groundwater plume detection using soil-gas sampling techniques

DE: PANKOU Y CHERRY, 1996

DISPERSION

Fórmula que relaciona distancia, tiempo, dispersión, concentración inicial y concentración a diversas distancias.

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) + \exp \left(\frac{V_x L}{D_L} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{L + V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \right) \right] \quad 1$$

Ecuación de la dispersión hidrodinámica (Fetter, 1988, pag.393).

Donde:

C_0 = Concentración inicial

L = Distancia

T = Tiempo

C = Concentración a la distancia L y el tiempo T

V_x = Velocidad linear media del agua subterránea

$$V_x = \frac{K}{n_e} \frac{dh}{dl} \quad 2$$

K = conductividad hidráulica

n_e = porosidad efectiva

dh/dl = gradiente hidráulico

D_L = Coeficiente de dispersión longitudinal

$$D_L = \alpha_L V_x + D^* \quad 3$$

D^* = Difusión molecular (10^{-10} -- 10^{-11} para materiales finos, y 10^{-9} para grandes, en m/s^2)

mas

α_L = Dispersividad (unidades de distancia)

$$\alpha_L \approx 0.1L \quad 4$$

Ejemplo. Determinar el tiempo en que el frente de la pluma de un contaminante con un valor de 5 mg/l llega a un pozo de explotación localizado a una distancia de 2000 metros del pozo de recarga. Se seleccionó al parámetro NO_3 por ser el que presenta mayor concentración en el agua de recarga. Se marcó como 5 mg/l el frente de la pluma contaminante debido a que corresponde al criterio para agua potable.

Por lo tanto los valores iniciales son:

$$C_0 = 515 \text{ mg/l } (\text{NO}_3)$$

$$C = 5 \text{ mg/l } (\text{NO}_3)$$

$$L = 2000 \text{ m}$$

$$T = \text{incognita}$$

$$K = 2.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$dh/dl = 0.01$$

$$n_e = 0.23$$

$$D^* = 10^{-9} \text{ m/s}^2$$

sustituyendo los valores en la fórmula (2)

$$V_x = \frac{2.2 \times 10^{-5}}{0.23} \times 0.01 = 9.6 \times 10^{-7} = 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$\alpha_L = 0.1(2000) = 200 \text{ m}, \text{ (formula 4)}$$

$$D_L = 200 \times 10^{-6} + 10^{-9} = 2 \times 10^{-4} \text{ m/s}, \text{ (formula 3)}$$

Cuando la dispersividad (α_L), longitud (L) o el tiempo (T) son grandes, el segundo término del lado derecho de la expresión general (ecuación 1) tiende a cero. (Freeze and Cherry, 1979, pag. 391).

Por ello y sustituyendo los valores en la ecuación (1) queda:

$$\frac{5}{515} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{2\sqrt{2 \times 10^{-4} T}} \right) \right]$$

$$0.02 = \operatorname{erfc} \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right) \quad \text{5}$$

$$\text{si denominamos } X = \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right) \quad \text{6}$$

entonces:

$$\operatorname{erfc}(x) = 0.02$$

de la tabla (apendice 13, Fetter, 1988):

$$\operatorname{erfc}(1.6) = 0.023652$$

$$\operatorname{erfc}(1.7) = 0.016210$$

$$\text{por lo tanto: } \frac{0.023652 - 0.016210}{10} = 0.0007442 \quad \text{para cada incremento}$$

de 0.01 en el rango de 1.6 a 1.7

$$\text{por lo tanto: } \operatorname{erfc}(1.65) = 0.0199$$

$$\text{por lo tanto: } x = 1.65$$

$$\text{sustituyendo en (6): } 1.65 = \left(\frac{2000 - 10^{-6} T}{0.028\sqrt{T}} \right)$$

$$0.046\sqrt{T} = 2000 - 10^{-6} T$$

elevando al cuadrado:

$$0.002T = 4 \times 10^6 - 0.004T + 10^{-12} T^2$$

$$10^{-12} T^2 - 0.006T + 4 \times 10^6 = 0$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{0.006^2 - 4 \times 10^{-12} \times 4 \times 10^6}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm \sqrt{3.6 \times 10^{-5} - 1.6 \times 10^{-5}}}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T = \frac{0.006 \pm 0.0045}{2 \times 10^{-12}}$$

$$T_1 = \frac{5.3 \times 10^{-3}}{10^{-12}}$$

$$T_2 = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{10^{-12}}$$

$$T_1 = 5.3 \times 10^9 \text{ seg}$$

$$T_2 = 7.5 \times 10^8 \text{ seg}$$

$$T_1 = 170 \text{ años}$$

$$T_2 = 24 \text{ años}$$

El valor de tiempo real obtenido de la deducción de la ecuación cuadrática anterior es de 24 años.

EJEMPLO:

Se busca la distancia L del frente de Concentración C en al tiempo T

Concentración inicial (Co) mg/L:	515
Concentración del frente (C) mg/L:	5
Tiempo (T) años:	10
Tiempo en segundos:	3.15E+08
Conductividad hidráulica (K) m/s:	2.2E-05
Porosidad:	0.23
Gradiente:	0.01
Velocidad linear (Vx) m/s:	9.6E-07

Difusión molecular (D*) m/s²: 1.00E-09

Dispersividad (alfa) m: 82 ** Se obtiene de aproximaciones de (alfa) = 0.

Dispersión (D_L) m/s²:(formula 3) 7.84E-05

De formula (1):

$$\frac{2C}{C_o} = \operatorname{erfc}\left(\frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}}\right)$$

Si denominamos

$$X = \frac{L - V_x T}{2\sqrt{D_L T}} \text{-----(7)}$$

entonces:

$$\frac{2C}{C_o} = \operatorname{erfc}(X)$$

erfc (x) = ___ 0.019417

x (limite inferior):	1.6
x (limite superior):	1.7

erfc(limite inferior):	0.023652
erfc(limite superior):	0.016210

incremento por 0.001 de unidad: 0.000744

No. de incrementos: 4.310

X: 1.66

Sustituyendo X en formula (7):

$$L = X2\sqrt{D_L T} + V_x T$$

Se obtiene que L = 822.83 m

APPENDIX 13 Values of the error of x [$\text{erf}(x)$] and the complementary error function of x [$\text{erfc}(x)$]. Note that $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$.

x	$\text{erf}(x)$	$\text{erfc}(x)$
0	0	1.0
0.05	0.056372	0.943628
0.1	0.112463	0.887537
0.15	0.167996	0.832004
0.2	0.222703	0.777297
0.25	0.276326	0.723674
0.3	0.328627	0.671373
0.35	0.379382	0.620618
0.4	0.428392	0.571608
0.45	0.475482	0.524518
0.5	0.520500	0.479500
0.55	0.563323	0.436677
0.6	0.603856	0.396144
0.65	0.642029	0.357971
0.7	0.677801	0.322199
0.75	0.711156	0.288844
0.8	0.742101	0.257899
0.85	0.770668	0.229332
0.9	0.796908	0.203092
0.95	0.820891	0.179109
1.0	0.842701	0.157299
1.1	0.880205	0.119795
1.2	0.910314	0.089686
1.3	0.934008	0.065992
1.4	0.952285	0.047715
1.5	0.966105	0.033895
1.6	0.976348	0.023652
1.7	0.983790	0.016210
1.8	0.989091	0.010909
1.9	0.992790	0.007210
2.0	0.995322	0.004678
2.1	0.997021	0.002979
2.2	0.998137	0.001863
2.3	0.998857	0.001143
2.4	0.999311	0.000689
2.5	0.999593	0.000407
2.6	0.999764	0.000236
2.7	0.999866	0.000134
2.8	0.999925	0.000075
2.9	0.999959	0.000041
3.0	1.999978	0.000022
∞	1.00000	0.00000

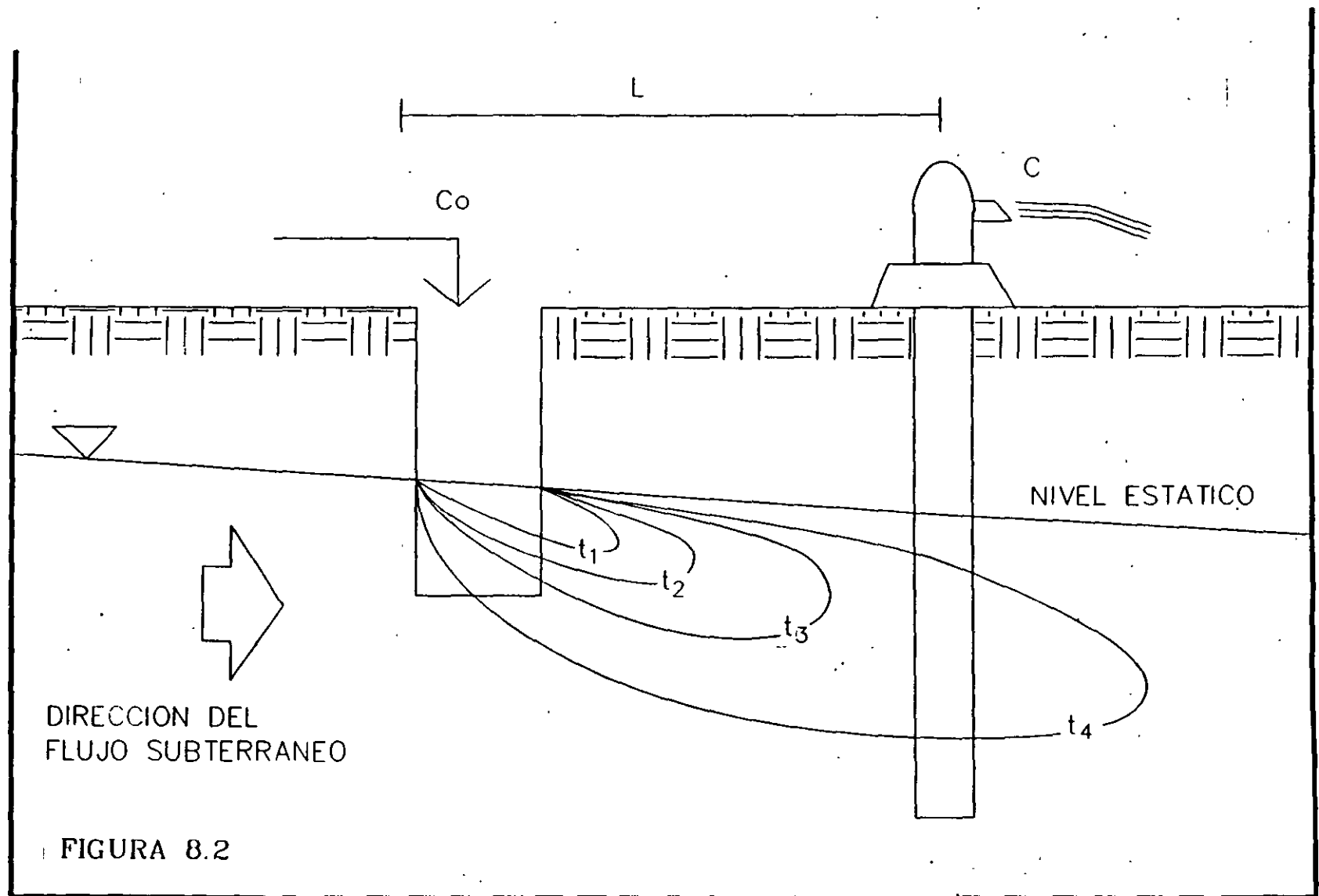
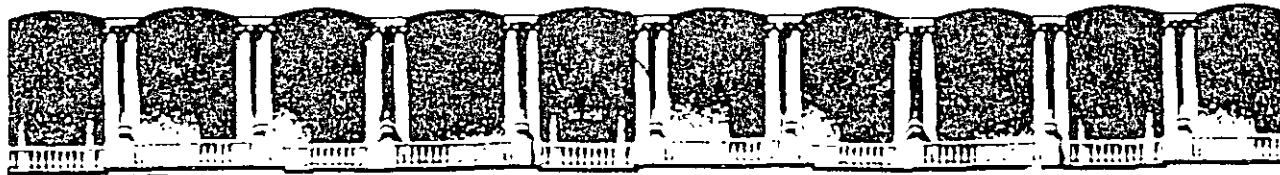


FIGURA 8.2



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Remediación de Acuíferos

Dra. Susana Saval Bohórquez
Guanajuato, Guanajuato
1998.

8

A Screening Protocol for Bioremediation of Contaminated Soil

Jean A. Rogers

James M. Montgomery, Consulting Engineers, Inc., Mannheim, Germany

Dante J. Tedaldi

Bechtel Environmental, Inc., San Francisco, CA 94105

Michael C. Kavanaugh

James M. Montgomery, Consulting Engineers, Inc., Walnut Creek, CA 94598

A bioremediation treatability protocol for soil is presented which can provide feasibility study and remedial action engineers maximum information with respect to the viability and efficiency of bioremediation. The protocol, divided into two main phases, progressively evaluates the viability of biodegradation and the requirements for optimization of the process once implemented. Chemical and microbiological baseline conditions and the potential for contaminant degradation are assessed during Phase I screening. During Phase II the endpoint achievable and kinetics of the biodegradation reactions can be established with pan and slurry reactor tests for ex-situ systems or column tests for in-situ systems. Models are reviewed which can predict the rate of removal of organic constituents, and these data in conjunction with the Phase I and II may be used to estimate the potential time required to achieve cleanup standards, assess the relative importance of biological versus chemical removal mechanisms, and compare expected performance of alternative bioremediation methods.

INTRODUCTION

The screening protocol for evaluating and implementing bioremediation involves several distinct phases. Information about the contaminant and the contaminated media must be gathered during the site characterization and feasibility study stages. A treatability study should then be performed to develop information on the effectiveness of bioremediation for specific contaminants and media, and to optimize process parameters. Finally, contaminant removal rates and scale-up parameters should be considered before a project's design phase. A general bioremediation project timeline is shown in Figure 1. This paper presents a practical, phased approach for evaluating bioremediation as a cleanup alternative at hazardous waste sites, and presents the methodology for obtaining kinetic and equilibrium parameters from treatability study data.

SITE CHARACTERIZATION/FEASIBILITY STUDY ISSUES

A wide range of information should be collected about a potential bioremediation site during the site characterization and feasibility study phases. The data gathered at this point are critical to the evaluation of bioremediation as a viable remedial technology. The factors which should be examined include the chemical characteristics of the contaminants and the chemical, physical, and microbiological characteristics of the site [1, 2]. A summary of these factors is presented in Table 1 (after Dupont [3]).

The data on contaminant and site characteristics gathered during this phase are used to decide on two fundamental issues prior to the commencement of the treatability study and design phases of the project. First, the information gathered provides

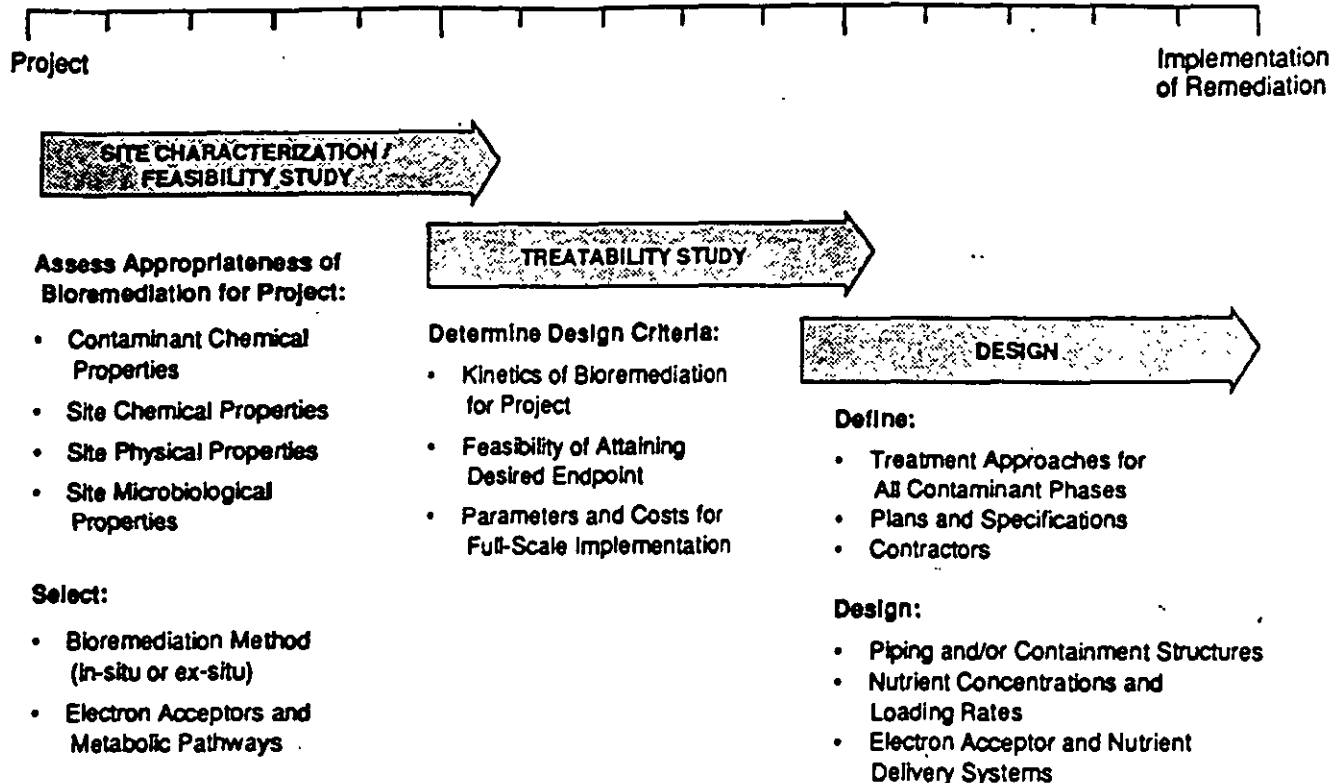


FIGURE 1. Bioremediation project timeline.

a basis for the selection of the most appropriate electron acceptor and redox environment (e.g., oxic/aerobic, anoxic/denitrifying, anaerobic/methanogenic [4, 5, 6]). The complete oxidation of a single organic chemical present at low concentrations in groundwater will typically require very large quantities of oxygen; often well beyond the ability of the system

to naturally replenish the depleted O_2 supply. Thus, within these environments, addition of alternate electron acceptors or the addition of pure oxygen or hydrogen peroxide as a source of oxygen may be required to maintain the viability of the degradation process.

In cases where oxygen concentrations (either in soil gas or

Table 1 Summary of Important Site Characteristics

Soil/Groundwater Characteristics

Texture, pH, nutrient availability, competing carbon sources/oxygen depleters
 Porosity, permeability, bulk density
 Organic matter/organic carbon content
 Cation exchange capacity, clay content
 Dissolved oxygen, redox potential, metals (Mg, Cu, Ni, total/dissolved Fe & Mn)
 Alkalinity, moisture content of soils
 Microbial population—total, contaminant-degraders

Site Characteristics

Recharge rate/runoff potential/water balance
 Depth of water table
 Depth of contamination, areal extent of contamination
 Site/soil temperature
 Site surficial geology

Waste Characteristics

Whole waste
 Existence of carrier fluid
 Carrier fluid chemical composition
 Carrier fluid density, viscosity
 Hazardous constituents
 Soil concentration, dissolved concentration
 Physical/chemical properties
 Vapor pressure, boiling point, melting point, solubility,
 Molecular weight, diffusivity
 Distribution in soil environment
 Soil/water, soil/air, air/water, carrier fluid/soil-air-water
 Degradation rate constants
 Biotic, abiotic

Table 2 Electron Acceptors and Redox Potential in Bioremediation Systems

Process	Electron Acceptor	Environment	Typical Redox Potential, mV	Order of Preference
Aerobic	O ₂	Aerobic metabolism	+ 810	1
	NO ₃ ⁻	Denitrification	+ 750	2
Anaerobic	SO ₄ ²⁻	Sulfate reduction	- 220	3
	CO ₂	Methanogenesis	- 240	4

in dissolved in water) are insufficient to maintain aerobic respiration, nitrate (NO₃⁻), sulfate (SO₄²⁻), iron (Fe³⁺), and manganese (Mn²⁺) can act as electron acceptors if the organisms have the appropriate enzyme systems. However, these reactions can occur only if the organic matter (contaminant or cometabolite) is present in a soluble and consumable form, the bacteria present have a suitable supply of nutrients to maintain the biochemical process, and temperature variations are not excessive. Electron acceptors in microbial processes, typical values for redox potential of various modes of microbial metabolism, and the order of preference for use by microorganisms (after Vogel [7]) are presented in Table 2.

The second principal task is to use the information to identify the general method (in-situ or ex-situ) of bioremediation that is most appropriate for the project. A thorough understanding of contaminant chemical characteristics (such as molecular structure, degree of substitution, vapor pressure, and partition coefficient) is critical to the selection and design of an appropriate treatment system. The complexity and structure of the organic material often determines the likelihood of the molecule being degraded. In general, most simple petroleum hydrocarbons, phenols, and lower ringed polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) are degraded rapidly under aerobic conditions [8]. While a few chlorinated compounds can be used as primary substrates for growth many are transformed as secondary substrates. Less chlorinated compounds are more easily transformed by oxidation processes, while more highly chlorinated compounds are more easily transformed by reduction processes.

Furthermore, the estimated total mass in each phase (e.g., dissolved or solid), media chemical characteristics (including redox potential and organic carbon content), and site microbiological and hydrogeological characteristics should all be very well defined during the site investigation to ensure that treatment system design address the complexities of the site as well as those of the contaminants.

taminated soils typically rely on modifications and improvements to aerobic processes which were originally developed for land farming of petroleum wastes and for wastewater treatment. These processes consist of enriching an environment with a source of oxygen in the presence of the appropriate microorganisms to mineralize the contaminants to carbon dioxide and water. *Ex-situ* treatment systems include land treatment, biopiles/composting, and liquid/solids (slurry) reactors. *In-situ* systems include above-ground inoculation of extracted groundwater followed by injection after addition of nutrients and an electron acceptor; direct injection or infiltration of nutrients, electron acceptors and bacteria, and bioventing which seeks to stimulate biodegradation process through enhanced air flow (oxygen transfer) through the soil.

In-situ bioremediation offers the benefit of not requiring movement of contaminated soils to establish the appropriate conditions for contaminant degradation. Typically, nutrients, water and oxygen have to be supplied by injection wells to stimulate the indigenous organisms to metabolize the waste. *In-situ* bioventing may offer a less intrusive yet effective approach under certain circumstances. Implementation of *ex-situ* bioremediation avoids the difficulties imposed by hydrogeological constraints [9, 10]. *In-situ* systems are generally applicable where the hydrogeology of the site permits the transport of water, nutrients, and/or oxygen through the subsurface and permits the hydraulic containment of the contaminant [11]. In general, sites with conductivities greater than 10⁻⁴ cm/s and fairly homogeneous stratigraphy are good candidates for *in-situ* bioremediation [12, 13]. If the contamination is shallow and can be excavated easily, or site physical and/or chemical characteristics prohibit *in-situ* bioremediation, an *ex-situ* system may be preferred.

Bouwer [14] has summarized the favorable and unfavorable characteristics affecting the feasibility of *in-situ* bioremediation (Table 3).

BIOREMEDIATION METHOD

The method of bioremediation to be employed is chosen based on the information gathered during the characterization phase of a project. Conventional treatment processes for con-

COMPONENTS REQUIRED FOR BIODEGRADATION

The basic components required for the degradation process include the following:

Table 3 Favorable and Unfavorable Factors Affecting Bioremediation

Favorable Chemical and Biological Factors	Unfavorable Chemical and Biological Factors
Small number of organic contaminants	Numerous contaminants, or a complex mixture of inorganic and organic compounds
Non-toxic concentrations	Toxic concentration
Diverse microbial populations	Sparse microbial activity
Suitable electron acceptor condition	Absence of appropriate electron acceptors
pH 6 to 8	pH extremes
Favorable Hydrogeologic Factors	Unfavorable Hydrogeologic Factors
Granular porous media	Fractured rock
High permeability (> 10 ⁻⁴ cm/sec)	Low permeability
Uniform mineralogy	Complex mineralogy with high organic carbon content
Homogeneous media	Heterogeneous media
Saturated conditions	Unsaturated strata, or intermittently saturated conditions

- Microorganisms
- Terminal electron acceptor
- Carbon source
- Nutrients
- Water.

The biotreatability study evaluates the presence of these components, and to what extent these components need to be supplemented. Tests which can be performed encompass both chemical analyses necessary for basic soil and groundwater characterization, and engineered studies to assess optimization of parameters, and to determine kinetic and/or equilibrium measurements.

Information from mass balance studies, including laboratory screening, bench- and pilot-scale studies, is combined with information concerning site and waste characteristics in order to determine applications and limitations of each technology. Information obtained from treatability studies should be focused on identifying ultimate limitations to the use of a remediation technology at a specific site, which usually are related to 1) time required for cleanup 2) level of cleanup attainable, and 3) cost of cleanup.

Environmental factors which will affect remediation efforts include:

- Oxygen and nutrient availability
- Soil moisture content
- The pH of the soil, groundwater, and hazardous waste
- Soil structure and organic content
- Temperature
- Solubility of the pollutants
- Concentration of toxic compounds
- Concentration of contaminant-degrading microbes.

All of these factors should be assessed during treatability studies, and subsequently controlled during the bioremediation process.

Microorganisms

The availability and viability of microorganisms indigenous to the contaminated media are determined during treatability studies. It is generally desirable to enhance the microbial activity of indigenous organisms, rather than using exogenous organisms, because the indigenous organisms are already acclimated to the waste material. Additionally, it has been shown that exogenous organisms do not effectively compete with indigenous microorganisms. Only if the environment is sterile, or the present microbial population does not degrade the contaminant, should exogenous microorganisms be considered. Whatever types of degraders are selected, nutrient addition rates favorable to organisms which preferentially degrade the contaminants of concern must also be determined during treatability studies.

Substrate Requirements

Microorganisms require a primary substrate, which is the carbon and energy source, also termed the electron donor, in the redox reaction governing oxidation of hydrocarbons, for example. Ideally, the contaminant of concern serves as the primary substrate. If the contaminant of concern cannot be degraded as primary substrate, then an analog compound which acts as the primary substrate must be added, and the contaminant of concern can be cometabolized, or degraded as a secondary substrate. Additional substrate may also be required if contaminant levels are too low to support the microbial mass necessary for degradation.

Nutrient Requirements

Nutrient requirements for microorganisms have been established through extensive research for activated sludge processes in the wastewater treatment field. The nutrients include both macronutrients and micronutrients, and are based on the composition of cell matter. Macronutrients include nitrogen, phosphorus, sulfur, iron, potassium, calcium, magnesium, and manganese. Nitrogen and phosphorus are the major requirements in soil bioremediation systems because the soil itself generally provides the other nutrients which are needed in much smaller amounts. Oxidation-reduction reactions can be written for the synthesis and growth of the microbes in order to rigorously determine the mass of nutrients required for a given mass of contamination to be degraded based on the method of McCarty [15]. A rule of thumb ratio for C:N:P is 120:10:1 on a weight basis [16].

Oxygen Requirements

Oxygen requirements for aerobic systems can also be determined by mass balances, and for *in-situ* systems, hydrogen peroxide may be evaluated during treatability studies for use as an oxygen source. Hydrogen peroxide is cytotoxic to those species of microorganisms that do not possess the catalytic enzyme catalase that breaks down hydrogen peroxide to oxygen and water [17]. If hydrogen peroxide is being considered as an alternative oxygen source, the population of biodegrading organisms present should be tested for this enzyme in the treatability study stage.

FOCUS AND OBJECTIVES OF TREATABILITY STUDIES

There are two fundamental objectives of treatability studies, which define the scope of the study to be conducted. The primary objectives of the treatability protocol are:

- to rapidly and inexpensively evaluate the susceptibility of site soils to biological treatment, and
- to determine the rate and extent of treatment which can be achieved.

Secondary objectives include:

- to better understand site-specific chemical partition coefficients of soils for use in risk assessment and remediation efforts, and
- to provide insight regarding non-biological soil treatment options, e.g., soil washing.

A preliminary (Phase I) study is performed during the remedial investigation/feasibility study (RI/FS) stage, in order to obtain comparative information for technology selection. The intent of the Phase I treatability study is to determine if bioremediation is indeed an appropriate remedial activity, given the hydrogeological and contaminant characteristics. A Phase II treatability study is appropriate after bioremediation has been selected as the technology of choice, in order to provide design criteria for a full-scale remediation project. The Phase I and Phase II treatability studies can then be followed by field studies, if necessary, prior to full scale implementation.

Primary Elements of the Soil Treatability Protocol

While some elements of environmental fate mechanisms and required components for biological degradation can be quantified under strict laboratory conditions for some simple cases,

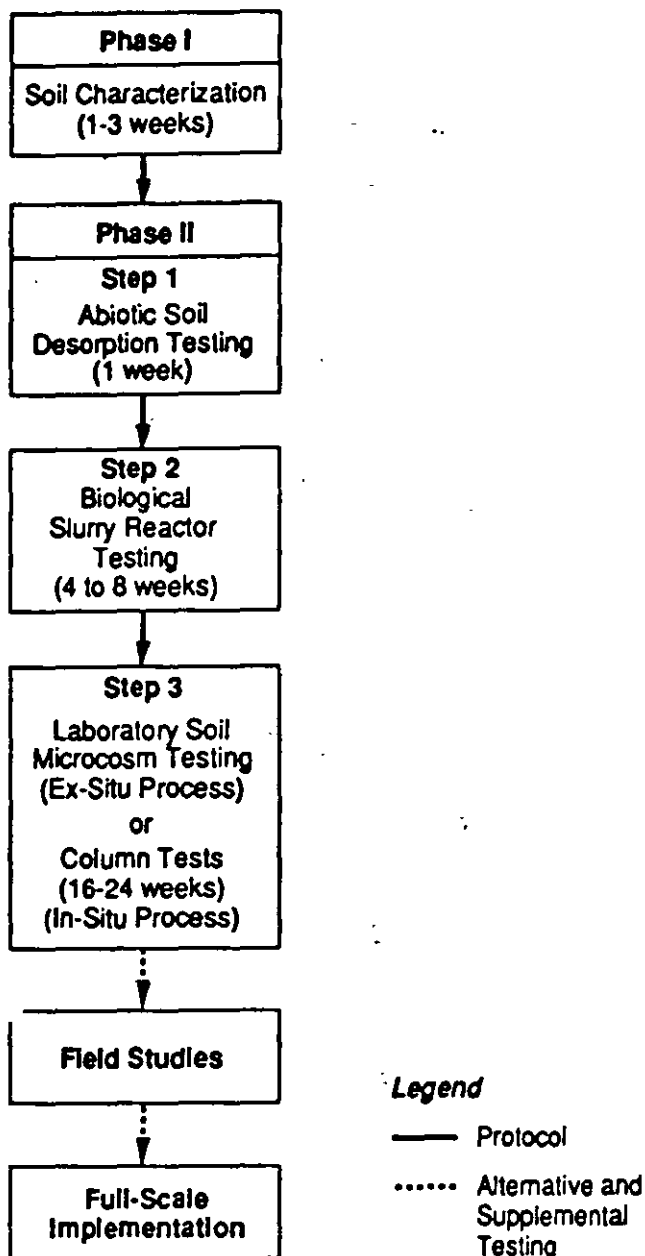


FIGURE 2. Elements of the soil treatability test protocol evaluation.

no one model or set of models can adequately simulate or predict biodegradation in soils because of the complexity of the system. The accelerated soil treatability protocol discussed below was developed and evaluated for the United States Environmental Protection Agency [16, 18] and was proposed earlier by Nakels and Smith [19]. The protocol is based on the premise that chemical contaminants must first desorb and diffuse from the soil and enter the aqueous phase before they can be assimilated by the bacteria and degraded.

The treatability study protocol is designed to evaluate 1) equilibrium sorption relationships, 2) sorption kinetics, and 3) biological oxidation. Protocol elements are shown in Figure 2. Phase I consists of complete characterization of the soil for chemical, microbial, and physical parameters. During Phase II the rate and extent of contaminant desorption which can be achieved is determined. The ability of the microbes to biodegrade the contaminants under aerobic or anaerobic conditions can also be assessed. These tests are not intended to simulate particular soil treatment processes, but rather are intended to examine the biodegradability of contaminants associated with site soils under optimal environmental condi-

tions. Slurry reactor configurations, used in Phase II studies, maximize contaminant mass transfer and ensure that the rate of desorption from soil to water is as rapid as possible. Slurry reactor and soil desorption test results are used to determine the relationship between the extent of contaminant soil desorption and the extent of biodegradation. Soil desorption testing results also provide an indication of the leaching potential of soil contaminants.

Results from this accelerated test protocol can then be applied toward field studies and full-scale implementation. Each of the steps in the treatability study protocol is discussed below.

Phase I—Soil Characterization

The objective of Phase I is to define the chemical, microbial, and physical characteristics of the soil. Chemical analyses are used to identify the chemicals of interest and to quantify their concentrations for a particular site soil. Statistical analysis can determine if soil collected for treatability evaluation is representative of the site (as defined by the site investigation). The chemical concentrations are also needed to help determine the amount of soil, nutrients, and other additives required for the soil desorption and slurry reactor tests. A complete gas chromatographic (GC) scan for volatile and semi-volatile organics should be conducted, as well as testing for metals if the soil has not previously been tested. In addition, the following tests should be conducted:

- Gas chromatographic analysis of volatile organic compounds and base/neutral extractable contaminants of concern
- Total organic carbon
- Ammoniacal nitrogen phosphorous
- Nitrate
- Potassium
- Sulfate
- pH
- Moisture content
- Redox potential
- Metals concentrations (Fe, Mn, Mg, Cu, Ni)
- Radioactivity (gross alpha and gross beta radiation); if suspected
- Alkalinity.

The characterization of soil and water chemistry indicates the contaminants of concern, possible metabolic modes for microbial activity, existing nutrients, and potential inhibitors.

Microbial Enumeration/Composition

Microbial characterization should include enumeration of total microbes and contaminant-specific degraders. Total microbes may be determined by the "Agar Plate Method for Total Microbial Count" as described by Clark [20]. The total microbial count should be compared to an estimate of the population present which will degrade the contaminant of concern. The preliminary screen for contaminant-specific degraders is performed in a medium that provides only the necessary inorganic nutrients required for microbial growth and no intrinsic carbon source. The contaminant supplement serves as the sole source of carbon. Cultures of selected potential biodegraders are prepared in supplemented and unsupplemented (control) media. Following incubation, the cultures are evaluated for the presence and relative abundance of microbial growth. Isolates demonstrating little or no growth are judged to be poor or non-degraders of the contaminant and should be eliminated from further study. The remaining isolates can be evaluated for the effects of environmental parameters or for performance in bench scale reactor systems [21].

Protocol for isolating and identifying contaminant-specific degraders should be developed in conjunction with a micro-

biologist. There are many competent laboratories which can develop specific agars for enumeration of bacteria which degrade the contaminants of concern. Numerous other methods for determining viable counts of microorganisms have been developed recently. These include electron microscopy, viable counts, epifluorescence microscopy, and measurements of biochemical components. Readers are referred to selected references for additional information on newly developed microbial enumeration techniques [5, 22]. Results of total microorganisms and contaminant-specific degraders provide an indication of microbial activity for the soil for existing (unamended) site conditions. If viable populations exist, the potential for bioremediation has been established.

Another technique which establishes the viability of the existing population is respirometry. This method measures the CO_2 production of the microbes, and indicates the activity which is present. This technique is better suited to monitoring and process control than site characterization, because a real-time reading can be obtained. However, the respirometry technique does not distinguish between total organisms and contaminant degraders.

Toxicity Testing

In conjunction with plate counts, bioassays may be used to determine if toxic substances which may inhibit biodegradation exist in the soil matrix. The Microtox® assay is an aqueous general toxicity assay that measures the reduction in light output by a suspension of marine luminescent bacteria in response to an environmental sample. Bioluminescence of the test organism depends on a complex chain of biochemical reactions. Chemical inhibition of any of the biochemical reactions causes a reduction in bacterial luminescence. Therefore, the Microtox® test considers the physiological effect of a toxicant, and not just mortality.

Matthews and Bulich [23] describe a method of using the Microtox® assay to predict the land treatability of hazardous organic wastes. When plate counts yield low results for indigenous microorganisms, the Microtox® assay indicates whether the condition is controllable or not. If the low counts are due to the presence of toxins, bioremediation may be very complicated or infeasible. If toxins are absent, the microbial activity may be enhanced through nutrient addition.

Physical Characterization

Particle size distribution using a dry sieve method developed by Lambe [24] with points of clarification provided by ASTM [25] is used to interpret the results of desorption and slurry reactor testing, and to determine if *in-situ* bioremediation is feasible with respect to hydraulic considerations. Field hydraulic conductivity tests should also be performed by a hydrogeologist as part of a Phase I screening if *in-situ* biodegradation is being considered.

Phase II Testing

Step 1 Abiotic Soil Desorption Testing

Soil desorption tests are performed under abiotic conditions with the results used to compute site-specific soil/water partition coefficients (K_p) for chemicals of interest (i.e., site-specific desorption isotherms). Desorption tests can be conducted many different ways. Readers are referred to selected references to design an applicable protocol for the contaminant of concern [16, 26, 27, 28]. Experimentally determined partition coefficients provide a quick indication of the extent to which organic chemicals will leach off of the site soils. The extent to which chemicals desorb off of soils into solution can be directly correlated with their susceptibility to biodegradation. If a specific organic chemical is detected near its aqueous solubility, then it is expected that biodegradation will occur to some extent. If, on the other hand, a specific chemical is not measured in solution, then it is unlikely that bioremediation of this chemical will occur to any significant extent [29]. Thus, the ultimate effectiveness of bioremediation is strongly affected by the solubility of a contaminant to be degraded. Many common organic contaminants found in soil and groundwater are highly hydrophobic and nonpolar; thus they have relatively low solubilities in water. This fact can hamper the degradation of these compounds because degradation is most likely to occur in the aqueous phase where the bacteria are present and where assimilation of substrate and nutrients can easily occur. The role of sorption and desorption in the aqueous phase biodegradation process has been modeled by Annoke [30] and is presented in Figure 3. In this model, biological oxidation can

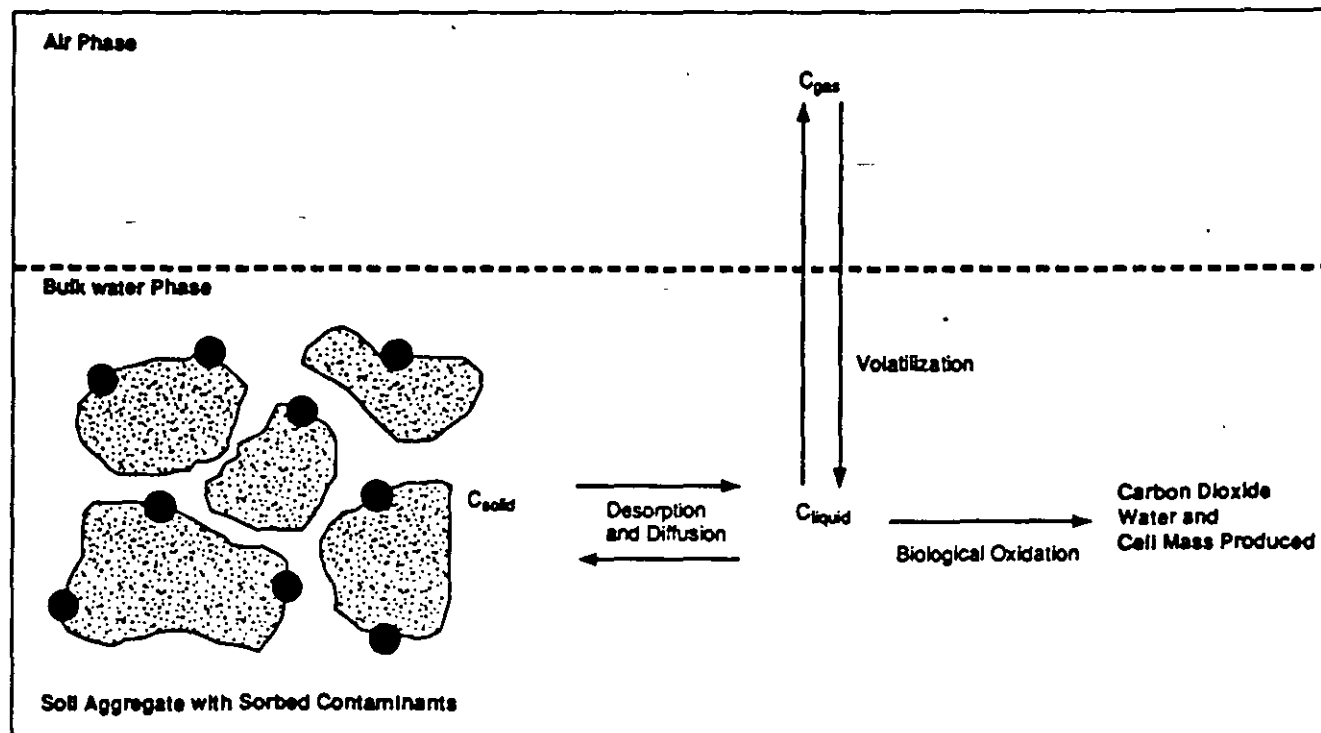


FIGURE 3. Role of desorption/diffusion in biodegradation process.

only occur if the compound within or on a soil particle desorbs and diffuses into the aqueous phase. Once in solution, volatilization can also occur. In many cases, desorption and diffusion of the contaminant into the aqueous phase may be the rate limiting step controlling both volatilization and biological oxidation [31]. These mechanisms control removal of contaminants in both *in-situ* and *ex-situ* biodegradation systems.

A great deal of research has been devoted to the facilitation of bioremediation through the enhancement of the aqueous solubility of organic chemicals. For example, Loehr [32, 33] observed that the loss rates of PAH compounds found at manufactured gas plant (MGP) sites were near zero and little affected by changing nutrient addition rates, water content, temperature, or pH. The test soils were non-toxic, and despite low loss rates of the compounds, significant populations of bacteria were present. Also, aqueous extracts of MGP soils indicated that PAH compounds in such soils were not soluble. This failure of bioremediation of PAHs was surprising as these compounds had been successfully biodegraded in numerous other laboratory and field studies [34]. It was postulated that the probable cause of this phenomenon was the biological unavailability of these compounds. The low solubilities of these compounds and their strong adsorption to the soil could lead to inaccessibility of these chemicals to microorganisms. As a result of these findings and corroborating research by others, many researchers have been investigating the use of surfactants and cosolvents to enhance the solubility of organic chemicals in the environment and thus, make these chemicals more available for bioremediation [35, 36, 37, 38].

Current research in this area has focused on several major areas:

- Surfactants or cosolvent additions are not required at all
- Surfactants are indigenous in the soil
- Surfactants are created by the microbes
- Excess mixing in above-ground reactors enhances chemical release
- Biotreatment is not required at all
- Surfactants or cosolvents remove contaminants from soil
- Design optimization
- Combined use of surfactants/cosolvents and bioremediation.

Large increases (orders of magnitude) in the solubility of individual compounds have been observed by these researchers through surfactant or cosolvent addition. However, because of the very low initial solubilities of many higher ringed PAHs (often less than 200 µg/L for the pure chemical) the resultant aqueous concentrations are still very low and biotreatment may have difficulty in proceeding. In such instances, even with enhancement of solubility and increases in the mass degraded, the mass of contaminant remaining on the soil may still be quite high and well-above regulatory limits. It is important to note that in all cases, these researchers reported that very high concentrations (tens of percent) of surfactants or cosolvents were required to achieve very small increases in solubility. Thus, even if surfactants and cosolvents are found to be effective for the enhancement of bioremediation, reagent costs as well as the ultimate environmental fate of the added reagents become important considerations which may detract from the applicability of these techniques.

Because aqueous solubilities within a chemical class (e.g., chlorinated aliphatics) can vary by several orders of magnitude, it is not possible to provide a broadly-based characterization relative solubilities. Thus it is important to review the solubilities of contaminants of interest in bioremediation studies. From the solubility and desorption data, it may also be possible, based upon the hypothesis that mass transfer limitations dominate chemical fate in a soil matrix, to estimate the treatment endpoint for some chemicals.

Step 2 Biological Slurry Reactor Testing

Biological slurry reactors are operated to examine the ability of the microbes to biodegrade the desorbed organics under either aerobic or anaerobic conditions. Bioreactors maximize degradation rates by reducing or eliminating mass transfer limitations, thereby providing the equilibrium concentrations which will be achievable in the shortest period of time. Figure 4 provides a schematic representation of a common laboratory slurry reactor. Initial and final aqueous phase chemical concentrations are measured along with the concentration time profile of the chemical in the soil phase. The proper microbial environment (i.e., pH, nutrients, sufficient electron acceptor, and no toxic compounds) must be maintained through periodic monitoring and supplemental additives. The biodegradation tests can be completed with 4 to 8 weeks. In the event that necessary indigenous bacteria are not sufficient to biodegrade the aqueous phase organics, the protocol can involve bioaugmentation using cultured organisms.

Bioreactors can be operated in batch, fed batch, or continuous culture modes. The size of the reactor is dependent on the quantity of waste to be treated as well as the hydraulic retention time required to meet target levels. If the slurry reactor tests show statistically significant reduction in soil contaminants, then the technical viability of soil biodegradation will be established. Under slurry reactor conditions, soil desorption and solubilization of organic compounds is maximized, thus, biodegradation should also be maximized. The premise of the protocol is that if biodegradation cannot be achieved under slurry reactor conditions, then it is highly unlikely that biodegradation can be achieved in any other soil treatment process. Biological slurry reactor data quickly provides an estimate of the potential end point for biological treatment. With this understanding, it is possible to decide if further investigation is warranted to select the best process configuration to take advantage of the waste-specific desorption and biodegradation factors. Optimization of operating parameters can be quickly accomplished, such as temperature variation and surfactant addition.

After viability is established, a bench-scale or pilot-scale test is completed to determine the system's operating parameters, which are listed below [39, 40].

- Biological solids retention time
- Hydraulic retention time
- Total suspended solids
- Mixed liquor volatile suspended solids
- BOD, COD, TOC, nitrogen, and phosphorus removal efficiencies
- Sludge yield coefficients
- Dissolved oxygen uptake rates
- Surfactant addition requirements
- Nitrification potential investigations.

Step 3 Pan Microcosm Testing or Column Tests

Pan microcosm tests and/or column tests are conducted to determine the kinetics of the reaction, depending upon whether an *ex-* or *in-situ* approach is desired.

Pan Microcosm Testing

This procedure most closely emulates the land treatment process and represents the conventional test procedure for developing design parameters for the biological land treatment of contaminated soils. For the case of hydrocarbon-contaminated soil, the test is conducted by mixing contaminated soils with an appropriate amount of clean soil to produce a mixture that has oil and grease levels no greater than 1 to 2 percent by

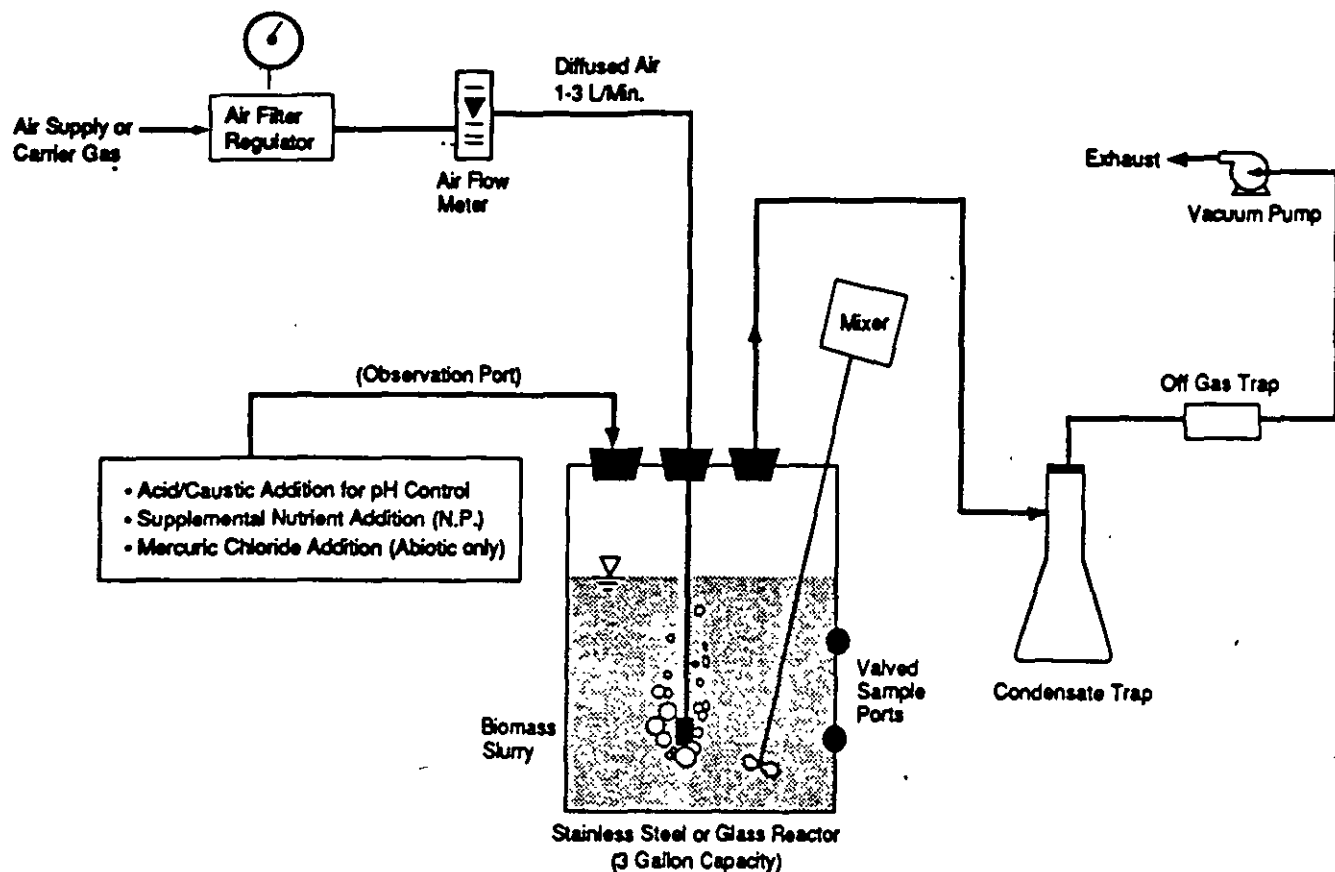


FIGURE 4. Slurry reactor process schematic.

weight. This mixture is placed in a pan reactor with typical dimensions of 20 cm by 30 cm with 10 cm depth [18]. Nutrients (i.e., phosphorus and nitrogen) and water are then added to the soil to enhance the activity of the indigenous bacteria, in amounts determined by the initial soil characterization. Periodically, the pan soils are mixed, and nutrient, pH, and moisture levels are measured, and if necessary, adjusted. Samples of the soils are taken at the start of the experiment, and every week for 2 to 3 months. The concentration-time profiles that are generated are used to estimate contaminant removal kinetics and the basic design parameters for the land treatment process. The pans must be operated for a 2- to 3-month period because this bioremediation process is not as aggressive as a slurry reactor in terms of maximizing soil surface exposure to biological activity.

Column Tests

This procedure simulates *in-situ* biodegradation of organic contaminants in the subsurface environment. A vertical column of contaminated soil is used, allowing a solution of water, microorganisms, and nutrients to flow through the system. Test and control columns are run. Hydraulic conductivity considerations can be assessed in this manner, as well as the potential for clogging due to biomass generation. Biofouling, common in *in-situ* systems, is caused by poor soil permeability and inhibits the flow of applied materials through the treatable soil matrix. The resultant biomaterial "plug" precludes homogeneous aqueous dispersion, saturation, and maintenance of biological activity, thereby negating effective biotreatment. During the course of the column studies, chemical, microbiological, and contaminant parameters of control and test systems are evaluated. Samples are subsequently evaluated for chemical and biological changes as well as terminal end procedure. If anaerobic or methanogenic conditions are being studied, metabolic pathways and potentially toxic by-products should be investigated [41, 42, 43].

Data Analysis

Following the collection of site characterization and contaminant treatability data, various data interpretation and modeling approaches are available to estimate the expected effectiveness of bioremediation for cleanup of soils contaminated with organic chemicals. Modeling approaches range from simple analytical equations to complex computer codes. The two most effective uses of models in remediation projects are for either screening purposes or for field validation activities. In this section, relatively simple analytical equations are presented which allow the rate and extent of contaminant removal to be estimated. These model results can be used to estimate the potential time required to achieve cleanup standards, assess the relative importance of biological versus physical/chemical reaction mechanisms, and compare expected performance of alternative bioremediation methods.

The data obtained from the slurry reactor study can be interpreted using the classical model of microbial growth, given by the Monod equation:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{kXS}{K_s + S} \quad (1)$$

Where:

S is substrate concentration, mg/L

X is biomass concentration, mg/L

K_s is the half-velocity coefficient, mg/L

t is the time in hours

k is the maximum specific substrate utilization rate, 1/hr.

The measurement of substrate and biomass with time will enable the quantification of K_s and k . The application of the Monod expression to soil bioremediation, however, has been limited in practice due to difficulty in quantifying X , which

represents the active, contaminant-degrading microorganisms on a mass/volume basis and is a required parameter in the above second order equation. Many treatability studies rely on cultural techniques to estimate the abundance of microorganisms in soils, although these methods may detect less than ten percent of the amount actually present [22]. The application of this equation has traditionally been in slurry reactors, where activated sludge is dried and weighed to determine X . The presence of a solid phase in pan or column reactors complicates biomass determination. Non-traditional methods of determining X for soil/water systems are being investigated. Readers are referred to selected references for further information [5, 22]. Additional research is needed in the area of soil biomass quantification to provide a reliable method to distinguish between contaminant degrading the non-contaminant degrading cells.

In addition to problems associated with quantifying X , many of the assumptions upon which Monod kinetics are based may not be valid for *in-situ* applications or land treatment processes. These include the assumption that utilization rate is limited by a single enzymatic process, that there is a constant enzyme concentration, and that there is no change in the species distribution of the microbial community.

In view of the problems of applying the Monod equation in *in-situ* or land farming processes, approximations to the rigorous equation given above can be used. At high primary substrate concentration, the rate is a maximum and first order with respect to organism concentration, but zero order with respect to substrate concentration:

$$-dS/dt = kX \text{ with } (S \gg K_s) \quad (2)$$

At low primary substrate concentration, the rate of utilization is first order with respect to both organism concentration and substrate concentration:

$$-dS/dt = (k/K_s)XS \text{ with } (S \ll K_s) \quad (3)$$

The ratio of k/K_s is called the second order rate constant for biological degradation. This value is useful when considering the degradation of contaminants at low mg/L concentrations.

From these equations it is clear that X , or the biomass concentration should be increased in order to increase the rate of degradation. At a constant biomass level, one can determine the half-life of a compound by integrating.

$$C_0 - C_t = kX(t - t_0) \quad (4)$$

where

C_t = concentration at time t ,
 C_0 = concentration at time $t_0 = 0$
 for the half-life, $t_{1/2}$, set $C_t = 1/2 C_0$

$$1/2 C_0 = kX t_{1/2} \quad (5)$$

$$t_{1/2} = C_0 / 2kX \quad (6)$$

These concepts are illustrated by the following example, for this case assume:

$k = 0.1 \text{ d}^{-1}$ (a typical value)
 $C_0 = 100 \text{ mg/L}$, or 100 ppm
 $t_{1/2} = 1,000 \text{ hr}$, or about 40 days
 then, X (biomass concentration) = 12.5 mg/L

The relatively slow rate of biodegradation is partially due to the very low biomass concentration and this factor would tend to limit *in-situ* degradation. This slow rate is further compounded by the fact that many degradable compounds may have half-lives of months to years under natural conditions.

Table 4 Volumetric Productivity Comparison

Type of Bioreactor	Volumetric Productivity (mg/L-hr)
Fermentor	5,000 to 25,000
Trickling filter	5 to 250
Activated sludge	10 to 100
Bioremediation	0.02 to 30

The extent to which biomass concentrations can be increased can be estimated by comparison to other biotreatment processes. In order to compare biodegradation with other bioprocesses it is useful to consider another way to express microbial kinetics in terms of volumetric productivity [44]. In the example just given, the rate of conversion could be stated as:

$$\text{Volumetric productivity} = \text{Rate/volume} = kX \quad (7)$$

or, volumetric productivity = $(0.1 \text{ d}^{-1})(12.5 \text{ mg/L}) = 1.25 \text{ mg/L-d}$. Other examples of biological reactions stated in the same terms are listed in Table 4.

One strategy to enhance biotreatment is to add a substrate that causes the biomass to increase *in-situ*. However, this is limited by the stoichiometric constraints discussed above particularly for aerobic reactions. This same effect can also be obtained by adding externally grown biomass to the contaminated matrix, i.e., enrichment. In this case, biomass would be grown in a fermentor where it is much easier to optimize nutrient addition rates and environmental conditions such as temperature and pH. In a fermentor, biomass concentrations of greater than 25,000 mg/L can be achieved. The addition of this biomass to a contaminated matrix may increase the rate of degradation by orders of magnitude. However the rate will also decay as the bacteria die off if the substrate (and/or nutrient) concentration in the soil is insufficient for continued cell maintenance and growth. In addition, although the introduction of exogenous biomass (as recycle in the activated sludge process for conventional wastewater treatment) may be practical in open or batch systems, it is unlikely that biomass addition to groundwater systems will be practical due to problems associated with fouling of the porous media.

The minimum substrate concentration is also a useful parameter which can be obtained from slurry reactor data, [14] and is given as follows:

$$S_{\min} = \frac{K_s b}{Yk - b} \quad (8)$$

Where:

Y = yield coefficient, mg bacteria/mg substrate
 b = decay coefficient or death rate, day^{-1} .

S_{\min} represents the minimum substrate concentration that can support a viable biomass community. If the substrate concentration is below S_{\min} the organisms will not multiply or increase in concentration. Thus, if a contaminant enters the soil at a low level, the bacteria responsible for degradation will not increase substantially and the degradation will take place very slowly.

For example under aerobic conditions where $k = 0.1 \text{ hr}^{-1}$, $K_s = 10 \text{ mg/L}$, $Y = 0.5$, and $b = 0.005 \text{ hr}^{-1}$, the S_{\min} would equal about 100 $\mu\text{g/L}$. That is, degradation cannot achieve a concentration below 100 $\mu\text{g/L}$ within a reasonable period of time. S_{\min} is likely to vary by an order of magnitude or more above or below 100 $\mu\text{g/L}$, depending on the organism, the substrate, and the environmental conditions under which the organism grows. In any event, there appears to be a minimum value under steady-state conditions to which substrate concentration can be reduced when this substrate is the sole source of energy. However, it may be possible to overcome this limitation by adding

a non-toxic primary substrate which can act as cometabolite. This has the effect of increasing the rate of metabolism and overcoming the minimum concentration limitation. In this way it may be possible to achieve residual concentration levels of $\mu\text{g/L}$ or even ng/L levels.

This determination is useful to estimate minimum concentrations which can be achieved without adding an additional primary substrate. The significance of determining S_{min} from treatability study data is that the treatability studies do not have to be carried out to their endpoint. Once sufficient data is collected to determine kinetic parameters, S_{min} can be predicted.

Although a contaminant being degraded as a primary substrate can not be reduced to concentrations below S_{min} , a contaminant acting as a secondary substrate may be removed to lower concentrations through cometabolism. In this case, utilization of the primary substrate determines the amount of biomass present in the system and the secondary substrate is degraded without contributing significant energy to the system. Kinetic parameters determined for bioremediation projects can be based on either primary or secondary substrate kinetics.

Recent efforts to describe substrate utilization in soil and subsurface environments are focusing on a biofilm concept as a basis for modeling [45]. Soil microorganisms are typically present as a biofilm on the soil particles. The change in substrate concentration, then, is a function of the mass transport of substrate, nutrients, and electron acceptor into the biofilm.

A comparison of the rates observed in the slurry reactor and in either the column or pan reactor will permit an evaluation of the rate limiting process. If the observed kinetics are similar in the two reactor configurations, the rate at which the microorganisms can metabolize the substrate limits the rate at which the substrate is used. Similarly, if the kinetics observed in the pan or column are much slower than those in the slurry reactor, then either the rate of desorption, mass transfer, or nutrient/electron acceptor availability limit the rate of substrate utilization. The latter case is typical of *in-situ* applications and suggests that the rate of disappearance of contaminant is typically related to the engineering of an appropriate system, rather than on the ability of the microorganisms to degrade the contaminant quickly. The column or pan reactor, being more representative of the system in which the remediation effort will occur, will give a closer approximation of the kinetics which can be expected in the field.

SUMMARY

The above treatability protocol is designed to provide maximum information with respect to the viability and efficiency of bioremediation, with a minimum of laboratory effort. The Phase I screening provides information with regard to chemical and microbiological parameters required to determine if bioremediation is a feasible technology given the site conditions. Once bioremediation has been selected as the appropriate technology, a Phase II screening should be performed. The Phase II screening provides information pertaining to the endpoint achievable (slurry reactors) or kinetics of the reaction (established with pan tests for *ex-situ* systems or column tests for *in-situ* systems). Data analysis can predict the rate of removal of constituents using one of the models discussed. Data from the preliminary screening and the kinetic predictions from the model are used to estimate the potential time required to achieve cleanup standards, assess the relative importance of biological versus chemical removal mechanisms, and compare expected performance of alternative bioremediation methods.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge the indirect and

direct contributions of researchers in the Environmental and Water Resources Program at the University of Texas at Austin especially Dr. Raymond C. Loehr, and the approach towards volumetric productivity advanced by Dr. Philip Stewart of the Center for Interfacial Microbial Processes at Montana State University.

LITERATURE CITED

1. McCarty, P. L., "Bioengineering Issues Related to In-Situ Remediation of Contaminated Soil and Groundwater," Presented at Reducing Risks from Environmental Chemicals through Biotechnology, University of Washington, Seattle, WA (1987).
2. Kobayashi, H., and B. Rittman, "Microbial Removal of Hazardous Organic Compounds," *Environmental Science and Technology*, 16 p. 170A (1982).
3. Dupont, R. R., "Applications of Treatability Studies in Management of Fuels/Petroleum Waste Impacted Soils," For Presentation at 84th Annual Meeting & Exhibition, Vancouver, B.C., (1991).
4. McCarty, P. L., B. E. Rittmann, and E. J. Bouwer, "Microbial Processes Affecting Chemical Transformations in Groundwater," *Groundwater Pollution Microbiology*, G. Bitton and C. P. Gerba (Eds.) J. Wiley and Sons, New York, N.Y. (1984).
5. Lee, M. D., et al., "Bioremediation of Aquifers Contaminated with Organic Compounds," *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, 18 (1) pp. 29-89 (1981).
6. Babea, L., and D. D. Vaishnav, "Prediction of Biodegradability of Selected Organic Compounds," *Journal of Industrial Microbiology*, 2 pp. 107-115 (1987).
7. Vogel, T. M., C. S. Criddle, and P. L. McCarty, "Transformations of Halogenated Aliphatic Compounds," *Environmental Science & Technology*, 21 (8) pp. 722-736 (1987).
8. Bradford, M. L., and R. Krishnamoorthy, "Consider Bioremediation for Waste Site Cleanup," *Chemical Engineering Progress*, 87 (2) pp. 80-85 (1991).
9. Brown, R. A., R. D. Norris, and G. R. Brubaker, "Aquifer Restoration with Enhanced Bioreclamation," *Pollution Engineering*, pp. 25-28 (1985).
10. Brubaker, G. R., and E. L. Crockett, "In Situ Aquifer Remediation Using Enhanced Bioreclamation," In Proceedings of Hazmat 86. Atlantic City, Tower Conference Management, Glen Ellyn, IL (1986).
11. Raymond, R. L., M. D. Lee, and C. H. Ward, "Assessment of Potential for In-situ Bioremediation," In Proceedings of the DECHEMA Conference, Frankfurt am Main, pp. 30-31 (1989).
12. Thomas, J. M., and C. H. Ward, "In Situ Bioremediation of Organic Contaminants in the Subsurface," *Environmental Science and Technology*, 23 (7) pp. 760-765.
13. United States Environmental Protection Agency (EPA), International Evaluation of In-Situ Bioremediation of Contaminated Soil and Groundwater, EPA 540/2-90/012, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C. (1990).
14. Bouwer, E. J., "Bioremediation of Organic Contaminants in the Subsurface," in *New Concepts in Environmental Microbiology*, Ralph Mitchell ed., in Press.
15. McCarty, P. L., "Stoichiometry of Biological Reactions," Presented at the International Conference, Toward a Unified Concept of Biological Waste Treatment Design, Atlanta, GA (1972).
16. Sims, R. C., "Soil Remediation Techniques at Uncontrolled Hazardous Waste Sites," *J. Air and Waste Management Association*, 40 (5) pp. 704-732 (1990).
17. American Petroleum Institute, "Field Study of Enhanced

- Subsurface Biodegradation of Hydrocarbons using Hydrogen Peroxide as an Oxygen Source," Publication No. 4448, Washington, D.C. (1987).
18. United States Environmental Protection Agency (EPA), "Guide for Conducting Treatability Studies under CERCLA," EPA/540/2-89/058, Office of Solid Waste and Emergency Response, and Office of Research and Development, Washington, D.C. (1989).
 19. Nakles, D. V., and J. R. Smith, "Treatability Protocol for Screening Biodegradation of Heavy Hydrocarbons in Soil," In: *Proceedings of Hazardous Materials and Management Conference and Exhibition*, Atlantic City, NJ (1989).
 20. Clark, F., "Agar Plate Method for Total Microbial Count," *Methods of Soil and Analysis*, American Society of Agronomy, Madison, WI, Vol. 2, pp. 1460-1465 (1965).
 21. Kaufman, K., "Applied Bioremedial Technology," Presented at Hazmacon '89, Santa Clara, CA (1989).
 22. Ghiorse, W. C., and D. L. Balkwill, "Microbial Characterization of Subsurface Environments," in *Ground Water Quality*, Ward, C. H., W. Giger, and P. L. McCarty eds., Wiley, New York, NY (1985).
 23. Matthews, J., and A. Bulich, "A Toxicity Reduction Test System to Assist in Predicting Land Treatability of Hazardous Waste," in *Hazardous and Industrial Solid Waste Testing: Fourth Symposium*, STP-886, J. K. Petros, Ed., ASTM, Philadelphia, PA (1984).
 24. Lambe, T. W., *Soil Testing for Engineers*, John Wiley and Sons, New York, NY (1951).
 25. American Society of Testing and Materials (ASTM), "Standard Method for Particle-Size Analysis," ASTM D 422-63, (Reapproved 1972).
 26. DiToro and Horzumpa, "Reversible and Resistant Components of PCB Adsorption-Desorption: Isotherms," *Environmental Science and Technology*, 16 (9) pp. 594-603 (1982).
 - Vu, S., and P. M. Gschwend, "Sorption Kinetics of Hydrophobic Compounds to Natural Sediments and Soils," *Environmental Science and Technology*, 20 (7) pp. 717-725 (1986).
 28. Hamaker, J. W., and J. M. Thompson, *Adsorption of Organic Chemicals in the Soil Environment*, Vol. I, C. A. I. Goring and J. W. Hamaker, Eds., Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y. (1972).
 29. Torphy, M. F., H. F. Stroo, and G. Brubaker, "Biological Treatment of Hazardous Wastes," *Pollution Engineering* May 80-86 (1989).
 30. Annoke, G. J., "Research on Decontamination of Polluted Soils and Dredging Sludges in Bioreactor Systems," *Assessment of International Technologies for Superfund Application* EPA/540/2-88/003, Washington, D.C. (1988).
 31. Hamaker, J. W., and J. M. Thompson, "Adsorption," *Organic Chemicals in the Soil Environment*, Vol. I, C. A. I. Goring and J. W. Hamaker, Eds., Marcel Dekker, Inc., New York, N.Y. (1972).
 32. Loehr, R. C., "Treatability Potential for EPA Listed Hazardous Wastes in Soils," EPA-600/2-89-011, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK. (1989).
 33. Loehr, R. C., "Bioremediation of PAH Compounds in Contaminated Soil," *Second Annual West Coast Conference on Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater*, Newport Beach, CA (1991).
 34. Park, K. S., R. C. Sims, and R. R. DuPont, "Transformation of PAHs in Soil Systems," *ASCE Journal of Environmental Engineering*, 116 (3) pp. 632-642 (1990).
 35. Vedvyas, S. K., "Enhancement of the Solubilization of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons Using Cosolvents and Surfactants," M.S. Thesis, University of Texas at Austin, Austin, TX (1990).
 36. Groves, F., Jr., "Effect of Cosolvents on the Solubility of Hydrocarbons in Water," *Environmental Science & Technology*, 22 (3) pp. 282-286 (1988).
 37. Ellis, W. D., J. R. Payne, and G. D. McNabb, "Treatment of Contaminated Soils with Aqueous Surfactants," EPA/600/S2-85/129. USEPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH (1985).
 38. Nkedi-Kizza, P., P. S. C. Rao, and A. G. Hornsby, "Influence of Organic Cosolvents on Sorption of Hydrophobic Organic Chemicals by Soils," *Environmental Science & Technology*, 19 (10) pp. 975-979 (1985).
 39. Eckenfelder, W. W., *Industrial Water Pollution Control*, 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, NY (1989).
 40. Benefield, L. D., and C. W. Randall, "Biological Process Design for Wastewater Treatment," Prentice-Hall Series, Englewood Cliffs, NJ (1980).
 41. Bragg, J. R., J. C. Roffall, S. McMillen, "Column Flow Studies of Bioremediation in Prince William Sound," Exxon Production Research Company, Houston, TX (1990).
 42. Bouwer, E. J., and P. L. McCarty, "Transformations of Halogenated Organic Compounds Under Denitrification Conditions," *Applied and Environmental Microbiology*, 45 1295 (1983).
 43. Gibson, S. A., and J. M. Suflita, "Extrapolation of Biodegradation Results to Groundwater Aquifers: Reductive Dehalogenation of Aromatic Compounds," *Applied and Environmental Microbiology*, 52 p. 161 (1986).
 44. Stewart, P. S., D. J. Tedaldi, A. R. Lewis, and E. Goldman, "Biodegradation Rates of Crude Oil in Seawater," *Water Environment Research* (In Press).
 45. Rittman, B. E., D. Jackson, S. L. Storck, "Potential for Treatment of Hazardous Organic Chemicals with Biological Processes," in *Biotreatment Systems*, CRC Press, Boca Raton, FL (1989).

CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO CONTAMINADO

ANÁLISIS DEL SITIO Y SUS ALREDEDORES



ANÁLISIS GEOHIDROLÓGICO



ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS CONTAMINANTES

diagnóstico *in-situ*

muestreo directo



ANÁLISIS FISCOQUÍMICO



ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO



PROPUESTA DE REMEDIACIÓN DEL SITIO

ANÁLISIS DEL SITIO CONTAMINADO

- ubicación geográfica
 - tipo de instalación
 - plano de instalaciones superficiales y vías de acceso (terrestre, fluvial y marítimo)
 - plano de instalaciones subterráneas
 - instalaciones aledañas
 - ubicación de zonas urbanas aledañas
 - estudios previos (auditorías ambientales, gasometrías, mediciones de la profundidad del nivel freático)
 - material contaminante (materia prima, producto o residuo de proceso)
 - ubicación de fuentes de contaminación (obra subterránea o superficial)
 - antigüedad de la contaminación
 - precipitaciones pluviales (frecuencia y nivel)
 - escorrentías
 - ubicación de cuerpos de agua aledaños
 - clima y temperatura ambiente del sitio
 - uso del suelo afectado (agrícola, forestal, recreativo, residencial, comercial, industrial o de conservación)
 - tipo de vegetación
-

ANÁLISIS GEOHIDROLÓGICO DEL SITIO

- topografía
 - ubicación de pozos de extracción de agua (incluye norias)
 - profundidad del nivel freático
 - dirección y velocidad del flujo del agua subterránea
 - espesor de producto libre (cuando éste ha alcanzado el nivel freático)
 - definición tridimensional de la mancha de contaminación
 - perfiles estratigráficos
 - pozos indio
-

DIAGNÓSTICO DE LA CONTAMINACIÓN

✓ métodos geofísicos

✓ métodos gasométricos

- lectura directa
- colocación de absorbedores

✓ muestreo directo

ANÁLISIS QUÍMICO DE CONTAMINANTES

- Compuestos monoaromáticos volátiles (BTEX): benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, método EPA 8020 (GC/FID) o método EPA 8060 o EPA 8240 (GC/MS)
 - Hidrocarburos totales de gasolina y diesel, método EPA 8015 (GC/FID)
 - Hidrocarburos polinucleoaromáticos: naftaleno, antraceno, fenantreno, benzopireno y otros, método EPA 8310 (GC/FID)
 - Hidrocarburos totales del petróleo (HTPs), método EPA 418.1 M (infrarrojo)
 - Bifenilos Policlorados, método EPA 8080
 - Metales pesados: As, Ba, Cd, Cr VI, Ni, Hg, Ag, Pb y Se , según NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
-

ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

en material geológico

- pH
- humedad
- capacidad de retención de agua
- concentración de materia y carbono orgánicos
- contenido de materia inorgánica (sólidos fijos)
- contenido de carbono inorgánico (carbonatos y bicarbonatos)
- porosidad
- permeabilidad
- tipo de suelo (tamaño de partículas)

en agua subterránea

- pH
 - demanda química de oxígeno
 - demanda bioquímica de oxígeno
 - alcalinidad
 - concentración de sólidos (totales, fijos y volátiles)
-

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Caracterización

- cuenta total de microorganismos
- cuenta de microorganismos heterótrofos
- cuenta de microorganismos degradadores

Pruebas de biofactibilidad (microcosmos)

- consumo de oxígeno
- generación de bióxido de carbono

Pruebas de viotratabilidad (mesocosmos)

- definición de los requerimientos nutricionales y de condiciones de experimentación
-

BIBLIOGRAFIA

- Alxander M. 1994. Biodegradation and Bioremediation. Academic Press, Inc. USA.
- Baker K.H. and Herson D.S., 1994. Bioremediation. McGraw Hill, Inc., New York.
- Carter M.R. 1993. Soil Sampling and Methods of Analysis. Lewis Publishers. Boca Raton, USA.
- Chapelle F.H., 1993. Groundwatwr Microbiology and Geochemistry, John Wilwy & Sons, Inc., New York.
- EPA. 1993. Cleaning Up the Nation's Waste Sites: Markets and Technology Trends. EPA 542-R-92-012. Environmental Protection Agency. Washington D.C.
- EPA. 1991. Understanding Bioremediation a Guidebook for Citizens. EPA/540/2-91/002. Environmental Protection Agency
- Gibson D.T. 1984. Microbial Degradation of Organic Compounds. Marcel Dekker, Inc. New York and Basel.
- King R.B., Long G.M. and Sheldon J.K., 1992. Practical environmental Bioremediation. Lewis Pub. Boca Raton, USA.
- Kitmann B.E., Valocchi A.J., Seagren E., Ray C., Wrenn B. and Gallagher J.R. 1992. Topical Report. A Criticl Review of in Situ Bioremediation. Gas Research Institute. Environment and Safety Research Departament.
- Kuznetsov S.I., Ivanov M.V. and Lyalikova N.N. Geological Microbiology. McGraw Hill Book Co. New York.
- Kuznetsov S.I., Ivanov M.v., Lyalikova N.N. Oppenheimer C.H. and Broneer P.T. 1963. Introduction to Geological Microbiology. McGraw Hill Book Company, Inc. New York.
- Leahy J.G. and Colwell R.R. 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. Microb. Rev. 54(3): 305-315.
- Paul E.A. and Clark F.E. 1989. Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, Inc. New York.
- Rittmann B.E., 1993. In situ bioremediation. When does it work?. National Academy Press, Washington D.C., USA.
- Russell D.L. 1992. Remediation Ma: al for Petroleum-Contaminated Sites. Technomic Publishing Company, Inc. USA.

Russell L. D. 1992. *Remediation Manual For Petroleum-Contaminated Sites*. Technomic Publishing Company. USA.

Kostecki T. P., Calabrese J. E. 1989. *Petroleum Contaminated Soils. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment*. Volume I. Lewis Publishers, INC. USA.

Kostecki T. P., Calabrese J. E. 1989. *Petroleum Contaminated Soils. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment. Analytical Methodologies. Regulatory Considerations*. Volume 3. Lewis Publishers, INC.USA.

Calabrese E. J. and Kostecki T. P. 1993. *Principles and Practices for Petroleum Contaminated Soils*. Lewis Publishers, INC.USA.

Wise D. L. and Trantolo D. J. 1994. *Remedation of Hazardous Waste Contaminated Soils*. Mercel Dekker, Inc. USA.

Calabrese E. J. and Kostecki T. P. 1991. *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater: Analysis Fate, Environmental and Public Healt Effects Remedation*. Volume I. Lewis Publishers, INC.USA.

Calabrese E. J. and Kostecki T. P. 1993. *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater: Sampling and Site Assessment Environmental Fate and Modeling Remedation Assessment and Design Risk Management*. Volume 3. Lewis Publishers, INC.USA.

US Department of Energy Office of Environmental Restoration and Waste Management. 1993. *Fy 1993 Program Summary Office of Research and Development Office of Demostration, Testing and Evaluation*. October. The National Technical Information Service. USA.

EPA. 1989. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Human Healt, Evaluation Manual (Part A)*. December. Volume 1. Department of Commerce. USA.

EPA. 1993. *Cleaning Up the Nation's Waste Sities: Markets and Technology Trends*. April. Environmental Protection Agency. USA.

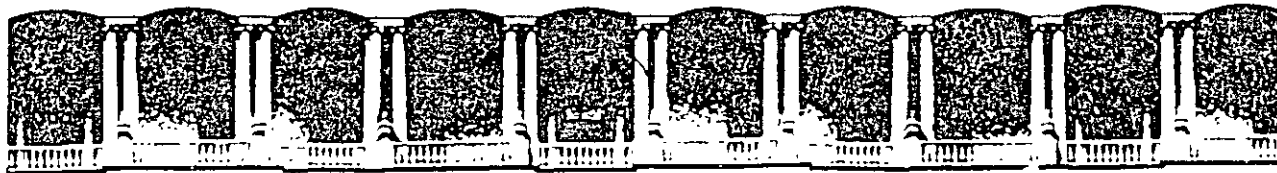
EPA. 1991. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Human Healt, Evaluation Manual (Part B, Developmnet of Risk-based Preliminary Remedation Goals)*. December. Environmental Protection Agency. USA.

EPA. 1991. *Guide for Conducting Treatibility Studies Under CERCLA: Aerobic Biodegradation Remedy Screening*. July. Environmental Protection Agency. USA.

EPA. 1991. *Understanding Bioremediation: A Guidebook for Citizens*. February. Environmental Protection Agency. USA.

EPA. 1991. *Risk Assessment Guidance for Superfund: Human Health, Evaluation Manual (Part C, Risk Evaluation of Remedial Alternatives)*. December. Environmental Protection Agency. USA.

US Department of Health and Human Services. 1992. *Evaluación de Riesgos en Salud por la Exposición a Residuos Peligrosos*. Public Health Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, USA.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano

Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.

DIRECCION GENERAL DE CONSTRUCCION Y OPERACION HIDRAULICA
SUBDIRECCION DE DESARROLLO
UNIDAD DEPARTAMENTAL DEL LABORATORIO CENTRAL DE CONTROL
RESULTADO DE ANALISIS FISICOS, QUIMICOS Y BACTERIOLOGICOS.

PARAMETROS	NORMAS mg/l				
TURBIEDAD	10 UTN				
pH	6.9-8.5				
COND. ELEC.	1250				
ALC. TOTAL	400				
CLORUROS	250				
COLOR	20 UPT/Co				
O.C.M.A.	3				
DUREZA TOTAL	300				
DUREZA DE Ca	114				
DUREZA DE Mg	186				
FLUORUROS	1.5				
SOL. TOT.	500				
N. DE NITRATO	5				
N. DE NITRITO	0.05				
N. AMONICAL	0.5				
N. PROTEICO	0.1				
SULFATOS	250				
S.A.A.M	0.5				
D.Q.O. TOTAL	4				
ALUMINIO	**				
ARSENICO	0.05				
CADMIO	0.005				
CALCIO	200				
CINC	5				
COBRE	1.5				
CROMO	0.05				
FIERRO	0.3				
MAGNESIO	125				
MANGANESO	0.15				
MERCURIO	0.001				
PLOMO	0.05				
POTASIO	12				
SELENIO	0.05				
SILICE	**				
SODIO	100				
CUENTA STD.	**				
COLIFORME TOTAL	2COL/100ml				
COLIFORME FECAL	0				

OBSERVACIONES

LOS RESULTADOS DE *Vibrio cholerae* FUERON NEGATIVOS.

NO SE DETECTARON COMPUESTOS VOLATILES NI EXTRACTABLES.

* PARAMETRO FUERA DE NORMA

** PARAMETROS NO SANCIONADOS POR S.S.A.

ción o información que proporcionen los interesados podrán dictar las medidas sanitarias para corregir, las irregularidades que se hubieren detectado, notificándolas al interesado y dándole un plazo adecuado para su realización, que podrá ser hasta por treinta días naturales, el cual podrá prorrogarse por un plazo igual a petición del interesado, siempre y cuando demuestre que está corrigiendo las anomalías.

ARTICULO 203.—En los casos en que el interesado acuda de propia iniciativa ante la autoridad sanitaria competente para cumplir con una obligación fuera de los términos señalados en este Reglamento, la autoridad calificará la infracción considerando dicha circunstancia como atenuante de la sanción que corresponda.

ARTICULO 204.—En los casos de reincidencia, se estará a lo dispuesto por el artículo 423 de la Ley.

ARTICULO 205.—Las infracciones no previstas en este Reglamento, serán sancionadas en los términos del Artículo 422 de la Ley.

CAPITULO XV

Procedimientos para aplicar sanciones y medidas de seguridad

ARTICULO 206.—El procedimiento para aplicar las medidas de seguridad y sanciones, que se deriven del ejercicio del control sanitario en las materias que comprende este Reglamento, se sujetará a lo que dispone el Capítulo III, del Título Décimo Octavo de la Ley.

CAPITULO XVI

Recurso de Inconformidad

ARTICULO 207.—Contra actos y resoluciones de la Secretaría, que con motivo de la aplicación de este Reglamento, den fin a una instancia o resuelvan un expediente, los interesados podrán interponer el recurso de inconformidad y su tramitación se ajustará al Capítulo IV del Título Décimo Octavo de la Ley.

ARTICULO 208.—El recurso de inconformidad podrá desecharse en los siguientes casos:

- I.—Cuando se presente fuera del término a que se refiere el artículo 439 de la Ley;
- II.—Cuando no se acredite, en términos de la Ley, la personalidad del promovente;
- III.—Si el recurrente, dentro del término señalado en el acuerdo respectivo, no cumple con la prevención emitida por la Secretaría, y
- IV.—Los demás que procedan conforme a las disposiciones legales aplicables en la Ley y el Código Federal de Procedimientos Civiles.

TITULO TERCERO

Agua y hielo para uso y consumo humano y para refrigerar

CAPITULO I

Agua

ARTICULO 209.—Se considerará agua potable o agua apta para consumo humano, toda aquella cuya ingestión no cause efectos nocivos a la salud.

Se considera que no causa efectos nocivos a la salud, cuando se encuentra libre de gérmenes patógenos y de sustancias tóxicas, y cumpla, además con los requisitos que se señalan en este Título y en la norma correspondiente.

ARTICULO 210.—Para considerar que el agua es potable, la investigación bacteriológica se realizará de acuerdo a las normas respectivas y deberá dar como resultado lo siguiente:

- I. El número de organismos coliformes totales, deberá ser, como máximo, de dos organismos en 100 ml, según las técnicas del número más probable (NMP) o de la de filtro de membrana, y
- II. No contendrá organismos fecales.

Aparte de lo anterior, se podrán realizar, a satisfacción de las autoridades sanitarias, todas las pruebas que se consideren necesarias, a fin de identificar otros riesgos a la salud.

ARTICULO 211.—Los requisitos organolépticos y físicos, se establecerán atendiendo a las siguientes características: aspecto, pH, sabor, olor, color, turbiedad del agua y, en su caso, los demás que señale la norma.

ARTICULO 212.—Se considera que el agua es potable, en lo relativo a las características organolépticas y físicas, cuando se encuentre dentro de los límites siguientes:

- I. Aspecto: Líquido;
- II. pH: De 6.9 a 8.5;
- III. Sabor: Característico;

IV. Olor: Característico;

V. Color: Hasta 20 unidades de la escala de platino cobalto, o su equivalente en otro método, y

VI. Turbiedad: Hasta 10 unidades de la escala de sílice, o su equivalente en otro método.

ARTICULO 213.—El contenido, expresado en miligramos por litro, de elementos, iones y sustancias, no excederá los límites permisibles que a continuación se expresan:

Alcalinidad Total expresada-Como CaCO_3	400.00
Aluminio.....	0.20
Arsénico.....	0.05
Bario.....	1.00
Cadmio.....	0.005
Cianuro expresado como-ión CN	0.05
Cobre.....	1.50
Cloro libre: En agua clorada.....	0.20
En agua sobre clorada.....	1.00
Cromo hexavalente.....	0.05
Dureza de Calcio expresada como- CaCO_3	300.00
Fenoles o compuestos fenólicos.....	0.001
Hierro.....	0.30
Fluoruros expresado como elemento.....	1.50
Magnesio.....	125.00
Manganeso.....	0.15
Mercurio.....	0.001
Nitratos expresados como nitrógeno.....	5.00
Nitritos expresados como nitrógeno.....	0.05
Nitrógeno proteico.....	0.10
Oxígeno consumido en medio ácido.....	3.00
Plomo.....	0.05
Selenio.....	0.05
Sulfatos, expresados como ión.....	250.00
Zinc.....	5.0
SAAM (Substancias Activas al Azul de Metileno).....	0.5
ECC (Extractables Carbón-Cloroformo).....	0.5
ECA (Extractables Carbón-Alcohol).....	1.5

Los demás que señale la norma correspondiente.

ARTICULO 214.—En materia de agua para consumo humano, se determinará en la norma:

I. El tratamiento a que deberá sujetarse en los sistemas públicos de abastecimiento, para asegurar su potabilidad;

II. El tipo, contenido y periodicidad de los análisis y exámenes necesarios para vigilar su potabilidad;

III. Las técnicas para la toma, conservación, transporte y manejo de muestras, así como los métodos para realizar las determinaciones necesarias para verificar su potabilidad;

IV. Los métodos de prueba de equipos y aparatos purificadores de tipo doméstico, y

V. Los demás aspectos, condiciones, requisitos y características que la Secretaría juzgue necesarios para que el agua pueda ser destinada para consumo humano.

ARTICULO 215.—Para los efectos de este Reglamento, se entiende por sistema de abastecimiento, el conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, líneas de conducción y distribución, que abastece de agua para consumo humano a una o más localidades o locales, sean de propiedad pública o privada.

ARTICULO 216.—La Secretaría establecerá los requisitos sanitarios que deban cumplir las construcciones, instalaciones y equipos de los sistemas de abastecimiento para proteger la salud de la población.

ARTICULO 217.—Los gobiernos de las entidades federativas otorgarán, de confor-

3.5 Características físicas y organolépticas.- Son aquellas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio.

3.6 Características químicas.- Son aquellas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.

3.7 Características radiactivas.- Son aquellas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.

3.8 Coagulación química.- Adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.

3.9 Contingencia.- Situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa y que pongan en riesgo la salud humana.

3.10 Desinfección.- Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.

3.11 Filtración.- Remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.

3.12 Floculación.- Aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos.

3.13 Intercambio iónico.- Proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.

3.14 Límite permisible.- Concentración o contenido máximos o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.

3.15 Neutralización.- Ajuste del pH, mediante la adición de agentes químicos básicos o ácidos al agua en su caso, con la finalidad de evitar incrustación o corrosión de materiales que puedan afectar su calidad.

3.16 Osmosis inversa.- Proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltas en el agua, el cual por medio de altas presiones fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniendo los iones y moléculas de mayor tamaño.

3.17 Oxidación.- Introducción de oxígeno en la molécula de ciertos compuestos para formar óxidos

3.18 Potabilización.- Conjunto de operaciones y procesos, físicos y/o químicos que se aplican al agua a fin de mejorar su calidad y hacerla apta para uso y consumo humano.

3.19 Precipitación.- Proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas sedimentables del agua, por efecto gravitacional.

3.20 Sistema de abastecimiento.- Conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución.

4 LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DE AGUA

4.1 Límites permisibles de características bacteriológicas

El contenido de organismos resultante del examen de una muestra de agua simple, deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 1.

Bajo situaciones de emergencia sanitaria, las autoridades competentes dictarán las medidas necesarias para identificar la presencia de otros agentes biológicos nocivos a la salud.

TABLA 1

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

4.2 LIMITES PERMISIBLES DE CARACTERISTICAS FISICAS Y ORGANOLEPTICAS

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2.

TABLA 2

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Color	15 unidades de color verdadero en la escala de platino cobalto.
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquéllos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

4.3 LIMITES PERMISIBLES DE CARACTERISTICAS QUIMICAS

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

TABLA 3

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN ⁻)	0.07
Cloro residual libre	0.5-1.00 (después de un tiempo de contacto mínimo de 30 min)
Cloruros (como Cl ⁻)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F ⁻)	1.50
Fosfatos (como PO ₄ ⁼)	0.10
Manganeso	0.10
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
Oxígeno consumido en medio ácido	3.00
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l Aldrin y dieldrin (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00

Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO ₄ =)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

4.4 LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS RADIATIVAS

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Becquerel por litro).

TABLA 4

RADIATIVIDAD ALFA GLOBAL	0.1
RADIATIVIDAD BETA GLOBAL	1.0

5 TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe fundamentarse en estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad cuando los contaminantes biológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua enlistados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4.

5.1 Contaminación biológica.

5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoarios y virus.- Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta.

5.2 Características físicas y organolépticas.

5.2.1 Color, olor, sabor y turbiedad.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, adsorción con carbón activado u oxidación.

5.3 Constituyentes químicos.

5.3.1 Arsénico.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.2 Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo.- Intercambio iónico, ósmosis inversa o adsorción con carbón activado.

5.3.3 Cloruros.- Intercambio iónico, ósmosis inversa, o evaporación.

5.3.4 Dureza.- Ablandamiento químico o intercambio iónico.

5.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos.- Adsorción con carbón activado u oxidación con ozono.

5.3.6 Hierro y/o manganeso.- Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.7 Fluoruros.- Adsorción con carbón activado, ósmosis inversa o coagulación química.

5.3.8 Materia orgánica.- Oxidación-filtración o adsorción con carbón activado.



HANDBOOK OF DRINKING WATER QUALITY

Standards
and
Controls

John De Zuane, P.E.
*Consulting Engineer and Former
Director of the Bureau of
Public Health Engineering
New York City Department of Health*

VNR VAN NOSTRAND REINHOLD
New York

CADMIUM

CHEMISTRY

A soft, blue-white metallic chemical element occurring as a sulfide or carbonate in zinc ores; symbol Cd; at. wt. 112.41; at. no. 48; sp. gr. 8.65; valence 2. As an element it is insoluble in water; in nature cadmium appears in zinc, copper and lead ores. Chlorides, nitrates, and sulfate of cadmium are soluble in water. (Cadmium will precipitate at high pH since carbonate and hydroxide are insoluble.)

Similar to zinc, it is used in electroplating, in many types of solders, batteries, television sets, and as a yellow pigment. It is also used in ceramics, photography, insecticides, and as an alloy with copper, lead, silver, aluminum, and nickel.

ENVIRONMENTAL EXPOSURE**Raw Water**

Since it is found in low concentrations in rocks, coal, and petroleum, it is found in ground water more than in surface water as a natural occurrence. Therefore, it may enter the water supply from mining, industrial operation, and leachates from landfill. Also, cadmium may enter the distribution system from corrosion of galvanized pipes. Raw water may contain normally less than 1 µg/L.

Air and Nutrition

Cigarettes contain high levels of cadmium (1 ppm). Urban air has higher levels of cadmium: reported levels in air from 0.0005–0.01 µg/mc according to Regulatory Agencies in the U.S. With 20 mc/day ventilation rate and a typical value of 0.01 µg/mc, a male adult respiratory intake is 0.2 µg/day. Exposure to cadmium dust should not exceed 0.15 mg/mc (15 min). Cadmium oxide fume exposure should not exceed 0.05 mg/mc.

Daily dietary intake of cadmium for an adult male averages between 10 and 50 µg, with grains, cereals, potatoes, meat, fish, and poultry as major cadmium suppliers. A tolerable weekly intake of 0.4–0.5 mg/individual was accepted by FAO*/WHO in 1972.

* United Nations Food and Agricultural Organization (Rome, Italy)

Water Surveys

The USEPA reported the results of federal surveys conducted between 1969 and 1980 of 707 ground water supplies and 117 surface water supplies as:

Ground water—27% above 2 µg/L (mean of positives: 3 µg/L).
Surface water—20% above 2 µg/L (mean of positives: 3.2 µg/L).

Soft water of low pH may register higher values when plumbing systems contain cadmium.

HEALTH EFFECTS

Human beings reported nausea and vomiting at 15 mg/L, with no adverse effects at 0.05 mg/L. Severe toxic, but not fatal, symptoms are reported at concentrations of 10–326 mg (NAS, Vol. 4, 1982). The death of a boy within 1.5 hr was reported after ingestion of 9 g of cadmium chloride. The kidneys are the critical target organ by ingestion (renal dysfunction, hypertension, and anemia).

A. HUMAN STUDY—One-Day assessment

Uncertainty factor = 10

0.043 mg/kg/day of NOAEL

Consumption: 1 liter per 10-kg child = 43 µg/L

2 liters per 70-kg adult = 150 µg/L

B. ANIMAL STUDY—Ten-Day assessments

Uncertainty factor = 1000 (+ additional factor of 10⁻¹)

0.08 mg/kg/day NOAEL (proteinuria in rats)

Consumption: 1 liter per 10-kg child = 8 µg/L

2 liters per 70-kg adult = 29 µg/L

C. AADI

Endpoint: renal dysfunction

Threshold: critical concentration of cadmium in the renal cortex

Range: 50–300 µg/g

LOAEL = 0.352 mg/day (in humans)

Provisional AADI = 0.018 mg/L [0.352 ÷ (10 × 2)]

Uncertainty factor = 10

Consumption: 2 liters of water per day

IARC = group 2B (limited evidence of carcinogenicity in humans, sufficient evidence for animals)

Exposure: inhalation

Ingestion: no evidence of carcinogenicity in animals or humans

EPA Regulation: based on chronic toxicity

STANDARDS

USPHS 1925-1942-1946	= not stated
USPHS 1962	= 0.01 mg/L
NIPDWR	= 0.01 mg/L
WHO Guidelines	= 0.005 mg/L
European Community	= 0.005 mg/L
RMLC (1985)	= 0.005 mg/L
NAS-SNARI	= 0.005 mg/L*
EPA Classification	= B1 = "Limited evidence in humans exposed to cadmium fumes, cancer in rats exposed to cadmium chloride aerosol, injection site tumors in animals given cadmium salts. However, regulating as "D" (see Barium) since there is inadequate evidence to conclude that the chemical is carcinogenic via ingestion." MLCG (1989) and MCL (1989) = 0.005 mg/L (USEPA)

ANALYSIS

Standard Methods introducing cadmium states that the cadmium concentrations of U.S. drinking water have been reported to vary between 0.4–60 µg/L, with a mean of 8.2 µg/L.

Reliable analytical methods have been determined and applied for cadmium in drinking water. Atomic Absorption Spectrometric Method is the preferred with the Dithizone Method considered acceptable when an AA Spectrometer is unavailable. The USEPA (1985) approved the same methods reported for barium.

REMOVAL/NOTES

There is no accepted, economically effective method for direct removal of cadmium at high concentration. Pilot plant study may be used attempting precipitation as carbonate and hydroxide at high pH. Every effort for locating the source of cadmium contamination and its partial or total elimination should be undertaken prior to consideration of a treatment solution.

* Based on 10 mg/L concentration of cadmium as the no-effect level in rats, resulting in 0.75 mg/kg, using a safety factor of 1,000, a 70-kg human consuming 2 L per day and assuming a 20% exposure from drinking water. SNARI is calculated as:

$$\frac{0.75 \text{ mg/L} \times 70 \text{ kg} \times 0.20}{1000 \times 2 \text{ L}} = 0.005 \text{ mg/L (NAS Vol. 4, 1982)}$$

The USEPA *Quality Criteria For Water* of 1976 recommends 10 µg/L for domestic water supply (based on health criteria). New York State limits to 0.3 mg/L cadmium content reaching all fresh waters with none in amounts that will be injurious to fish life or shellfish, or that would impair any designated uses of water.

Water treatment industry has confidence in cadmium removal by lime softening when concentrations are less than 0.5 mg/L. Less effective is the removal with ferric sulfate and alum clarification.

USEPA proposed in 1989 the following treatment processes as BAT for cadmium removal: ion exchange; reverse osmosis; coagulation/filtration; and lime softening.

CHROMIUM

CHEMISTRY

Defined as a grayish-white crystalline, very hard metallic chemical element with a high resistance to corrosion; used in chromium electroplating, in alloy steel (stainless steel), and in alloys containing nickel, copper, manganese, and other metals: symbol Cr; at. wt. 51.996; at. no. 24; sp. gr. 7.20; valence 2, 3, or 6. Principal ore is chromite—FeCr₂O₄. The most important compounds are the chromates of sodium and potassium (K₂CrO₄); the dichromates (K₂Cr₂O₇), and the potassium and ammonium chrome alums (KCr(SO₄)₂ × 12H₂O); and lead chromate.

chromous ion Cr ⁺⁺	metallic chromium
chromic ion Cr ⁺⁺⁺	} <i>trivalent</i> —more stable in general but not in chlorinated water
chromite ion CrO ₃ ⁻⁻⁻ or CrO ₇ ⁻⁻⁻	
chromite ion CrO ₄ ⁻⁻⁻	} <i>hexavalent</i> —with tendency to be quickly reduced by organic species
dichromate ion Cr ₂ O ₇ ⁻⁻⁻	

- chlorides, nitrate, and sulfate (trivalent chromic salts) are soluble in water;
- hydroxide and carbonates are quite insoluble; and
- sodium, potassium, and ammonium chromates (hexavalent chromates salts) are soluble; corresponding dichromates are quite insoluble

Chromium is also used as a corrosion inhibitor in the textile, glass, and photographic industries.

Benzene
C₆H₆

Contaminant

A volatile, flammable, colorless liquid with an ethereal odor. Basically a commercial solvent and a product by chemical processes related to petroleum refining, coal tar distillation, and coal processing.

Use

Benzene is normally used as a chemical intermediate in the manufacturing of styrene, cyclohexane, detergents, pesticides, synthetic rubber, aviation fuel, dye, paints, pharmaceuticals, gasoline and photographic chemicals.

Occurrence in the Environment

In gasoline benzene accounts for 0.8% by volume normally, with some higher concentration occasionally. In ambient air of gasoline stations, benzene varies between 0.001–0.008 mg/L. The highest concentration reported in drinking water was 10 µg/L. Summarizing reported values in drinking water, NAS—1980 (Vol. III) recorded from surveys conducted by the USEPA 0/111, 7/113 (0.4 µg/L), and 4/16 (0.55 µg/L) as positive samples for benzene per number of cities sampled.

Health Effects

According to USEPA (*Fed. Reg.* Vol. 49, No. 114, June 12, 1984, and Vol. 50, No. 219, Nov. 13, 1985, carcinogenic effects in humans have been documented: myelocytic anemia, thrombocytoopenia, and leukemia. Toxic effects include the central nervous system, hematological and immunological effects.

A NOAEL of 1 mg/kg was determined in animals, so using an uncertainty factor of 1,000, the ADI resulted in 0.025 mg/L (100% exposure from drinking water, 70-kg adult and 2 liters of water per day and 5/7 correction factor for weekly feeding

days). The IARC, NAS, and USEPA classify benzene as a contaminant with sufficient evidence of carcinogenicity in humans.

Standards

USEPA final MCL	= 0.005 mg/L (July 1987)
USEPA RMCL	= zero (Nov. 1985)
USEPA proposed MCL	= 0.005 mg/L (Nov. 1985)
WHO recommended 1984	= 0.010 mg/L as a guide (see Notes)
EEC 1980	= No Guideline

Analytical Methods

Benzene can be analyzed as other volatile aromatic and unsaturated organic compounds in water by purge-and-trap gas chromatography (photoionization detector). Also all regulated VOCs in the above mentioned regulations can be determined by purge-and-trap gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS).

Notes

Minimum detectable concentration of benzene in water is registered at 0.5 mg/L, with taste detectability at 4.5 mg/L. NAS—1977, Vol. 1—recognized only the possibility of carcinogenicity of benzene in water. Because all data were related to industrial exposure to benzene, more toxicological studies were recommended prior to the issuance of drinking water standards by USEPA.

The USEPA final rules for public notification include the following language to be used by public water supply system responsible managers:

"Benzene. The United States Environmental Protection Agency (EPA) sets drinking water standards and has determined that benzene is a health concern at certain levels of exposure. This chemical is used as a solvent and degreaser of metals. It is also a major component of gasoline. Drinking water contamination generally results from leaking underground gasoline and petroleum tanks or improper

waste disposal. This chemical has been associated with significantly increased risks of leukemia among certain industrial workers who were exposed to relatively large amounts of this chemical during their working careers. This chemical has also been shown to cause cancer in laboratory animals when the animals are exposed at high levels over their lifetimes. Chemicals that cause increased risk of cancer among exposed industrial workers and in laboratory animals also may increase the risk of cancer in humans who are exposed at lower levels over long periods of time. EPA has set the enforceable drinking water standard for benzene at 0.005 parts per million (ppm) to reduce the risk of cancer or other adverse health effects which have been observed in humans and laboratory animals. Drinking water which meets this standard is associated with little to none of this risk and should be considered safe."

The WHO (1984) issued a guideline value for benzene of 10 $\mu\text{g/L}$ under the organic constituents of health significance. This value was computed "from a conservative hypothetical mathematical model." The WHO recognized that drinking water concentrations of benzene did not exceed 1 $\mu\text{g/L}$ and all the studies involved inhalation exposure. Because benzene tends to effect the entire organism (systemic), WHO guidelines were set on data for leukemia applied to a linear multi-stage extrapolation model.

Total uptake of benzene in urban environments have been estimated in about 125 mg/year; food is considered to have contributed with 90 mg/year. Normal water concentration of less than 1 $\mu\text{g/L}$ would contribute to less than 1 mg/year ($1 \mu\text{g/L} \times 2 \text{ L/day} \times 365 \text{ days} = 0.730 \text{ mg/year}$).

**Vinyl Chloride
or Chloro Ethylene
or Monochloroethylene
 $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$**

Contaminant

Commercially synthesized by the halogenation of ethylene; slightly soluble in water (less than 0.11% by weight). CAS #75.01-4.

Use

The major use in the U.S. is in the production of polyvinyl chloride (PVC) resins for the building and construction industry (pipes, conduit, floor covering).

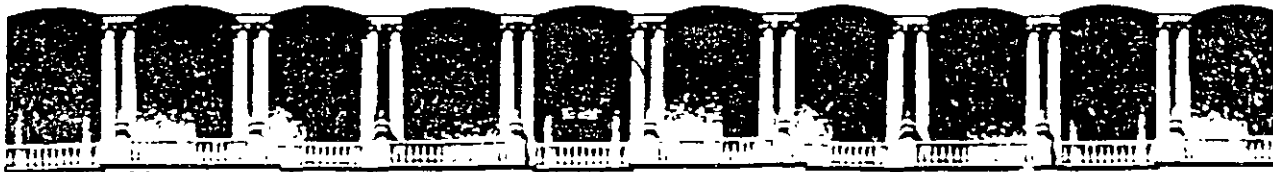
USEPA banned the sale of propellents and all the aerosols containing vinyl chloride monomer due to human and animal carcinogenicity. A distribution system constructed with PVC pipes showed concentrations of 1.4 $\mu\text{g/L}$.

Occurrence in the Environment

USEPA in 1975 tested the finished water of 10 cities registering a concentration of 5.6 $\mu\text{g/L}$ in Miami and 0.27 $\mu\text{g/L}$ in Philadelphia. States recorded 2 positives out of 646 samples collected with a max. = 17 ppb.

Health Effects

Industrial exposure to this contaminant in workers confirmed hepatic angiosarcoma when liquified vinyl chloride under pressure was handled, probably in concentrations from 1,000 to several thousand ppm (NAS—1977). Lesions of skin, bones, liver, spleen, and lungs were reported after chronic exposure. NAS—1983 (Vol. 5) recorded the no-observed-effect level at less than 1.7 mg/L. Mutagenicity and teratogenicity studies did not produce conclusive results (mutagen in-vitro), but carcinogenicity in animals was proved by inhalation (NAS—1977 and 1983).



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Contaminación de Hidrocarburos y Rellenos Sanitarios

**Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

GASOLINERA

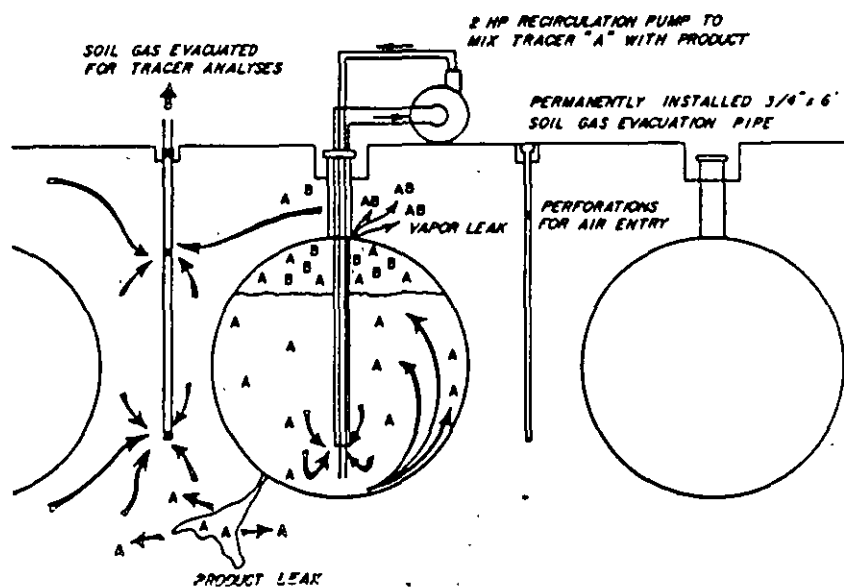
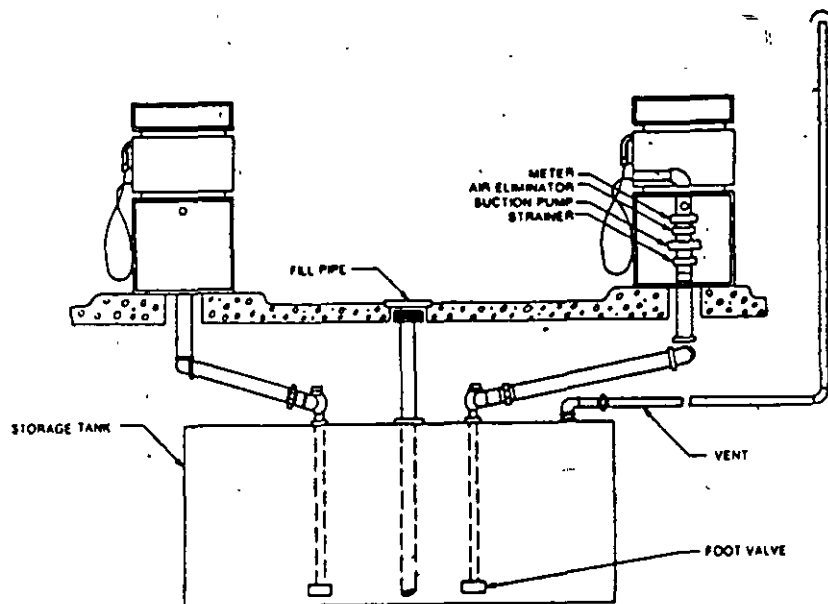
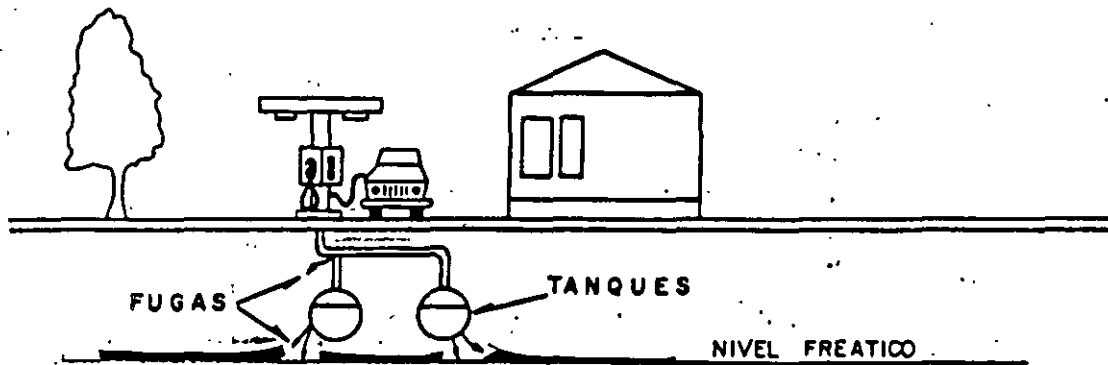


Figure 10. Dual-tracer leak detection method. (Source: Thomason, 1955: 12)

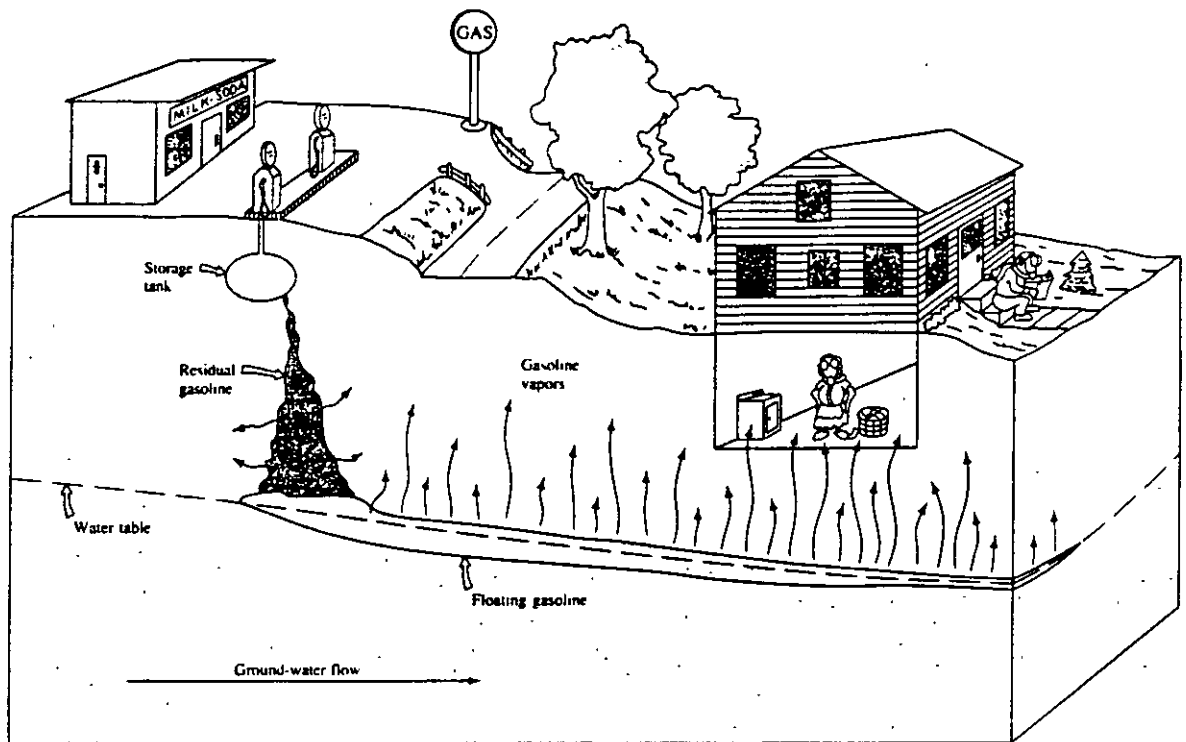


FIGURE 9.25 Release of organic vapors in vadose zone from residual saturation and floating product.

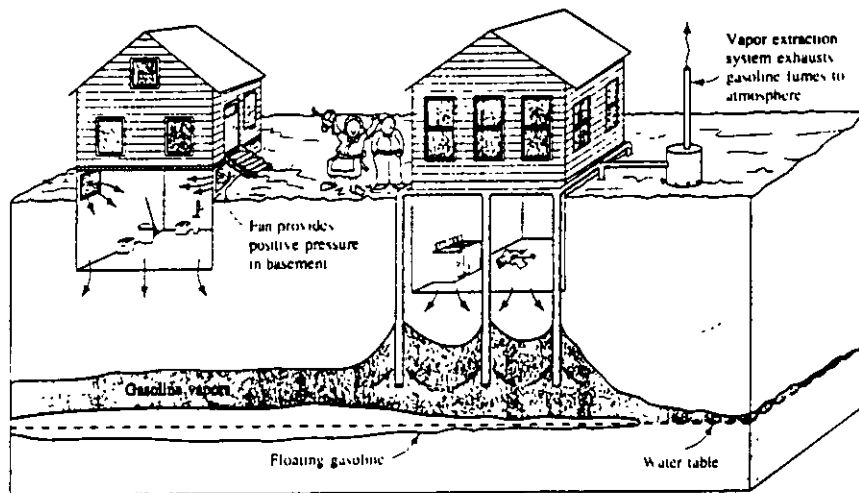
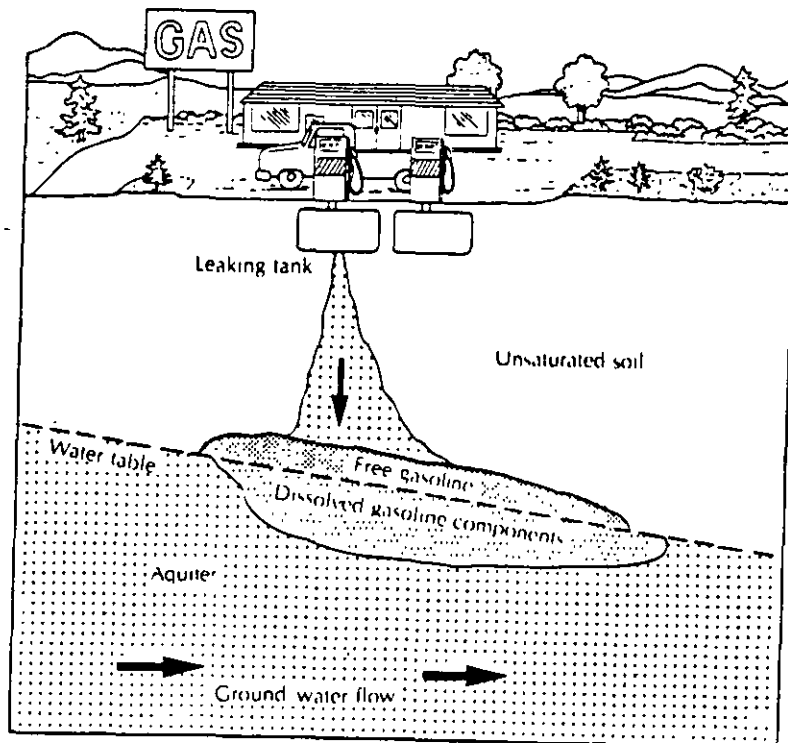
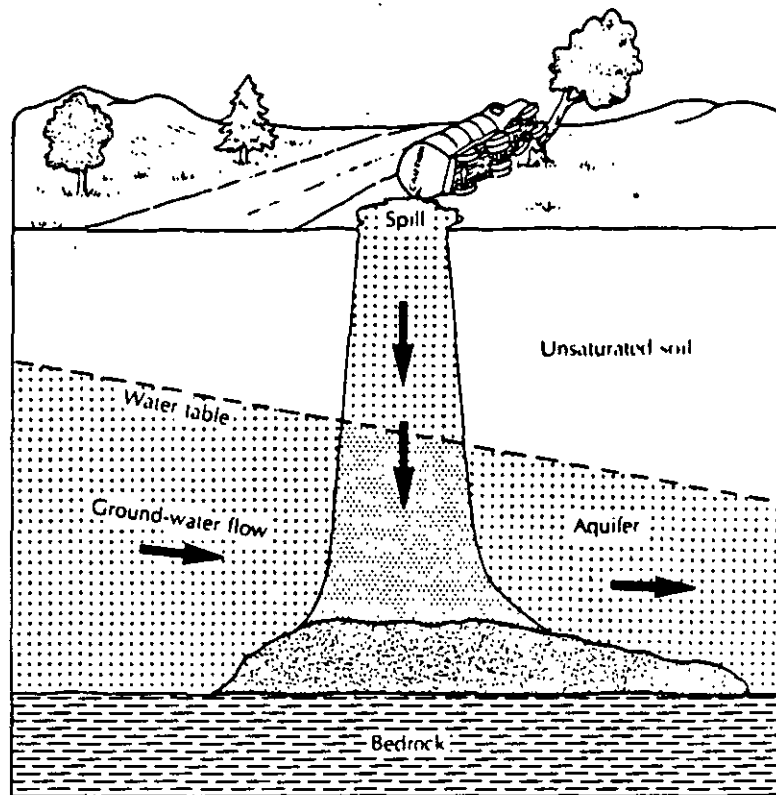
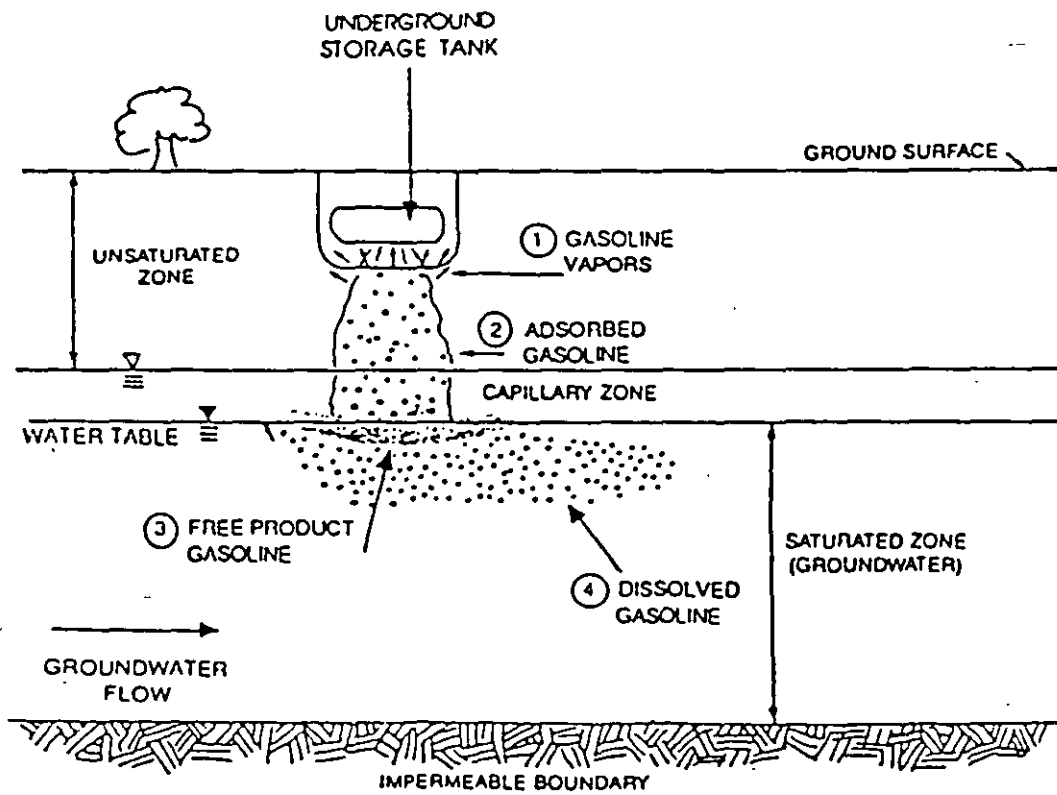
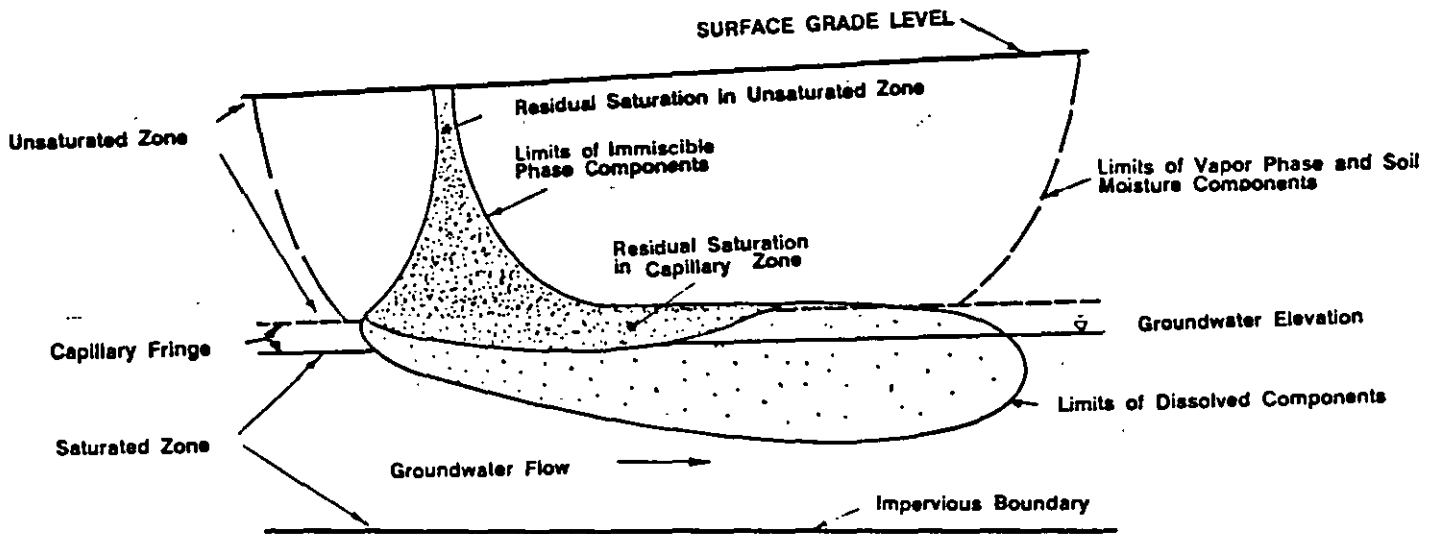


FIGURE 9.26 Control of organic vapors in the vadose zone. Source: Modified from M. J. O'Connor, J. G. Agar and R. D. King, *Proceedings of Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration*, 1984, pp. 519-33. National Water Well Association. Used with permission.





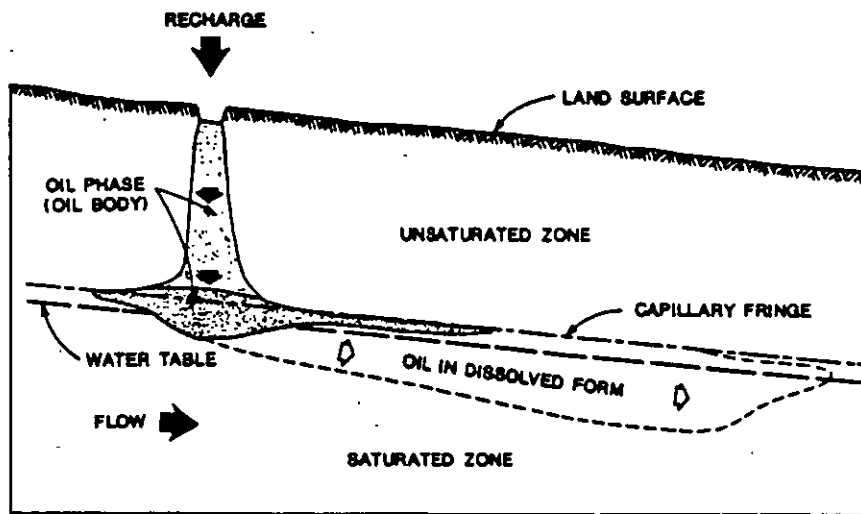


Figure 3-35. Example of multiphase flow in the subsurface (adapted from Schwille, 1975).

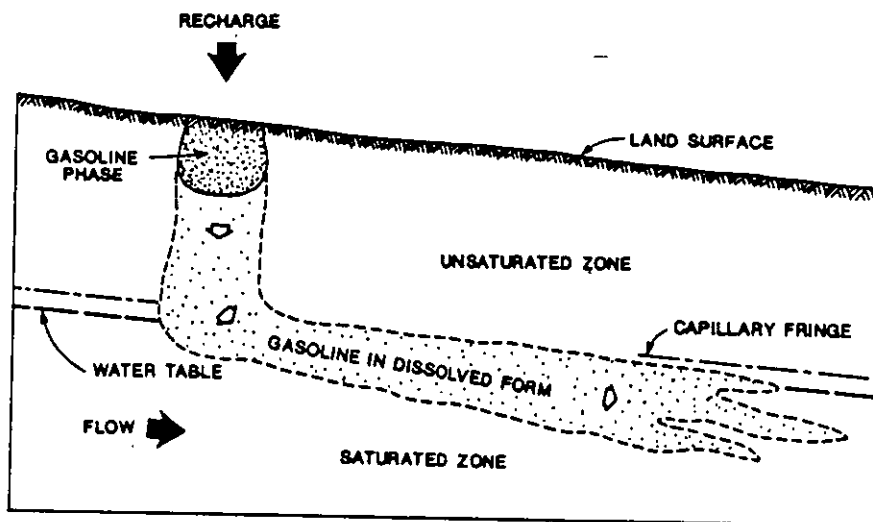


Figure 3-34. Movement of gasoline in the subsurface (adapted from Schwille, 1975).

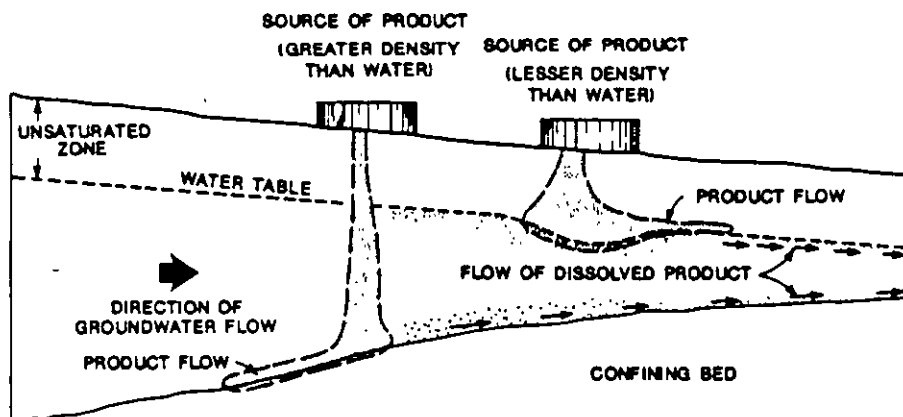
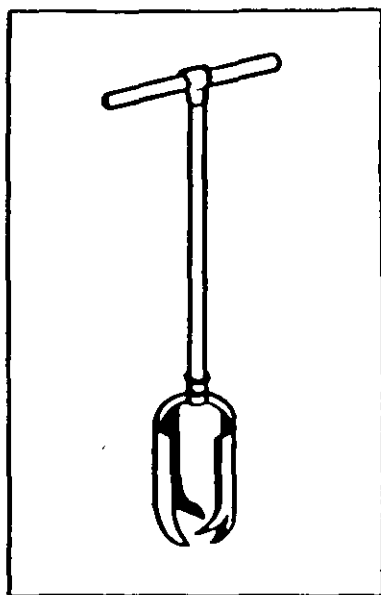
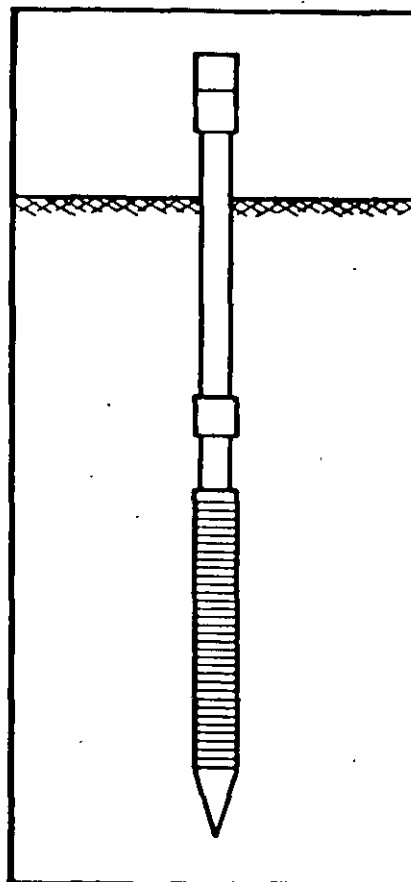


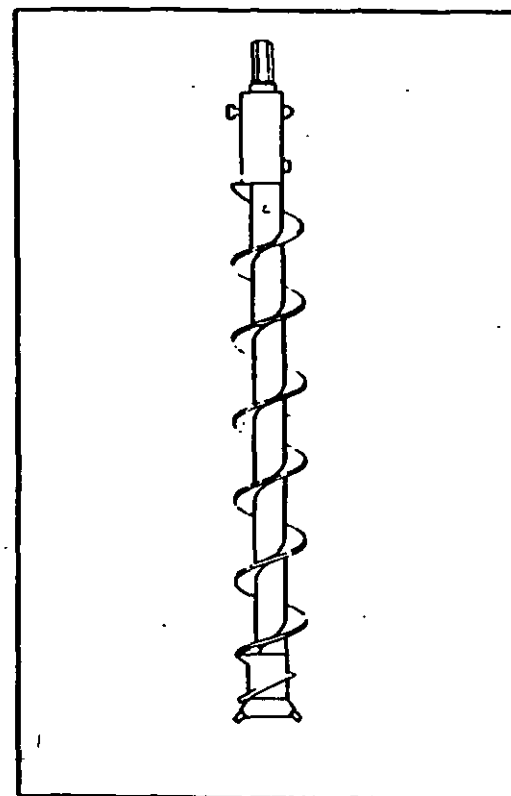
Figure 3-36. Example of the subsurface movement of fluids with densities greater than, and less than, that of water.



MUESTREADOR MANUAL



MUESTREADOR MEDIANTE
INCADO DE TUBERÍA



MUESTREADOR DE MAQUINA ROTARIA

FUENTE: NWWA, 1969, HANDBOOK OF SEGGESED...

FIGURA 3

8

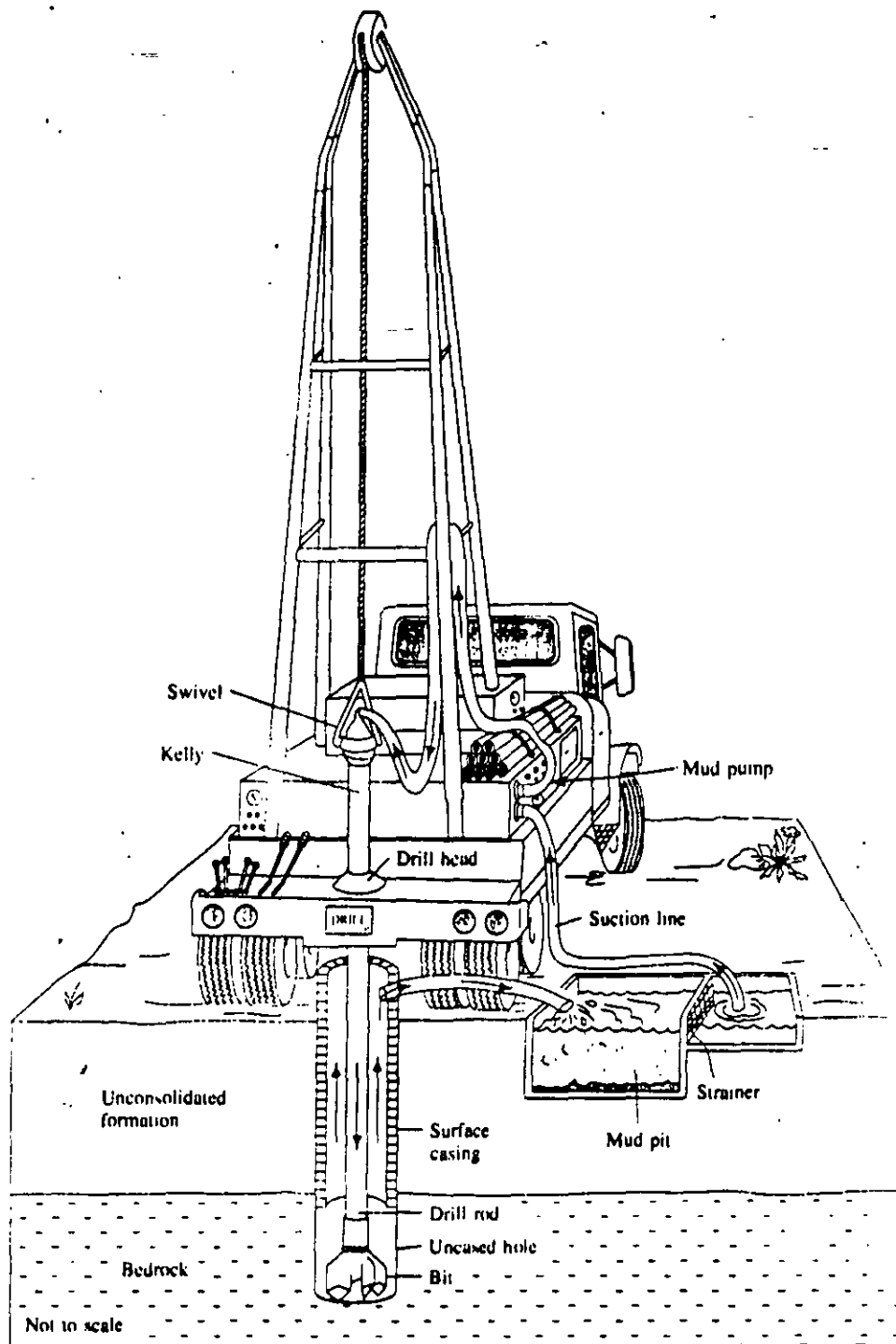


FIGURE 8.11 Circulation of drilling fluid in mud-rotary drilling.

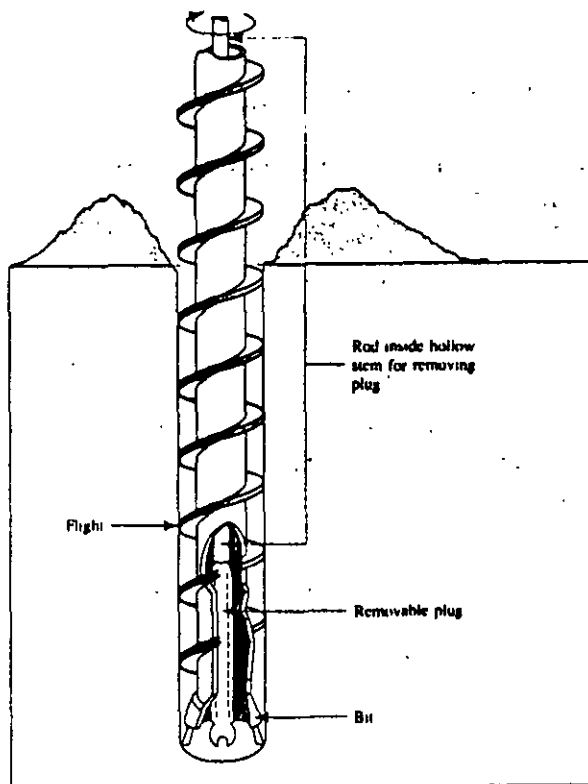


FIGURE 8.9 Hollow-stem auger drill rod and bit. Source: M. L. Scott et al. *Manual of Ground Water Sampling Procedures*, 1981, National Water Well Association. Used with permission.

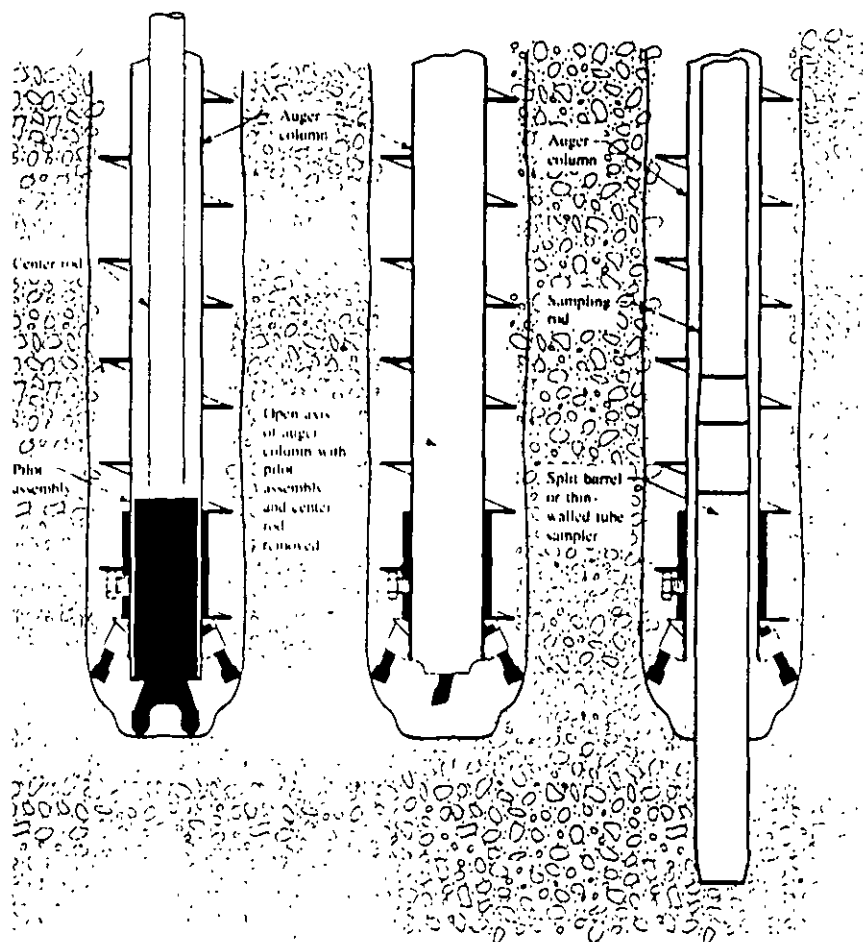


FIGURE 8.13 Sequential steps for the collection of a core sample through a hollow-stem auger. Source: Glen Hackett, *Ground Water Monitoring Review* 7, no. 4 (1987): 51-62. Used with permission. Copyright © 1987 Water Well Journal Publishing Co.

PERFORACION

PERFORACION

MEDICION

TERMINADO
PARA ME-
DICION PE-
RIODICA.

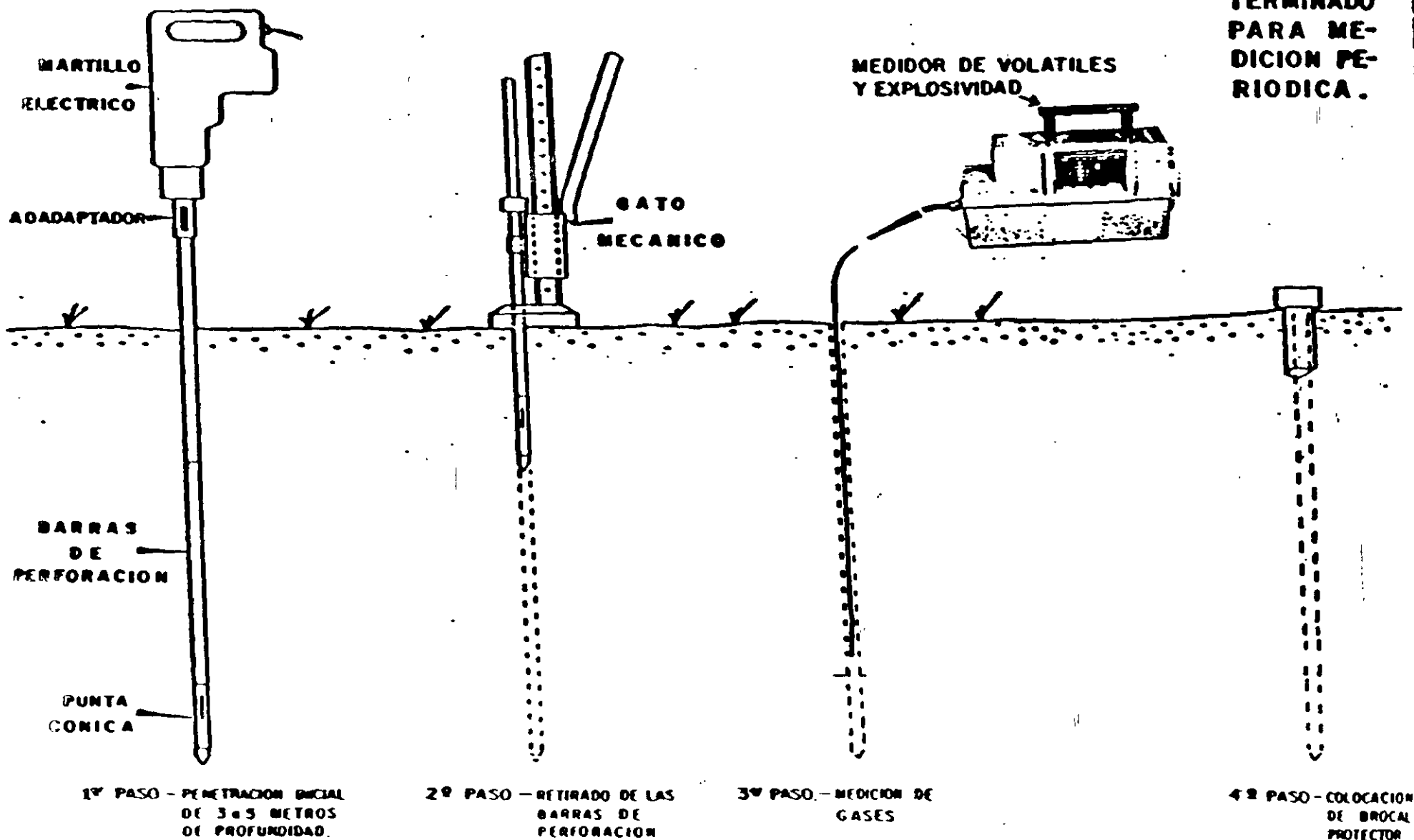

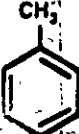

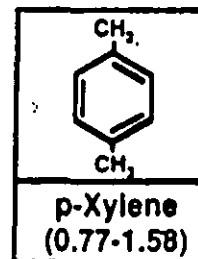
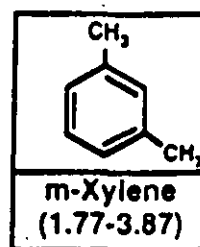
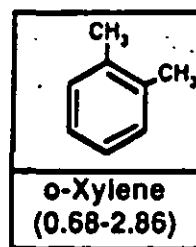


FIGURA 3.1 INSTALACION DE PUNTOS DE SERVICIO PARA DETECCION DE VOLATILES

	Benzene (0.12-3.50)
	Toluene (2.73-21.80)
	Ethyl Benzene (0.36-2.86)



Lesser y Asoc. S.A. de C.V.

**B
T
E
X**

BIOTREATMENT SYSTEM SCHEMATIC

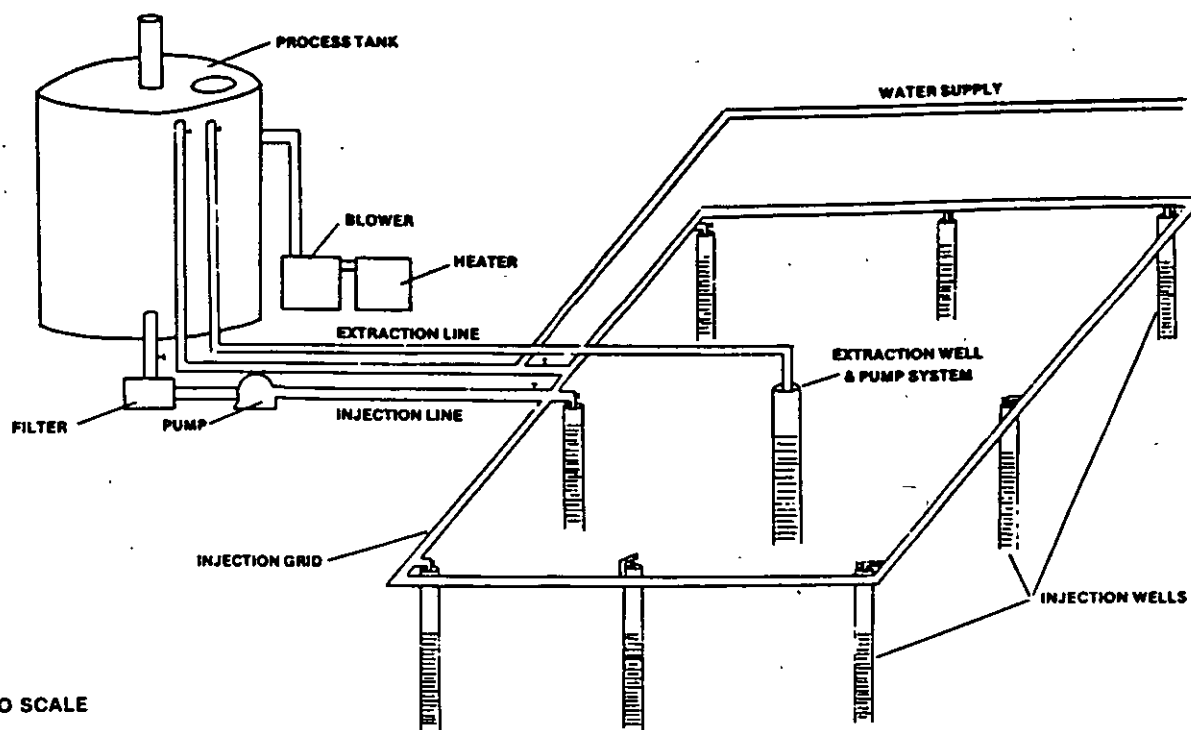
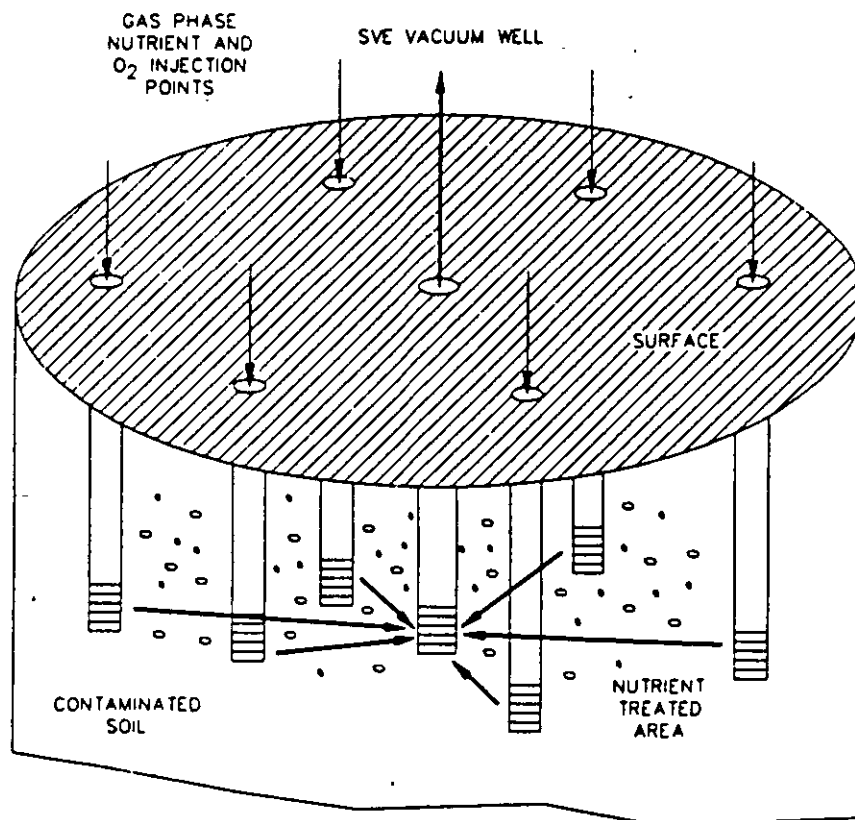
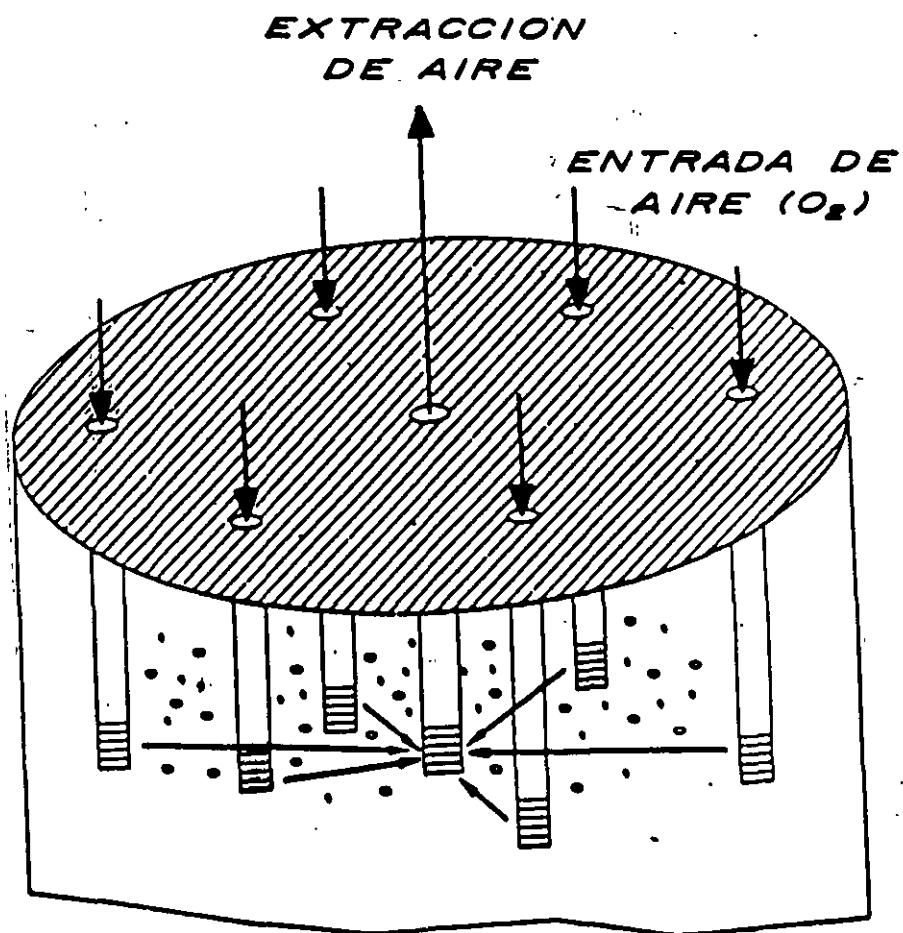


Figure 1. Continuous recirculation.



SANEAMIENTO

EXTRACCION DE VOLATILES

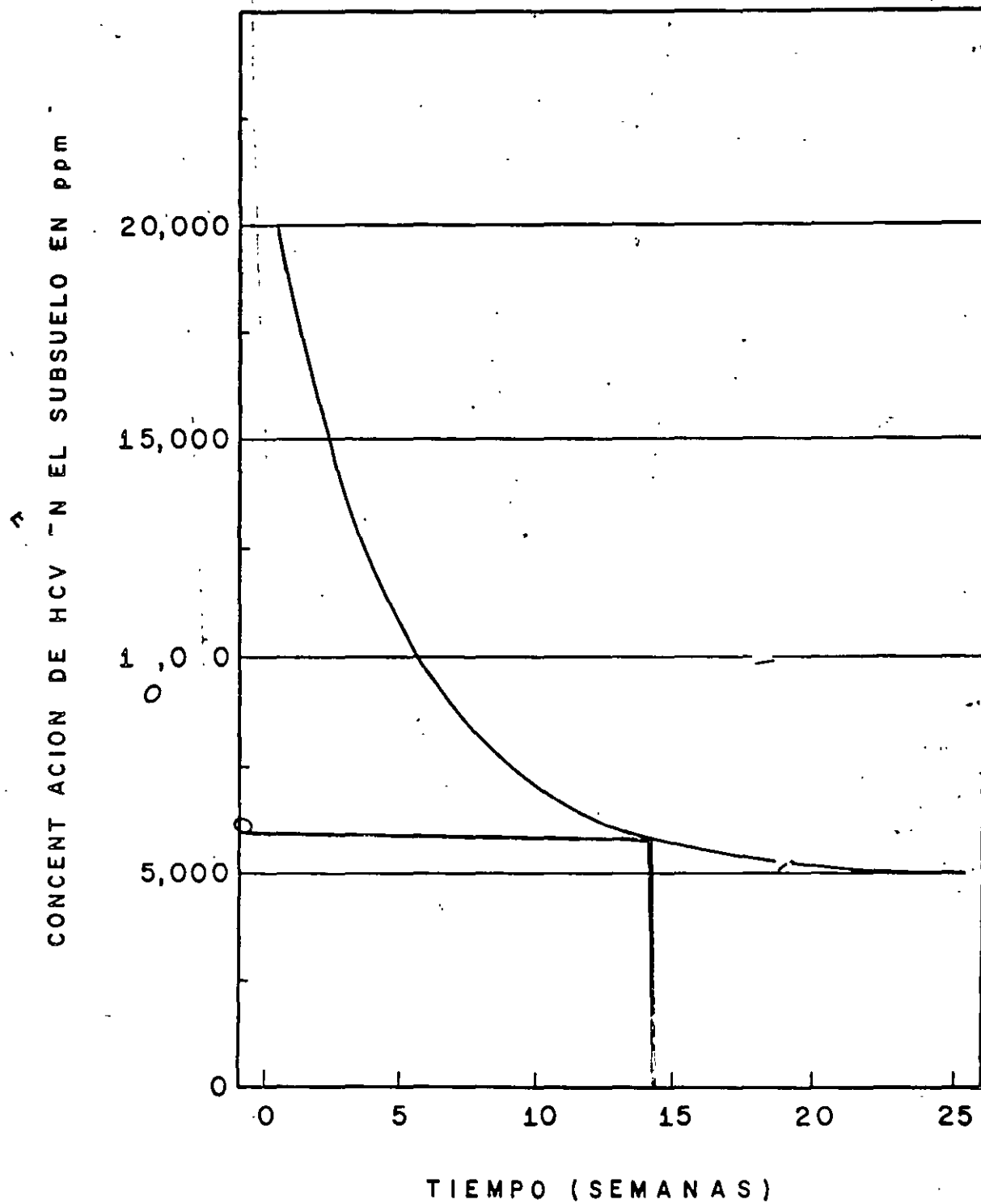


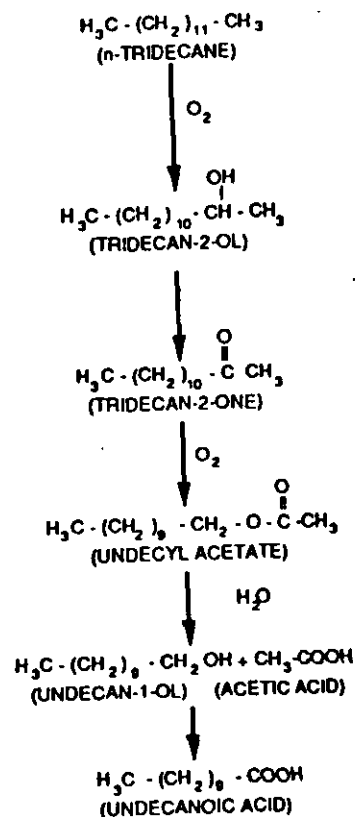
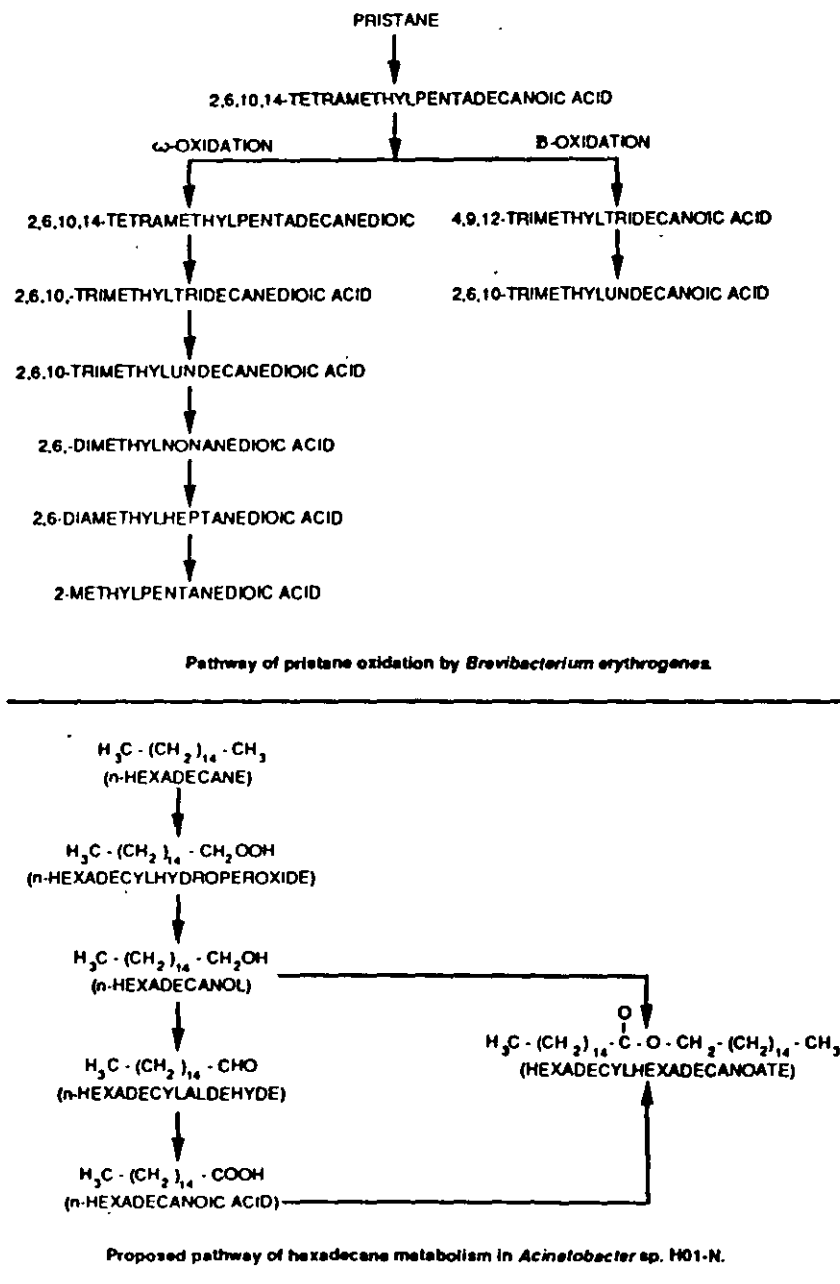
SE PRODUCE BIODEGRADACION
DEL 50 % DE LOS VOLATILES,
SE EXTRAHE EL 50 % RESTANTE



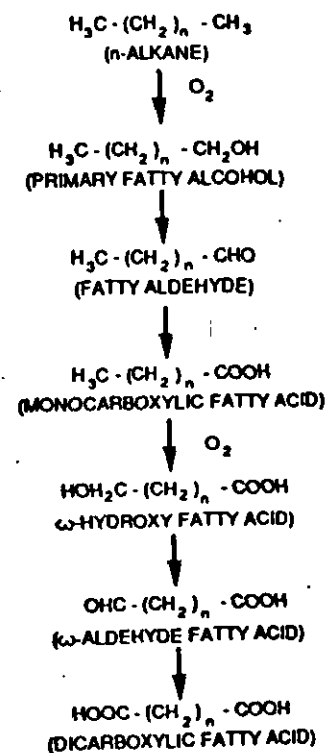
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.

RELACION TIPICA DE VOLUMEN DE REMOSION DE HCV RESPECTO AL TIEMPO





Pathway of Subterminal Alkane Oxidation in *Pseudomonas*.



Pathway of Di-terminal Alkane Oxidation

Figure 11-4. (continued).

$$\mu = \frac{\mu_{max} C}{(K_s + C)} \quad (11.3)$$

where $\mu = dB/dt (1/B) =$ specific growth rate (day^{-1})

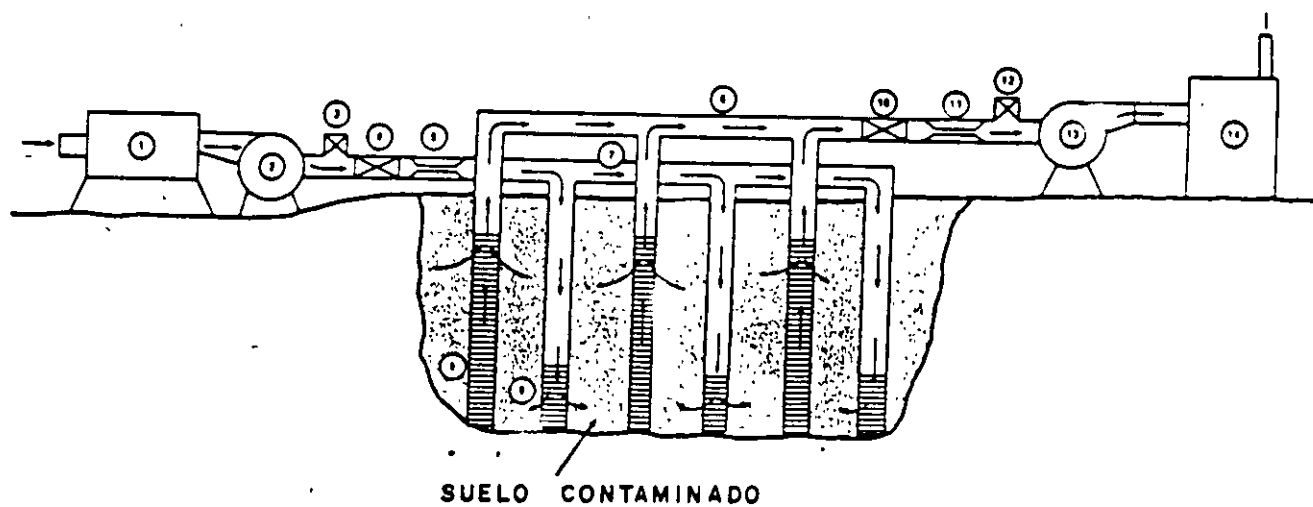
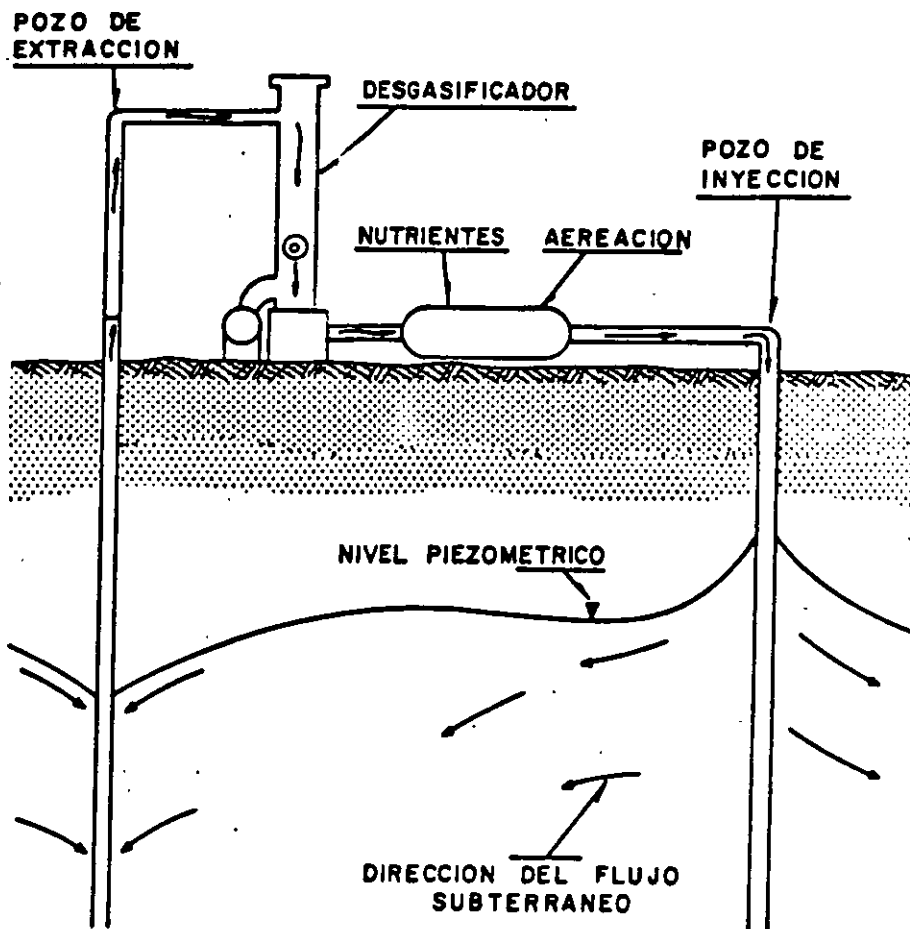
$B =$ microbial population density ($\frac{\text{bacteria cell count}}{\text{g soil}}$)

$\mu_{max} =$ maximum specific growth rate (day^{-1})

$C =$ substrate concentration ($\frac{\text{g hydrocarbon}}{\text{g soil}}$)

Figure 11-4. Pathways of biodegradation for several hydrocarbons. Source: Adapted from Singer and Finnerty, 1984.

16





COLONIA MODERNA
GUADALAJARA, JAL.
MAYO-93

COMISION NACIONAL
DEL AGUA

CONTAMINACION POR HIDROCARBUROS
EN EL SUBSUELO

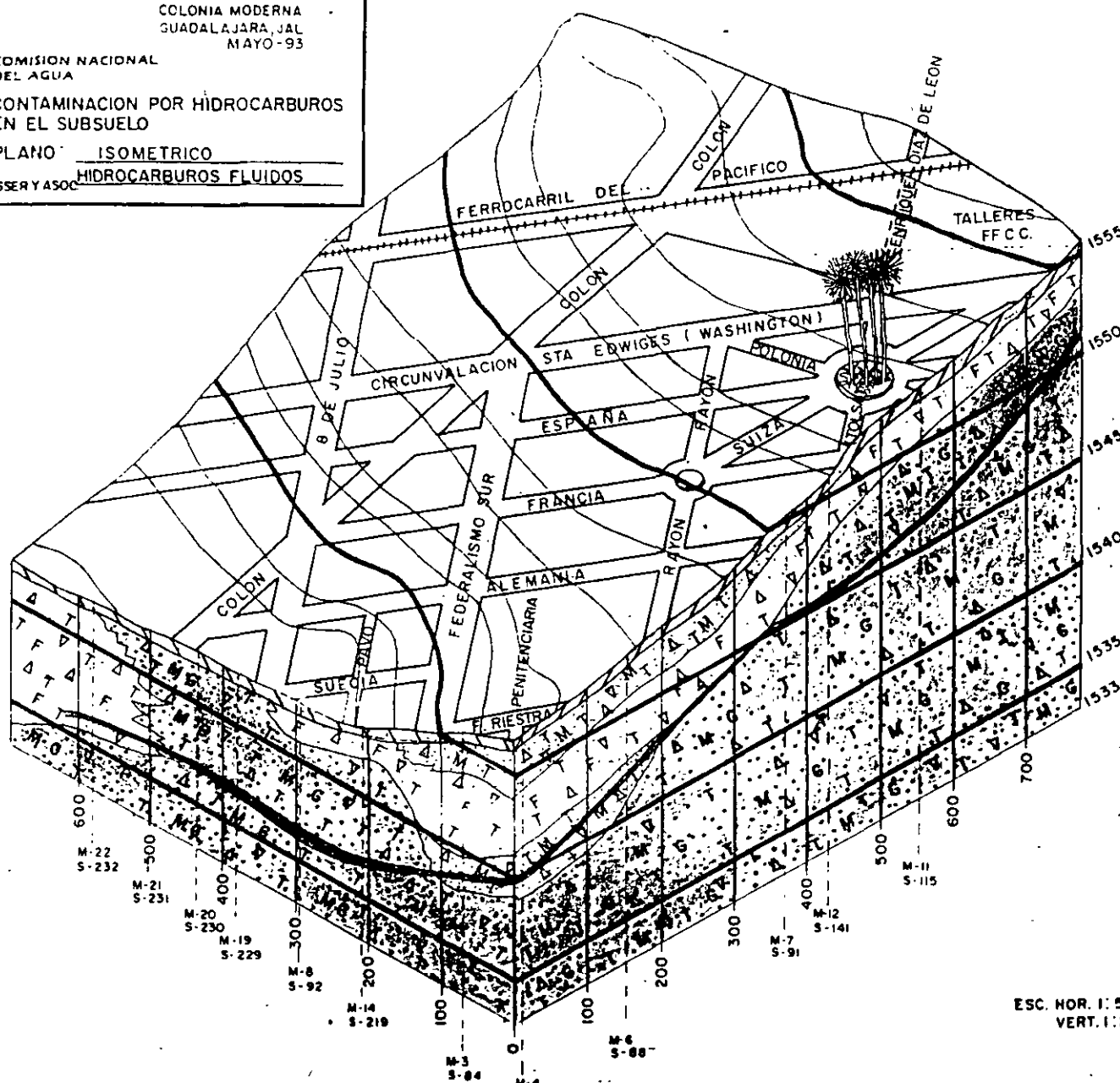
PLANO ISOMETRICO

FUENTE LESSER Y ASOC. HIDROCARBUROS FLUIDOS

EXPLICACION

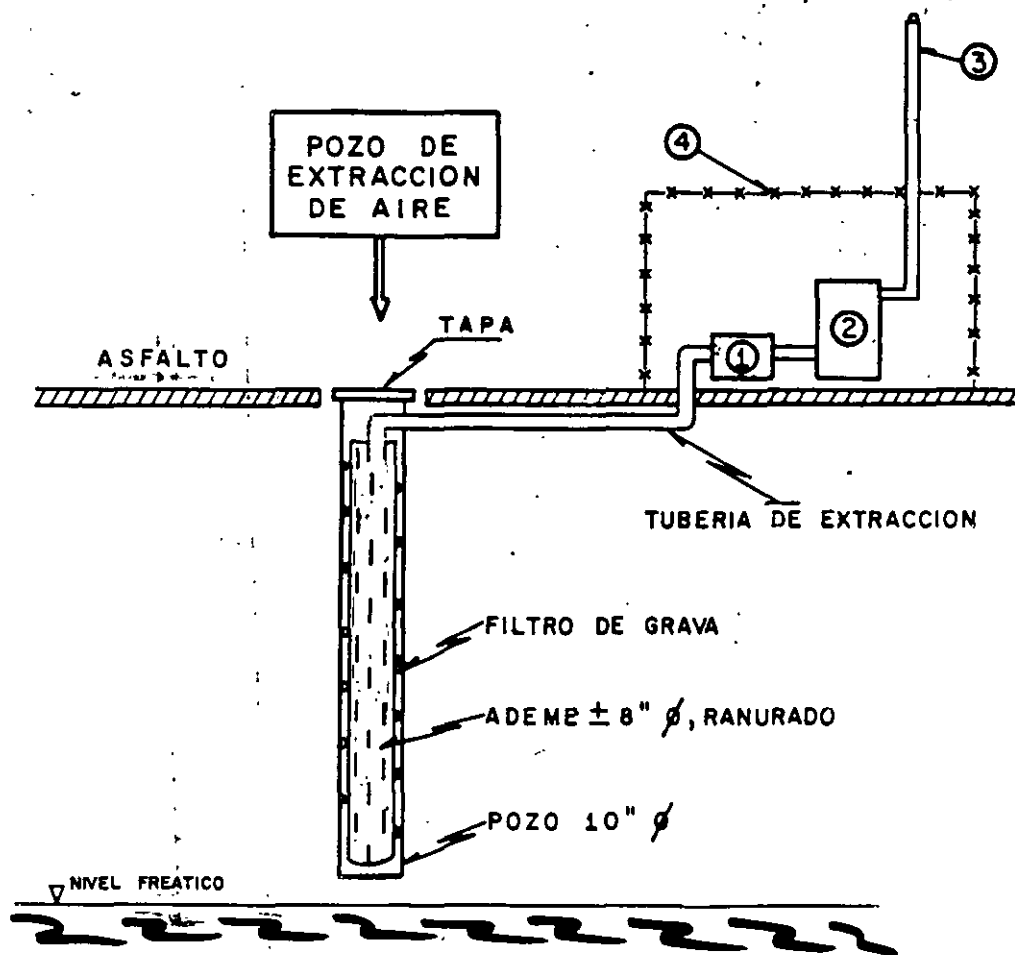
M-4 N° DE MUESTRA
S-8 N° DE POZO
N.F. NIVEL FREATICO

	CARPETA ASFAL
	ARCILLA
	ARENA PUMITIC, DE GRANO MEDI
	ARENA PUMITIC, DE GRANO FINO
	ARENA PUMITIC DE GRANO GRUE
	TOBA PUMITICA SEMICOMPACTA
	HIDROCARBURC FLUIDOS



ESC. HOR. 1:5,000
VERT. 1:200

MÉTODO DE EXTRACCION DE VOLATILES DEL SUBSUELO



- ① EXTRACCION DE AIRE
- ② TRATAMIENTO DEL VOLATIL
- ③ CHIMENEA
- ④ CERCADO (MALLA O SIMILAR)

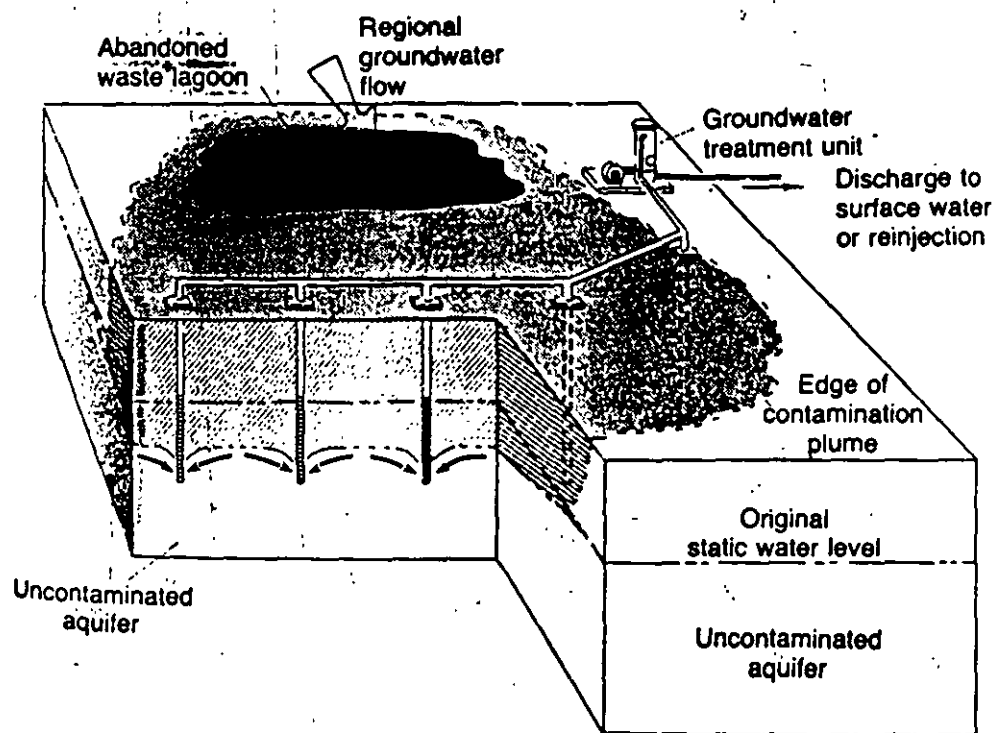


Fig. 19.1 Typical well recovery system.

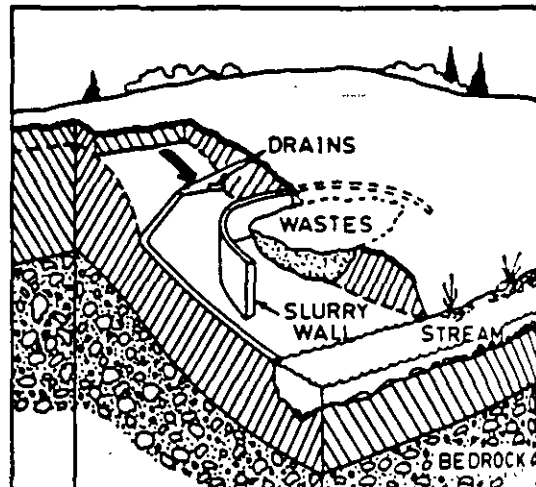
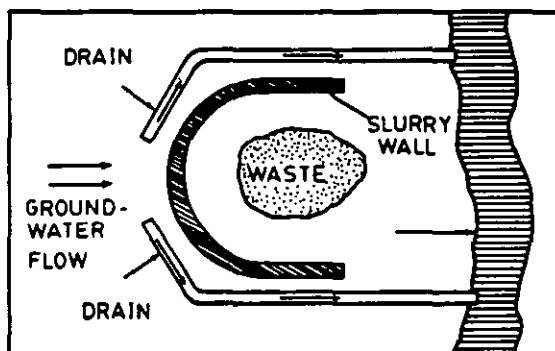


Figure 9-6. Combination of drains and slurry wall used to prevent leaching of contaminants into groundwater and a surface stream.

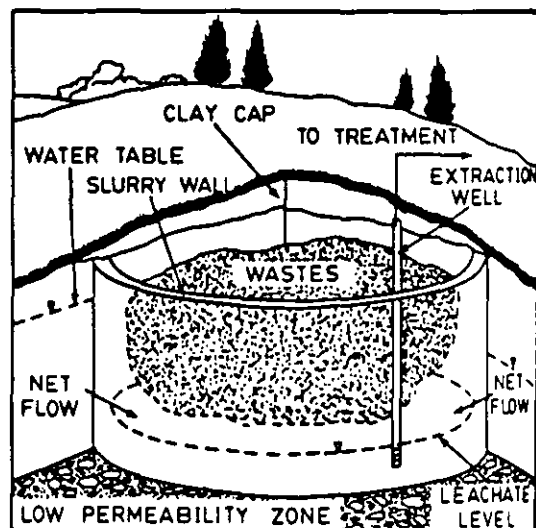
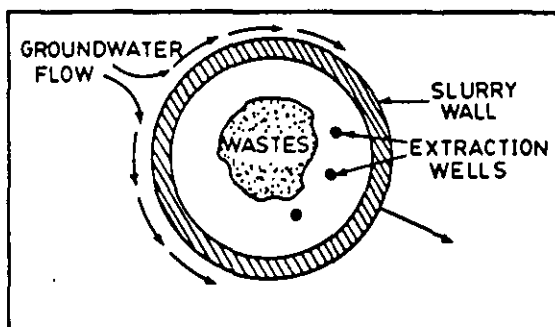


Figure 9-7. Circular slurry wall and groundwater extraction combined to prevent groundwater contamination.

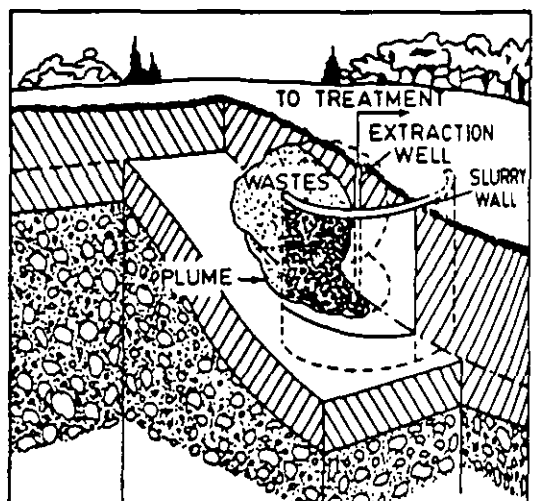
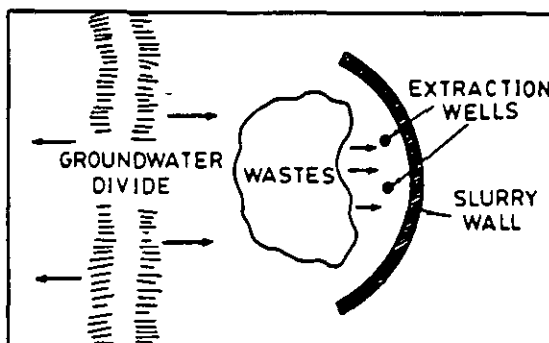


Figure 9-8. Slurry wall and extraction wells used to collect leachate.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Evaluación de Vulnerabilidad de acuíferos y riesgo ambiental

**M. en C. José Alfredo Ramos Leal
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS Y RIESGO AMBIENTAL

M. en C. José Alfredo Ramos Leal

RIESGO DE CONTAMINACIÓN.- Se puede definir como la probabilidad de que las aguas subterráneas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua de consumo humano.

El propósito de una evaluación de riesgo es determinar cuales fuentes potenciales de riesgo representan mayor potencial de causar daños a la salud humana y/o al ambiente y que acciones de planeación se deben tomar.

El hecho de que el riesgo pueda convertirse en una seria amenaza a la calidad de abastecimiento de agua subterránea ya desarrollada o por desarrollar, dependerá de la movilidad de los contaminantes dentro del acuífero.

MEDICIÓN DEL RIESGO.- La idea de una evaluación de riesgo es obtener valores cuantitativos. En la evaluación de riesgo se toman en cuenta al menos dos componentes desde el punto de vista de manejo de riesgo ambiental: a) la exposición y b) la cantidad de impacto. Para el caso de la exposición se toma muy en cuenta el tiempo sobre el cual un blanco se pone en contacto con la sustancia contaminante. Esto implica que si no hay contacto no hay riesgo. La cantidad de impacto se relaciona con la clase, tipo y severidad que resulte en una probable exposición.

VULNERABILIDAD DE UN ACUÍFERO.- Este término es usado para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante, debido al impacto humano y/o natural.

La vulnerabilidad del acuífero depende de la inaccesibilidad de la zona saturada y de la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada del acuífero como resultado de su retención física y reacción química con contaminantes. Estos dos componentes de la vulnerabilidad del acuífero interactúan además con factores relacionados con la carga contaminante en el subsuelo; a) modo de disposición del contaminante en el subsuelo y en particular de la cantidad de carga hidráulica asociada y b) la clase de contaminante en términos de su movilidad y persistencia.

La mejor manera de presentar la vulnerabilidad del acuífero es en forma de mapas que muestren como varía espacialmente los diferentes grados de vulnerabilidad.

Los mapas de vulnerabilidad de agua subterránea involucran la delineación de áreas susceptibles de variar a la contaminación del agua subterránea, basado en la interacción de características que promueven o inhiben el movimiento de contaminantes en el subsuelo.

METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD Y RIESGO DE CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS.

Se han desarrollado varios métodos para el mapeo de vulnerabilidad y evaluación de riesgo ambiental. Estos pueden ser de dos tipos:

- 1) Sistemas que utilizan tasas numéricas (AVI, DRASTIC y ERIS).
- 2) Sistemas no numéricas, los cuales pueden usar números para ordenar el incremento de vulnerabilidad o clasificar como altamente vulnerables o menos vulnerables.

Una diferencia entre los métodos de vulnerabilidad y los de riesgo ambiental es la presencia o ausencia de la fuente contaminante. Desde este punto de vista algunos métodos de vulnerabilidad (AVI, DRASTIC, son inherentes de que existe la fuente, otros en cambio toman en cuenta la presencia de la fuente contaminante (SAFE y ERIS), cabe mencionar que algunos de estos métodos (ERIS) fueron desarrollados para obtener índices de impacto a los diferentes partes del medio ambiental (agua superficial, agua subterránea, aire, contacto directo con humanos f fuego y explosión).

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS (AVI)

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas sobre el nivel del agua.

Es un índice para cuantificar la vulnerabilidad de un acuífero (Van Stempvoort et al. 1992), por medio de la resistencia hidráulica c al flujo vertical del agua al pasar por los diferentes materiales sobre el acuífero.

La resistencia hidráulica c se calcula por la expresión:

$$c = \sum b_i / K_i \text{ para las capas } 1, 2, 3, \dots, i$$

donde b_i es el espesor de cada capa sobre el acuífero, K_i es la conductividad hidráulica de cada capa, c es la resistencia hidráulica (inverso de la conductividad hidráulica, tiene dimensiones de tiempo) indica el tiempo aproximado de flujo por unidad de gradiente de carga que atraviesa el agua hacia abajo al pasar por varias capas de sedimentos, por encima del acuífero. A mayor resistencia hidráulica menor vulnerabilidad.

Para construir los mapas de vulnerabilidad se utiliza el log c para cada pozo y se interpolan los valores. Esto da como resultado un zoneamiento de resistencias hidráulicas, las cuales están directamente relacionadas con vulnerabilidad.

ÍNDICE DRASTIC PARA AGRICULTURA

El DRASTIC es un esquema de clasificación numérica ha sido desarrollada para la evaluar la contaminación potencial del agua subterránea para un sitio dado. Este esquema de clasificación se basa en 7 factores escogido por un gran numero de científicos geohidrologos en toda la unión americana. También los científicos han establecido pesos de relativa importancia y puntuación de escala de clasificación para cada factor cuando el método es aplicado a fuentes de contaminación no puntuales para pesticidas o fertilizantes. Las siglas de DRASTIC se deriva de los 7 factores del esquema de clasificación:

D = profundidad al agua subterránea, R = rapidez de descarga, A = medio acuifero, S = tipo de suelo
T = topografía (pendiente), I = impacto de la zona vadosa, C = conductividad hidráulica del acuifero

La determinación del índice de agricultura DRASTIC involucra la multiplicación de cada uno de los factores por la puntuación del rango y se suma el total. Valores altos de la suma representan fuertes potenciales de contaminación del agua subterránea o una gran vulnerabilidad del acuifero. Para un área dada será evaluada, cada factor es relacionado a una escala 1 a 10 que indica el relativa contaminación potencial de un factor dado para esa área. Una vez que todos los factores han sido asignados a un rango, cada rango es multiplicado por el peso asignado y el numero resultante es sumado como se indica a continuación.

$DrDw + RrRw + ArAw + SrSw + TrTw + Irlw + CrCw = \text{Contaminación potencial}$

donde r = rango para cada área a ser evaluada

w = peso de importancia para los parámetros

En la tabla 1 se presenta la escala de rangos para factores de la profundidad al agua subterránea; este peso de importancia en agricultura DRASTIC es 5 (Aller et al., 1985).

La tabla 2 contiene la clase de información para el factor de recarga neta y su índice de agricultura DRASTIC es 4 (Aller et al. op. cit.). La tabla 3 muestra los rangos para la evaluación de un factor del medio acuifero. El peso de importancia para este factor en el índice de agricultura DRASTIC es de 3 puntos.

La información para la evaluación del factor de tipo de suelo se incluye en la tabla 4, con su peso de importancia en el DRASTIC de 5 puntos (Aller et al. op. cit.). La tabla 5 muestra información sobre el factor de topografía y su peso de importancia para este factor en el DRASTIC es de 3 puntos (Aller et al. op. cit.). La aproximación para la evaluación del impacto de la zona vadosa en el DRASTIC se presenta en la tabla 6 con su peso de importancia para este factor será de 5 puntos (Aller et al. op. cit.). Finalmente la tabla 7 resume información pertinente para la conductividad hidráulica del factor acuifero, con su peso de importancia DRASTIC, el cual será de 3 puntos (Aller et al. op. cit.).

Parámetro	Rango (ft)	(m)	Clase
Profundidad del Agua Dw = 5	0 - 5	0 - 1.5	10
	5 - 15	1.5 - 4.6	9
	15 - 30	4.6 - 9.1	7
	30 - 50	9.1 - 15.2	5
	50 - 75	15.2 - 22.9	3
	75 - 100	22.9 - 30.5	2
	> 100	> 30.5	1

Tabla 1.- Evaluación del factor de profundidad al agua subterránea en el DRASTIC

Parámetro	Rango (inches)	(mm)	Clase
Recarga Neta Rw = 4	0-2	0 - 50	1
	2-4	50 - 102.6	3
	4-7	102 - 178	6
	7-10	178 - 254	8
	> 10	> 254	9

Tabla 2 - Evaluación del factor de recarga neta en el DRASTIC

Parámetro	Rango (GPD/ft)	(m/d)	(m/s)	Clase
Conductividad Hidráulica Cw = 3	1-100	0.040746-4.0746	4.6×10^{-7} - 4.7×10^{-5}	1
	100-300	4.0746-12.2238	4.7×10^{-5} - 1.4×10^{-4}	2
	300-700	12.2238-28.522	1.4×10^{-4} - 3.4×10^{-4}	4
	700-1000	28.522-40.746	3.4×10^{-4} - 4.7×10^{-4}	6
	1000-2000	40.746-81.492	4.7×10^{-4} - 9.5×10^{-4}	8
	> 2000	> 81.492	> 9.5×10^{-4}	10

Tabla 7.- Evaluación de conductividad hidráulica en el DRASTIC.

SISTEMA DE INVENTARIO DE RIESGO AMBIENTAL (ERIS)

Una vez que en el sistema se produce una falla y la sustancia contaminante ha salido de control y constituye una fuente de riesgo. Para evaluar sus efectos a los seres humanos y al medio ambiente sensible se puede aplicar el modelo del Sistema de Inventario de Riesgo Ambiental (ERIS), (Wilson, 1991) el cual toma en cuenta elementos muy importantes como son:

- Tipo de riesgo ambiental
- Cantidad y extensión de la fuente
- Mecanismos de control que intervienen en los niveles de riesgo
- Las condiciones actuales y futuras de los mecanismos de control
- Identificación espacial de las áreas de mayor riesgo.
- La cuantificación de los daños a los posibles blancos

Para agua superficiales utiliza datos como precipitación media anual, condiciones físicas del terreno, estado físico de suelo, uso del suelo, distancia a poblaciones y hábitats cercanos, población afectada en un tiempo actual y tiempos futuros, distancia a las fuentes de riesgo y uso de agua superficial y sensibilidad ambiental.

Para aguas subterráneas utiliza datos como profundidad de acuífero, distancia a la fuente, precipitación neta, conductividad hidráulica, estado físico de suelos, distancia a pozos cercanos, uso de aguas subterráneas, distancia a poblaciones y cercanas, población afectada para un tiempo actual y a futuro, probabilidades de uso.

En el análisis de la ruta de aire se requieren datos de probabilidad de uso, reactividad e incompatibilidad de la sustancia en cuestión, población afectada para un tiempo actual y para tiempos futuros, distancia a poblaciones cercanas, uso del suelo y sensibilidad ambiental.

La evaluación de la ruta de contacto directo requiere datos de probabilidad de uso, accesibilidad, población afectada para un tiempo actual y tiempos futuros, población en un radio de una milla, persistencia y toxicidad y sensibilidad ambiental

El análisis de riesgo de la ruta de fuego/explosión requiere de datos como probabilidad de uso, ignibilidad, reactividad, incompatibilidad, población afectada para un tiempo actual y tiempos futuros, población en un radio de dos millas, uso del suelo, distancia a edificios y hábitats cercanos. Todos estos datos mencionados anteriormente son normalizados mediante pesos basados en la técnica Delphi

EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL ERIS

Este método será utilizado para realizar una evaluación de riesgo ambiental en el área de La Presa de San German, León Gto.

• Relleno Sanitario (F1), este se localiza aproximadamente 1.6 km al poniente de la Presa de San German, en las cercanías de las vías del ferrocarril, pertenece a la Industria de Química Central de México, tiene una capacidad de 38,840 tons, al parecer esta fue construido bajo estrictas especificaciones de ingeniería sanitaria, cuenta con 8 pozos someros (4 m de profundidad) de observación, cuenta con una cubierta plástica, una capa de tepetate comprimido y asfalto en la superficie, fue construido en arcillas cuya conductividad hidráulica alcanza los 10^{-9} m/s.

Para cada mecanismo de transporte se analizará las condiciones de la fuente, así como sus características físicas (Hazard Ranking System => HRS) tablas 8a-d y 9a-d.

Confinamiento Superficial	Peso
Diques o estructuras de separación seguras, bordos adecuados y la erosión no es evidente.	0
Diques o estructuras separación seguras pero los bordos son inadecuados.	1
Diques sin infiltraciones pero potencialmente inseguros.	2
Diques inseguros, infiltraciones, o en peligro de colapsarse	3

Tabla 8a.- HRS de Confinamiento Superficial para transporte en agua superficial.

Contenedores	Peso
Contenedores sellados, en condiciones seguras y bordeados por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	0
Contenedores sellados, en condiciones seguras y pero no están rodeados por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	1
Contenedores con fugas y separadores o estructuras de confinamiento potencialmente inseguras.	2
Contenedores con fugas y sin separadores, ni estructuras de confinamiento, ni estructuras de captación de fugas o en peligro de colapso.	3

Tabla 8b.- HRS de Contenedores para transporte en agua superficial.

Pila de Residuos	Peso
Pilas cubiertas y rodeadas por separadores seguros o sistemas de confinamiento.	0
Pilas cubiertas, residuos sin consolidar, los separadores o sistemas de confinamiento son inadecuados	1
Pilas no cubiertas, residuos sin consolidar y con separadores o sistemas de confinamiento potencialmente inseguros.	2
Pilas no cubiertas, residuos sin consolidar y sin separadores, ni confinamiento, ni sistemas de captación de fugas o en peligro de colapso.	3

Tabla 8c.- HRS de Pila de Residuos para transporte en agua superficial.

Relleno Sanitario	Peso
La pendientes del Relleno Sanitario impide escurrimientos, relleno sanitario bordeado por sistemas de aislamiento seguros, o el relleno sanitario tiene una cubierta material adecuada	0
Relleno Sanitario cubierto inadecuadamente y con sistemas de aislamiento seguros.	1
Relleno Sanitario descubierto y con sistemas de aislamiento potencialmente inseguros.	2
Relleno Sanitario descubierto y sin sistemas de aislamiento y con sistemas de aislamiento inseguros.	3

Tabla 8d.- Valores de HRS de Contenedores para transporte en agua superficial.

Se asignan valores de 0 si 1) Todos los residuos del sitio son rodeados por diferentes estructuras de separación que se encuentran en condiciones seguras y adecuadas para contener todos los escurrimientos, derrames o lixiviados de residuos; o 2) si la intervención del terreno no permite escurrimientos en la entrada de agua superficial. Por otro lado al evaluar los contenedores para cada uno de los diferentes formas de almacenamiento o disposición en los sitios se asignan los siguientes valores.

Confinamiento Superficial	Peso
Estructuras de aislamiento para infiltraciones seguras, forradas con material impermeable (natural o artificial) compatible con los residuos y sistemas de colección de lixiviados adecuados	0
Forradas con material impermeable (natural o artificial) compatible con los residuos y sin sistemas de colección de lixiviados o bordos inadecuados	1
Estructuras de aislamiento para infiltraciones potencialmente inseguras o con cubierta moderadamente permeable compatible	2
Estructuras de aislamiento para infiltraciones inseguras, sin cubierta o cubierta incompatible.	3

Tabla 9a.- HRS de Confinamiento Superficial para transporte en agua subterránea.

Contenedores	Peso
Contenedores sellados, en condiciones seguras, sin cubierta o cubierta moderadamente permeable.	1
Contenedores con fugas, cubierta moderadamente permeable.	2
Contenedores con fugas y sin cubierta o cubierta incompatible.	3

Tabla 9b.- HRS de Contenedores para transporte en agua subterránea.

Pilas	Peso
Pilas descubiertas y residuos estabilizados; o pilas cubiertas, residuos no estabilizados y cubierta esencialmente impermeable.	0
Pilas descubiertas, residuos no estabilizados, cubierta moderadamente permeable y sistemas de colección de lixiviados.	1
Pilas descubiertas, residuos no estabilizados, cubierta moderadamente permeable y sin sistemas de colección de lixiviados.	2
Pilas descubiertas, residuos no estabilizados y sin cubierta.	3

Tabla 9c.- HRS de Pila de Residuos para transporte en agua subterránea.

Relleno Sanitario	Peso
Esencialmente cubierta impermeable, cubierta compatible con los residuos, y adecuado sistema de colección de lixiviados.	0
Esencialmente cubierta impermeable compatible sin sistema de colección de lixiviados y la superficie del relleno sanitario evita estancamiento de agua.	1
Cubierta moderadamente permeable y compatible, y la superficie del relleno sanitario evita estancamientos.	2
Sin cubierta o cubierta incompatible, cubierta moderadamente permeable compatible, la superficie del relleno sanitario facilita el estancamiento de agua; sin control de infiltraciones.	3

Tabla 9d.- Valores de HRS de Contenedores para transporte en agua subterránea.

Se asignan valores de 0 si 1) Las sustancias peligrosas, no tienen fácil acceso por la presencia de una superficie impermeable (natural o artificial) y sistemas de colección de lixiviados adecuados y con sistemas de aislamiento; 2) no hay agua subterránea cerca. El valor de 0 no indica que no haya riesgo, más bien indica un riesgo relativamente bajo, cuando es comparado con sitios más serios a nivel regional. Por otro lado al evaluar el confinamiento para cada uno de los diferentes formas de almacenamiento es más fácil al usar la anterior guía.

Para la ruta por aire, el método no proporciona ningún valor.

Para contacto directo, se refiere a accesibilidad de las sustancias al contacto directo. En el caso de que las sustancias sean accesibles al contacto directo como en las lagunas de desechos, pilas, tanques o rellenos sanitarios con una cubierta menor a 2 pies de profundidad o si ha sido depositada sobre el suelo y es fácilmente contactada en la superficie se le asigna un peso de 15. Para el caso de materiales que sean inaccesibles es decir no sean directamente contactada tan fácilmente, se le asigna un peso de 0.

En la ruta de fuego/explosión se le asigna un peso de 1 para el caso de materiales que no sean explosivos y un peso de 3 si hay la presencia de gases explosivos y inflamables.

De las características anteriormente mencionadas para cada fuente se obtuvieron los pesos de la componente físicas para cada una de los mecanismos de transporte, como se muestra en las tabla 10.

	ERIS (F1)
FUENTES	RELLENO SANITARIO
AGUA SUPERFICIAL	0
AGUA SUBTERRANEA	0
CONTACTO DIRECTO	0
FUEGO/EXPLOSION	1
HRS (MAXIMO 69*) TOTAL	1

Tabla 10.- Valores de HRS (Hazard Ranking System) de la fuente para sus mecanismos de transporte

* Si hay evidencia directa de una fuga se suma un peso de 45

RECONOCIMIENTO DE MECANISMOS DE CONTROL PRIMARIO (PCMRS)

El valor del PCMRS tiene una componente física y una componente humana, el valor de ambos componentes para cada una de las fuentes, se determino con base a las condiciones actuales y a la forma en que fueron construidas, el peso dado para cada una es mostrado en la tabla 11

ANÁLISIS DE MECANISMOS DE CONTROL PRIMARIO										
COMPONENTE FÍSICO						COMPONENTE HUMANO				PCMRS
FUENTE	CONDICIONES ACTUALES	t ₁	t ₂	t ₃	HRS VALOR	CAPACIDAD	ENTRENAMIENTO	EQUIPAMIENTO	DISCIPLINA	
F1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.00046
TASA DE** CONVERSION	G/F/P 1/3/5	H/M/L 5/3/1	H/M/L 5/3/1	H/M/L 5/3/1		G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	G/F/P 1/3/5	

Tabla 11.- Valores del PCMRS de la fuentes F1 (t₁, t₂ y t₃ representan probabilidades de fallas futuras, G/F/P => Good/Fair/Poor, H/M/L => High/Medium/Low).

El valor de reconocimiento de los mecanismos de control primario se obtiene mediante la siguiente expresión.

PCMRS = CONDICIONES ACTUALES*VALOR DEL HRS*CAPACIDAD*ENTRENAMIENTO*EQUIPAMIENTO*DISCIPLINA*0.00046

$$PCMRS(F1) = (1*1*1*1*1*100)/215\ 625 = 0.00046$$

MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CONTROL SECUNDARIO

ERIS Agua Superficial

La precipitación media anual para la región varía de 680 a 700 mm, la evaporación potencial anual es de 2100 mm, el área se encuentra en una planicie, donde las pendientes topográficas son menores a 3%, las distancias de las fuentes a las aguas superficiales (presa) alcanzan poco más del rango de una milla en algunos casos, el estado físico del suelo puede considerarse como sólido consolidado, los pesos dados para estas características son dados en las tablas 12, 13, 14, 15 y 16.

Cantidad de lluvia (Pulgadas)	mm	Peso
< 1.0	< 25.4	0
1.0 a 2.0	25.4 a 50.8	1
2.1 a 3.0	53.34 a 76.2	2
> 3.0	> 76.2	3

Tabla 12.- Peso para la lluvia.

Intervención del terreno					
Promedio de la pendiente del terreno					
Facilidad de pendiente	< 3 %*	3 - 5 %	5 - 8 %	> 8 %	Pendiente del agua**
Facilidad en cuenca cerrada	0	0	0	0	3
Facilidad con promedio de pendiente (< 3 %)	0	1	1	2	3
Promedio de pendiente (3 - 5%)	0	1	2	2	3
Promedio de pendiente (5 - 8%)	0	2	2	3	3
Promedio de pendiente (> 8%)	0	2	3	3	3

Tabla 13.- Peso para facilidad de pendiente e intervención del terreno

*Esta columna será usada tanto para terrenos que tienen una pendiente < 3 % ó para áreas de gran elevación que separa sitios de cuerpos de agua superficial.

**Esta columna será usada cuando hay distinto gradiente en corrientes de agua superficial al de la pendiente en la superficies cercanas, esto implica un rápido movimiento de la corriente.

Distancia (millas y pies)	metros	Peso
> 2 millas	> 3218.6	0
1 a 2 millas	1609.3 a 3218.6	2
1000 ft a 1 milla	304.8 a 1609.3	4
< 1000 ft	< 304.8	6

Tabla 14.- Pesos para distancias a aguas superficiales cercanas.

Estado físico	Peso
Sólido, consolidado o estabilizado	0
Sólido, no consolidado o inestable	1
Polvo o material fino	2
Líquido, viscoso o gas	3

Tabla 15.- Peso para el estado físico del suelo

FUENTE	F1
LLUVIA DE 24 hrs	0
FACILIDAD DE PENDIENTE E INTERVENCIÓN DEL TERRENO	0
DISTANCIA A AGUAS SUPERFICIALES	2
ESTADO FISICO DEL SUELO	0
VALOR DE AGUAS SUPERFICIALES NORMALIZADO *1.11	2.22

Tabla 16.- Valor de ERIS para aguas superficiales de diferentes fuentes.

ERIS Aguas Subterráneas

En general la profundidad del acuífero varía de 15 a 33 m, la evaporación es mucho mayor que la precipitación, la conductibilidad hidráulica de las arcillas alcanza los 10^{-9} m/s, en arena limosa se alcanzan valores de 10^{-7} m/s, en tanto que en arenas con grava alcanza los 5.787×10^{-4} m/s, la distancia de los pozos a las fuentes varía, por lo que se maneja para diferentes intervalos de distancia (de 1 a 2 millas y de 2 a 3 millas). La frecuencia de pozos distancia se da en las siguiente tablas.

FUENTE	F1
PESO(# DE POZOS)	1(9)
PESO(# DE POZOS)	2(21)
PESO(# DE POZOS)	3(9)
PESO(# DE POZOS)	4(0)

Tabla 17.- Relación entre número de pozos y pesos debido a su distancia con las fuentes.

Distancia (ft)	metros	Peso
> 150	> 45.72	0
76 a 150	23.16 a 45.72	2
21 a 75	6.4 a 23.16	4
0 a 20	0 a 6.09	6

Tabla 18.- Pesos para profundidad al acuífero.

Precipitación Neta(pulgadas) (precipitación - evaporación)	(mm)	Peso
< -10	< -254	0
-10 a +5	-254 a +127	1
+5 a +15	+127 a +381	2
> +15	> +381	3

Tabla 19.- Peso para precipitación neta.

Tipo de material	Rango de K (m/d)	Peso
Arcilla, till compacto, lutita, rocas ígneas y metamórficas no fracturadas	$< 8.64 \times 10^{-5}$	0
Limos, loess, arcillas limosas, margas limosas, margas arcillosas, calizas menos permeables, dolomías y areniscas, till moderadamente permeables	$< 8.64 \times 10^{-3} > 8.64 \times 10^{-5}$	2
Arenas finas, arenas limosas, margas, arenas margosas, calizas moderadamente permeables dolomías y calizas (no karsticas); rocas ígneas y metamórficas moderadamente fracturadas y algunos till gruesos.	$< 8.64 \times 10^{-1} > 8.64 \times 10^{-3}$	4
Gravas y arenas, rocas ígneas y metamórficas altamente fracturados, lavas y basaltos permeables dolomías y calizas karsticas.	$> 8.64 \times 10^{-1}$	6

Tabla 20 - Peso para conductividad hidráulica de algunos materiales geológicos

Distancia (millas y pies)	metros	Peso
> a 3 millas	4827.9	0
2 a 3 millas	3218.6 a 4827.9	1
1 a 2 millas	1609.3 a 3218.6	2
2001 ft a 1 milla	609.9 a 1609.3	3
< a 2001 ft	< 609.9	4

Tabla 21 - Peso por distancia a pozos cercanos a la fuente contaminante.

FUENTE	F1
PROFUNDIDAD DEL ACUÍFERO	2
PRECIPITACIÓN NETA	0
CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA	0
ESTADO FÍSICO DEL SUELO	0
DISTANCIA A POZOS CERCANOS	2
VALOR TOTAL CRUDO	4
VALOR TOTAL NORMALIZADO *0.91	3.64

Tabla 22.- Valor de ERIS normalizado para aguas subterráneas de diferentes fuentes.

ERIS Aire

Dado que no hay sustancias incompatibles, tampoco se tiene reactividad del Cromo, por lo tanto se le asigno un peso de 0 como se muestra en las tablas 23, 24a-f, 25 y 26.

Nivel NFPA	Peso
0 Materiales que normalmente son estables aún bajo condiciones de exposición al fuego en los cuales no reacciona con el agua.	0
1 Materiales en los cuales ellos mismos son normalmente estables, pero en los cuales pueden ser inestables a altas presiones y temperaturas o pueden reaccionar con agua liberando algo de energía pero no violentamente.	1
2 Materiales en los cuales ellos mismos son normalmente inestables y sufren cambios químicos violentos pero no detonan. Incluyen materiales que pueden sufrir cambios químicos con liberación rápida de energía a presiones y temperaturas normales o los cuales pueden sufrir cambios químicos violentos a elevadas presiones y temperaturas. También incluyen materiales que pueden reaccionar violentamente con agua o los cuales pueden formar mezclas potencialmente explosivas con agua.	2
3 Materiales que ellos mismos son capaces de detonar o de una descomposición explosiva o de una reacción explosiva pero los cuales pueden ser inicialmente confinados y calentados. Incluye materiales que son termalmente sensibles o a choques mecánicos a temperaturas y presiones elevadas o los cuales reaccionan explosivamente con agua sin requerir de calor o confinamiento.	3
4 Materiales que son capaces de detonar o de una descomposición explosiva o reacción explosiva en condiciones normales de presión y temperatura Incluye materiales que son sensibles a golpes mecánicos o choques térmicos.	3

Tabla 23.- Peso para clasificación de reactividad de la NFPA (National Fire Protection Association)

Grupo 1-A	Grupo 1-B
Acetileno viscoso	Acido viscoso
Líquidos cáusticos alcalinos	Bateria ácida
Limpiadores alcalinos	Electrolito Acido
Líquidos corrosivos alcalinos	Solventes
Fluidos de baterías corrosivas alcalinas	Otros ácidos corrosivos
Aguas residuales cáusticas	Desgastadores ácidos
	Desgastadores mezclados con ácidos
Desgastador cáustico	Desgastadores de ácidos sulfúricos
Consecuencias potenciales: Generación de calor; reacción violenta.	

Tabla 24a.- Materiales incompatibles del Grupo 1 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Grupo 2-A	Grupo 2-B
Aluminio	Algunos residuos concentrados de los Grupos 1-A o 1-B
Acido y agua	
Berilio	
Limpiadores químicos	Calcio
Litio	
Potasio	

Sodio Polvo de zinc Metales hidridos	Otros metales reactivos.
Secuencias potenciales: Fuego o explosión; generación de gas hidrogeno flamable.	

Tabla 24b.- Materiales incompatibles del Grupo 2 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Grupo 3-A	Grupo 3-B
Alcoholes Agua	Algunos residuos concentrados de los Grupos 1-A o 1-B Calcio Litio Metales hidridos Potasio SO ₂ Cl ₂ , SOCl ₂ , PCl ₂ , CH ₃ , SiCl ₃ Otros residuos reactivos con agua

Consecuencias potenciales: Fuego, explosión, o generación de calor, generación de gas flamable o tóxico.

Tabla 24c.- Materiales incompatibles del Grupo 3 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Grupo 4-A	Grupo 4-B
Alcoholes Aldehidos Hidrocarburos halogenados Hidrocarburos nitrados Hidrocarbonos no saturados Otros componentes reactivos orgánicos y solventes	Residuos concentrados del Grupo 1-A o 1-B Residuos del Grupo 2-A

Consecuencias potenciales: Fuego, explosión o reacción violenta.

Tabla 24d.- Materiales incompatibles del Grupo 4 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Grupo 5-A	Grupo 5-B
Limpiadores cianuros y soluciones sulfúricos Cloritos	

Consecuencias potenciales: Generación de cianuro hidrogenado tóxico o gas de hidrogeno sulfúrico.

Tabla 24e.- Materiales incompatibles del Grupo 5 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Grupo 6-A	Grupo 6-B
Cloratos Cloruros Residuos del Grupo 2-A Acido cromico Residuos del Grupo 4-A Hipocloritos Nitratos Acido nitrico Percloratos Permanganatos Peróxido Otros oxidantes fuertes	Acido acético y otros ácidos orgánicos Concentrado de ácidos minerales Otros residuos combustibles y flamables

Consecuencias potenciales: Fuego, explosión o reacciones violentas

Tabla 24f.- Materiales incompatibles del Grupo 6 de acuerdo a Departamento de salud de California, 1975.

Incompatibilidad	Peso
No se presentan sustancias incompatibles	0
Se presentan, pero no representan peligro	1
Se presentan, y pueden presentar peligro a futuro	2
Se presentan y poseen un peligro inmediato	3

Tabla 25.- Peso por incompatibilidad de quimicos

FUENTE	F1
REACTIVIDAD	0
INCOMPATIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO *6.67	0

Tabla 26.- Valor de ERIS normalizado para ruta aire, en diferentes fuentes

ERIS Contacto Directo

Dado que el relleno sanitario(F1), tiene barreras de seguridad y continuamente es monitoreado por medio de piezómetros, se le asigno un peso de 0 (Tabla 27), el resumen de las pesos es dado en la Tabla 28.

Barreras	Peso
Sistema de vigilancia las 24 hrs., (monitores de TV o vigilantes que vigilen la entrada) los cuales continuamente controlan la entrada o barreras artificiales (por ejemplo una cerca combinada con un acantilado) la cual bordea totalmente el acceso (por ejemplo monitores de TV, candados en la entrada, o entrada de acceso controlado).	0
Guardias de seguridad, sin barreras.	1
Una barrera pero no separa	2
Barreras pero no bordean completamente el acceso.	3

Tabla 27.- Peso para accesibilidad a la fuente de contaminación.

FUENTE	F1
ACCESIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO* 6.67	0

Tabla 28.- Valor de ERIS normalizado para ruta contacto directo.

ERIS Fuego/Explosión

Dado que el cromo no presenta reactividad con otras sustancias, no se localizan sustancias incompatibles y tiene un punto de ignición muy alto (>200°F) se le asignaron pesos de 0, como se ve en las tablas 29, 30 y 31.

Nivel	NEFPA	Peso
4	Gases muy inflamables, líquidos inflamables muy volátiles, y materiales que en forma de polvo o vapor en forma de mezclas explosivas cuando se dispersan en el aire.	3
3	Líquidos los cuales pueden ser encendidos bajo condiciones normales de temperatura. Algunos materiales que encienden espontáneamente a temperaturas normales en aire.	3
2	Líquidos que pueden ser moderadamente antes de ocurrir el encendido, así como sólidos que pueden producir vapores inflamables.	2
1	Materiales que pueden ser precalentados antes de que encienda. Muchos combustibles sólidos tienen un rango de inflamabilidad de 1	1
0	Materiales que no encienden.	0

Tabla 29.- Niveles de ignibilidad NEFPA y pesos asignados.

Ignibilidad	Peso
Punto de ignición > 200°F o Nivel NEFPA 0	0
Punto de ignición 140 - 200°F o Nivel NEFPA 1	1
Punto de ignición 80 - 140°F o Nivel NEFPA 2	2
Punto de ignición < 80°F o Nivel NEFPA 3 o 4	3

Tabla 30.- Peso para ignibilidad

FUENTE	F1
IGNICION	0
REACTIVIDAD	0
INCOMPATIBILIDAD	0
VALOR NORMALIZADO *2.22	0

Tabla 31.- Valor de ERIS normalizado via fuego/explosión en diferentes fuentes.

VALOR COMPUESTO DE RIESGO (CRS)

El CRS es una forma de valor esperado de que ocurra un evento adverso al humano o medio ambiente. Este puede ser calculado con la siguiente expresión.

$$\text{Valor esperado} = [(p_1) \cdot (p_2) \cdot \dots \cdot (p_n) \cdot v]$$

p_i = Probabilidad de que ocurra el evento i , n posible evento en la cadena de eventos para realizar v .

v = Valor del evento

Se calculó el CRS para cada fuente, para lo cual primero se obtuvo el valor de peso por mecanismo de transporte (TMRS), el cual se obtiene de la siguiente relación.

Si la probabilidad de uso es "0", no tiene sentido continuar con los cálculos posteriores.

$\text{TMRS} = \text{Probabilidad de uso (para cada mecanismo de transporte)} \cdot \text{valor normalizado para cada ruta de transporte}$

Una forma más práctica de probabilidad de uso de los diferentes mecanismos de transporte es usando la siguiente tabla, en donde la probabilidad puede ser alta (H), media (M), baja (L) y cero (0).

Valor H/M/L	Probabilidad Normal	Valor ERIS
H	0.83 - 1.00	5
M	0.17 - 0.82	3
L	0.01 - 0.16	1
0	0.00	0

Tabla 32.- Conversión de valores numéricos y relativos (H/M/L) a valores ERIS.

$$\text{RSCS} = (\text{Cantidad de la sustancia peligrosa} \cdot \text{toxicidad/persistencia}) \cdot 0.694$$

Usando las tablas 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40 se obtiene el RSCS.

Sustancia	Valor asignado
Componentes fácilmente biodegradables.	0
Cadenas fuertes de hidrocarburos.	1
Estructuras aniladas sustituidas	2
Metales y componentes policíclicos e hidrocarburos halogenados	3

Tabla 33.- Factor de riesgo para persistencia.

Peso = 3 Componentes altamente persistentes	Peso = 2 Componentes persistentes	Peso = 1 Componentes algo persistentes	Peso = 0 Componentes no persistentes
aldnn	acensaphthylene	acetylene dichloride	acetaldehyde
benzopyrene	atrazine	behemic acid, methyl ester	acetic acid
benzothiazole	(diethyl) atrazine	benzene	acetone
benzothophene	barbital	benzene sulfonic acid	acetophenone
benzyl butyl phthalate	borneol	butyl benzene	benzoic acid
bromochlorobenzene	bromobenzene	butyl bromide	di-isobutyl carbinol
bromoforn butanal	camphor	ε-caprolactam	docosane
bromophenyl phytanyl ether	chlorobenzene	carbon disulfide	docosane
chlordane	1,2-bis-chloroethoxy ethane	o-cresol	ethanol
chlorohydroxy benzophenone	b-chloroethyl methyl ether	decane	ethylamine
bis-chloroisopropyl ether	chloromethyl ether	1,2-dichloroethane	hexadecane
m-chlorotrobenzene	chloromethyl ethyl ether	1,2-dimethoxy benzene	methanol
DDE	3-chloropyridine	1,3-dimethyl naphthalene	methyl benzoate
DDT	di-4-butyl-p-benzoquinone	1,4-dimethyl phenol	3-methyl butanol
di-bromobenzene	dichloroethyl ether	diethyl adipate	methyl ethyl ketone
di-butyl phthalate	dihydrocarvone	n-decane	2-methylpropanol
1,4-dichlorobenzene	dimethyl sulfide	ethyl benzene	octadecane
dichlorodifluoroethane	2,6-dinitrotoluene	2-ethyl-o-hexane	pentadecane
di-ddnn	cis-2-ethyl-4-methyl 1,3-dioxolane	o-ethyltoluene	pentanol
diethyl phthalate	trans-2-ethyl-4-methyl-1,3-dioxolane	tridecane	propanol
di(2-ethylhexyl) phthalate	guaiacol	isopropyl benzene	propylamine
dichexyl phthalate	2-hydroxy adiponitrile	limonene	tetradecane
di-isobutyl phthalate	isophorone	methyl ester of benzoic acid	n-undecane
dimethyl phthalate	indene	methane	n-undecane
4,6-dimro-2-aminophenol	isoborneol	2-methyl-5-ethyl pyridine	
diisopropyl phthalate	isopropenyl-4-isopropyl benzene	methyl naphthalene	
endnn	2-methoxy biphenyl	methyl palmitate	
heptachlor	methyl biphenyl	methyl phenyl carbinol	
heptachlor epoxide	methyl chloride	methyl stearate, naphthalene	
1,2,3,4,5,6-heptachlorononboronene	methylindene	nonane	
hexachlorobenzene	methylindene chloride	octane	
hexachloro-1,3-butadiene	nitroanisole	acryl chloride	
hexachlorocyclohexane	nitrobenzene	pentane	
hexachloroethane	1,1,2-trichloroethylene	phenyl benzoate	
methyl benzothiazole	trimethyl-moxo-hexahydrotriazine	phthalic anhydride	

pentachlorobiphenyl	isomer	propylbenzene	
pentachlorobiphenol		1-terpineol	
1,1,3,3-tetrachloroacetone		toluene	
tetrachlorophenyl		vinyl benzene	
thiomethylbenzothiazole		xylene	
trichlorobenzene			
trichlorophenyl			
trichlorofluoromethane			
2,4,6-trichlorophenol			
triphenyl phosphate			
bromodichloromethane			
bromoform			
carbon tetrachloride			
chloroform			
chloromochloromethane			
dibromodichloroethane			
tetrachloroethane			
1,1,2-trichloroethane			

Tabla 34.- Persistencia (Biodegradabilidad) de algunos componentes orgánicos.

<p>0 = No tóxico (Ninguno). Esta designación es dada para materiales que caen en una de las siguientes categorías:</p> <p>a) Materiales que no causan daño bajo condiciones normales de uso.</p> <p>b) Materiales que producen efectos tóxicos en humanos solo bajo condiciones poco usuales o por sobredosis.</p> <p>1 = Ligeramente tóxico (Baja)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo unos segundos, minutos, u horas de exposición causan solo ligeros efectos sobre la piel o membranas mucosas sin tomar en cuenta lo extenso de la exposición.</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir solo ligeros efectos en segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis sin tomar en cuenta la cantidad absorbida o el tiempo de exposición.</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan solo ligeras y generalmente daños reversibles en la piel o la membrana mucosa. El tiempo de exposición puede ser pequeños o largos.</p> <p>d) Sistemático crónico. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y puede producir solo ligeros y generalmente efectos reversibles en periodos de días, meses o años. La extensión de la exposición puede ser grande o pequeña.</p> <p>En general la clasificación de estas sustancias sido de toxicidad ligera, produce cambios en el cuerpo humano que son reversibles y pueden desaparecer después de que termina la exposición con o sin tratamiento medico.</p> <p>2 = Moderadamente tóxico (Media)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo unos segundos, minutos, u horas de exposición causan solo moderados efectos sobre la piel o membranas mucosas. Estos efectos pueden ser el resultado de intensas exposiciones en cuestiones de segundos o de una moderada exposición en cuestión de horas</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir moderados efectos en segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis.</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan moderados daños en la piel o la membrana mucosa.</p> <p>d) Sistemático crónico. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y puede producir moderados efectos después de continuas o repetidas exposiciones en periodos de días, meses o años.</p> <p>En general la clasificación de estas sustancias ha sido de toxicidad moderada, produce cambios tanto reversibles como irreversibles en el cuerpo humano. Estos cambios no son tan severos que pongan en peligro la vida o producir serios daños físicos.</p> <p>3 = Toxicidad severa (Alta)</p> <p>a) Local agudo. Materiales que en solo segundos, minutos, u horas de exposición causan heridas a la piel o membranas mucosas de suficiente severidad como para poner en peligro la vida o causar permanentes daños físicos o deformación.</p> <p>b) Sistemático agudo. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden producir daños de suficiente severidad como para poner en peligro la vida después de una sola exposición en cuestión de segundos, minutos u horas o después de una ingestión de una sola dosis.</p> <p>c) Local crónico. Materiales que en continuas o repetidas tiempos de exposiciones en periodos de días, meses o años causan fuertes daños en la piel o la membrana mucosa de suficiente severidad que pone en peligro la vida o causar daños permanentes o deformaciones o cambios irreversibles.</p>
--

Sistemático crónico. Materiales que pueden ser absorbidos por el cuerpo por inhalación, ingestión o a través de la piel y pueden causar la muerte o serias heridas físicas después de continuas o repetidas en pequeños exposiciones, en periodos de días, meses o años.

Tabla 35.- Rangos de toxicidad SAX

1. Materiales que al ser expuesto a condiciones de fuego, no puede ocurrir riesgo a la salud.
2. Materiales con un ligero riesgo a la salud, es recomendable usar aparatos de respiración.
3. Materiales peligrosos a la salud, pero se puede ingresar libremente a las áreas con aparatos de respiración.
4. Materiales extremadamente peligrosos a la salud, pero se puede ingresar a las áreas con extremo cuidado. Bien protegido, incluyendo aparatos de respiración, mascara protectora, botas, guantes, vendas alrededor de las piernas, brazos, cintura. La superficie de la piel no debe ser expuesta.
5. Unos cuantos soplos del gas o vapor pueden causar la muerte, o el gas, vapor o líquido podría ser fatal, normalmente cuando ingresan los bomberos, llevan ropa resistente al calor.

Tabla 36.- Rangos de Toxicidad NFPA.

Toxicidad	Peso
Sax o NFPA nivel 0	0
Sax o NFPA nivel 1	1
Sax o NFPA nivel 2	2
Sax o NFPA nivel 3	3

Tabla 37.- Conversión de factores de pesos SAX/NFPA.

Peso para persistencia				
Peso para toxicidad	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	3	6	9	12
2	6	9	12	15
3	9	12	15	18

Tabla 38.- Matriz de Persistencia vs Toxicidad.

Tons en yardas cubicas	Numero de drums	Peso
0	0	0
1 - 10	1 - 40	1
11 - 62	41 - 250	2
63 - 125	251 - 500	3
126 - 250	501 - 1,000	4
251 - 625	1,001 - 2,500	5
626 - 1,250	2,501 - 5,000	6
1,251 - 2,500	5,001 - 10,000	7
> 2,500	> 10,000	8

Tabla 39.- Conversión para peso por cantidad (1 ton = 1 yarda cubica = 4 drums, 1 drums = 50 galones.

$$CRS = (TMRS + RSCS + PCMRS) \cdot 3$$

Para el relleno sanitario (F1) se obtuvieron los siguientes valores y dado que se manejan diferentes valores de ERIS en aguas subterráneas debido al riesgo en función de la distancia. debido a esto se observa que los mayores valores de riesgo compuesto es por la ruta de agua subterránea y agua superficial se obtuvieron diferentes valores de TMRS, al igual que el CRS, como se muestra en la tabla 40.

	PROBABILIDAD DE USO	ERIS F1	TMRS	RSCS	PCMRS	CRS
AGUA SUPERFICIAL	0	2.22	0	0	0	0
AGUA SUBTERRANEA	1	3.64	3.64	66.024	0.00046	23.42
AIRE	0	0	0	0	0	0
CONTACTO DIRECTO	1	0	0	0	0	0
FUEGO/EXPLOSION	0	0	0	0	0	0

Tabla 40.- valores de TMRS y CRS para el relleno sanitario (F1).

Como puede observarse los mayores valores del valor de riesgo compuesto se obtienen en mecanismos de transporte de agua subterránea.

BLANCOS HUMANOS

Se hizo una evaluación de riesgo en blancos humanos, para cada una de las fuentes con cada uno de los mecanismos de transporte.

ERIS Agua Superficial—Blanco Humano

Los pesos para población por distancia se manejaron varios valores para diferente número de población (actual, para un tiempo de respuesta a la emergencia t_1 , t_2 y t_3) y distancia, como se muestra en las tablas 42, 43 y 44.

Población actual. - Considera el número de población que puede ser afectada al momento de la fuga.

Población en t_1 . - Considera la población que puede ser afectada entre la fuga y tiempo de respuesta a la emergencia.

Población en t_2 . - Considera la población que puede ser afectada un año después de la fuga.

Población en t_3 . - Considera la población que puede ser afectada 10 años después de la fuga.

Población	Distancia al o al pozo				
	> 4828 (m) > 3 millas	3218 - 4828 (m) 2 - 3 millas	1609 - 3218 (m) 1 - 2 millas	609 - 1609 (m) 2000 ft - 1 milla	0 - 609 (m) 0 - 2000 ft
0	0	0	0	0	0
1 - 100	0	4	8	8	10
101 - 1000	0	8	16	16	20
1001 - 3000	0	12	24	24	30
3001 - 10000	0	16	32	32	35
> 10000	0	20	35	35	40

Tabla 41.- Peso por Población vs Distancia para consumo de agua superficial o pozos de agua subterránea.

Uso de agua superficial (agua fresca o agua salada)	Valor asignado
Normalmente no usado	0
Comercial o industrial	3
Irrigación, fuente importante económicamente preparación de comida comercial o recreación (pesca, remo, balneario)	6
Agua potable	9

Tabla 42.- Peso para uso de agua superficial.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t_1	0
POBLACION EN t_2	0
POBLACION EN t_3	0
POBLACION TOTAL	0
USO DE AGUA SUPERFICIAL	3
POBLACION/DISTANCIA	10
VALOR CRUDO TOTAL	13
VALOR NORMALIZADO X 2.043	26.56

Tabla 43.- Valores de ERIS de aguas superficiales - blanco humano para diferentes fuentes.

ERIS Agua Subterránea—Blanco Humano

Los resultados de ERIS aguas subterráneas - blanco humano son resumidos en la tabla 45 y 46.

Uso del agua subterránea	Peso
Sin uso (acuifero extremadamente salino, extremadamente baja producción)	0

Comercial, industrial o irrigación y otras fuentes de agua disponibles no usadas pero podrían ser usadas	3
Fuentes alternas de agua potable con agua municipal sin tratar, siempre disponibles o comercial, industrial o para irrigación, sin otras fuentes disponibles.	6
Agua potable; sin agua municipal de fuentes alternas sin tratar siempre disponibles	9

Tabla 44.- Peso para uso de agua subterránea.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0.01
POBLACION EN t3	0.07
POBLACION TOTAL	0.08
USO DE AGUA SUBTERRANEA	3
POBLACION/DISTANCIA	10
VALOR CRUDO TOTAL	13.08
VALOR NORMALIZADO X 2.043	26.72

Tabla 45.- Valores de ERIS para aguas subterráneas - blanco humano, en diferentes fuentes.

ERIS Aire--Blanco Humano

El valor del ERIS normalizado esta en función de la distancia y tipo de uso del suelo, como se muestra en las tablas 46 y 47.

Población	0 - 4 millas (6436 m)	0 - 1 milla (1609 m)	0 - ½ milla (804 m)	0 - ¼ milla (402 m)
0	0	0	0	0
1 - 100	9	12	15	18
101 - 1,000	12	15	18	21
1,001 - 3,000	15	18	21	24
3,001 - 10,000	18	21	24	27
> 10,000	21	24	27	30

Tabla 46.- Distancia de la población a la sustancia peligrosa.

Valor asignado	0	1	2	3
Distancia a comercios-industrias	> 1 milla (> 1609 m)	½ - 1 milla (804-1609 m)	¼ - ½ milla (402-804 m)	< ¼ milla (< 402 m)
Distancia a Parques nacionales/estatales, bosques, reservas ecológicas y áreas residenciales	> 2 millas (> 3212 m)	1 - 2 millas (1609-3212m)	¼ - 1 milla (402-1609m)	< ¼ milla (< 402 m)
Distancia a zonas agrícolas (en producción los 5 últimos años)	> 1 milla (> 1609 m)	½ - 1 milla (804-1609 m)	¼ - ½ milla (402-804 m)	< ¼ milla (< 402 m)
Zonas agrícolas principales	> 2 millas (> 3212 m)	1 - 2 millas (1609-3212m)	½ - 1 milla (804-1609m)	< ½ milla (< 804 m)
Distancia a sitios históricos				*

Tabla 47.- Peso para uso de suelo (ruta aire y fuego/explosión). * Si el sitio es sujeto aun impacto importante.

Los valores de ERIS via aire - blanco humano son resumidos en la tabla 48.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0
POBLACION EN t3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION/DISTANCIA	9
USO DEL SUELO a	3
b	2
c	1
VALOR CRUDO TOTAL a	12

b	11
c	10
VALOR NORMALIZADO X 3.03 a	36.36
b	33.33
c	30.30

Tabla 48.- Valores de ERIS aire-blanco humano para diferentes fuentes.

ERIS Contacto Directo--Blanco Humano

El valor del ERIS esta en función del numero de personas como se ve en la siguiente tabla.

Población	Peso
0	0
1 - 100	1
101 - 1,000	2
1,001 - 3,000	3
3,001 - 10,000	4
> 10,000	5

Tabla 49.- Peso para población en un radio de una milla.

Los datos de ERIS de contacto directo son dados en la tabla 50.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0
POBLACION EN t3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION EN UNA MILLA	1
VALOR CRUDO TOTAL	1
VALOR NORMALIZADO X 20	20

Tabla 50.- Valores de ERIS vía contacto directo - blanco humano.

ERIS Fuego/Explosión --Blanco Humano

Los valores de peso para población en un radio de 2 millas se da en la siguiente tabla.

Población	Peso
0	0
1 - 100	1
101 - 1,000	2
1,001 - 3,000	3
3,001 - 10,000	4
> 10,000	5

Tabla 51.- Peso para población en un radio de 2 millas.

Los valores del ERIS via fuego/explosión - blanco humano son resumidos en la tabla 52.

FUENTES	F1
POBLACION ACTUAL	0
POBLACION EN t1	0
POBLACION EN t2	0
POBLACION EN t3	0
POBLACION TOTAL	0
POBLACION EN DOS MILLAS	1
USO DEL SUELO	1
VALOR CRUDO TOTAL	2
VALOR NORMALIZADO X 12.5 a	25

Tabla 52.- Valores de ERIS via fuego/explosion -- blanco humano, para diferentes fuentes.

Cabe hacer notar que el Cromo no representa riesgos de fuego y explosión, sin embargo se hace el análisis del escenario.

BLANCO AMBIENTES SENSIBLES

ERIS Ruta de Agua Superficial-Sensibilidad Ambiental

Los posibles ambientes sensibles (hábitats críticos) se localizan a distancias entre 1 - 2 millas, por lo que se les asigno un peso de 1, como se muestra en las tablas 53 y 54.

Peso	0	1	2	3
Distancia a zonas húmedas (5 acres (20235 m ²) como mínimo) costeras.	> 2 millas (> 3212 m)	1 - 2 millas (1609-3212m)	½ - 1 milla (804-1609m)	< ½ milla (< 804 m)
Aguas dulces	> 1 milla (> 1609 m)	¼ - 1 milla (402-1609m)	100 ft - ¼ milla (30.48 m - 402 m)	< 100 ft (< 30.48 m)
Distancias a hábitats críticos (especies en peligro de extinción)	> 1 milla (> 1609 m)	½ - 1 milla (804-1609m)	¼ - ½ milla (402-804 m)	< ¼ milla (< 402 m)

Tabla 53.- Peso para ambientes sensibles (Agua superficial).

FUENTE	F1
SENSIBILIDAD AMBIENTAL	1
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 54.- Valores de ERIS vía agua superficial - blanco ambientes sensibles, para diferentes fuentes

ERIS Ruta Aire-Sensibilidad Ambiental

La sensibilidad ambiental se obtiene de la tabla 53. El resumen de los valores de ERIS vía aire - blanco ambientes sensibles se da en la tabla 55.

FUENTE	F1
SENSIBILIDAD AMBIENTAL	1
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 55 - Valores de ERIS vía aire - blanco ambientes sensibles.

ERIS Ruta Contacto Directo-Sensibilidad Ambiental

La sensibilidad ambiental se obtiene de la tabla 56. La tabla 57 muestra los valores de ERIS contacto directo - sensibilidad ambiental.

Distancia	Peso
> 1 milla (1609 m)	0
½ - 1 milla (804-1609 m)	1
¼ - ½ milla (402-804 m)	2
< ¼ milla (< 402 m)	3

Tabla 56.- Peso para distancia a hábitats críticos.

FUENTE	F1
SENSIBILIDAD AMBIENTAL	1
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 57.- Valores de ERIS contacto directo - sensibilidad ambiental.

ERIS Ruta Fuego/Explosión-Sensibilidad Ambiental

Los valores de pesos para ambientes sensibles, numero de construcciones y construcciones cercanas se obtienen de las tablas 58, 59 y 60.

Peso	0	1	2	3
Distancia zonas húmedas	> 100 ft (30.48 m)			< 100 ft (< 30.48 m)
Distancia a hábitats críticos	> ½ milla (> 804 m)	1000 ft - ½ milla (304.8-804 m)	100-1000 ft (30.48-304.8 m)	< 100 ft (< 30.48 m)

Tabla 58.- Peso para ambientes sensibles (fuego/explosión)

Número de construcciones	Peso
0	0
1-26	1
27-260	2
261-790	3
791-2600	4
> 2600	5

Tabla 59.- Peso para número de construcciones (fuego/explosión).

Distancia	Peso
> ½ milla (> 804 m)	0
201 ft - ½ milla (61.26-804 m)	1
51 ft - 200 ft (15.54-61 m)	2
0-50 ft (0-15.24 m)	3

Tabla 60.- Peso para distancia a construcciones cercanas.

FUENTE	F1
DISTANCIA A AMBIENTES SENSIBLES	0
NUMERO DE CONSTRUCCIONES	1
DISTANCIA A CONSTRUCCIONES CERCANAS	0
PESO NORMALIZADO X 33.33	33.33

Tabla 61.- Valores de ERIS contacto directo - sensibilidad ambiental

VALORES DE RIESGO HUMANO Y AMBIENTES SENSIBLES

Los valores de riesgo humano y riesgo a ambientes sensibles son resumidos para cada de las diferentes rutas, en la tabla 62

RELLENO SANITARIO (F1)

POBLACION ACTUAL	VALOR DE ERIS BLANCO HUMANO	CRS	BLANCO AMBIENTES SENSIBLES	RIESGO HUMANO	RIESGO AMBIENTAL	I=A..S
0.07	26.56	0	33.33	0	0	A.-AGUA SUPERFICIAL
0.07	26.72	23.42		43.8		B.-AGUA SUBTERRANEA
0.07	26.56	0	33.33	0	0	D.-AIRE
0.07	24.51	0	33.33	0	0	E.-AIRE
0.07	22.47	0	33.33	0	0	F.- AIRE
0.07	20	0	33.33	0	0	G.-CONTACTO DIRECTO
0.07	25	0	33.33	0	0	H.-FUEGO/EXPLOSION

Tabla 62 - Valores de riesgo humano y ambientes sensibles, para el relleno sanitario (F1), en la diferentes rutas de transporte.

En donde los valores de riesgo humano es analizado considerando diferentes factores, sin embargo debido a que tiene probabilidades de uso representa sólo riesgo humano

Para riesgo ambiental se considera que no hay ningún riesgo, debido a la nula probabilidad de uso de los diferentes mecanismos de transporte y para el mecanismo de transporte de agua subterránea no es aplicable según el autor del método.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

- Aller, L., T. Bennet, J.H. Lehr, R.J.Petty, and G. Hackett, 1985, DRASTIC: A Standar System for Evaluation Ground Water Pollution Potential Usin Hydrogeologic Setting.", EPA/600/2-85/018. U.S. Enviromental Protection Agency, Robert S. Kerr Enviromental Research Laboratory, Ada, OK. (original no consultado, citado en Knox, Robert C. , Sabatini, David A. and Canter, Larry W., 1993).
- Armienta Hernández M.A., Contribución a los Mecanismos de Transporte del Cromo en el Acuífero de León Gto., Tesis Doctorado, Instituto de Geofísica-UNAM, 1992.
- Armienta Hernández Ma., Rodríguez Castillo R., "Investigación de Impacto Ambiental de la Dispersión de Compuestos de Cromo en el Area Occidente-Central del Valle de León Gto.", Reporte Interno, Instituto de Geofísica-UNAM, 1992.
- Foster, Stephen and Hirata, Ricardo, "Determinación del Riesgo de contaminación de aguas subterráneas". Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Lima, Perú, 1991, 81 pp.
- Ramos-Leal, J.A., "Evaluación de Riesgo Ambiental para diferentes fuentes de Cromo en los alrededores de la Presa de San Germa, León, Gto.", Trabajo de Investigación, (Inédito), 1994.
- Vrba, J., y Zaporozec, A., Guidebook on Mapping Grounwater Vulnerability, International Association of Hydrogeologists, Vol. 16, 1994, 131 p
- Van Stempvoort, D., L. Ewert and L. Wassenaar, 1992. AVI: A method for Groundwater Protection Mapping in the Praire Province of Canada. PPWB Report No. 114, National Hydrology Research Institute, Saskatoon Saskatchewan. (original no consultado, citado en: Rommeseth, K. Wei, M. and Gallo, M., 1994 Evaluating methods of Aquifer vulnerability mapping for the prevention of groundwater contamination in British Columbia. Hydrology Branch, Ministry of Environment, Lands and Parks, Victoria, British Columbia, Canada).
- Wilson Albert, R., "Enviromental Risk: Identification and Management, Lewis Publisher Inc., 1991.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Prospección de contaminación de acuíferos por Hidrocarburos

**Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

PROSPECCION DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR HIDROCARBUROS

**POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.
RIO GUADALQUIVIR No. 3
QUERETARO, QRO. 76020
MEXICO**

R E S U M E N

En nuestros días es común la presencia de hidrocarburos en el subsuelo. Las principales fuentes de contaminación son las fugas que se generan a partir de tanques de almacenamiento y de líneas de conducción, así como en el manejo y disposición inadecuados, principalmente en patios de mantenimiento de automóviles, autobuses, ferrocarriles y aeropuertos. Los tanques y conducciones llegan a ser corroídos; acomodamientos del terreno producen tensiones y dislocaciones de tuberías; roturas accidentales también son frecuentes. En terminales de diferentes medios de transporte, se manejan hidrocarburos para el lavado de motores, los que después de su utilización eran descargados al sitio más próximo. Esta práctica no se realizaba por negligencia; era el método usual. Actualmente, ante el conocimiento del problema, en algunos países se ha tomado conciencia del problema y se trabaja en la limpieza del subsuelo. El hidrocarburo ligero, como puede ser una gasolina, se infiltra al subsuelo y tiende a avanzar hasta el nivel estático, donde por presentar una menor densidad que el agua, flota sobre ella. Parte de este hidrocarburo se volatiliza ocupando espacios porosos o fracturas arriba del nivel estático. Cuando el hidrocarburo es más pesado, tiende a infiltrarse y sedimentarse hacia las partes inferiores del acuífero o permanece absorbido por retención molecular en las partículas del suelo. Una porción del hidrocarburo llega a ser diluida por el agua. La porción volátil es la que se aprovecha para su prospección, la cual se realiza a través de pozos de monitoreo someros. Práctica útil y común es la realización de análisis de cromatografía de gases, a partir de cuyos resultados se identifica el tipo de hidrocarburo y se cuantifican sus componentes. En relación a la calidad del agua contaminada por hidrocarburos, recibe especial atención el benceno, debido al bajo límite permisible para el agua potable, el cual es de 1 ppb; es cancerígeno y el 35% de este compuesto es soluble en el agua. El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo está influenciado por el tipo y características del material a través del cual circula. En zonas cubiertas por arcillas, como es el caso de la Ciudad de México, la circulación del contaminante es restringida, en contraste, suelos de alta permeabilidad como es el caso de la Ciudad de Guadalajara, la alta permeabilidad permite la libre circulación del contaminante en el subsuelo.

ABSTRACT

Nowadays is common to find underground hydrocarbons (HC) leakages. The main pollutant sources are: leakage from underground storage tanks and pipes, and inadequate management at the maintenance yards of cars, buses, trains and airplanes. After some time storage tanks are corroded; ground movements produce accidental ruptures and dislocations of pipes. At terminals of different kind of transports, HC are used in motors cleaning and were discharged to the closest area after being used. This was not done by negligence, it was the usual method. Nowadays several countries have realized this problem and are working at underground remediation. A light HC like gasoline, infiltrates into the ground and tends to reach the static level. Due to its lower density, gasoline floats over the water. Part of this HC is volatilized and stored at the ground porous or fractures above the static level. When the HC is heavier, it tends to infiltrate and acumulate towards the base of the aquifer, or it is absorbed by molecular retention to ground particles. The volatile portion of a HC is used for detection through shallow monitoring wells. From chromatographic analysis are determined the type of HC and amount of its components. In relation to water quality polluted by HC, benzene is special importance due to its very low permissible limit in drinking water (1 ppb). Benzene is carcinogenic and 35% of it is soluble in water.

INTRODUCCION

Una fuerte transformación en la tecnología y en la vida del hombre, se produjo a partir del cambio de energía de vapor por hidrocarburo, a partir de los años 40s. El manejo y disposición de los hidrocarburos no contemplaba la repercusión de los efectos que causaría al infiltrarse al subsuelo. No fue sino hasta que se empezó a manifestar la contaminación de suelo y el agua, que se inició la cultura de la prevención de la contaminación y saneamiento del subsuelo y los acuíferos.

Por ello, es común encontrar zonas contaminadas por fugas de hidrocarburos. En esta década de los 90s, se inició en México la exploración y saneamiento del subsuelo por hidrocarburos, con las limitantes que la economía del país ha permitido.

MOVIMIENTO DEL HIDROCARBURO EN EL SUBSUELO

El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo está influenciado por el tipo y características del material a través del cual circula. A manera de ilustración de este punto, a continuación se mencionan las características de los subsuelos de las ciudades de México y Guadalajara, ya que, en la primera de ellas la existencia de arcillas superficiales restringen la contaminación, mientras que en la otra lado la alta permeabilidad del subsuelo permite la libre circulación del contaminante.

La mayor parte del área metropolitana de la Ciudad de México se encuentra asentada sobre sedimentos arcillosos de origen lacustre, cuyo espesor varía de 20 a más de 80 metros. Estas arcillas, presentan una permeabilidad reducida que las hace que funcionen como un acuitardo (material que permite la entrada de agua pero impide o limita su salida por retención molecular). El flujo de agua en el acuitardo de la Ciudad de México es muy reducido; tiene una permeabilidad del orden de 10^{-7} a 10^{-9} m/seg. La presencia de estas arcillas en el subsuelo limita el movimiento del agua y de sus contaminantes, los que circulan en forma muy lenta, retardando la contaminación. Sin embargo, el contacto de zonas impregnadas de hidrocarburos con espacios abiertos en el subsuelo, tales como el drenaje, ductos telefónicos e infraestructura subterránea en general, pueden constituir zonas a través de las cuales pueda circular libremente el hidrocarburo en el subsuelo. También la existencia de agrietamientos llega a permitir el flujo rápido de agua con hidrocarburos.

En contraste, el subsuelo de la Ciudad de Guadalajara esta constituido en sus aproximadamente 20 metros superiores, por arenas pumíticas (llamadas localmente "jales"), las cuales presentan una alta permeabilidad que permite la libre y rápida infiltración de contaminantes al subsuelo. A profundidades de entre 5 y 15 metros se encuentra el nivel freático, sobre el cual se llegan a acumular fugas de hidrocarburos líquidos. La zona no saturada, entre la superficie y el nivel freático, permite la libre circulación de volátiles, haciendo de ésta, una zona de alta vulnerabilidad.

CARACTERISTICAS DE LOS HIDROCARBUROS

Con el objeto de entender el comportamiento de los hidrocarburos en el subsuelo, se presentan algunas de sus características físicas y químicas.

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos en una gasolina típica. Estudios efectuados por Fleischer et al (1986), enfocados a los 13 compuestos más comunes de las gasolinas, los dividió en los 4 grupos siguientes: (1) Compuestos que preferentemente son absorbidos por la estructura del suelo; (2) los que se volatilizan rápidamente; (3) los que pueden causar mayor peligro; (4) los que no tienen un comportamiento de migración definido. En la tabla No. 1 se muestra la capacidad de adsorción, volatilización y solubilidad de los componente más comunes de las gasolinas.

Los hidrocarburos ligeros tienden a volatilizarse, mientras que los pesados permanecen entre las partículas del suelo. Los hidrocarburos ligeros son conocidos como LNAPLS (Ligth-Nonaqueous Phase Liquids)

Las gasolinas son utilizadas como combustible para máquinas. Los principales componentes químicos incluyen las cadenas de los alcanos, los cicloalcanos y los aromáticos. La primera cadena corresponde también a parafinas. El porcentaje en volumen de las cadenas mencionadas, son de aproximadamente 51% para los alcanos, 36% para los cicloalcanos y 14% de aromáticos, En la tabla No. 2, se presentan algunos de estos compuestos en ciertas gasolinas.

El diesel es una mezcla de parafinas de cadena rota. Los diferentes tipos de hidrocarburos comerciales, entre ellos la gasolina y el diesel, corresponden a cortes de destilación. La gasolina contiene relativamente grandes concentraciones de aromáticos como benceno y tolueno. En contraste, en el diesel estos aromáticos prácticamente no se encuentra presentes.

Dentro de los productos del petróleo, los aromáticos corresponden al grupo más importante desde el punto de vista ambiental. El benceno, el tolueno y los xilenos, presenta densidades menores a uno. El benceno es el más soluble con hasta 1780 ppm a la temperatura ambiente. El tolueno tiene una solubilidad de 515 ppm a 20° C. Los componentes aromáticos BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos), se consideran los de más alta movilidad.

La identificación de los componentes de los hidrocarburos se realiza mediante un análisis de cromatografía, por medio del cual se llegan a identificar y cuantificar. En la figura 1 se muestra el cromatograma de una mezcla de hidrocarburos, así como los rangos de destilación de ciertos compuestos y en la figura 2 los cromatogramas de algunos productos.

Algunos constituyentes de los hidrocarburos puede ser cancerigenos, en especial el benceno. La norma de calidad para el benceno en agua es de 1 ppb. (parte por billón).

Los hidrocarburos se pueden encontrar en diferentes formas en el subsuelo como son: fase líquida; fase disuelta en el agua y; fase absorbida por el suelo. Estudios recientes han adoptado el BTEX como una forma de expresar a los hidrocarburos.

EXPLORACION Y DELIMITACION DE PLUMAS DE HIDROCARBUROS EN EL SUBSUELO

Parte de los hidrocarburos más comunes se volatiliza, propiedad que se aprovecha para, mediante perforaciones someras, realizar mediciones de los hidrocarburos volátiles existentes y delimitar la zona afectada.

El proceso de exploración se inicia con la perforación de pozos someros, mediante los cuales se realizan mediciones insitu y se obtienen muestras de gas y líquido para análisis de cromatografía. Los resultados de las mediciones permiten delimitar la zona afectada y, cuantificar el volátil y el líquido.

POZOS DE MEDICION O MONITOREO

La perforación de los pozos someros de medición, se puede realizar mediante muestreadores manuales o perforadoras sencillas. Son comunes los rotomartillos accionados por energía eléctrica. El rotomartillo "inca" barras de acero inoxidable generalmente de 3/4" de diámetro. La perforación de este tipo de pozos generalmente alcanza de 2 a 6 metros de profundidad.

Mayores profundidades requieren maquinas perforadoras especiales que incluyen tuberías para perforación y muestreo de suelo, denominadas "augers".

MEDICIONES INSITU

Una vez perforados los pozos someros, se pueden realizar mediciones insitu de hidrocarburos volátiles (HCV), oxígeno, explosividad y bióxido de carbono. Un plano con la distribución de HCV puede mostrar claramente la presencia y

extensión de la zona contaminada. Los valores de explosividad, además de poder indicar la magnitud de la pluma, dan una "idea" del riesgo, aunque su medición puede estar afectada por la ausencia de oxígeno.

En todos los suelos existen bacterias, las que biodegradan a los hidrocarburos provocando: (1) ausencia de oxígeno que es consumido por la acción bacteriana y (2) abundancia de bióxido de carbono, como producto de la biodegradación. por ello, la medición y mapéo de los parámetros mencionados constituyen otras formas de delimitar las áreas impregnadas por hidrocarburos.

Cuando en las perforaciones de monitoreo se alcanza el nivel freático, se puede medir el espesor de los hidrocarburos líquidos (HCL) que se encuentran flotando sobre el nivel freático.

MUESTREO DE HIDROCARBUROS

El muestreo se puede llevar a cabo sobre muestras de suelo, gas, agua y producto líquido.

MUESTRAS DE SUELOS

Con el objeto de definir la litología del subsuelo y extraer muestras de suelo e hidrocarburos, se perforan pozos con obtención de núcleos de suelo inalterado, a partir de la superficie y hasta la profundidad total del pozo. Los núcleos son enviados al laboratorio para efectuarles un análisis de cromatografía. Existen varias formas de realizar el muestreo de núcleos de suelo. Generalmente para profundidades someras (1-10 m), el muestreo se realiza mediante un tubo de acero inoxidable, el cual incluye una punta cónica truncada; a través de ésta, entra el material arcilloso del suelo al tubo, al ser impulsado el muestreador hacia abajo. El tubo muestreador se encuentra revestido en su interior por un empaque de acetato, dentro del cual se aloja la muestra de material. Al sacar el tubo muestreador, se extrae el empaque de acetato y muestra de suelo, al que se le colocan tapas en las partes superior e inferior. Las tapas pueden ser de diferente color con el objeto de marcar la orientación de la muestra.

Para el muestreo a profundidades mayores de 10 metros, generalmente se utilizan máquinas perforadoras rotarias, equipadas con tuberías de perforación especiales para muestreo, denominadas "augers". En la figura 3 se muestran diferentes tipos de equipos de muestreo.

MUESTRAS DE GAS

La obtención de muestras de gas en los pozos someros se realiza colocando un tubo plástico flexible dentro del pozo. Se extrae el gas por medio de una pequeña bomba o una hipodérmica y se almacena en bolsas especiales, fabricadas con materiales que no reaccionan con el hidrocarburo o bien en recipientes de vidrio. Las muestras obtenidas son enviadas al laboratorio para su análisis cromatográfico. Son comunes los cromatógrafos portátiles que pueden realizar el análisis en el sitio.

MUESTRAS DE PRODUCTO LIQUIDO

Cuando la perforación alcanza el nivel freático, puede obtenerse una muestra de agua y del producto (hidrocarburo) líquido. Existen diferentes aparatos para su extracción. El producto líquido debe envasarse y sellarse en recipientes especiales.

ANALISIS DE LABORATORIO

En la prospección de hidrocarburos, las muestras de gas, agua o suelo, son analizadas por el método de cromatografía de gases (GC/FID = Gas chromatography with flame ionization detection). Los resultados pueden interpretarse cualitativa y cuantitativamente. En la gráfica (cromatograma) resultante de un análisis, los picos relacionan a los diferentes compuestos presentes en la muestra. (figuras 1 y 2).

CONCLUSIONES

Las fugas de hidrocarburos y su consecuente contaminación de suelos y agua subterránea, son comunes en sitios donde se manejan estos productos, principalmente gasolineras y patios de ferrocarriles, autobuses y aeropuertos. El movimiento del hidrocarburo en el subsuelo depende del tipo y características del material que constituye el medio. Los hidrocarburos comerciales corresponden a cortes de destilación, que van de ligeros y alto grado de volatilización, a pesados o densos. La exploración y delimitación de hidrocarburos en el subsuelo

se realiza mediante determinaciones de HCV, O₂, CO₂ y BTEX, entre otros, medidos en pozos someros. Generalmente se obtienen muestras de gas, líquido y/o sólido para su análisis, cualitativo y cuantitativo; la técnica usual es la cromatografía de gases.

REFERENCIAS

ABDUL, S.A. 1989. Limitations of Monitoring Wells for the Detection and Quantification of Petroleum Products in Soil and Aquifers In: GWMR.

CANTER L.W AND R.C. KNOX. 1985. Ground Water Pollution Control. Lewis Publishers, Inc. 526 p.

FETTER, C.W. 1993, Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company. 458 p.

KVA, ANALYTICAL SYSTEMAS. 1990. Soil Gas Equipment and Brief Field Techniques. Publisher K-V Associates, INC. 50 p.

KERFOOT, H. B. 1988. Is Soil-Gas Analysis, an Effective Means of Tracking Contaminant Plumes in Groundwater? What are the limitations of the Technology Currently Employed, In: GWMR.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1992. Contaminated Soils, Diesel Fuel Contamination. Lewis Publishers, 227 p.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas..DDF-DGCOH

LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos. Intera-Lesser-CFE.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.

NIELSEN, D. M. 1991. Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. National Water Well Association. 717 p.

OUDISK, G. AND K MUSICA. 1989. Handbook for the Identification, Location and Investigation of Pollution Sources Affecting Ground Water. NWWA. 185 p.

**TABLA 1 CAPACIDAD DE ADSORCION, VOLATILIZACION Y
SOLUBILIDAD DE LOS COMPONENTES MAS COMUNES
DE LAS GASOLINAS**

	CAPACIDAD DE		
	ADSORCION POR EL SUELO (%)	VOLATILIZACION (%)	SOLUBILIDAD (%)
Benceno	3	62	35
Etilbenceno	21	59	20
(n) Heptano	0.1	99.8	0.1
(n) Hexano	0.1	99.8	0.1
(n) Pentano	0.1	99.8	0.1
Benc (a)	100	0	0
Antraceno	100	0	0
Benc (a) Pireno	61	8	31
Naftaleno	88	2	10
Fenantreno	0.1	99.8	0.1
1-pentano	9	0.01	91
Fenol	3	77	20
Tolueno	15	54	31
Xileno			

De: Fleischer et al., 1986

**TABLA 2 ALGUNOS DE LOS PRINCIPALES CONSTITUYENTES
DE LAS GASOLINAS (ADAPATADA POR PERRY Y MODIFICADA
POR NYER 1993)**

	VOLUMEN %		
	GASOLINA 1	GASOLINA 2	GASOLINA 3
ALCANOS			
n-PENTANO	0.33	0.44	1.12
n-HEXANO	6.44	7.75	9.15
n-HEPTANO	6.90	5.94	8.42
2-METILPENTANO	2.89	2.58	3.47
2,3-DIMETILHEXANO	0.22	1.30	2.39
CICLOALCANOS			
CICLOPENTANO	0.98	1.78	0.87
METILCICLOPENTANO	6.61	10.29	5.01
CICLOHEXANO	10.40	7.83	7.13
METILCICLOHEXANO	22.00	14.58	18.07
ETILCICLOPENTANO	2.03	4.38	2.34
TRIMETILCICLOPENTANO	3.64	8.12	4.18
AROMATICOS			
BENCENO	3.27	2.22	3.61
TOLUENO	18.19	7.94	12.02

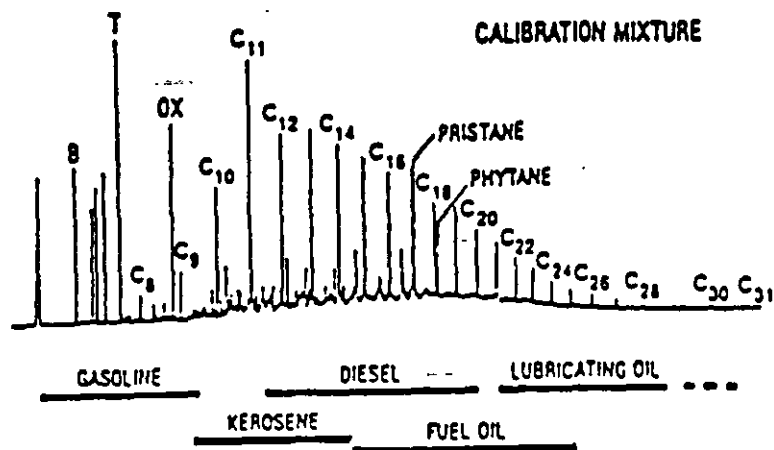


FIGURA 1. CROMATOGRAMA DE MEZCLA DE
HIDROCARBUROS (MODIFICADA
DE SENN AND JOHNSON, 1995)

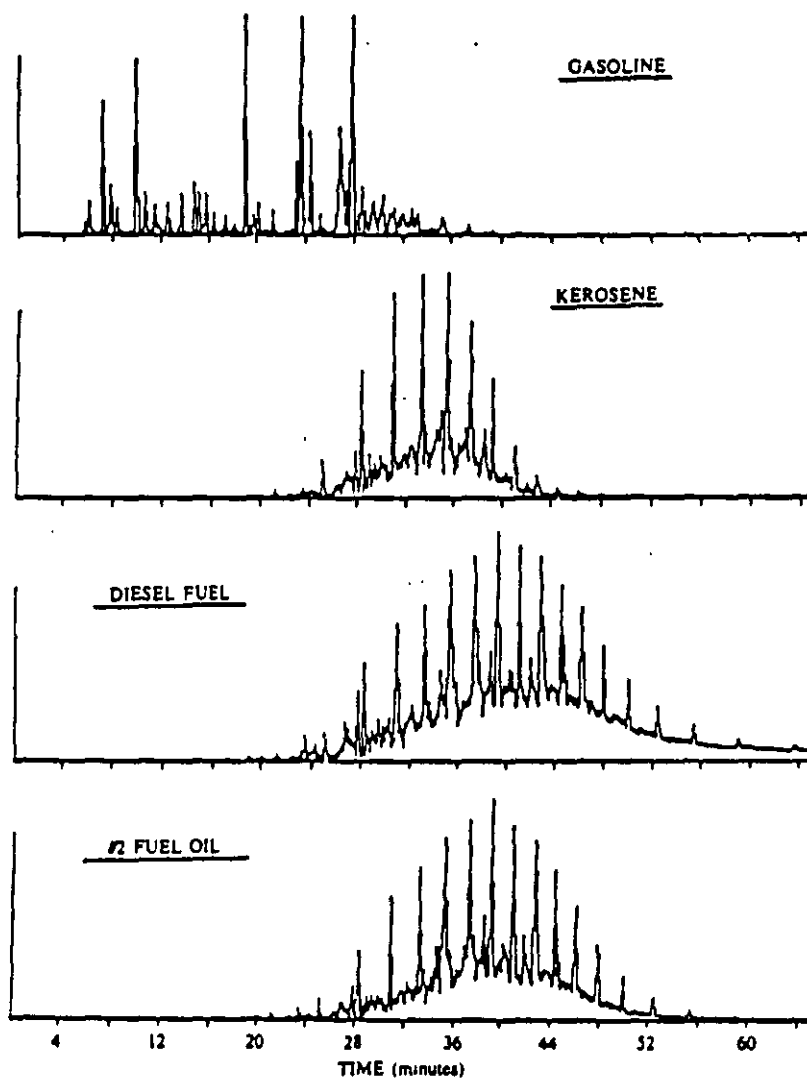
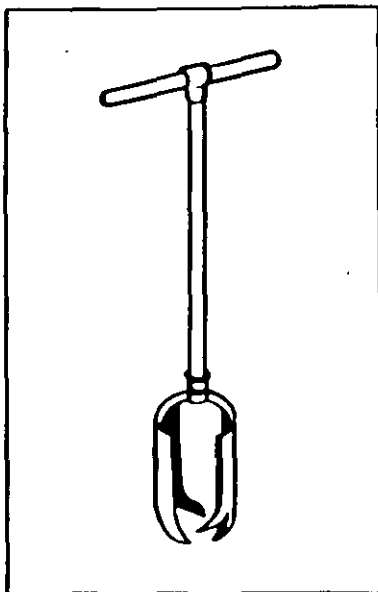
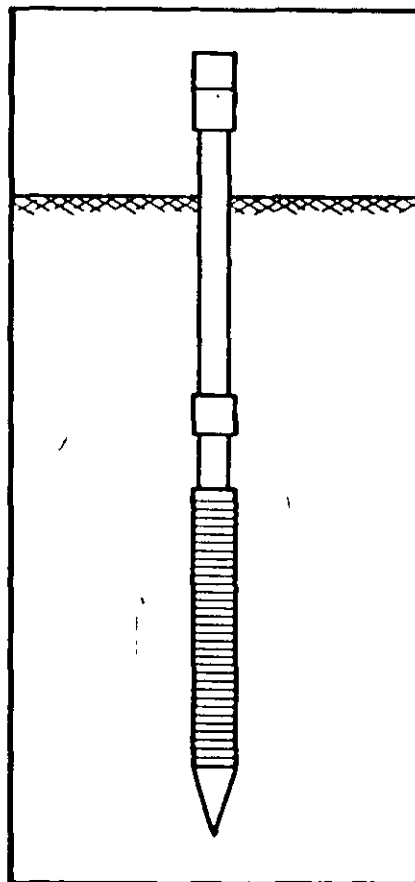


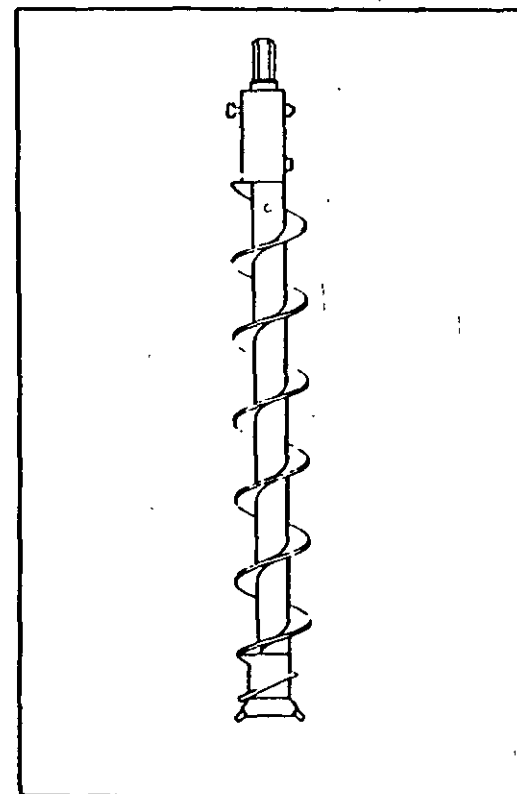
FIGURA 2. CROMATOGRAMAS DE DIFERENTES HIDROCARBUROS
(DE CALABRESE Y KOSTECKI, 1989)



MUESTREADOR MANUAL



MUESTREADOR MEDIANTE
INCADO DE TUBERÍA



MUESTREADOR DE MAQUINA ROTARIA

FUENTE NWWA, 1989, HANDBOOK OF SEGGESTED

FIGURA 3

11

DETERMINACION DE HIDROCARBUROS VOLATILES EN LA CONTAMINACION DEL SUBSUELO

**POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.
RIO GUADALQUIVIR No. 3
QUERETARO 76020, QRO.
MEXICO**

R E S U M E N

En suelos y acuíferos contaminados por hidrocarburos (HC), algunos de sus componentes se disuelven en el agua; otros flotan sobre el nivel freático y otra parte se volatiliza. En los estudios de prospección de HC, se obtienen y analizan muestras de agua, de HC líquido, de volátiles y de suelos. El estudio de los componentes de los hidrocarburos se realiza mediante análisis de cromatográfico, por medio del cual se llegan a identificar los tipos de HC y a cuantificar sus componentes.

INTRODUCCION

En la prospección y saneamiento del subsuelo y acuíferos por hidrocarburos, una herramienta útil es el análisis cromatográfico. El análisis incluye una gráfica denominada cromatograma, en la que se registra la presencia de diferentes orgánicos volátiles. Mediante este análisis es factible cuantificar los compuestos presente y clasificar el tipo de hidrocarburo.

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados más de 150 compuestos diferentes en una gasolina típica y en general, se caracteriza por que los compuestos que la constituyen son más volátiles que los que forman al diesel. En contraste, los aceites lubricantes prácticamente no contienen compuestos ligeros, lo cual es claramente identificable en los cromatogramas.

Los hidrocarburos que presentan mayor volatilidad pueden perder fácilmente los compuestos más ligeros en relación al tiempo, factor que llega a permitir la diferenciación de un hidrocarburo fresco de otro antiguo.

ANALISIS DE LABORATORIO

En la prospección de hidrocarburos, las muestras de agua o suelo son analizadas en el laboratorio por el método de cromatografía de gases (GC/FID = Gas chromatography with flame ionization detection). Los resultados pueden interpretarse cualitativa y cuantitativamente. En la gráfica (cromatograma) resultante de un análisis, los picos relacionan a los diferentes compuestos presentes en la muestra.

En la figura 1 se muestra un cromatograma donde se marcan los cortes de destilación de algunos hidrocarburos como la gasolina, el diesel y el keroseno. En la figura 2 se incluyen cromatogramas típicos de una gasolina y del diesel, entre otros

VOLATILIZACION DE LOS HIDROCARBUROS

Conforme un hidrocarburo se volatiliza, la cantidad de HC ligeros disminuye. En las figuras 3 a 5, se presentan los cromatogramas de gasolina nova, diesel y petróleo, tanto frescos como volatilizados, observándose que es notoria la pérdida de volátiles en los dos primeros. En el petróleo, no se aprecia un cambio significativo, debido a que este hidrocarburo está constituido por una mezcla pobre en volátiles ligeros.

A partir de los resultados del análisis cromatográfico puede clasificarse el tipo de hidrocarburos y cuantificarse los diferentes compuestos que lo constituyen.

Con el objeto de conocer el comportamiento de la volatilización de los hidrocarburos a la intemperie, se obtuvieron muestras de gasolina magna, gasolina nova, diesel y petróleo. A las muestras obtenidas se les efectuó un análisis de cromatografía. Se colocaron en un espacio abierto y ventilado, y se tomaron muestras periódicas. Algunos de los cromatogramas resultantes se muestran en las figuras 3 a 5. Con los valores de compuestos volátiles obtenidos, se formó una gráfica (fig. 6) donde se observó una clara volatilización en las gasolinas. Por lo que respecta al diesel y al petróleo, la respuesta fue mínima, debido a que estos hidrocarburos son pobres en volátiles, en relación con las gasolinas.

CONCLUSIONES

La cromatografía de gases es una herramienta útil para la identificación de los hidrocarburos y para la cuantificación de sus componentes. Dentro de un cromatograma se marcan los compuestos de acuerdo a su grado de volatilización. Las gasolinas presentan compuestos más ligeros que el diesel. En contraste, los aceites

lubricantes no contienen compuestos ligeros. Con el tiempo un hidrocarburo puede volatilizarse, factor que llega a permitir diferenciar a un hidrocarburo fresco de otro antiguo.

REFERENCIAS

CALABRESE, E.J. AND P.T. Kostecki. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 2. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment Analytical Methodologies. Lewis Publishers, Inc. 515 p.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 1. Lewis Publishers. 357 p.

KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1991. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater, Lewis Publishers. 354 p.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. DDF-DGCOH

LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos. Intera-Lesser-CFE.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.

LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.

LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY. 1992. Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments. C. K. Sholey, Inc. 395 P.

RISER-ROBERTS, E. 1992. Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites, C. K. Smoley, Inc. 264 p.

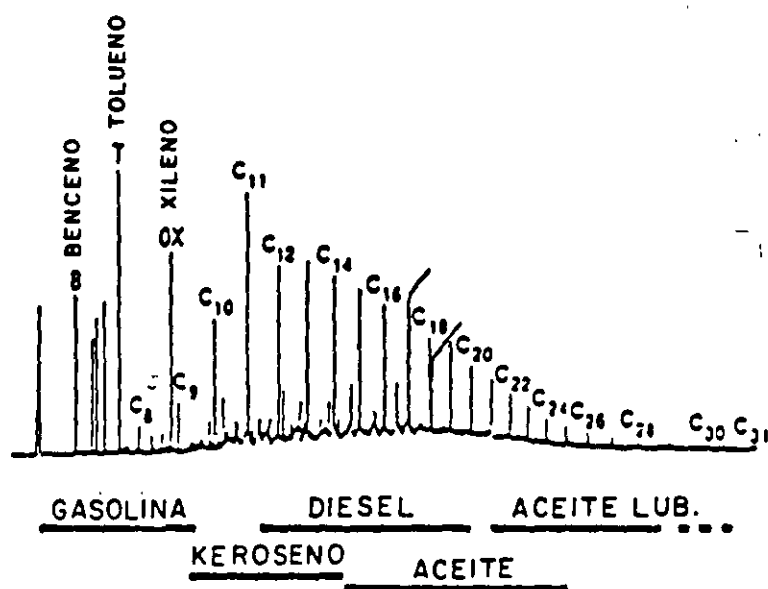
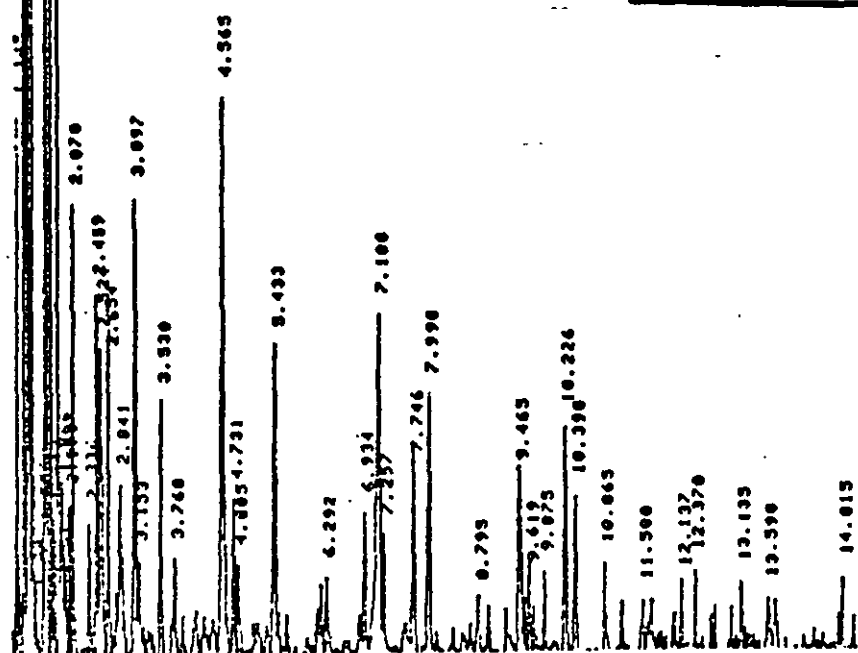


FIGURA 1 CROMATOGRAMA DE UNA MEZCLA DE HIDROCARBUROS:

(MODIFICADA DE SENN AND JOHNSON 1985)

1.432
1.815

CROMATOGRAMA DE
GASOLINA NOVA



CROMATOGRAMA DE
DIESEL

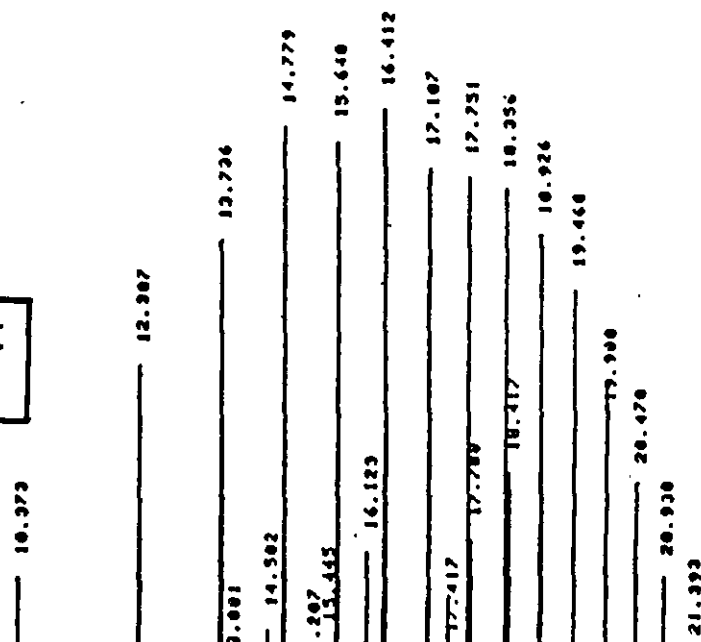
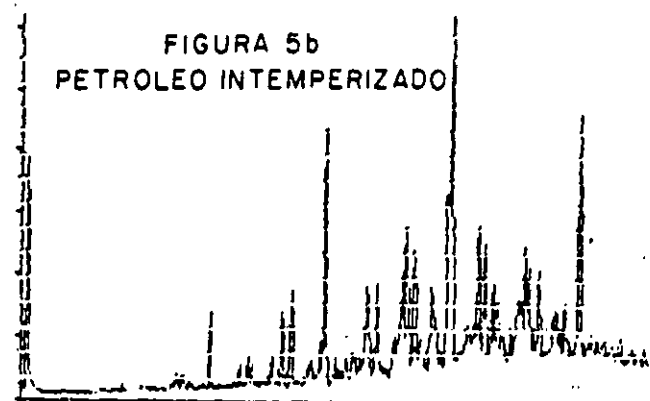
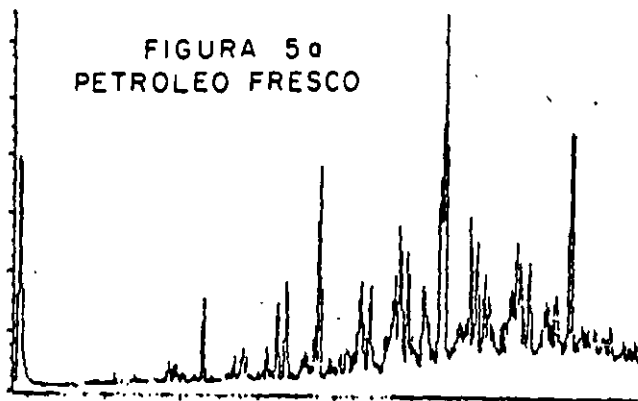
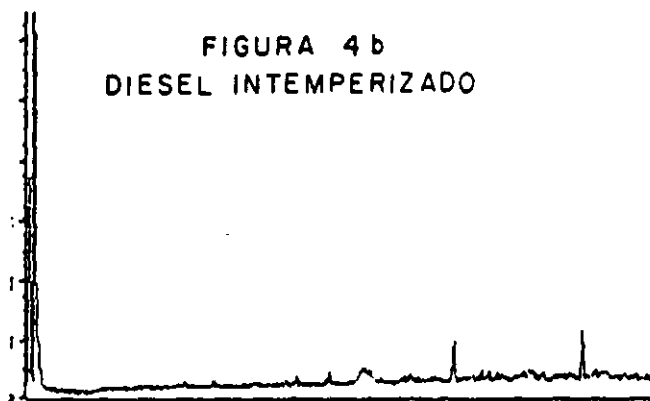
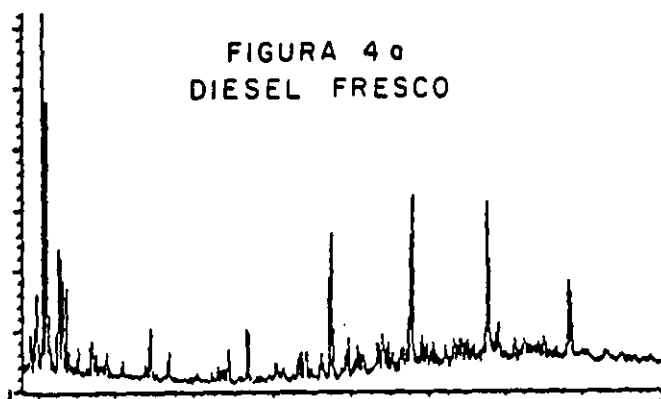
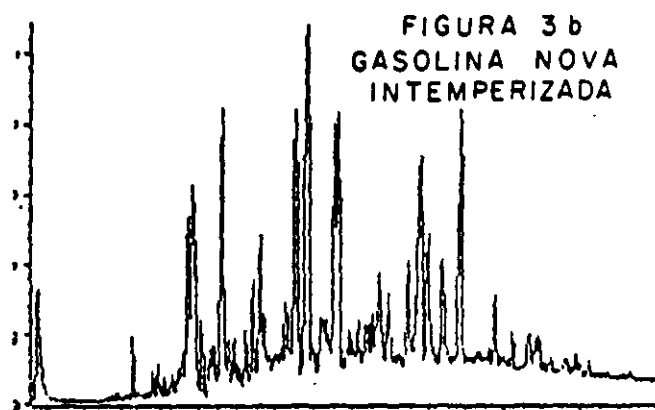
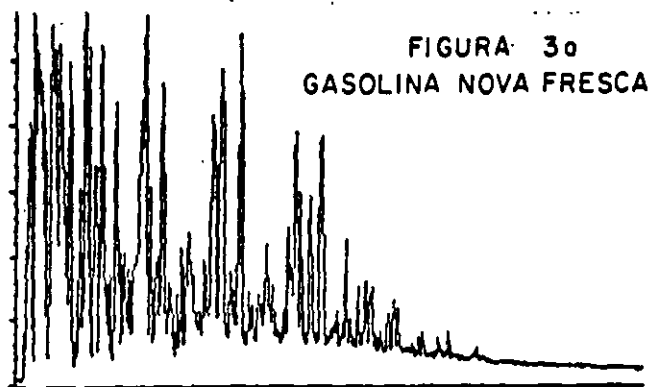


FIGURA 2.- CROMATOGRAMAS TÍPICOS DE
GASOLINA NOVA Y DIESEL



COMPORTAMIENTO DE HIDROCARBUROS A LA INTEMPERIE, RESPECTO AL TIEMPO

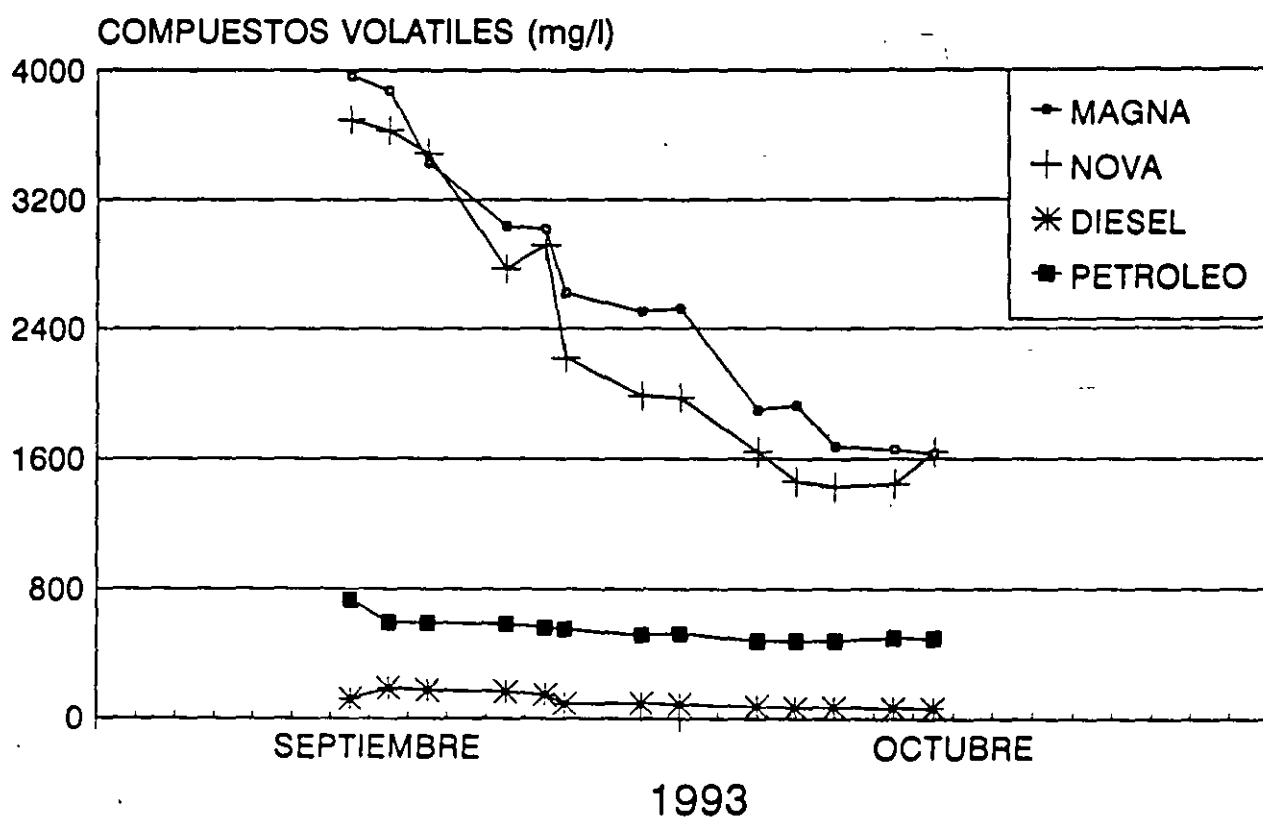


FIGURA 6

SANEAMIENTO DE ACUIFEROS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS

**POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES
LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V.
RIO GUADALQUIVIR No. 3
QUERETARO, QRO. 76020
MEXICO**

R E S U M E N

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en 4 formas: líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático ó estático; volátil en la zona no saturada; disuelto en agua y; líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por el material del medio o sedimentado en la base del acuífero. Los métodos apropiados para el saneamiento del subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo. El saneamiento del subsuelo puede iniciarse con la extracción del HC líquido y el volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. Como segundo paso se puede considera la limpieza del suelo y acuífero contaminados, los cuales tienen una mayor complejidad.

Para la extracción inicial de los productos líquido y volátil, el diseño y operación es "relativamente" sencillo. La remediación o saneamiento total del suelo y acuífero incluye técnicas sofisticadas, de alto costo y largo tiempo de ejecución. Existen diversos métodos, destacando entre ellos la extracción del contaminante y la biodegradación. La extracción por bombeo del producto líquido, es común, la cual se extrae junto con agua del acuífero; una vez en la superficie el producto es almacenado en tanques y el agua extraída es tratada a fin de eliminar los volátiles que contenga. El volátil puede extraerse a través de pozos y, una vez

en la superficie, puede ser incorporado a la atmósfera, incinerado o capturado mediante filtros de carbón activado.

ABSTRACT

Infiltrated hydrocarbons (HC) underground are found in 4 phases: (1) Liquid of lower density than water, floating over the water level; (2) volatile in the vadose zone; (3) dissolved in water; (4) liquid of higher density than water, found absorbed by the environment or accumulated at the base of the aquifer. The appropriate methods to clean underground polluted by HC depends of various factors. Some of them are: the phase in which the HC is found, its distribution and soil characteristics. Remediation usually begin with liquid and volatile extraction to reduce the risk. As a second step soil and aquifer cleaning is performed. To start extraction of HC, both liquid and volatile phases, is relatively simple. Total remediation of soil and aquifer includes sophisticated and expensive techniques performed for a long period of time. A common remediation method consists in extraction of liquid product and water by pumping. Once at the surface the product (liquid HC) is stored in tanks and water is treated to eliminate possible volatiles. The volatile phase can be extracted through wells. Once in surface those volatiles can be incorporated to the atmosphere, incinerated or captured by activated carbon filters.

INTRODUCCION

El hidrocarburo (HC) infiltrado al subsuelo puede encontrarse en varias formas tales como: (1) líquido de menor densidad que el agua y flotando sobre el nivel freático ó estático; (2) volátil en la zona no saturada; (3) disuelto en agua y; (4) líquido de mayor densidad que el agua, el cual puede encontrarse absorbido por

las partículas del suelo o sedimentado en la base del acuífero. Una vez conocida su presencia en el subsuelo, (en extensión, concentración, tipo de hidrocarburos y fase en que se encuentra), junto con el conocimiento de la geología y geohidrología del lugar, se pueden establecer las políticas de saneamiento.

El o los métodos más apropiados para el saneamiento de un subsuelo contaminado por HC, depende de varios aspectos. Entre ellos, la fase en que el HC se encuentre, su distribución y las características del subsuelo.

En México, se puede dividir el saneamiento en 2 partes. La primera considera la extracción inicial del HC líquido y volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. La segunda parte se puede denominar la "limpieza total", del suelo y acuífero, la cual incluye técnicas sofisticadas de alto costo y largo tiempo de ejecución.

METODOS DE SANEAMIENTO

Los principales métodos para el saneamiento del subsuelo y acuífero por hidrocarburos son: (1) extracción del HC líquido y volátil; (2) biodegradación insitu.

EXTRACCION DE HC LIQUIDO Y VOLATIL

Una vez delimitada la zona invadida por HC y cuantificada su concentración, se procede a extraerlo. El producto líquido es bombeado a través de pozos. Este, puede ser extraído junto con el agua del acuífero y una vez en la superficie, es separado. En otros casos, el HC líquido que se encuentra en una capa flotando sobre el agua, de donde puede ser extraído mediante bombas especiales. Para

acelerar la acumulación del HC en el entorno del pozo, puede bombearse agua y formarse un cono de abatimiento, cuya pendiente facilita el movimiento de la capa de HC que flota sobre el nivel estático, hacia el pozo. El HC y agua extraídos son procesados en la superficie. (Figura 1)

La extracción de volátiles se puede realizar a través de pozos ubicados en la zona vadosa, donde se colocan extractores de aire. Pueden perforarse pozos para inyección de aire, que "empujen al volátil hacia su salida. La remoción de volátiles al inicio de la extracción es alta y va disminuyendo con el tiempo.

BIODEGRADACION INSITU

Un método para el saneamiento de zonas afectadas por hidrocarburos es la bideogradación. Consiste en utilizar las bacterias que existen en todo suelo y que se alimentan de HC y oxígeno, formando bióxido de carbono y agua. Para acelerar este proceso, se pueden añadir nutrientes que aceleren la acción bacteriana, principalmente oxígeno, el cual se inyecta como gas o mediante agua. Debido al proceso de biodegradación mencionado, una zona invadida por hidrocarburos se caracteriza también por ausencia de oxígeno y abundancia de bióxido de carbono, parámetros que pueden monitorearse durante el saneamiento para determinar el grado de limpieza alcanzado.

EQUIPOS USUALES PARA EL SANAMIENTO

Con el objeto de ilustrar tanto la forma en que se encuentra el HC el subsuelo, así como las técnicas más comunes para su extracción o saneamiento, a continuación se describen varios productos comunes en el mercado.

En la figura No. 2 se muestra un equipo Westinghouse para el tratamiento de hidrocarburos y agua subterránea extraídos del subsuelo. En el se observa un tanque separador de agua-hidrocarburos, un tanque para el almacenamiento del producto recuperado, un tanque de aereación, un compresor, un soplador acoplado a una torre desgasificadora y un panel de control.

En la figura No. 3 se incluye el sistema de ORS Environmental Equipment, para la extracción y tratamiento de producto líquido y volátiles. En esta figura, se observa la presencia de un acuífero somero que es contaminado por fugas de un tanque de gasolina. El producto líquido se encuentra flotando sobre el nivel freático. También existen volátiles entre la superficie del terreno y el nivel freático. La extracción del hidrocarburo líquido se realiza mediante un sistema de bombas para la extracción, tanto del producto (HC líquido) como del agua. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada por una torre desgasificadora. El gas obtenido es tratado por oxidación catalítica o incinerado. En la misma figura, se ilustra la inyección de agua y nutrientes al subsuelo, lo que provoca biodegradación, además de "empujar" al producto hacia el pozo. Cuenta también con un sistema de extracción de volátiles, los que son conducidos a la planta de tratamiento de gases.

En la figura No. 4 se muestra la perforación de pozos direccionales para el saneamiento del subsuelo bajo infraestructura como edificios y tanques de almacenamiento.

En la figura No. 5 se incluye el sistema Environmental Instruments para la extracción y tratamiento del producto líquido y del volátil. Los volátiles son extraídos a través de un pozo y pueden ser conducidos a un filtro de carbón activado o bien a un oxidador catalítico. Un sistema de inyección de aire al subsuelo separa el volátil del agua, para posteriormente ser captado por un pozo. Mediante otro pozo, se extrae agua y producto (HC) líquido. El producto es almacenado en un tanque y el agua es pasada a través de un separador de

agua/producto. Posteriormente el agua pasa a un proceso de aereación, donde el volátil es separado y conducido hacia un filtro de carbón activado o bien a un oxidador catalítico.

En la figura No. 6 se muestra un esquema del sistema SENECA para la extracción y tratamiento del producto líquido y volátil del subsuelo. En dicha figura se ilustran pozos de extracción, tanto de volátiles como de producto líquido. Por lo que respecta al producto líquido, este es extraído por un sistema múltiple de pozos y conducido a un tanque. Posteriormente pasa por un tanque de separación agua/producto. El agua obtenida es conducida a través de un desgasificador, en el que, por medio de un soplador, se produce un burbujeo que permite la separación del volátil del agua.

CONCLUSIONES

El HC en el subsuelo y acuífero puede encontrarse en forma líquida, volátil o disuelta en agua. El saneamiento puede consistir en la extracción del HC (líquido o volátil), la cual puede realizarse a través de pozos. La biodegradación insitu es un método eficaz para la remoción de HC hasta niveles bajos, tanto en suelo como en el acuífero. Los principios en que se basa el saneamiento es aplicado en forma comercial por un gran número de compañías productoras de equipo.

REFERENCIAS

- CALABRESE, E.J. AND P.T. Kostecki. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 2. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assessment Analytical Methodologies. Lewis Publishers, Inc. 515 p.
- CANTER L.W AND R.C. KNOX. 1985. Ground Water Pollution Control. Lewis Publishers, Inc. 526 p.
- HAYES, D., E. C. HERNRY AND S. M. TESTA. 1989. A Practical Approach to Shallow Petroleum Hydrocarbon Recovery.
- KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume I. Lewis Publishers. 357 p.
- KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALABRESE. 1991. Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater, Lewis Publishers. 354 p.
- KOSTECKI, P.T. AND E.J. CALEBRESE. 1992. Contaminated Soils, Diesel Fuel Contamination. Lewis Publishers. 227 p.
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1990. Proyecto Experimental para Detección de Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. DDF-DGCOH
- LESSER, J. M. 1991. Contaminación de Acuíferos por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas. Curso sobre Tecnología de Punta en Contaminación de Acuíferos. Intera-Lesser-CFE.
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1992. Detección de Zonas Contaminadas por Fugas de Tanques Almacenadores de Gasolinas DDF-DGCOH.
- LESSER Y ASOCIADOS, S.A. DE C.V. 1993. Evaluación de Riesgos y Diagnóstico para el Saneamiento de la Colonia Moderna Oriente de Guadalajara, Jal. CNA.
- LYMAN, W.S., P.S. REIDY AND B. LEVY.. 1992. Mobility and Degradation of Organic Contaminants in Subsurface Environments. C. K. Sholey, Inc. 395 P.
- NYER, E. K. 1993. Practical Techniques for Groundwater and Soil Remediation. Lewis Publishers 214 p.

RISER-ROBERTS, E. 1992. Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites, C. K. Smoley, Inc. 264 p.

NWWA. 1991. Volatile Organic Compound Cleanups: An Anthology.

NWWA. 1991. Ground Water and Soil Venting.

ROY F. WESTON, INC. 1988. Remedial Technologies for Leaking Underground Storage Tanks. Lewis Publishers. 216 p.

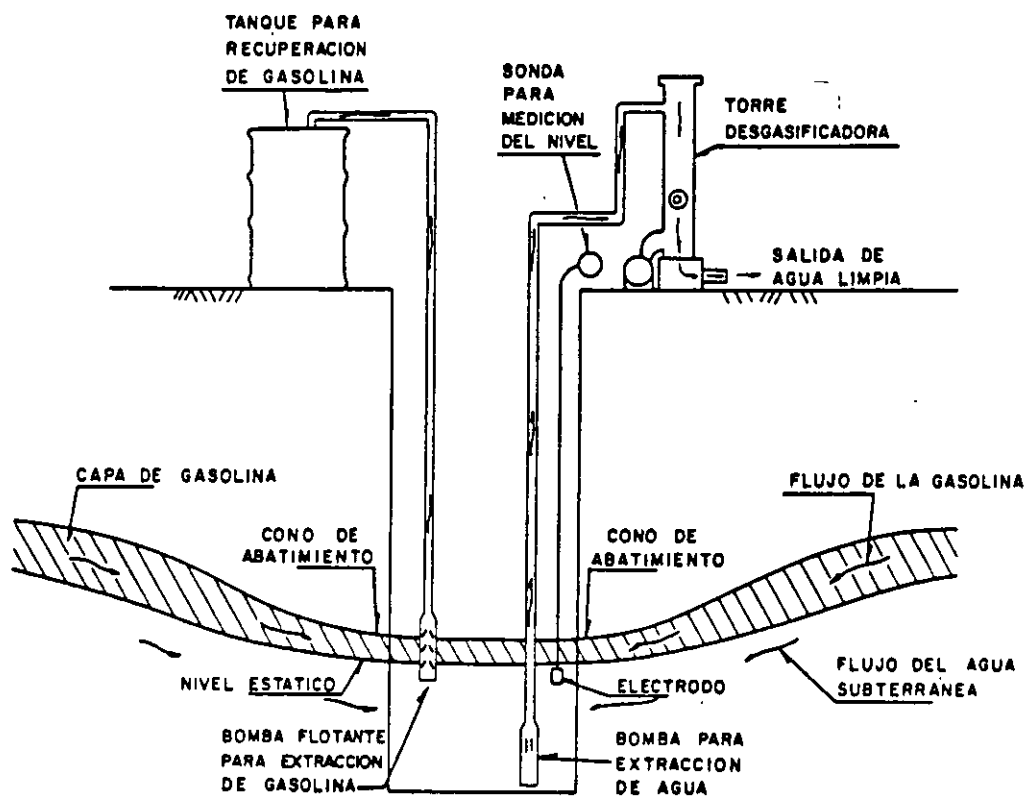


FIGURA 1.- EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS POR BOMBEO
Y TRATAMIENTO EN SUPERFICIE

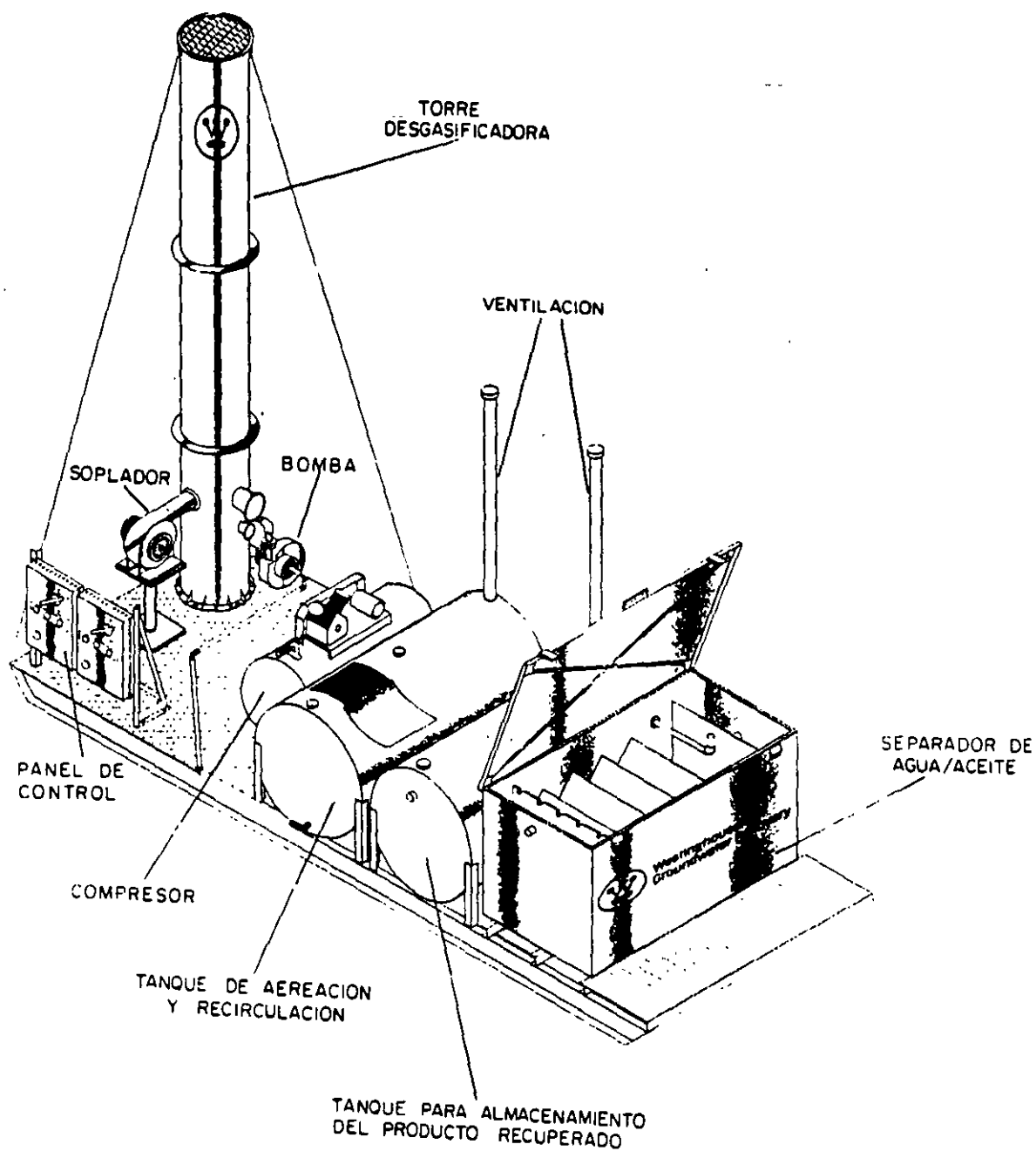
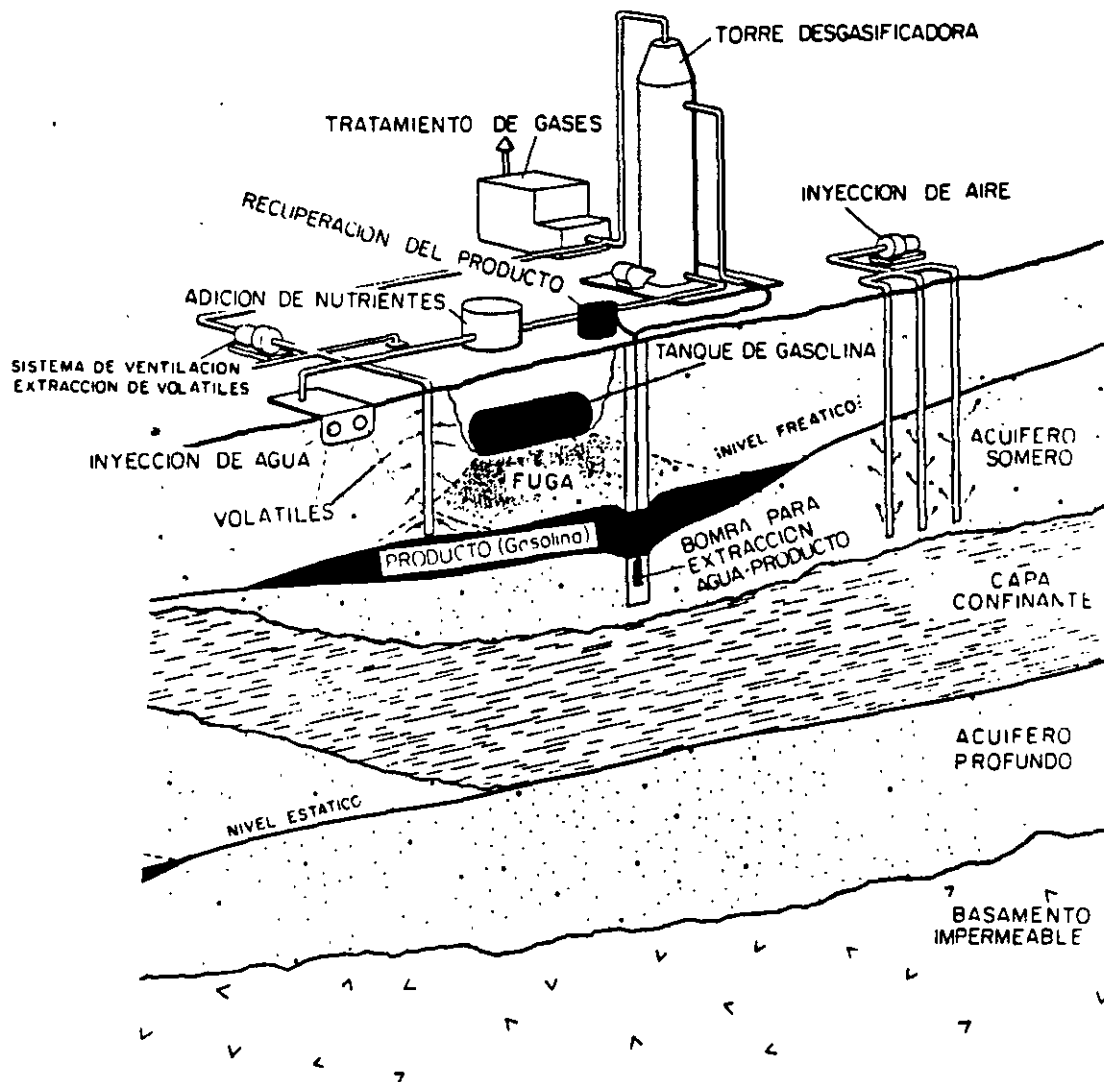


FIGURA 2.- EQUIPO WESTINGHOUSE PARA EL TRATAMIENTO DE
HIDROCARBUROS Y AGUA



DE. ORS ENVIRONMENTAL EQUIPMENT CATALOG

FIGURA 3.- SISTEMA ORS/ENVIRONMENTAL EQUIPMENT PARA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL

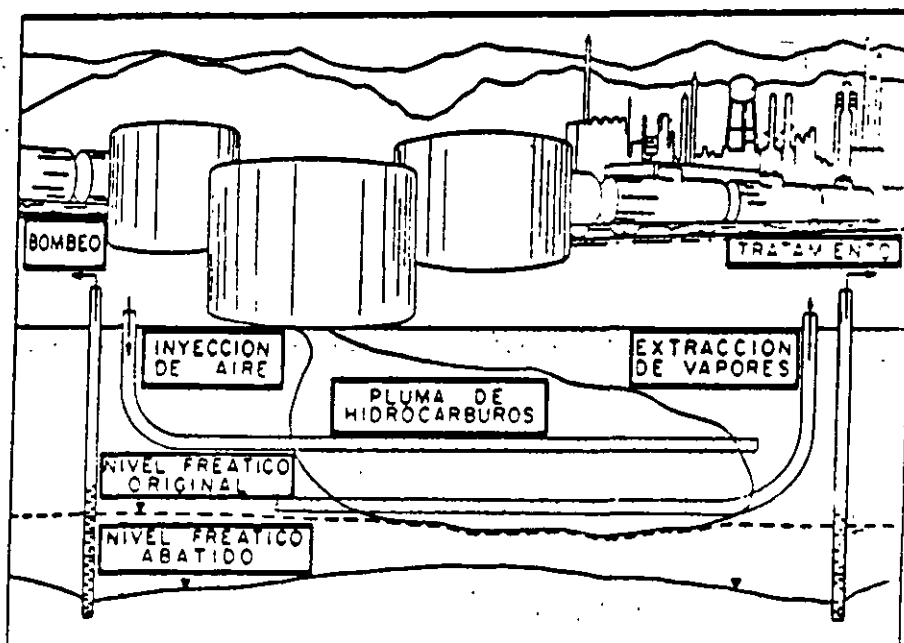


FIGURA 4 . SANEAMIENTO DE HIDROCARBUROS DEL SUBSUELO
MEDIANTE POZOS DIRECCIONALES (DE ENGINEERING-SCIENCE, INC.)

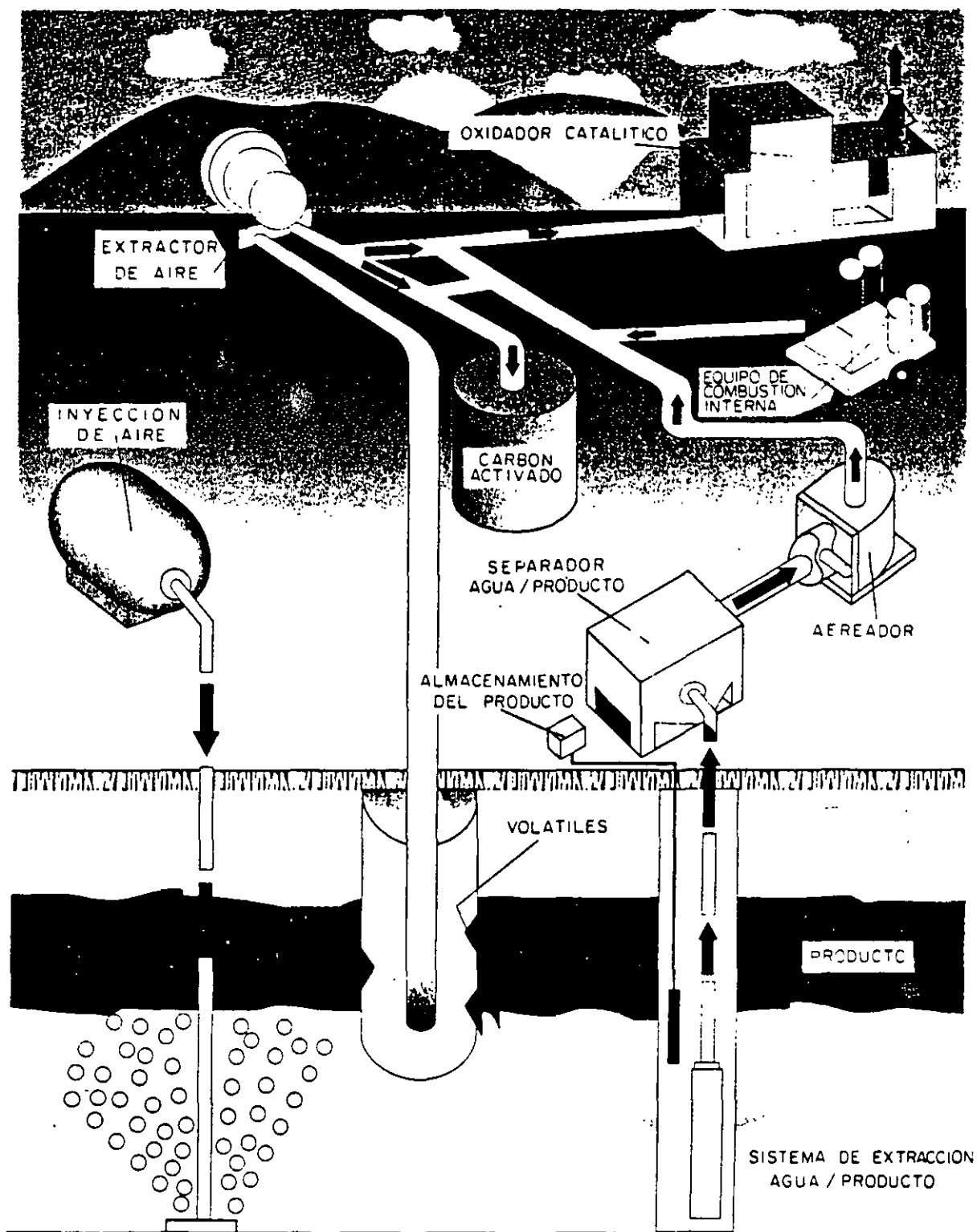


FIGURA 5.- SISTEMA ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS PARA LA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL.

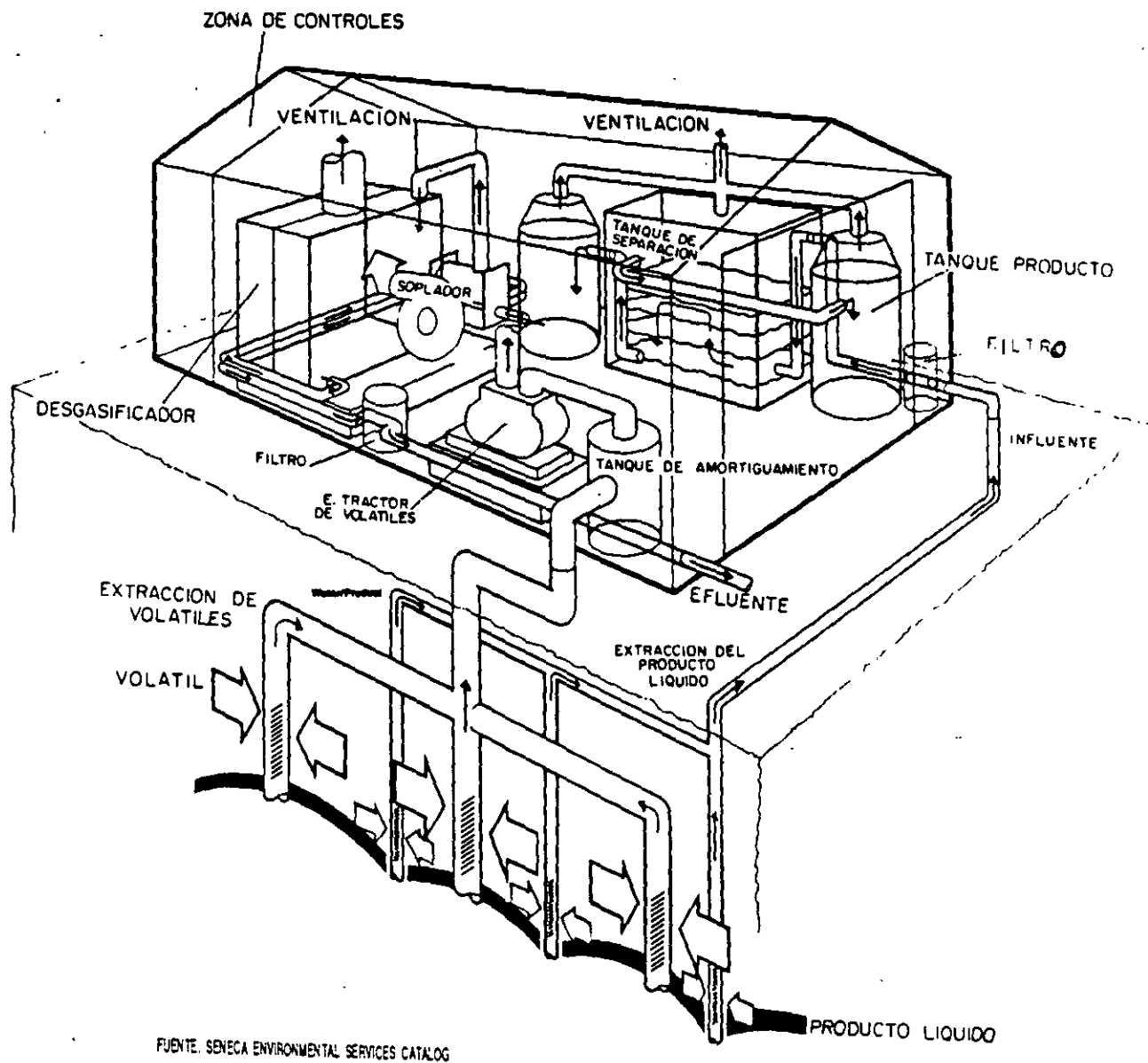


FIGURA 6.- SISTEMA SENECA PARA LA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Selección de Sitios para Disposición de Desechos sólidos

Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Guanajuato, Guanajuato
1998.

RELLENOS SANITARIOS

I.- ESTUDIOS BASICOS PARA LA SELECCION DE SITIOS PARA DISPOSICION DE DESECHOS SOLIDOS

GEOLOGIA: TIPO Y CARACTERISTICAS DE LAS ROCAS

- ESTRUCTURAS
- FALLAS, GEOFISICA
- EROSION
- GEOFISICA

GEOHIDROLOGIA

- ROCAS PERMEABLES
- ROCAS IMPERMEABLES
- PROFUNDIDAD AL N.E.
- DIRECCION DEL FLUJO SUBTERRANEO
- PERMEABILIDAD DEL ACUIFERO

MECANICA DE SUELOS

- PERMEABILIDAD DE LA CAPA SUPERFICIAL

HIDROLOGIA SUPERFICIAL

- ARROYOS
- PRECIPITACION

CALCULO INFILTRACION

- PRECIPITACION
- PERMEABILIDAD
- PENDIENTE

DISEÑO PRELIMINAR

- TOPOGRAFIA
- DISEÑO DE LA BASE
- DISEÑO DE LA CUBIERTA
- RECOLECCION DE LIXIVIADOS
- VENTILACION
- PROTECCION SUPERFICIAL

SISTEMA DE MONITOREO

- DRENAJES DE LIXIVIADOS
- POZOS

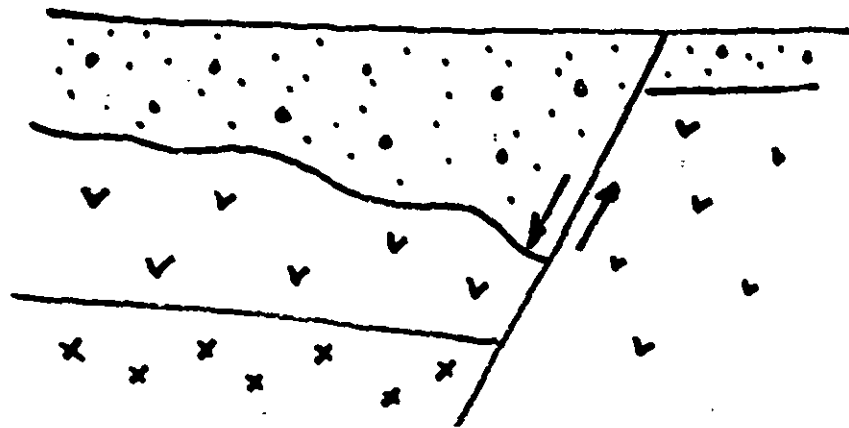
II.- DISEÑO EJECUTIVO Y MANEJO DE RESIDUOS

III.- OTROS ESTUDIOS

- ZONAS HABITADAS
- DIRECCION VIENTOS
- VIAS DE ACCESO

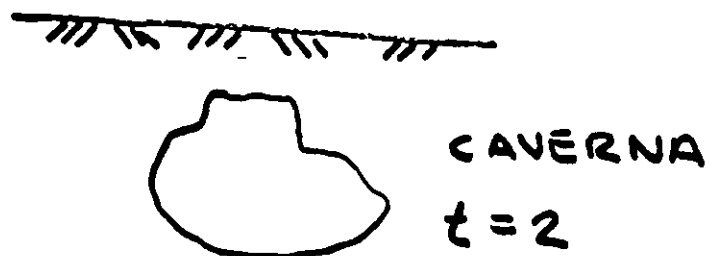
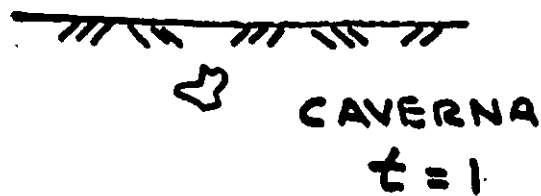
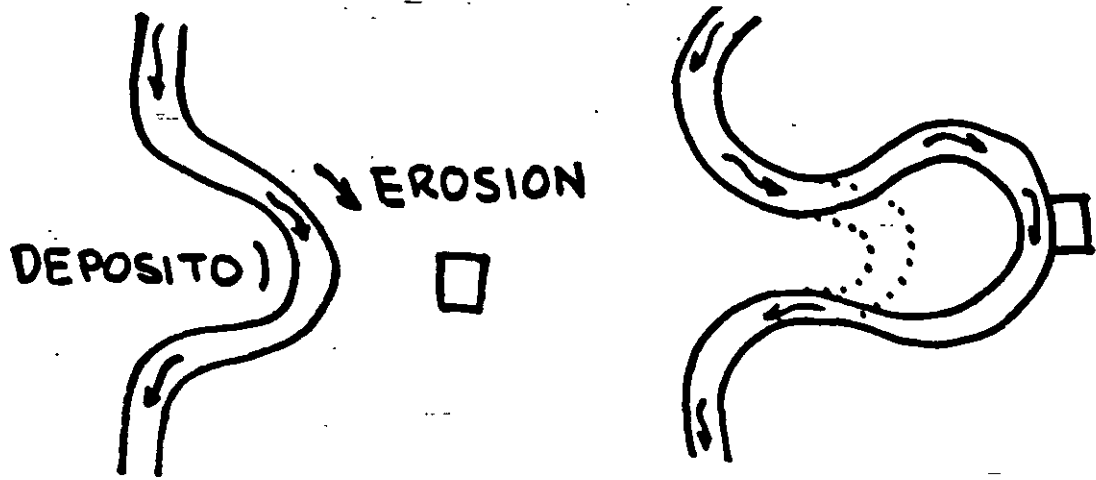
1.- MARCO GEOLOGICO

- GEOLOGIA DEL SUBSUELO
- SEDIMENTOLOGIA
- GEOLOGIA ESTRUCTURAL
- CORTES LITOLOGICOS
- GEOFISICA



MOVIMIENTOS PROPIOS DE LA CORTEZA TERRESTRE

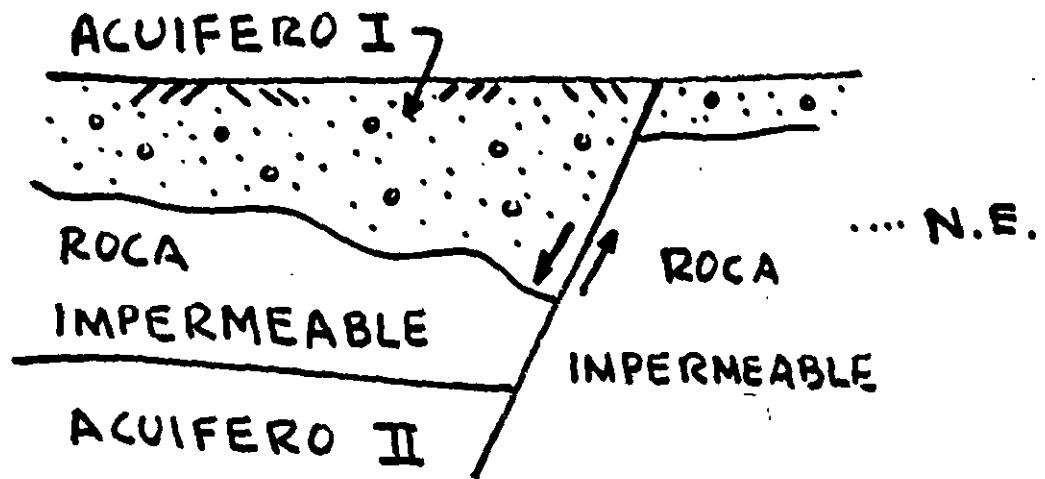
- SISMOS
- FALLAS ACTIVAS
- VULCANISMO
- EROSION
- MOVIMIENTOS DE TIERRA



TIEMPO GEOLOGICO
EN QUE SE PODRIAN
PRODUCIR CAMBIOS
SOBRE EL TERRENO

2: GEOHIDROLOGIA

ROCAS PERMEABLES E IMPERMEABLES



CARACTERISTICAS DE LAS ROCAS

- POROSIDAD
- PERMEABILIDAD
- FLUJO SUBTERRANEO

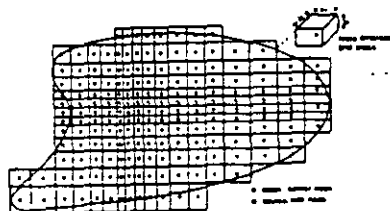
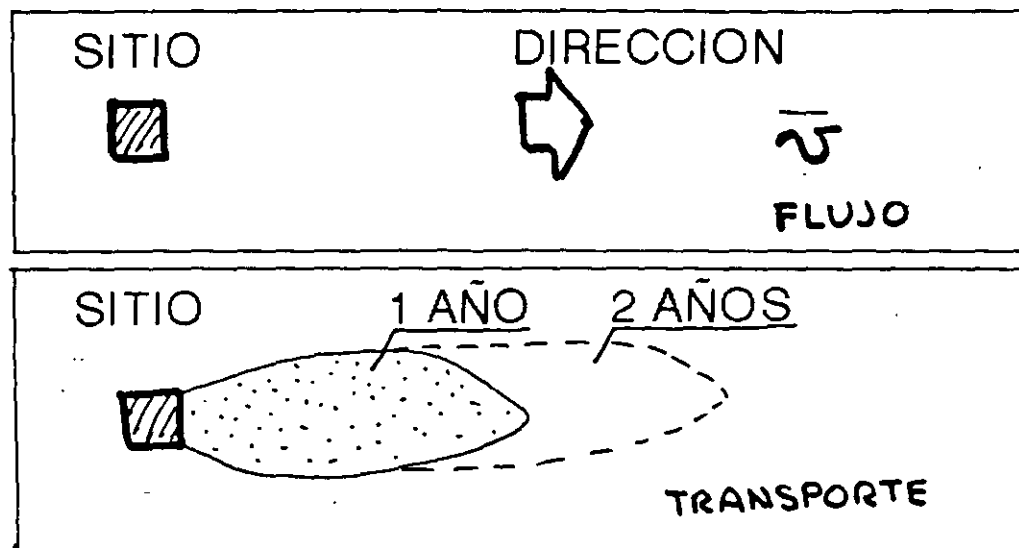
3: MONITOREO

- CONDICIONES ANTERIORES A LA CONSTRUCCION DEL SITIO
- IDENTIFICACION DE LIXIVIADOS
- COMPOSICION DE ROCAS Y LIXIVIADOS
- PROCESOS FQB
- RETENCION, MOVILIDAD

DETECCION DE LA PLUMA CONTAMINANTE

- PERMEABILIDAD
- DIRECCION DEL FLUJO
- REACCIONES QUIMICAS

4- MODELACION DE FLUJO Y TRANSPORTE



OTROS ESTUDIOS

- DIRECCION DE VIENTOS
- CLIMATOLOGIA
- CORRIENTES SUPERFICIALES

PRINCIPLES OF GROUNDWATER FLOW 87

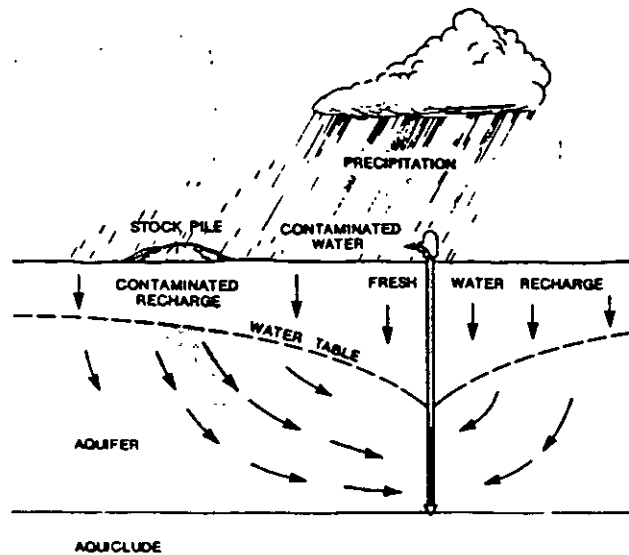


Figure 3-42. Influence of pumping on plume migration (adapted from Deutsch, U.S.G.S. 1963).

DISEÑO

- TOPOGRAFIA DE LA BASE
- TOPOGRAFIA DE LA CUBIERTA
- DRENES EXTERIORES
- DRENES INTERIORES (LIQUIDOS Y GASES)
- ETC.

RESUMEN

1-MARCO GEOHIDROLOGICO

GEOLOGIA, ROCAS PERMEABLES E IMPERMEABLES, PERMEABILIDAD,
FLUJO SUBTERRANEO

2-IDENTIFICACION DE LIXIVIADOS Y SU
COMPORTAMIENTO EN EL SUBSUELO
MONITOREO, TIPO DE LIXIVIADOS, PROCESOS FQB,
DETECCION DE LA PLUMA, MODELACION DE FLUJO Y TRANSPORTE

DISEÑO.- SE DEBE PARTIR DE QUE EL DISEÑO DEL
SITIO NO PERMITIRA FUGAS DE LIXIVIADOS

MONITOREO.- EN CASO DE QUE EXISTIERAN LIXIVIADOS
DEBE CONOCERSE SU COMPORTAMIENTO
FQB Y MOVIMIENTO

ALTERNATIVAS DE SANEAMIENTO.-

FACTORES QUE AFECTAN EL RELLENO

TIPO DE BASURA

TIEMPO

TEMPERATURA AMBIENTE

HUMEDAD

OXIGENO

FACTORES QUE AFECTAN LA CANTIDAD DE LIXIVIADO

PRECIPITACION

NIVEL ESTATICO SOMERO

CUBIERTA

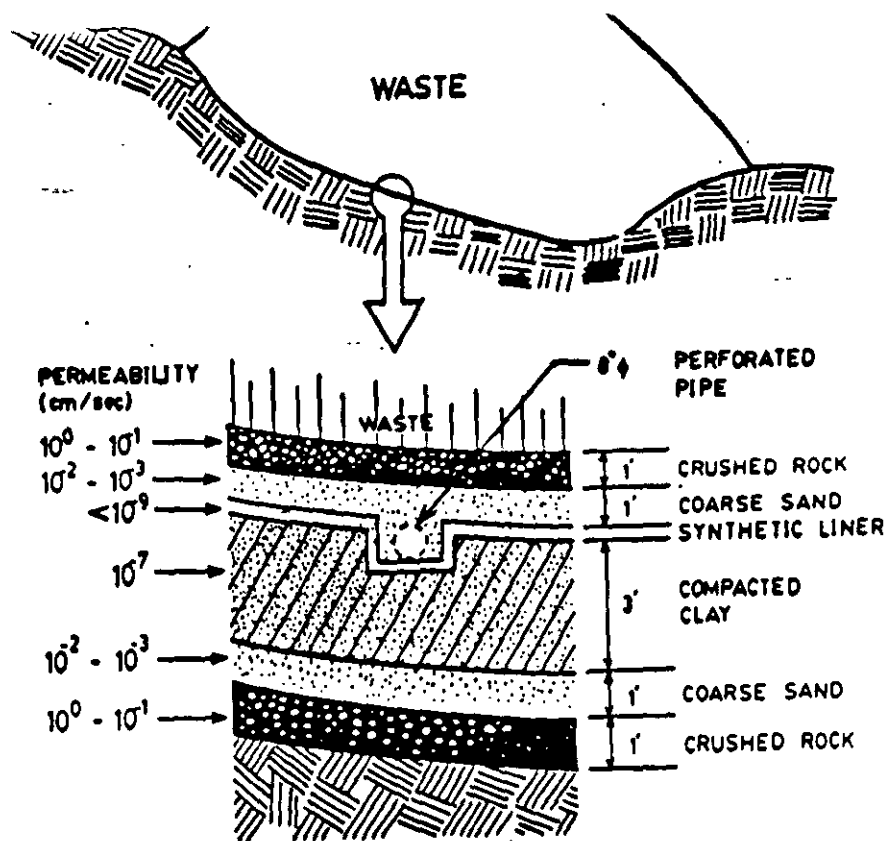
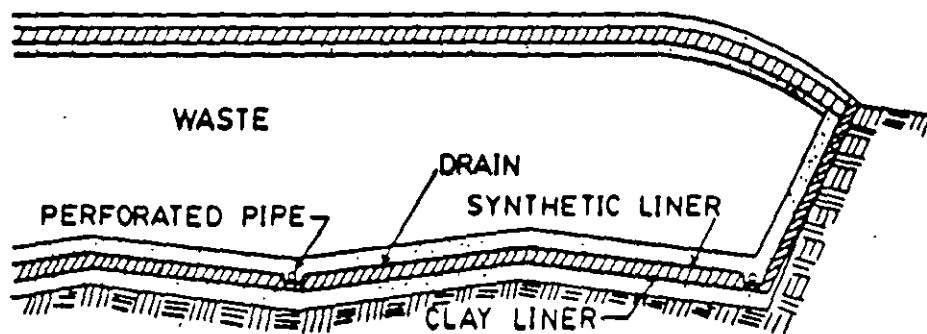
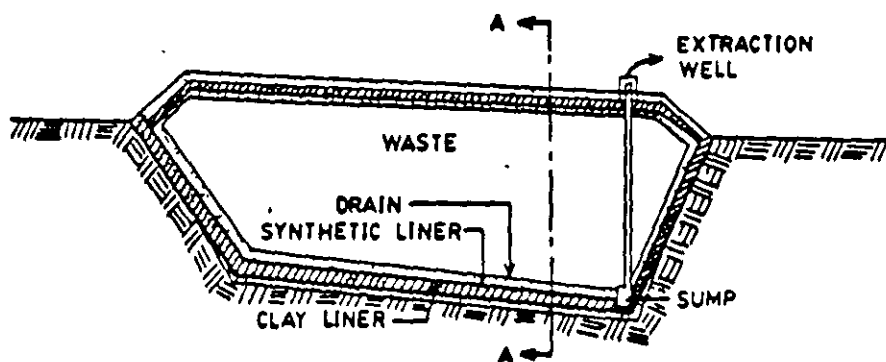


Figure 9-10. Typical landfill liner system.



SECTION A-A

Figure 9-11. Schematic of hazardous waste landfill leachate collection system.

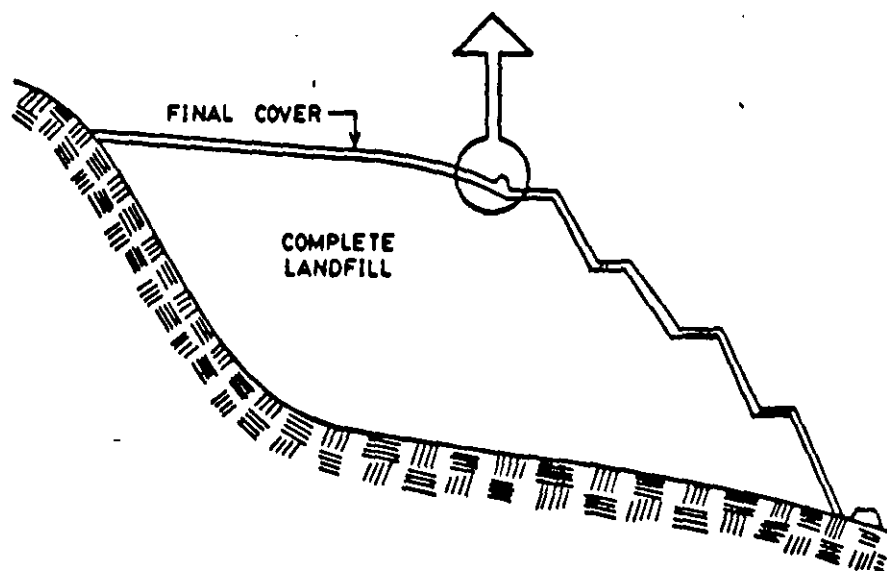
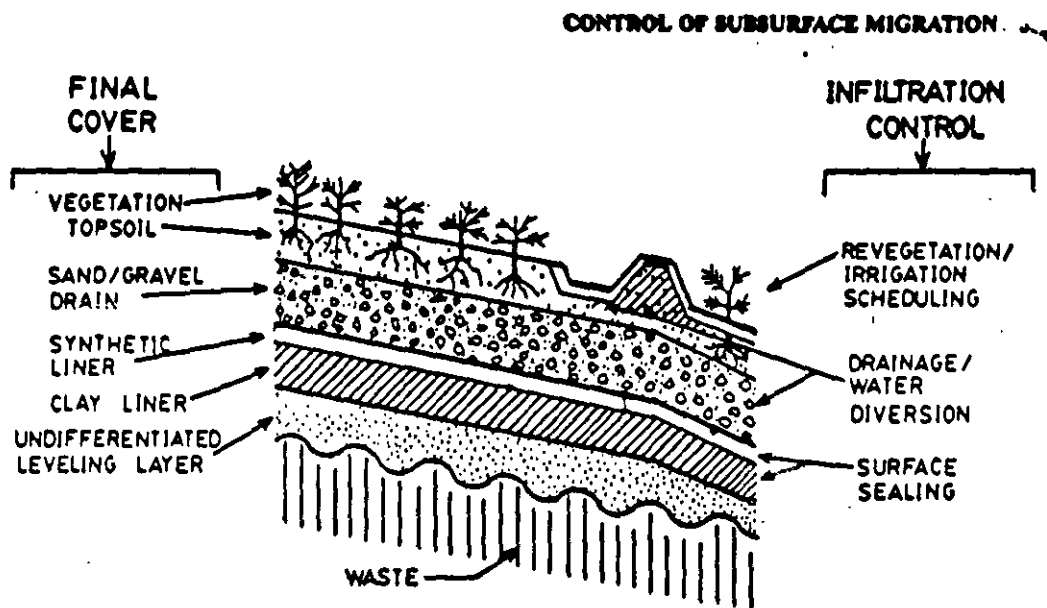
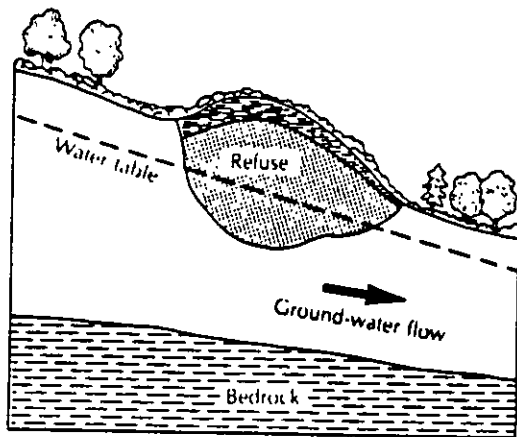
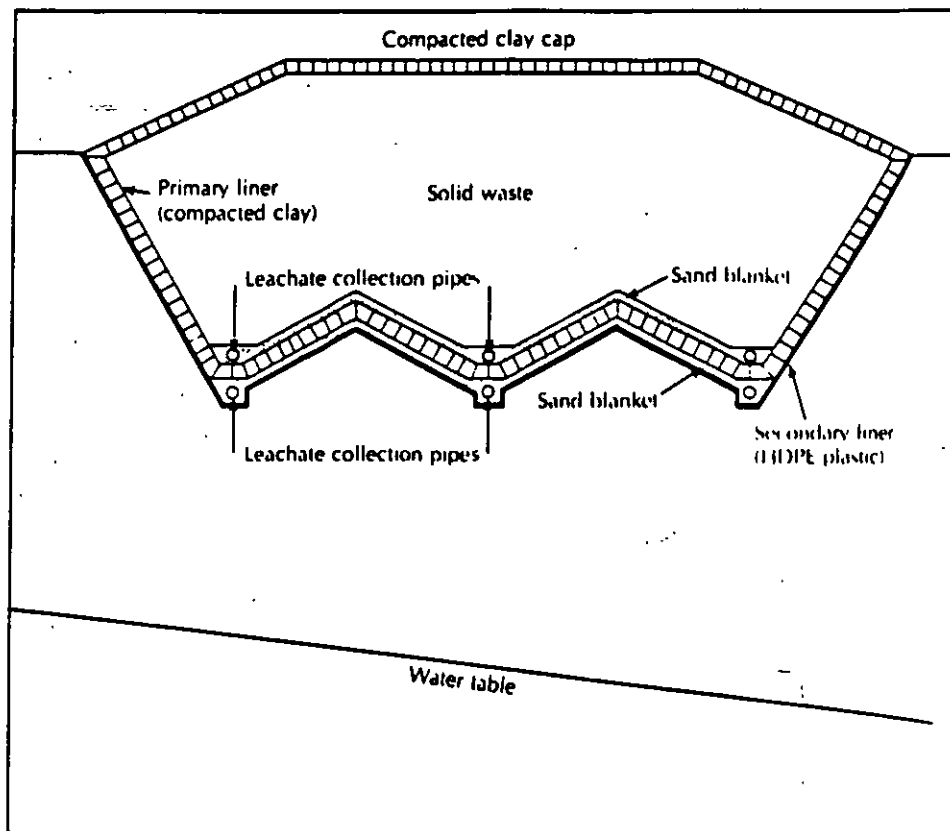
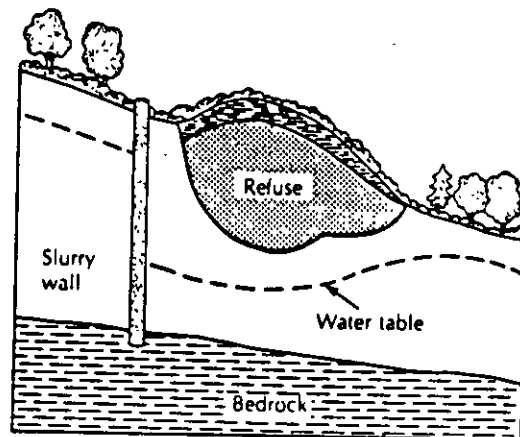


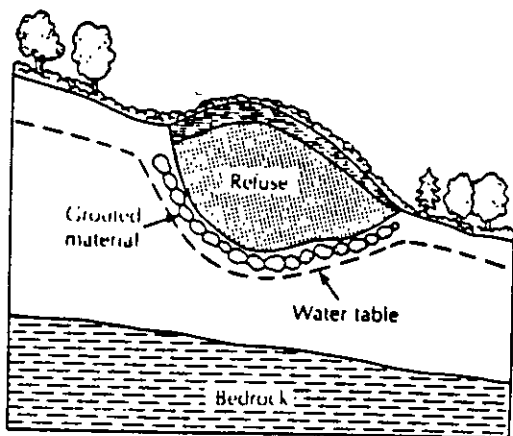
Figure 9-9. Infiltration control technologies.



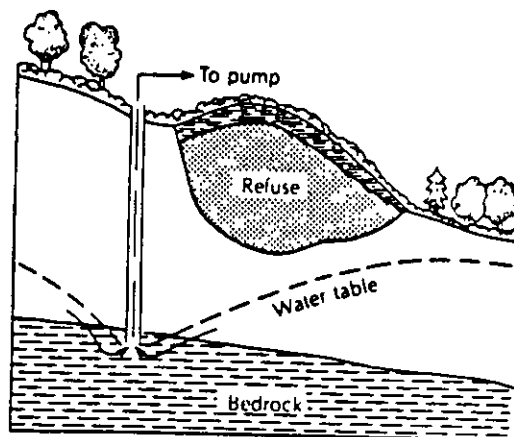
A No control measure



B Upgradient slurry wall to lower water table



C Injection of grout to form a seal on sides and bottom

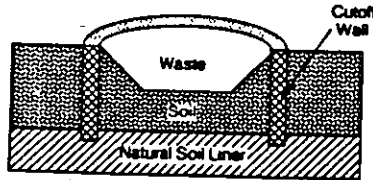


D Gradient control well to lower water table

(A) Waste Buried in a Natural Soil Liner



(B) Waste Buried Above a Natural Soil Liner



(A) Waste Buried in Unit with Engineered Liner

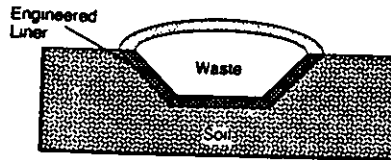


Fig. 5.3 Linings of waste disposal units with (a) natural soils, (b) vertical cutoff walls, and (c) engineered liners.

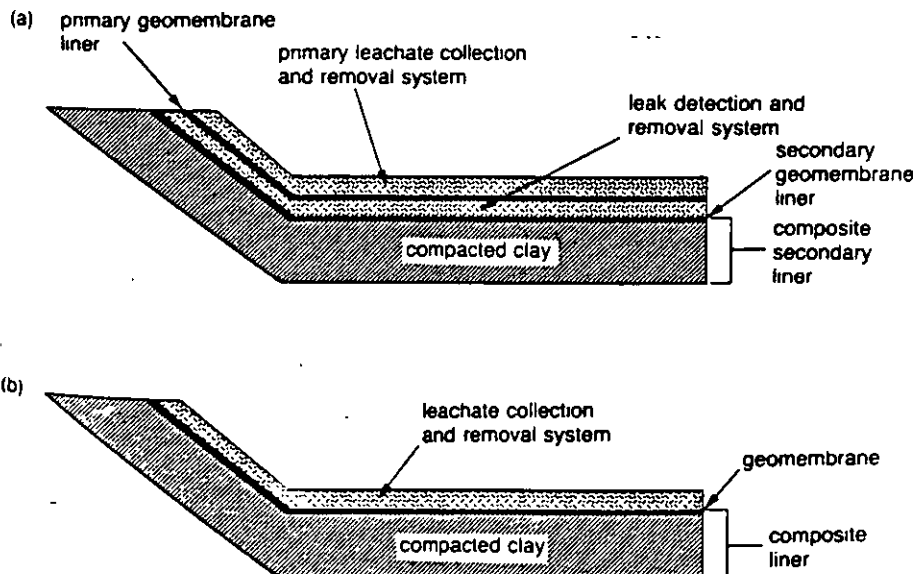


Fig. 5.4 Minimum liner requirements of the US Environmental Protection Agency. (a) for hazardous waste landfills (b) for non-hazardous waste landfills.

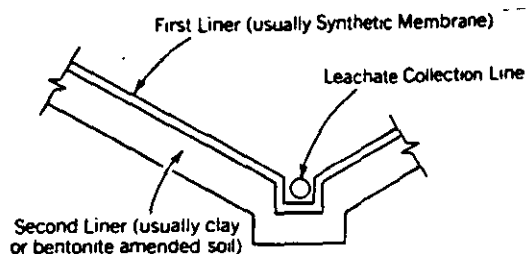


FIG. 1.3. Double liner.

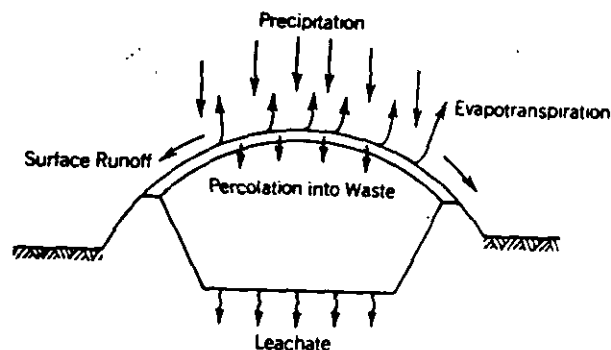


FIG. 3.1. How leachate is generated.

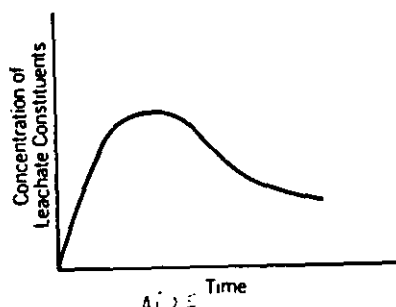


FIG. 3.2. Typical variation of leachate quality with time.

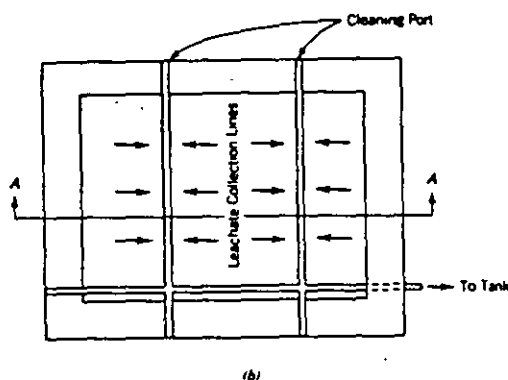
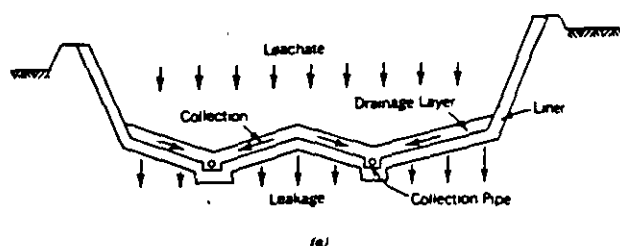


FIG. 6.1. Single lined containment landfill: (a) cross section; (b) plan.

TABLE 3.14. Typical Leachate Quality of Municipal Waste*

SI Number	Parameter	Overall Range (mg/liter except as indicated)
1	TDS	584-55,000
2	Specific conductance	480-72,500 $\mu\text{mho/cm}$
3	Total suspended solids	2-140,900
4	BOD	ND-195,000
5	COD	6.6-99,000
6	TOC	ND-40,000
7	pH	3.7-8.9 units
8	Total alkalinity	ND-15,050
9	Hardness	0.1-225,000
10	Chloride	2-11,375
11	Calcium	3.0-2,500
12	Sodium	12-6,010
13	Total Kjeldahl nitrogen	2-3,320
14	Iron	ND-4,000
15	Potassium	ND-3,200
16	Magnesium	4.0-780
17	Ammonia-nitrogen	ND-1,200
18	Sulfate	ND-1,850
19	Aluminum	ND-85
20	Zinc	ND-731
21	Manganese	ND-400
22	Total phosphorus	ND-234
23	Boron	0.87-13
24	Barium	ND-12.5
25	Nickel	ND-7.5
26	Nitrate-nitrogen	ND-250
27	Lead	ND-14.2
28	Chromium	ND-5.6
29	Antimony	ND-3.19
30	Copper	ND-9.0
31	Thallium	ND-0.78
32	Cyanide	ND-6
33	Arsenic	ND-70.2
34	Molybdenum	0.01-1.43
35	Tin	ND-0.16
36	Nitrite-nitrogen	ND-1.46
37	Selenium	ND-1.85
38	Cadmium	ND-0.4
39	Silver	ND-1.96
40	Beryllium	ND-0.36
41	Mercury	ND-3.0
42	Turbidity	40-500 Jackson units

Based on McGinley and Kmet (1984) and Lu et al. (1981)

*Several bacteria and fungi species and several priority pollutants are found in the leachate

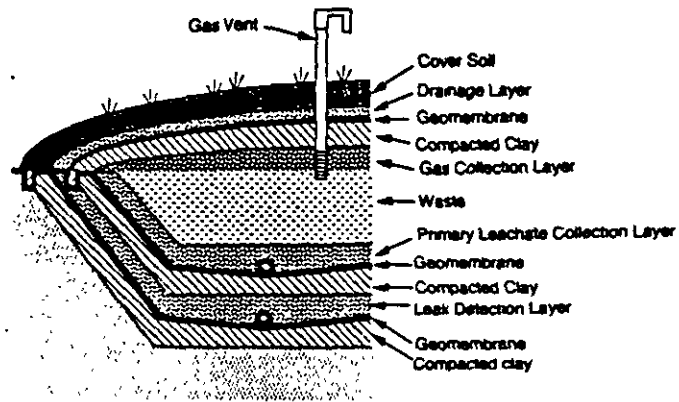


Fig. 5.6 Double composite liner system and multiple-component cover system in a waste containment unit.

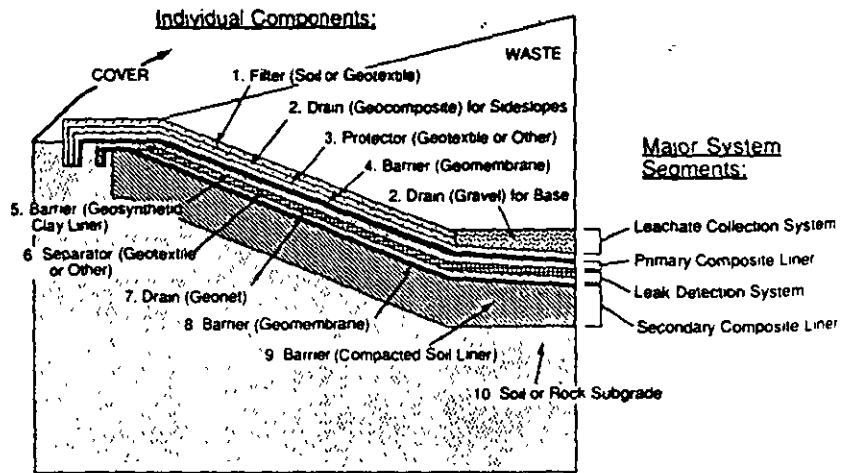


Fig. 5.7 Lining system recommended by Daniel and Koerner (1991).

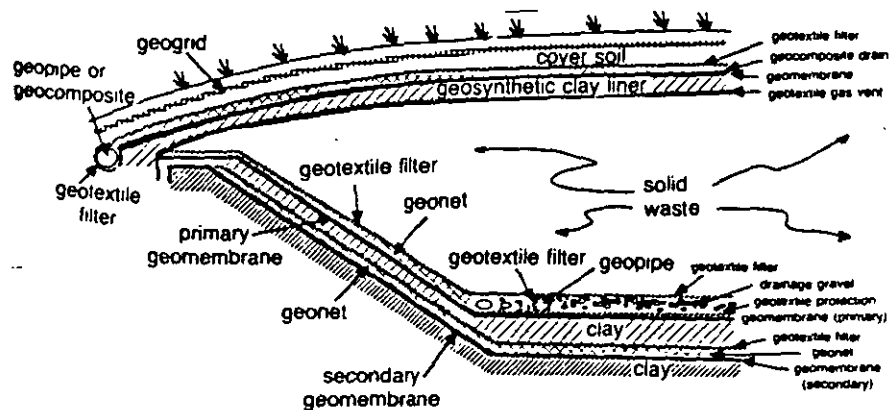


Fig. 8.2 Cross-section of solid waste landfill liner system and closure system illustrating the major use of geosynthetics.

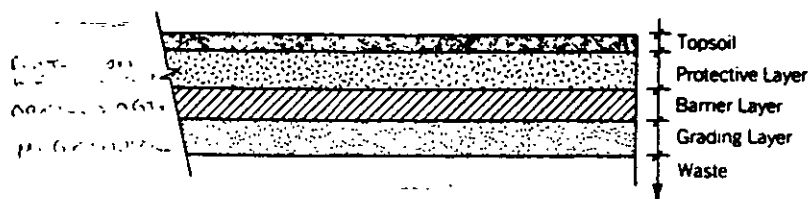


FIG. 8.23. Landfill final cover.

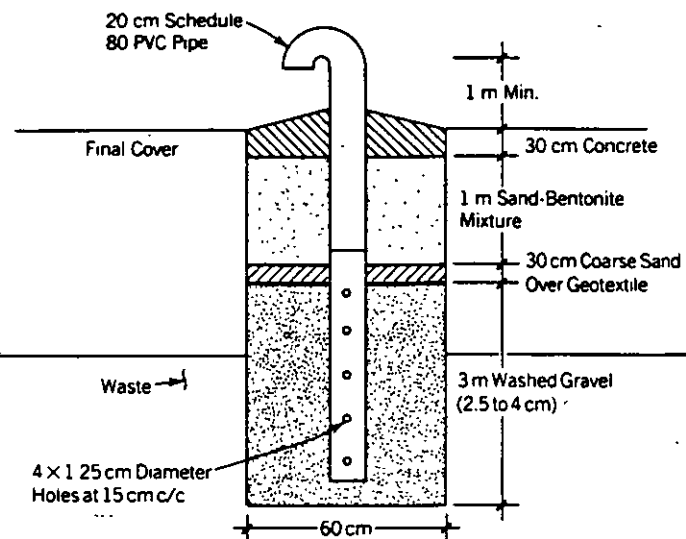


FIG. 8.24. Typical detail of an isolated gas vent.

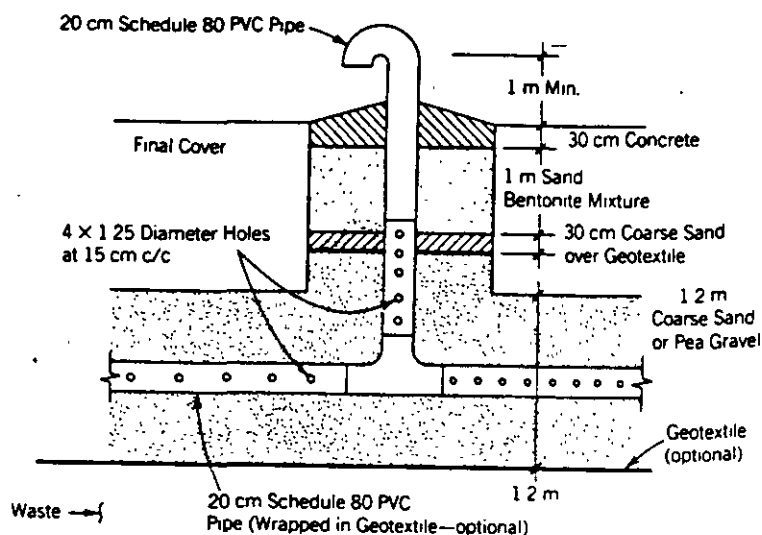


FIG. 8.25. Typical detail of a passive gas venting system with a header pipe

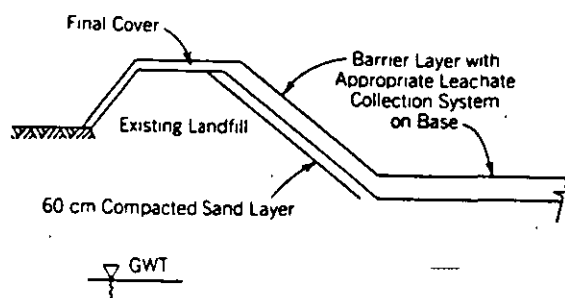
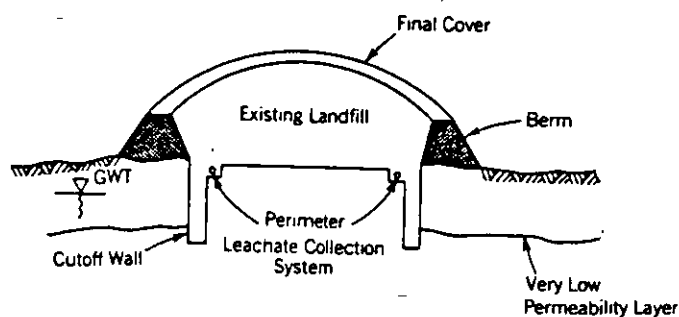


FIG. 8.33. Retrofitting of partially full existing landfill with a basal leachate collection system.

DESIGN OF LANDFILL ELEMENTS



34. Retrofitting of existing landfill with a perimeter leachate collection system.

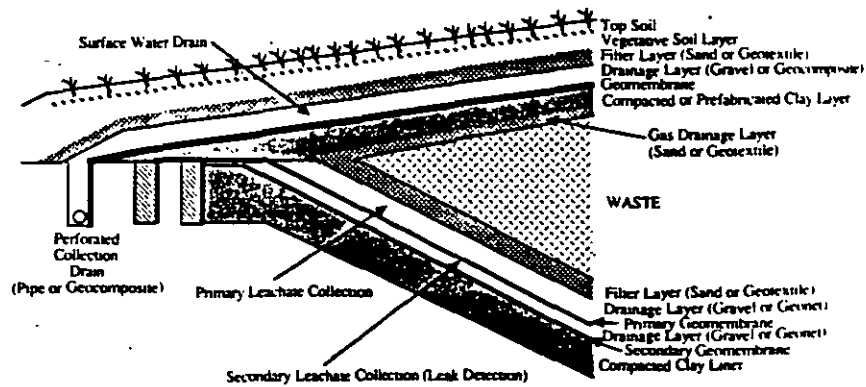


Fig. 9.1 Cross-section of solid waste facility illustrating various drainage layers involved in a liquid management program.

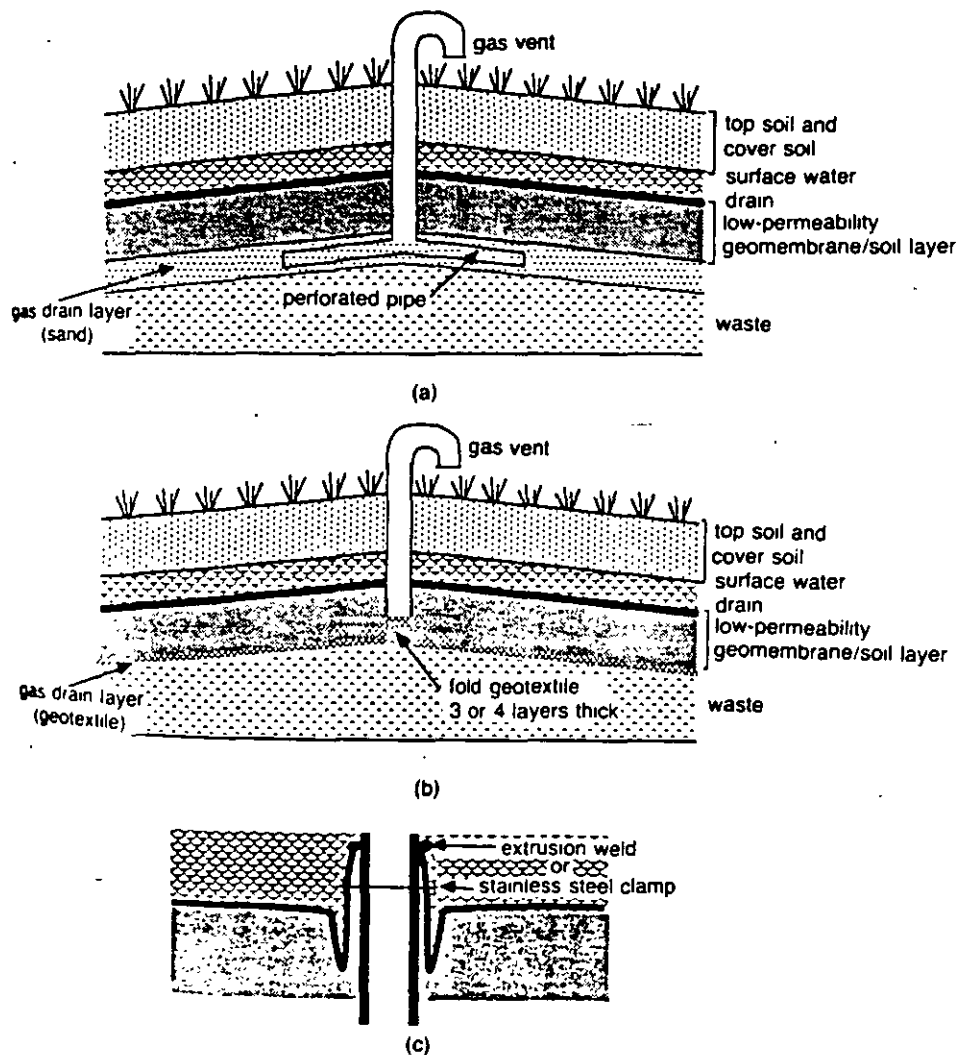


Fig. 9.9 Schemes for methane gas removal through final cover liner system: (a) natural soil vent system, after EPA (1989); (b) geotextile vent system; (c) suggested bellows at geomembrane penetration.

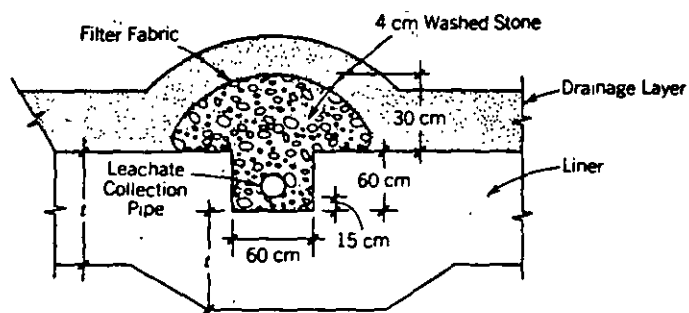


FIG. 8.1. Leachate collection trench detail.

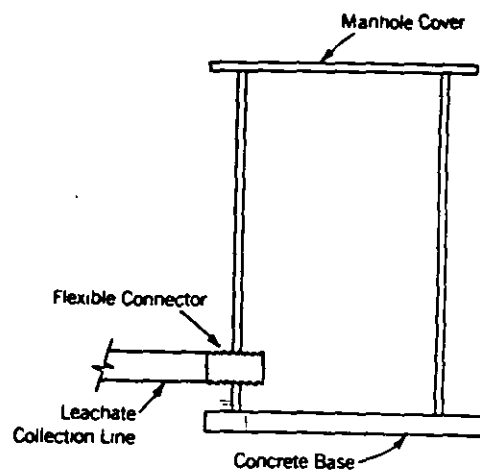


FIG. 8.5. Typical detail of landfill manhole.

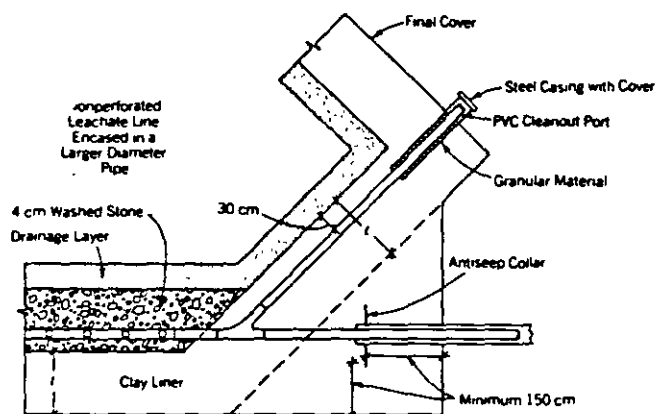


FIG. 8.2. Typical cleanout port.

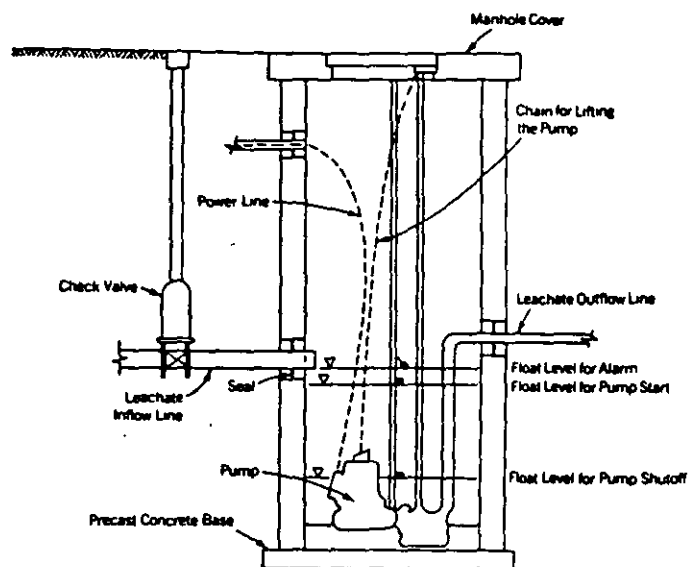


FIG. 8.7. Lift station.

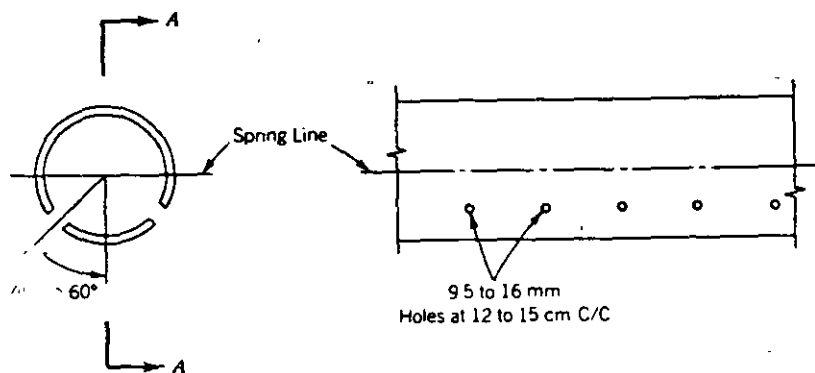


FIG. 8.6. Perforations in leachate collection pipes.

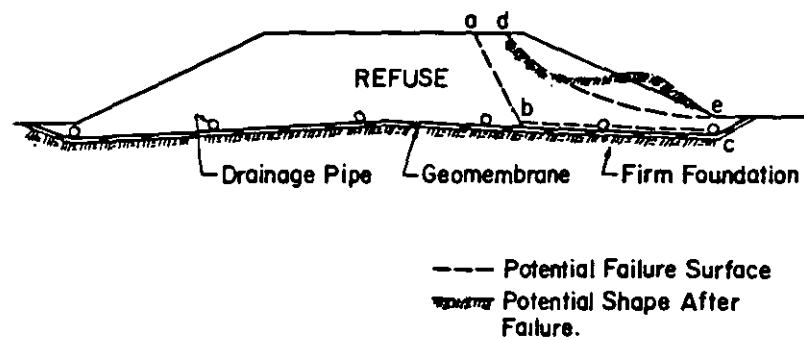


Fig. 11.1 Stability of a landfill on firm base.

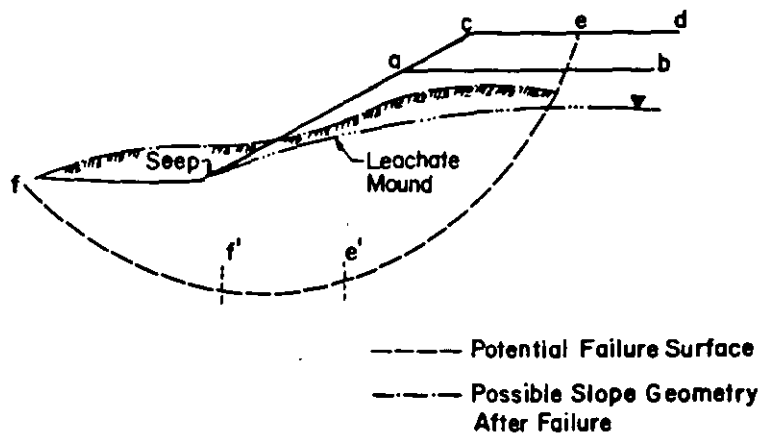


Fig. 11.2 Stability of a landfill expansion on soft base.

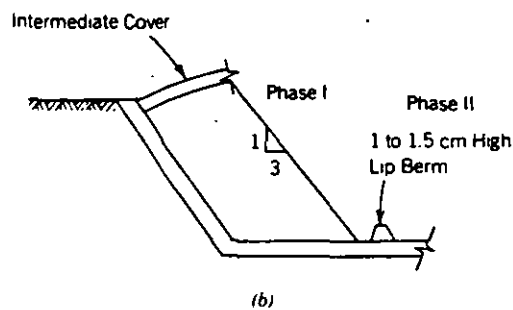
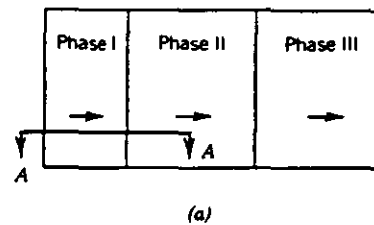


FIG. 11.3. Phasing plan for single stage landfill: (a) plan; (b) cross section A-A

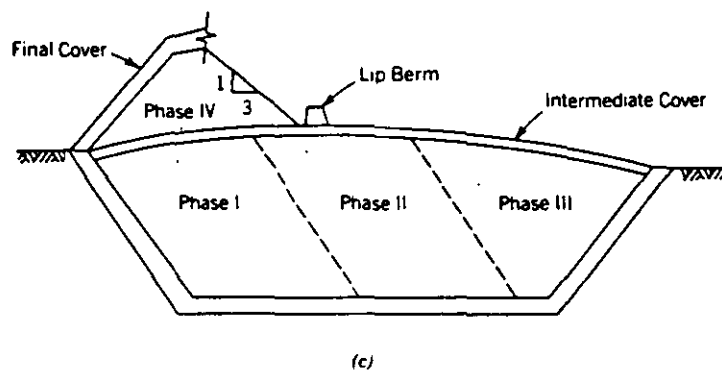
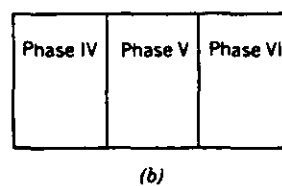
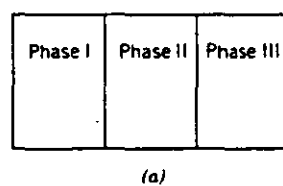


FIG. 11.4. Phasing plan for a multiphase landfill: (a) lower phase; (b) upper phase; (c) cross section.

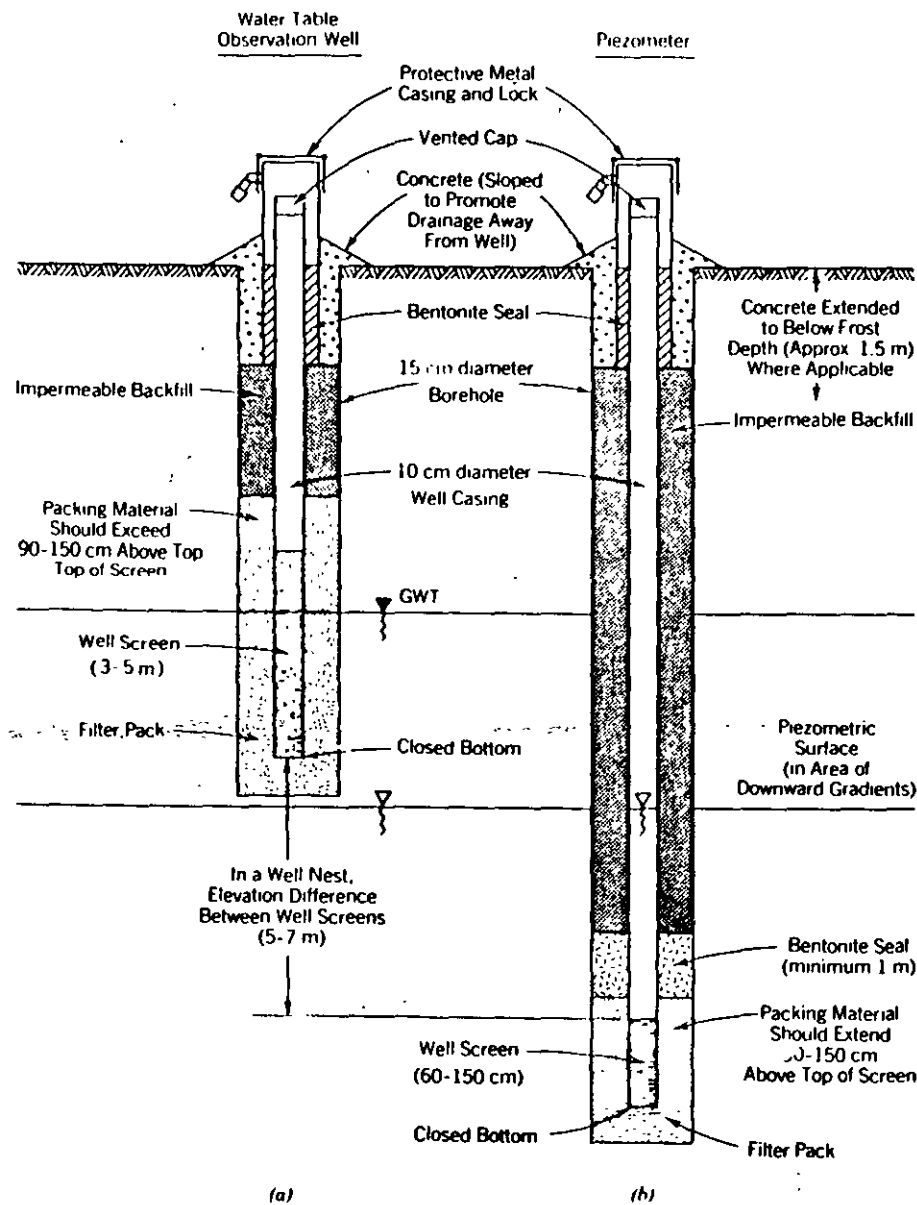


FIG. 10.13. Typical detail of a water table observation well and piezometer. Not to scale.

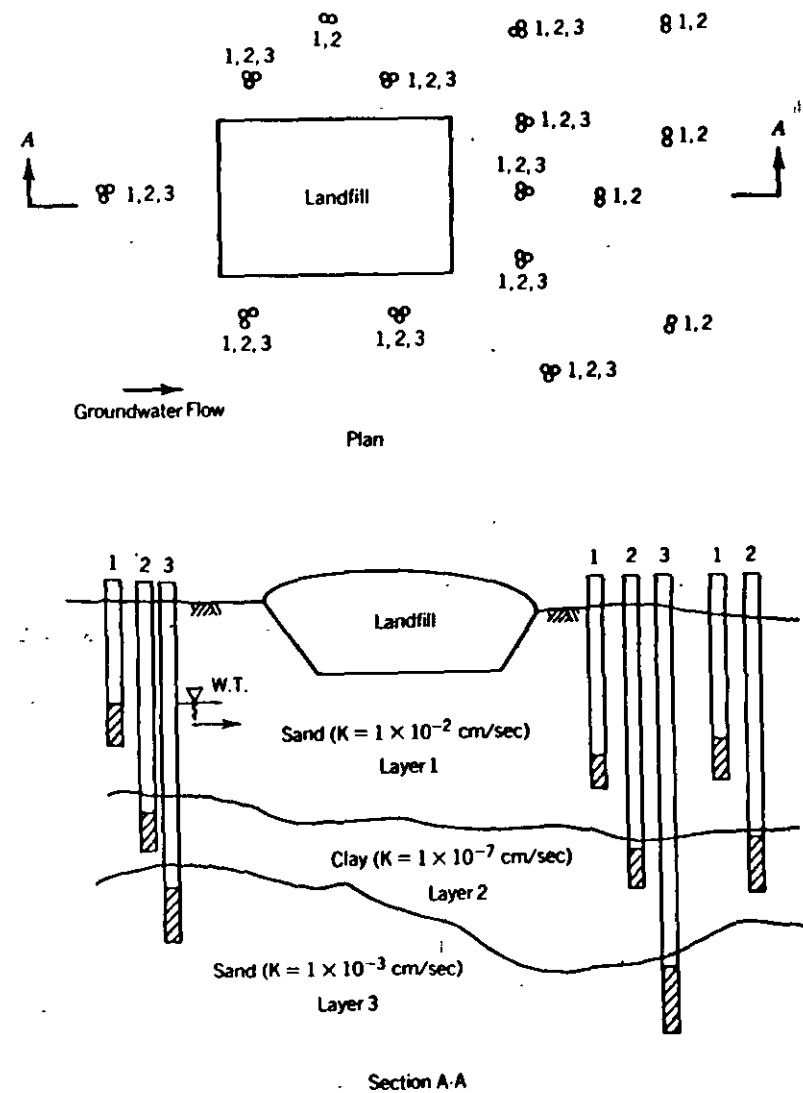
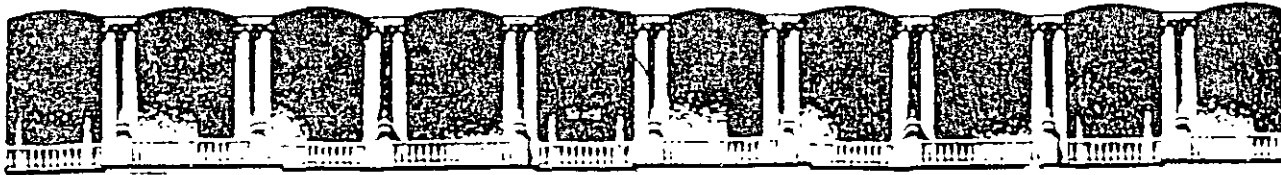


FIG. 10.11. Monitoring of an interbedded aquifer.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

Biol. Héctor Lesser H.
Guanajuato, Guanajuato
1998.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

TITULO PRIMERO

Disposiciones Generales

CAPÍTULO I

Normas Preliminares

ARTICULO 1o.- La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto propiciar el desarrollo sustentable y establecer las bases para:

- I.- Garantizar el derecho de toda persona a vivir en un medio ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar;
- II.- Definir los principios de la política ambiental y los instrumentos para su aplicación;
- III.- La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;
- IV.- La preservación y protección de la biodiversidad, así como el establecimiento y administración de las áreas naturales protegidas.
- V.- El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;
- VI.- La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;
- VII.-Garantizar la participación corresponsable de las personas, en forma individual o colectiva, en la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;
- VIII. El ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, bajo el principio de concurrencia previsto en el artículo 73 fracción XXIX - G de la Constitución;
- IX.- El establecimiento de los mecanismos de coordinación, inducción y concertación entre autoridades, entre éstas y los sectores social y privado, así como con personas y grupos sociales, en materia ambiental, y
- X.- El establecimiento de medidas de control y de seguridad para garantizar el cumplimiento y la aplicación de esta Ley y de las disposiciones que de ella se deriven, así como para la imposición de las sanciones administrativas y penales que correspondan.

En todo lo no previsto en la presente Ley, se aplicarán las disposiciones contenidas en otras leyes relacionadas con las materias que regula este ordenamiento.

ARTICULO 2o.- Se consideran de utilidad pública:

- I.- El ordenamiento ecológico del territorio nacional en los casos previstos por ésta y las demás leyes aplicables;
- II.- El establecimiento, protección y preservación de las áreas naturales protegidas y de las zonas de restauración ecológica;
- III.- La formulación y ejecución de acciones de protección y preservación de la biodiversidad del territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, así como el aprovechamiento de material genético; y
- IV.- El establecimiento de zonas intermedias de salvaguardia, con motivo de la presencia de actividades consideradas como riesgosas.

ARTICULO 3o.- Para los efectos de esta Ley se entiende por:

- I.- Ambiente: El conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados;
- II.- Áreas naturales protegidas: Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en donde los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano o que requieren ser preservadas y restauradas y están sujetas al régimen previsto en la presente Ley;
- III.- Aprovechamiento sustentable: La utilización de los recursos naturales en forma que se respete la integridad funcional y las capacidades de carga de los ecosistemas de los que forman parte dichos recursos, por periodos indefinidos;
- IV.- Biodiversidad: La variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente, incluidos, entre otros, los ecosistemas terrestres, marinos y otros ecosistemas acuáticos y los complejos ecológicos de los que forman parte; comprende la diversidad dentro de cada especie, entre las especies y de los ecosistemas;
- V.- Biotecnología: Toda aplicación tecnológica que utilice recursos biológicos, organismos vivos o sus derivados para la creación o modificación de productos o procesos para usos específicos;
- VI.- Contaminación: La presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico;
- VII.- Contaminante: Toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural;
- VIII.- Contingencia ambiental: Situación de riesgo, derivada de actividades humanas o fenómenos naturales, que puede poner en peligro la integridad de uno o varios ecosistemas;
- IX.- Control: Inspección, vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas en este ordenamiento;
- X.- Criterios ecológicos: Los lineamientos obligatorios contenidos en la presente Ley, para orientar las acciones de preservación y restauración del equilibrio ecológico, el aprovechamiento sustentable de los recursos

naturales y la protección al ambiente, que tendrán el carácter de instrumentos de la política ambiental;

- XI.- Desarrollo Sustentable: El proceso evaluable mediante criterios e indicadores del carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, que se funda en medidas apropiadas de preservación del equilibrio ecológico; protección del ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras;
- XII.- Desequilibrio ecológico: La alteración de las relaciones de interdependencia entre los elementos naturales que conforman el ambiente, que afecta negativamente la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos;
- XIII.- Ecosistema: La unidad funcional básica de interacción de los organismos vivos entre sí y de éstos con el ambiente, en un espacio y tiempo determinados
- XIV.- Equilibrio ecológico: La relación de interdependencia entre los elementos que conforman el ambiente que hace posible la existencia, transformación y desarrollo del hombre y demás seres vivos;
- XV.- Elemento natural: Los elementos físicos, químicos y biológicos que se presentan en un tiempo y espacio determinado sin la inducción del hombre;
- XVI.- Emergencia ecológica: Situación derivada de actividades humanas o fenómenos naturales que al afectar severamente a sus elementos, pone en peligro a uno o varios ecosistemas;
- XVII. Fauna silvestre: Las especies animales que subsisten sujetas a los procesos de selección natural y que se desarrollan libremente, incluyendo sus poblaciones menores que se encuentran bajo control del hombre, así como los animales domésticos que por abandono se tornen salvajes y por ello sean susceptibles de captura y apropiación.
- XVII Flora silvestre: Las especies vegetales así como los hongos, que subsisten sujetas a los procesos de selección natural y que se desarrollan libremente, incluyendo las poblaciones o especímenes de estas especies que se encuentran bajo control del hombre.
- XIX - Impacto ambiental: Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza;
- XX.- Manifestación del impacto ambiental: El documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que sea negativo;
- XXI.- Material genético: Todo material de origen vegetal, animal, microbiano o de otro tipo, que contenga unidades funcionales de herencia.
- XXII. Material peligroso: Elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, represente un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas;
- XXII Ordenamiento ecológico: El instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, con el fin de lograr la protección del medio ambiente y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento de los mismos;
- XXI Preservación: El conjunto de políticas y medidas para mantener las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los ecosistemas y hábitat naturales, así como conservar las poblaciones viables de especies en

V.- sus entornos naturales y los componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitat naturales;

XXV.Prevenición: El conjunto de disposiciones y medidas anticipadas para evitar el deterioro del ambiente;

XXV Protección: El conjunto de políticas y medidas para mejorar el ambiente y controlar su deterioro;

I.-

XXV Recursos biológicos: Los recursos genéticos, los organismos o partes de ellos, las poblaciones, o cualquier

II.- otro componente biótico de los ecosistemas con valor o utilidad real o potencial para el ser humano;

XXV Recursos genéticos: El material genético de valor real o potencial;

III.-

XXI Recurso natural: El elemento natural susceptible de ser aprovechado en beneficio del hombre;

X.-

XXX.Región ecológica: La unidad del territorio nacional que comparte características ecológicas comunes;

XXX Residuo: Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción,

I.- consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó;

XXX Residuos peligrosos: Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características

II.- corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente;

XXX Restauración: Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que

III.- propician la evolución y continuidad de los procesos naturales;

XXX Secretaría: La Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, y

IV.-

XXX Vocación natural: Condiciones que presenta un ecosistema para sostener una o varias actividades sin que se

V.- produzcan desequilibrios ecológicos.

CAPÍTULO II

Distribución de Competencias y Coordinación

ARTICULO 4o.- La Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios ejercerán sus atribuciones en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, de conformidad con la distribución de competencias prevista en esta Ley y en otros ordenamientos legales.

ARTICULO 5o.- Son facultades de la Federación,

I.- La formulación y conducción de la política ambiental nacional;

II.- La aplicación de los instrumentos de la política ambiental previstos en esta Ley, en los términos en ella establecidos, así como la regulación de las acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente que se realicen en bienes y zonas de jurisdicción federal;

III.- La atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico en el territorio nacional o en las zonas sujetas a

la soberanía y jurisdicción de la nación, originados en el territorio o zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de otros Estados, o en zonas que estén más allá de la jurisdicción de cualquier Estado;

- IV.- La atención de los asuntos que, originados en el territorio nacional o las zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de la nación afecten el equilibrio ecológico del territorio o de las zonas sujetas a la soberanía o jurisdicción de otros Estados, o a las zonas que estén más allá de la jurisdicción de cualquier Estado;
- V.- La expedición de las normas oficiales mexicanas y la vigilancia de su cumplimiento en las materias previstas en esta Ley;
- VI.- La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas, y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas, así como para la preservación de los recursos naturales, de conformidad con esta Ley, otros ordenamientos aplicables y sus disposiciones reglamentarias;
- VII.- La participación en la prevención y el control de emergencias y contingencias ambientales, conforme a las políticas y programas de protección civil que al efecto se establezcan;
- VIII. El establecimiento, regulación, administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas de competencia federal;
- IX.- La formulación, aplicación y evaluación de los programas de ordenamiento ecológico general del territorio y de los programas de ordenamiento ecológico marino a que se refiere el artículo 19 BIS de esta Ley;
- X.- La evaluación del impacto ambiental de las obras o actividades a que se refiere el artículo 28 de esta Ley y, en su caso, la expedición de las autorizaciones correspondientes;
- XI.- La regulación del aprovechamiento sustentable, la protección y la preservación de los recursos forestales, el suelo, las aguas nacionales, la biodiversidad, la flora, la fauna y los demás recursos naturales de su competencia;
- XII.- La regulación de la contaminación de la atmósfera, proveniente de todo tipo de fuentes emisoras, así como la prevención y el control en zonas o en caso de fuentes fijas y móviles de jurisdicción federal;
- XIII. El fomento de la aplicación de tecnologías, equipos y procesos que reduzcan las emisiones y descargas contaminantes provenientes de cualquier tipo de fuente, en coordinación con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios; así como el establecimiento de las disposiciones que deberán observarse para el aprovechamiento sustentable de los energéticos;
- XIV. La regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, sustancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente;
- XV.- La regulación de la prevención de la contaminación ambiental originada por ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales para el equilibrio ecológico y el ambiente;
- XVI. La promoción de la participación de la sociedad en materia ambiental, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley;
- XVII La integración del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales y su puesta a disposición al público en los términos de la presente Ley;
- XVII La emisión de recomendaciones a autoridades Federales, Estatales y Municipales, con el propósito de

I.- promover el cumplimiento de la legislación ambiental;

XIX. La vigilancia y promoción, en el ámbito de su competencia, del cumplimiento de esta Ley y los demás ordenamientos que de ella se deriven;

XX.- La atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico de dos o más entidades federativas, y

XXI. Las demás que esta Ley u otras disposiciones legales atribuyan a la Federación.

ARTICULO 60.- Las atribuciones que esta Ley otorga a la Federación, serán ejercidas por el Poder Ejecutivo Federal a través de la Secretaría, salvo las que directamente correspondan al Presidente de la República por disposición expresa de la ley.

Cuando, por razón de la materia y de conformidad con la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal u otras disposiciones legales aplicables, se requiera de la intervención de otras dependencias, la Secretaría ejercerá sus atribuciones en coordinación con las mismas.

Las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal que ejerzan atribuciones que les confieren otros ordenamientos cuyas disposiciones se relacionen con el objeto de la presente Ley, ajustarán su ejercicio a los criterios para preservar el equilibrio ecológico, aprovechar sustentablemente los recursos naturales y proteger el ambiente en ella incluidos, así como a las disposiciones de los reglamentos, normas oficiales mexicanas, programas de ordenamiento ecológico y demás normatividad que de la misma se derive.

ARTICULO 70.- Corresponden a los Estados, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:

I.- La formulación, conducción y evaluación de la política ambiental estatal;

II.- La aplicación de los instrumentos de política ambiental previstos en las leyes locales en la materia, así como la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente que se realice en bienes y zonas de jurisdicción estatal, en las materias que no estén expresamente atribuidas a la Federación;

III.- La prevención y control de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, así como por fuentes móviles, que conforme a lo establecido en esta Ley no sean de competencia Federal;

IV.- La regulación de actividades que no sean consideradas altamente riesgosas para el ambiente, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 149 de la presente Ley;

V.- El establecimiento, regulación, administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas previstas en la legislación local, con la participación de los gobiernos municipales;

VI.- La regulación de los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley;

VII.- La prevención y el control de la contaminación generada por la emisión de ruido, vibraciones, energía térmica, lumínica, radiaciones electromagnéticas y olores perjudiciales al equilibrio ecológico o al ambiente, proveniente de fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, así como, en su caso, de fuentes móviles que conforme a lo establecido en esta Ley no sean de competencia Federal;

VIII. La regulación del aprovechamiento sustentable y la prevención y control de la contaminación de las aguas de jurisdicción estatal; así como de las aguas nacionales que tengan asignadas;

- IX.- La formulación, expedición y ejecución de los programas de ordenamiento ecológico del territorio a que se refiere el artículo 20 BIS 2 de esta Ley, con la participación de los municipios respectivos;
- X.- La prevención y el control de la contaminación generada por el aprovechamiento de las sustancias no reservadas a la Federación, que constituyan depósitos de naturaleza similar a los componentes de los terrenos, tales como rocas o productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales para la construcción u ornamento de obras;
- XI.- La atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico o el ambiente de dos o más municipios;
- XII.- La participación en emergencias y contingencias ambientales, conforme a las políticas y programas de protección civil que al efecto se establezcan;
- XIII. La vigilancia del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Federación, en las - materias y supuestos a que se refieren las fracciones III, VI y VII de este artículo;
- XIV. La conducción de la política estatal de información y difusión en materia ambiental;
-
- XV.- La promoción de la participación de la sociedad en materia ambiental, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley;
- XVI. La evaluación del impacto ambiental de las obras o actividades que no se encuentren expresamente - reservadas a la Federación, por la presente Ley y, en su caso, la expedición de las autorizaciones correspondientes, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 35 BIS 2 de la presente Ley.
- XVII El ejercicio de las funciones que en materia de preservación del equilibrio ecológico y protección al ambiente - les transfiera la Federación, conforme a lo dispuesto en el artículo 11 de este ordenamiento.
- XVII La formulación, ejecución y evaluación del programa estatal de protección al ambiente;
- I.-
- XIX. La emisión de recomendaciones a las autoridades competentes en materia ambiental, con el propósito de - promover el cumplimiento de la legislación ambiental,
- XX.- La atención coordinada con la Federación de asuntos que afecten el equilibrio ecológico de dos o más Entidades Federativas, cuando así lo consideren conveniente las Entidades Federativas respectivas, y
- XXI. La atención de los demás asuntos que en materia de preservación del equilibrio ecológico y protección al - ambiente les conceda esta Ley u otros ordenamientos en concordancia con ella y que no estén otorgados expresamente a la Federación.

ARTICULO 8o.- Corresponden a los Municipios, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las leyes locales en la materia, las siguientes facultades:

- I.- La formulación, conducción y evaluación de la política ambiental municipal,
- II.- La aplicación de los instrumentos de política ambiental previstos en las leyes locales en la materia y la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en bienes y zonas de jurisdicción municipal, en las materias que no estén expresamente atribuidas a la Federación o a los Estados;
- III.- La aplicación de la disposiciones jurídicas en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas que funcionen como establecimientos mercantiles o de servicios, así como de emisiones de contaminantes a la atmósfera provenientes de fuentes móviles que no sean consideradas

de jurisdicción federal, con la participación que de acuerdo con la legislación estatal corresponda al gobierno del estado;

- IV.- La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por la generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos e industriales que no estén considerados como peligrosos, de conformidad con lo dispuesto por el artículo 137 de la presente Ley;
- V.- La creación y administración de zonas de preservación ecológica de los centros de población, parques urbanos, jardines públicos y demás áreas análogas previstas por la legislación local;
- VI.- La aplicación de las disposiciones jurídicas relativas a la prevención y control de la contaminación por ruido, vibraciones, energía térmica, radiaciones electromagnéticas y lumínica y olores perjudiciales para el equilibrio ecológico y el ambiente, proveniente de fuentes fijas que funcionen como establecimientos mercantiles o de servicios, así como la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones que, en su caso, resulten aplicables a las fuentes móviles excepto las que conforme a esta Ley sean consideradas de jurisdicción federal;
- VII.- La aplicación de las disposiciones jurídicas en materia de prevención y control de la contaminación de las aguas que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población, así como de las aguas nacionales que tengan asignadas, con la participación que conforme a la legislación local en la materia corresponda a los gobiernos de los estados;
- VIII.- La formulación y expedición de los programas de ordenamiento ecológico local del territorio a que se refiere el artículo 20 BIS 4 de esta Ley, en los términos en ella previstos, así como el control y la vigilancia del uso y cambio de uso del suelo, establecidos en dichos programas;
- IX.- La preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en los centros de población, en relación con los efectos derivados de los servicios de alcantarillado, limpia, mercados, centrales de abasto, panteones, rastros, tránsito y transporte locales, siempre y cuando no se trate de facultades otorgadas a la Federación o a los Estados en la presente Ley;
- X.- La participación en la atención de los asuntos que afecten el equilibrio ecológico de dos o más municipios y que generen efectos ambientales en su circunscripción territorial;
- XI.- La participación en emergencias y contingencias ambientales conforme a las políticas y programas de protección civil que al efecto se establezcan;
- XII.- La vigilancia del cumplimiento de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Federación, en las materias y supuestos a que se refieren las fracciones III, IV, VI y VII de este artículo;
- XIII.- La formulación y conducción de la política municipal de información y difusión en materia ambiental;
- XIV.- La participación en la evaluación del impacto ambiental de obras o actividades de competencia estatal, cuando las mismas se realicen en el ámbito de su circunscripción territorial;
- XV.- La formulación, ejecución y evaluación del programa municipal de protección al ambiente, y
- XVI.- La atención de los demás asuntos que en materia de preservación del equilibrio ecológico y protección al ambiente les conceda esta Ley u otros ordenamientos en concordancia con ella y que no estén otorgados expresamente a la Federación o a los Estados

ARTICULO 9o.- Corresponden al Gobierno del Distrito Federal, en materia de preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, conforme a las disposiciones legales que expida la Asamblea Legislativa del

Distrito Federal, las facultades a que se refieren los artículos 7o. y 8o. de esta Ley.

ARTICULO 10.- Los Congresos de los Estados, con arreglo a sus respectivas Constituciones y la Asamblea Legislativa del Distrito Federal, expedirán las disposiciones legales que sean necesarias para regular las materias de su competencia previstas en esta Ley. Los ayuntamientos, por su parte, dictarán los bandos de policía y buen gobierno, los reglamentos, circulares y disposiciones administrativas que correspondan, para que en sus respectivas circunscripciones, se cumplan las previsiones del presente ordenamiento.

En el ejercicio de sus atribuciones, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, observarán las disposiciones de esta Ley y las que de ella se deriven.

ARTICULO 11.- La Federación, por conducto de la Secretaría, podrá suscribir convenios o acuerdos de coordinación con el objeto de que los Estados o el Distrito Federal asuman las siguientes funciones:

- I.- El manejo y vigilancia de las áreas naturales protegidas de competencia Federal;
- II.- El control de los residuos peligrosos considerados de baja peligrosidad conforme a las disposiciones del presente ordenamiento;
- III.- La prevención y control de la contaminación de la atmósfera proveniente de fuentes fijas y móviles de jurisdicción federal;
- IV.- El control de acciones para la protección, preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en la zona federal marítimo terrestre, así como en la zona federal de los cuerpos de agua considerados como nacionales;
- V.- La protección, preservación y restauración de los recursos naturales a que se refiere esta Ley, y de la flora y fauna silvestre, así como el control de su aprovechamiento sustentable;
- VII. La realización de acciones operativas tendientes a cumplir con los fines previstos en este ordenamiento, y

La realización de acciones para la vigilancia del cumplimiento de las disposiciones de esta Ley.

Asimismo, los Estados podrán suscribir con sus Municipios convenios de coordinación, previo acuerdo con la Federación, a efecto de que éstos asuman la realización de las funciones anteriormente referidas.

ARTICULO 12.- Los convenios o acuerdos de coordinación que suscriban la Federación con el Distrito Federal y los Estados, y éstos con los Municipios, para los propósitos a que se refiere el artículo anterior, deberán ajustarse a las siguientes bases:

- I.- Definirán con precisión las materias y actividades que constituyan el objeto del convenio o acuerdo;
- II.- Deberá ser congruente el propósito de los convenios o acuerdos de coordinación con las disposiciones del Plan Nacional de Desarrollo y con la política ambiental nacional;
- III.- Se describirán los bienes y recursos que aporten las partes esclareciendo cuál será su destino específico y su forma de administración;
- IV.- Se especificará la vigencia del convenio o acuerdo, sus formas de terminación y de solución de controversias y, en su caso, de prórroga.
- V.- Definirán el órgano u órganos que llevarán a cabo las acciones que resulten de los convenios o acuerdos de coordinación, incluyendo las de evaluación, y

VI.- Contendrán las demás estipulaciones que las partes consideren necesarias para el correcto cumplimiento del convenio o acuerdo.

Los convenios a que se refiere el presente artículo, deberán ser publicados en el Diario Oficial de la Federación y en el órgano oficial del gobierno local respectivo.

ARTICULO 13.- Los Estados podrán suscribir entre sí y con el Gobierno del Distrito Federal, en su caso, convenios o acuerdos de coordinación y colaboración administrativa, con el propósito de atender y resolver problemas ambientales comunes y ejercer sus atribuciones a través de las instancias que al efecto determinen, atendiendo a lo dispuesto en las leyes locales que resulten aplicables. Las mismas facultades podrán ejercer los municipios entre sí, aunque pertenezcan a entidades federativas diferentes, de conformidad con lo que establezcan las leyes señaladas.

ARTICULO 14.- Las dependencias y entidades de la Administración Pública se coordinarán con la Secretaría para la realización de las acciones conducentes, cuando exista peligro para el equilibrio ecológico de alguna zona o región del país, como consecuencia de desastres producidos por fenómenos naturales, o por caso fortuito o fuerza mayor.

ARTICULO 14 BIS.- Las autoridades ambientales de la Federación y de las entidades federativas integrarán un órgano que se reunirá periódicamente con el propósito de coordinar sus esfuerzos en materia ambiental, analizar e intercambiar opiniones en relación con las acciones y programas en la materia, evaluar y dar seguimiento a las mismas, así como convenir las acciones y formular las recomendaciones pertinentes, particularmente en lo que se refiere a los objetivos y principios establecidos en los artículos primero y décimo quinto de esta Ley.

CAPÍTULO III

Política Ambiental

ARTICULO 15.- Para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas y demás instrumentos previstos en esta Ley, en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, el Ejecutivo Federal observará los siguientes principios:

- I.- Los ecosistemas son patrimonio común de la sociedad y de su equilibrio dependen la vida y las posibilidades productivas del país;
- II.- Los ecosistemas y sus elementos deben ser aprovechados de manera que se asegure una productividad óptima y sostenida, compatible con su equilibrio e integridad;
- III.- Las autoridades y los particulares deben asumir la responsabilidad de la protección del equilibrio ecológico;
- IV.- Quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo, debe incentivarse a quien proteja el ambiente y aproveche de manera sustentable los recursos naturales;
- V.- La responsabilidad respecto al equilibrio ecológico, comprende tanto las condiciones presentes como las que determinarán la calidad de la vida de las futuras generaciones;
- VI.- La prevención de las causas que los generan, es el medio más eficaz para evitar los desequilibrios ecológicos;
- VII.- El aprovechamiento de los recursos naturales renovables debe realizarse de manera que se asegure el mantenimiento de su diversidad y renovabilidad;

- VIII. Los recursos naturales no renovables deben utilizarse de modo que se evite el peligro de su agotamiento y la generación de efectos ecológicos adversos;
- IX.- La coordinación entre las dependencias y entidades de la administración pública y entre los distintos niveles de gobierno y la concertación con la sociedad, son indispensables para la eficacia de las acciones ecológicas;
- X.- El sujeto principal de la concertación ecológica son no solamente los individuos, sino también los grupos y organizaciones sociales. El propósito de la concertación de acciones ecológicas es reorientar la relación entre la sociedad y la naturaleza;
- XI.- En el ejercicio de las atribuciones que las leyes confieren al Estado, para regular, promover, restringir, prohibir, orientar y, en general, inducir las acciones de los particulares en los campos económico y social, se considerarán los criterios de preservación y restauración del equilibrio ecológico;
- XII.- Toda persona tiene derecho a disfrutar de un ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar. Las autoridades en los términos de ésta y otras leyes, tomarán las medidas para garantizar ese derecho.
- XIII. Garantizar el derecho de las comunidades, incluyendo a los pueblos indígenas, a la protección, preservación, uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y la salvaguarda y uso de la biodiversidad, de acuerdo a lo que determine la presente Ley y otros ordenamientos aplicables.
- XIV. La erradicación de la pobreza es necesaria para el desarrollo sustentable;
- XV.- Las mujeres cumplen una importante función en la protección, preservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y en el desarrollo. Su completa participación es esencial para lograr el desarrollo sustentable;
- XVI. Es interés de la nación que las actividades que se lleven a cabo dentro del territorio nacional y en aquellas zonas donde ejerce su soberanía y jurisdicción, no afecten el equilibrio ecológico de otros países o de zonas de jurisdicción internacional;
- XVII Las autoridades competentes en igualdad de circunstancias ante las demás naciones, promoverán la preservación y restauración del equilibrio de los ecosistemas regionales y globales, y
- XVII A través de la cuantificación del costo de la contaminación del ambiente y del agotamiento de los recursos naturales provocados por las actividades económicas en un año determinado, se calculará el Producto Interno Neto Ecológico. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática integrará el Producto Interno Neto Ecológico al Sistema de Cuentas Nacionales.

ARTICULO 16.- Las entidades federativas y los municipios en el ámbito de sus competencias, observarán y aplicarán los principios a que se refieren las fracciones I a XV del artículo anterior.

CAPÍTULO IV

Instrumentos de la Política Ambiental

SECCIÓN I

Planeación Ambiental

ARTICULO 17.- En la planeación nacional del desarrollo se deberá incorporar la política ambiental y el ordenamiento ecológico que se establezcan de conformidad con esta Ley y las demás disposiciones en la materia.

En la planeación y realización de las acciones a cargo de las dependencias y entidades de la administración pública federal, conforme a sus respectivas esferas de competencia, así como en el ejercicio de las atribuciones que las leyes confieran al Gobierno Federal para regular, promover, restringir, prohibir, orientar y en general inducir las acciones de los particulares en los campos económico y social, se observarán los lineamientos de política ambiental que establezcan el Plan Nacional de Desarrollo y los programas correspondientes.

ARTICULO 18.- El Gobierno Federal promoverá la participación de los distintos grupos sociales en la elaboración de los programas que tengan por objeto la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, según lo establecido en esta Ley y las demás aplicables.

SECCIÓN II

Ordenamiento Ecológico del Territorio

ARTICULO 19.- En la formulación del ordenamiento ecológico se deberán considerar los siguientes criterios:

- I.- La naturaleza y características de los ecosistemas existentes en el territorio nacional y en las zonas sobre las que la nación ejerce soberanía y jurisdicción;
- II.- La vocación de cada zona o región, en función de sus recursos naturales, la distribución de la población y las actividades económicas predominantes;
- III.- Los desequilibrios existentes en los ecosistemas por efecto de los asentamientos humanos, de las actividades económicas o de otras actividades humanas o fenómenos naturales;
- IV.- El equilibrio que debe existir entre los asentamientos humanos y sus condiciones ambientales; y
- V.- El impacto ambiental de nuevos asentamientos humanos, vías de comunicación y demás obras o actividades.

ARTICULO 19 BIS.- El ordenamiento ecológico del territorio nacional y de las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, se llevará a cabo a través de los programas de ordenamiento ecológico :

- I.- General del Territorio;
- II.- Regionales;
- III.- Locales, y
- IV.- Marinos

ARTICULO 20.- El programa de ordenamiento ecológico general del territorio será formulado por la Secretaría, en el marco del Sistema Nacional de Planeación Democrática y tendrá por objeto determinar:

- I.- La regionalización ecológica del territorio nacional y de las zonas sobre las que la nación ejerce soberanía y jurisdicción, a partir del diagnóstico de las características, disponibilidad y demanda de los recursos naturales, así como de las actividades productivas que en ellas se desarrollen y, de la ubicación y situación de los asentamientos humanos existentes, y
- II.- Los lineamientos y estrategias ecológicas para la preservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, así como para la localización de actividades productivas y de los asentamientos humanos.

ARTICULO 20 BIS.- La formulación, expedición, ejecución y evaluación del ordenamiento ecológico general del territorio se llevará cabo de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Planeación. Asimismo, la Secretaría deberá

promover la participación de grupos y organizaciones sociales y empresariales, instituciones académicas y de investigación, y demás personas interesadas, de acuerdo con lo establecido en esta Ley, así como en las demás disposiciones que resulten aplicables.

ARTICULO 20 BIS 1.- La Secretaría deberá apoyar técnicamente la formulación y ejecución de los programas de ordenamiento ecológico regional y local, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley.

Las entidades federativas y los municipios podrán participar en las consultas y emitir las recomendaciones que estimen pertinentes para la formulación de los programas de ordenamiento ecológico general del territorio y de ordenamiento ecológico marino.

ARTICULO 20 BIS 2.- Los Gobiernos de los Estados y del Distrito Federal, en los términos de las leyes locales aplicables, podrán formular y expedir programas de ordenamiento ecológico regional, que abarquen la totalidad o una parte del territorio de una entidad federativa.

Cuando una región ecológica se ubique en el territorio de dos o más entidades federativas, el Gobierno Federal, el de los Estados y Municipios respectivos, y en su caso el del Distrito Federal, en el ámbito de sus competencias, podrán formular un programa de ordenamiento ecológico regional. Para tal efecto, la Federación celebrará los acuerdos o convenios de coordinación procedentes con los gobiernos locales involucrados.

ARTICULO 20 BIS 3.- Los programas de ordenamiento ecológico regional a que se refiere el artículo 20 BIS 2 deberán contener, por lo menos.

- I.- La determinación del área o región a ordenar, describiendo sus atributos físicos, bióticos y socioeconómicos, así como el diagnóstico de sus condiciones ambientales y las tecnologías utilizadas por los habitantes del área;
- II.- La determinación de los criterios de regulación ecológica para la preservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que se localicen en la región de que se trate, así como para la realización de actividades productivas y la ubicación de asentamientos humanos, y
- III.- Los lineamientos para su ejecución, evaluación, seguimiento y modificación.

ARTICULO 20 BIS 4.- Los programas de ordenamiento ecológico local serán expedidos por las autoridades municipales, y en su caso del Distrito Federal, de conformidad con las leyes locales en materia ambiental, y tendrán por objeto:

- I.- Determinar las distintas áreas ecológicas que se localicen en la zona o región de que se trate, describiendo sus atributos físicos, bióticos y socioeconómicos, así como el diagnóstico de sus condiciones ambientales, y de las tecnologías utilizadas por los habitantes del área de que se trate;
- II.- Regular, fuera de los centros de población, los usos del suelo con el propósito de proteger el ambiente y preservar, restaurar y aprovechar de manera sustentable los recursos naturales respectivos, fundamentalmente en la realización de actividades productivas y la localización de asentamientos humanos, y
- III.- Establecer los criterios de regulación ecológica para la protección, preservación, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales dentro de los centros de población, a fin de que sean considerados en los planes o programas de desarrollo urbano correspondientes.

ARTICULO 20 BIS 5.- Los procedimientos bajo los cuales serán formulados, aprobados, expedidos, evaluados y modificados los programas de ordenamiento ecológico local, serán determinados en las leyes estatales o del Distrito Federal en la materia, conforme a las siguientes bases:

- I.- Existirá congruencia entre los programas de ordenamiento ecológico marinos, en su caso, y general del

territorio y regionales, con los programas de ordenamiento ecológico local:

- II.- Los programas de ordenamiento ecológico local cubrirán una extensión geográfica cuyas dimensiones permitan regular el uso del suelo, de conformidad con lo previsto en esta Ley;
- III.- Las previsiones contenidas en los programas de ordenamiento ecológico local del territorio, mediante las cuales se regulen los usos del suelo, se referirán únicamente a las áreas localizadas fuera de los límites de los centros de población. Cuando en dichas áreas se pretenda la ampliación de un centro de población o la realización de proyectos de desarrollo urbano, se estará a lo que establezca el programa de ordenamiento ecológico respectivo, el cual sólo podrá modificarse mediante el procedimiento que establezca la legislación local en la materia;
- IV.- Las autoridades locales harán compatibles el ordenamiento ecológico del territorio y la ordenación y regulación de los asentamientos humanos, incorporando las previsiones correspondientes en los programas de ordenamiento ecológico local, así como en los planes o programas de desarrollo urbano que resulten aplicables.

Asimismo, los programas de ordenamiento ecológico local preverán los mecanismos de coordinación, entre las distintas autoridades involucradas, en la formulación y ejecución de los programas.
- V.- Cuando un programa de ordenamiento ecológico local incluya un área natural protegida, competencia de la Federación, o parte de ella, el programa será elaborado y aprobado en forma conjunta por la Secretaría y los Gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, según corresponda;
- VI.- Los programas de ordenamiento ecológico local regularán los usos del suelo, incluyendo a ejidos, comunidades y pequeñas propiedades, expresando las motivaciones que lo justifiquen;
- VII.- Para la elaboración de los programas de ordenamiento ecológico local, las leyes en la materia establecerán los mecanismos que garanticen la participación de los particulares, los grupos y organizaciones sociales, empresariales y demás interesados. Dichos mecanismos incluirán, por lo menos, procedimientos de difusión y consulta pública de los programas respectivos

Las leyes locales en la materia, establecerán las formas y los procedimientos para que los particulares participen en la ejecución, vigilancia y evaluación de los programas de ordenamiento ecológico a que se refiere este precepto, y
- VIII.- El Gobierno Federal podrá participar en la consulta a que se refiere la fracción anterior y emitirá las
- recomendaciones que estime pertinentes.

ARTICULO 20 BIS 6.- La Secretaría podrá formular, expedir y ejecutar, en coordinación con las Dependencias competentes, programas de ordenamiento ecológico marino. Estos programas tendrán por objeto el establecer los lineamientos y previsiones a que deberá sujetarse la preservación, restauración, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales existentes en áreas o superficies específicas ubicadas en zonas marinas mexicanas, incluyendo las zonas federales adyacentes.

ARTICULO 20 BIS 7.- Los programas de ordenamiento ecológico marino deberán contener, por lo menos:

- I - La delimitación precisa del área que abarcará el programa;
- II.- La determinación de las zonas ecológicas a partir de las características, disponibilidad y demanda de los recursos naturales en ellas comprendidas, así como el tipo de actividades productivas que en las mismas se

desarrollen, y

- III.- Los lineamientos, estrategias y demás previsiones para la preservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, así como la realización de actividades productivas y demás obras o actividades que puedan afectar los ecosistemas respectivos.

En la determinación de tales previsiones deberán considerarse los criterios establecidos en esta Ley, las disposiciones que de ella se deriven, los tratados internacionales de los que México sea parte, y demás ordenamientos que regulen la materia.

SECCIÓN III

Instrumentos Económicos

ARTICULO 21.- La Federación, los Estados y el Distrito Federal, en el ámbito de sus respectivas competencias, diseñarán, desarrollarán y aplicarán instrumentos económicos que incentiven el cumplimiento de los objetivos de la política ambiental, y mediante los cuales se buscará:

- I.- Promover un cambio en la conducta de las personas que realicen actividades industriales, comerciales y de servicios, de tal manera que sus intereses sean compatibles con los intereses colectivos de protección ambiental y de desarrollo sustentable;
- II.- Fomentar la incorporación de información confiable y suficiente sobre las consecuencias, beneficios y costos ambientales al sistema de precios de la economía;
- III.- Otorgar incentivos a quien realice acciones para la protección, preservación o restauración del equilibrio ecológico. Asimismo, deberán procurar que quienes dañen el ambiente, hagan un uso indebido de recursos naturales o alteren los ecosistemas, asuman los costos respectivos;
- IV.- Promover una mayor equidad social en la distribución de costos y beneficios asociados a los objetivos de la política ambiental, y
- V.- Procurar su utilización conjunta con otros instrumentos de política ambiental, en especial cuando se trate de observar umbrales o límites en la utilización de ecosistemas, de tal manera que se garantice su integridad y equilibrio, la salud y el bienestar de la población.

ARTICULO 22.- Se consideran instrumentos económicos los mecanismos normativos y administrativos de carácter fiscal, financiero o de mercado, mediante los cuales las personas asumen los beneficios y costos ambientales que generen sus actividades económicas, incentivándolas a realizar acciones que favorezcan el ambiente.

Se consideran instrumentos económicos de carácter fiscal, los estímulos fiscales que incentiven el cumplimiento de los objetivos de la política ambiental. En ningún caso, estos instrumentos se establecerán con fines exclusivamente recaudatorios.

Son instrumentos financieros los créditos, las fianzas, los seguros de responsabilidad civil, los fondos y los fideicomisos, cuando sus objetivos estén dirigidos a la preservación, protección, restauración o aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y el ambiente, así como al financiamiento de programas, proyectos, estudios e investigación científica y tecnológica para la preservación del equilibrio ecológico y protección al ambiente.

Son instrumentos de mercado las concesiones, autorizaciones, licencias y permisos que corresponden a volúmenes preestablecidos de emisiones de contaminantes en el aire, agua o suelo, o bien, que establecen los límites de aprovechamiento de recursos naturales, o de construcción en áreas naturales protegidas o en zonas cuya

preservación y protección se considere relevante desde el punto de vista ambiental.

Las prerrogativas derivadas de los instrumentos económicos de mercado serán transferibles, no gravables y quedarán sujetos al interés público y al aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

ARTICULO 22 BIS.- Se consideran prioritarias, para efectos del otorgamiento de los estímulos fiscales que se establezcan conforme a la Ley de Ingresos de la Federación, las actividades relacionadas con:

La investigación, incorporación o utilización de mecanismos, equipos y tecnologías que tengan por objeto evitar, reducir o controlar la contaminación o deterioro ambiental, así como el uso eficiente de recursos naturales y de energía;

- I.- La investigación e incorporación de sistemas de ahorro de energía y de utilización de fuentes de energía menos contaminantes;
- III.- El ahorro y aprovechamiento sustentable y la prevención de la contaminación del agua;
- IV.- La ubicación y reubicación de instalaciones industriales, comerciales y de servicios en áreas ambientalmente adecuadas;
- V.- El establecimiento, manejo y vigilancia de áreas naturales protegidas, y
- VI.- En general, aquellas actividades relacionadas con la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

SECCIÓN IV

Regulación Ambiental de los

Asentamientos Humanos

ARTICULO 23.- Para contribuir al logro de los objetivos de la política ambiental, la planeación del desarrollo urbano y la vivienda, además de cumplir con lo dispuesto en el artículo 27 constitucional en materia de asentamientos humanos, considerará los siguientes criterios:

- I.- Los planes o programas de desarrollo urbano deberán tomar en cuenta los lineamientos y estrategias contenidas en los programas de ordenamiento ecológico del territorio;
- II.- En la determinación de los usos del suelo, se buscará lograr una diversidad y eficiencia de los mismos y se evitará el desarrollo de esquemas segregados o unifuncionales, así como las tendencias a la suburbanización extensiva;
- III.- En la determinación de las áreas para el crecimiento de los centros de población, se fomentará la mezcla de los usos habitacionales con los productivos que no representen riesgos o daños a la salud de la población y se evitará que se afecten áreas con alto valor ambiental;
- IV.- Se deberá privilegiar el establecimiento de sistemas de transporte colectivo y otros medios de alta eficiencia energética y ambiental;
- V.- Se establecerán y manejarán en forma prioritaria las áreas de conservación ecológica en torno a los asentamientos humanos;
- VI.- Las autoridades de la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, en la esfera de su competencia, promoverán la utilización de instrumentos económicos, fiscales y financieros de política urbana

y ambiental, para inducir conductas compatibles con la protección y restauración del medio ambiente y con un desarrollo urbano sustentable;

VII.-El aprovechamiento del agua para usos urbanos deberá incorporar de manera equitativa los costos de su tratamiento, considerando la afectación a la calidad del recurso y la cantidad que se utilice;

VIII. En la determinación de áreas para actividades altamente riesgosas, se establecerán las zonas intermedias de salvaguarda en las que no se permitirán los usos habitacionales, comerciales u otros que pongan en riesgo a la población, y

IX.- La política ecológica debe buscar la corrección de aquellos desequilibrios que deterioren la calidad de vida de la población y, a la vez, prever las tendencias de crecimiento del asentamiento humano, para mantener una relación suficiente entre la base de recursos y la población, y cuidar de los factores ecológicos y ambientales que son parte integrante de la calidad de la vida.

ARTICULO 24.- Se deroga

ARTICULO 25.- Se deroga

ARTICULO 26.- Se deroga

ARTICULO 27.- Se deroga

SECCION V

Evaluación del Impacto Ambiental

ARTICULO 28.- La evaluación del impacto ambiental es el procedimiento a través del cual la Secretaría establece las condiciones a que se sujetará la realización de obras y actividades que puedan causar desequilibrio ecológico o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones aplicables para proteger el ambiente y preservar y restaurar los ecosistemas, a fin de evitar o reducir al mínimo sus efectos negativos sobre el ambiente. Para ello, en los casos que determine el Reglamento que al efecto se expida, quienes pretendan llevar a cabo alguna de las siguientes obras o actividades, requerirán previamente la autorización en materia de impacto ambiental de la Secretaría:

I.- Obras hidráulicas, vías generales de comunicación, oleoductos, gasoductos, carbo ductos y poliductos;

II.- Industria del petróleo, petroquímica, química, siderúrgica, papelera, azucarera, del cemento y eléctrica;

III.- Exploración, explotación y beneficio de minerales y sustancias reservadas a la Federación en los términos de las Leyes Minera y Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia Nuclear;

IV.- Instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, así como residuos radiactivos;

V.- Aprovechamientos forestales en selvas tropicales y especies de difícil regeneración.

VI.- Plantaciones forestales;

VII.-Cambios de uso del suelo de áreas forestales, así como en selvas y zonas áridas.

VIII. Parques industriales donde se prevea la realización de actividades altamente riesgosas;

IX.- Desarrollos inmobiliarios que afecten los ecosistemas costeros;

X.- Obras y actividades en humedales, manglares, lagunas, ríos, lagos y esteros conectados con el mar, así como en sus litorales o zonas federales;

XI.- Obras en áreas naturales protegidas de competencia de la Federación;

XII.- Actividades pesqueras, acuícolas o agropecuarias que puedan poner en peligro la preservación de una o más especies o causar daños a los ecosistemas, y

XIII. Obras o actividades que correspondan a asuntos de competencia federal, que puedan causar desequilibrios

- ecológicos graves e irreparables, daños a la salud pública o a los ecosistemas, o rebasar los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas relativas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección del ambiente.

El Reglamento de la presente Ley determinará las obras o actividades a que se refiere este artículo, que por su ubicación, dimensiones, características o alcances no produzcan impactos ambientales significativos, no causen o puedan causar desequilibrios ecológicos, ni rebasen los límites y condiciones establecidos en las disposiciones jurídicas referidas a la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, y que por lo tanto no deban sujetarse al procedimiento de evaluación de impacto ambiental previsto en este ordenamiento

Para los efectos a que se refiere la fracción XIII del presente artículo, la Secretaría notificará a los interesados su determinación para que sometan al procedimiento de evaluación de impacto ambiental la obra o actividad que corresponda, explicando las razones que lo justifiquen, con el propósito de que aquéllos presenten los informes, dictámenes y consideraciones que juzguen convenientes, en un plazo no mayor a diez días. Una vez recibida la documentación de los interesados, la Secretaría, en un plazo no mayor a treinta días, les comunicará si procede o no la presentación de una manifestación de impacto ambiental, así como la modalidad y el plazo para hacerlo. Transcurrido el plazo señalado, sin que la Secretaría emita la comunicación correspondiente, se entenderá que no es necesaria la presentación de una manifestación de impacto ambiental.

ARTICULO 29.- Los efectos negativos que sobre el ambiente, los recursos naturales, la flora y la fauna silvestre y demás recursos a que se refiere esta Ley, pudieran causar las obras o actividades de competencia federal que no requieran someterse al procedimiento de evaluación de impacto ambiental a que se refiere la presente sección, estarán sujetas en lo conducente a las disposiciones de la misma, sus reglamentos, las normas oficiales mexicanas en materia ambiental, la legislación sobre recursos naturales que resulte aplicable, así como a través de los permisos, licencias, autorizaciones y concesiones que conforme a dicha normatividad se requiera.

ARTICULO 30.- Para obtener la autorización a que se refiere el artículo 28 de esta Ley, los interesados deberán presentar a la Secretaría una manifestación de impacto ambiental, la cual deberá contener, por lo menos, una descripción de los posibles efectos en el o los ecosistemas que pudieran ser afectados por la obra o actividad de que se trate, considerando el conjunto de los elementos que conforman dichos ecosistemas, así como las medidas preventivas, de mitigación y las demás necesarias para evitar y reducir al mínimo los efectos negativos sobre el ambiente.

Cuando se trate de actividades consideradas altamente riesgosas en los términos de la presente Ley, la manifestación deberá incluir el estudio de riesgo correspondiente.

Si después de la presentación de una manifestación de impacto ambiental se realizan modificaciones al proyecto de la obra o actividad respectiva, los interesados deberán hacerlas del conocimiento de la Secretaría, a fin de que ésta, en un plazo no mayor de 10 días les notifique si es necesaria la presentación de información adicional para evaluar los efectos al ambiente, que pudiesen ocasionar tales modificaciones, en términos de lo dispuesto en esta Ley

Los contenidos del informe preventivo, así como las características y las modalidades de las manifestaciones de

impacto ambiental y los estudios de riesgo serán establecidos por el Reglamento de la presente Ley.

ARTICULO 31.- La realización de las obras y actividades a que se refieren las fracciones I a XII del artículo 28, requerirán la presentación de un informe preventivo y no una manifestación de impacto ambiental, cuando:

- I.- Existan normas oficiales mexicanas u otras disposiciones que regulen las emisiones, las descargas, el aprovechamiento de recursos naturales y, en general, todos los impactos ambientales relevantes que puedan producir las obras o actividades;
- II.- Las obras o actividades de que se trate estén expresamente previstas por un plan parcial de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que haya sido evaluado por la Secretaría en los términos del artículo siguiente, o
- III.- Se trate de instalaciones ubicadas en parques industriales autorizados en los términos de la presente sección.

En los casos anteriores, la Secretaría, una vez analizado el informe preventivo, determinará, en un plazo no mayor de veinte días, si se requiere la presentación de una manifestación de impacto ambiental en alguna de las modalidades previstas en el reglamento de la presente Ley, o si se está en alguno de los supuestos señalados.

La Secretaría publicará en su Gaceta Ecológica, el listado de los informes preventivos que le sean presentados en los términos de este artículo, los cuales estarán a disposición del público.

ARTICULO 32.- En el caso de que un plan o programa parcial de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico del territorio incluyan obras o actividades de las señaladas en el artículo 28 de esta Ley, las autoridades competentes de los Estados, el Distrito Federal o los Municipios, podrán presentar dichos planes o programas a la Secretaría, con el propósito de que ésta emita la autorización que en materia de impacto ambiental corresponda, respecto del conjunto de obras o actividades que se prevean realizar en un área determinada, en los términos previstos en el artículo 31 de esta Ley.

ARTICULO 33.- Tratándose de las obras y actividades a que se refieren las fracciones IV, VIII, IX y XI del artículo 28, la Secretaría notificará a los gobiernos estatales y municipales o del Distrito Federal, según corresponda, que ha recibido la manifestación de impacto ambiental respectiva, a fin de que éstos manifiesten lo que a su derecho convenga.

La autorización que expida la Secretaría, no obligará en forma alguna a las autoridades locales para expedir las autorizaciones que les corresponda en el ámbito de sus respectivas competencias

ARTICULO 34.- Una vez que la Secretaría reciba una manifestación de impacto ambiental e integre el expediente a que se refiere el artículo 35, pondrá ésta a disposición del público, con el fin de que pueda ser consultada por cualquier persona.

Los promoventes de la obra o actividad podrán requerir que se mantenga en reserva la información que haya sido integrada al expediente y que, de hacerse pública, pudiera afectar derechos de propiedad industrial, y la confidencialidad de la información comercial que aporte el interesado.

La Secretaría, a solicitud de cualquier persona de la comunidad de que se trate, podrá llevar a cabo una consulta pública, conforme a las siguientes bases:

- I.- La Secretaría publicará la solicitud de autorización en materia de impacto ambiental en su Gaceta Ecológica. Asimismo, el promotor deberá publicar a su costa, un extracto del proyecto de la obra o actividad en un periódico de amplia circulación en la entidad federativa de que se trate, dentro del plazo de cinco días contado a partir de la fecha en que se presente la manifestación de impacto ambiental a la Secretaría;
- II.- Cualquier ciudadano, dentro del plazo de diez días contados a partir de la publicación del extracto del proyecto en los términos antes referidos, podrá solicitar a la Secretaría ponga a disposición del público en la entidad

federativa que corresponda, la manifestación de impacto ambiental;

- III.- Cuando se trate de obras o actividades que puedan generar desequilibrios ecológicos graves o daños a la salud pública o a los ecosistemas, de conformidad con lo que señale el reglamento de la presente Ley, la Secretaría, en coordinación con las autoridades locales, podrá organizar una reunión pública de información en la que el promovente explicará los aspectos técnicos ambientales de la obra o actividad de que se trate;
- IV.- Cualquier interesado, dentro del plazo de veinte días contados a partir de que la Secretaría ponga a disposición del público la manifestación de impacto ambiental en los términos de la fracción I, podrá proponer el establecimiento de medidas de prevención y mitigación adicionales, así como las observaciones que considere pertinentes, y
- V.- La Secretaría agregará las observaciones realizadas por los interesados al expediente respectivo y consignará, en la resolución que emita, el proceso de consulta pública realizado y los resultados de las observaciones y propuestas que por escrito se hayan formulado;

ARTICULO 35 .- Una vez presentada la manifestación de impacto ambiental, la Secretaría iniciará el procedimiento de evaluación, para lo cual revisará que la solicitud se ajuste a las formalidades previstas en esta Ley, su Reglamento y las normas oficiales mexicanas aplicables, e integrará el expediente respectivo en un plazo no mayor de diez días.

Para la autorización de las obras y actividades a que se refiere el artículo 28, la Secretaría se sujetará a lo que establezcan los ordenamientos antes señalados, así como los programas de desarrollo urbano y de ordenamiento ecológico del territorio, las declaratorias de áreas naturales protegidas y las demás disposiciones jurídicas que resulten aplicables.

Asimismo, para la autorización a que se refiere este artículo, la Secretaría deberá evaluar los posibles efectos de dichas obras o actividades en el o los ecosistemas de que se trate, considerando el conjunto de elementos que los conforman y no únicamente los recursos que, en su caso, serían sujetos de aprovechamiento o afectación.

Una vez evaluada la manifestación de impacto ambiental, la Secretaría emitirá, debidamente fundada y motivada, la resolución correspondiente en la que podrá:

- I.- Autorizar la realización de la obra o actividad de que se trate, en los términos solicitados.
- II.- Autorizar de manera condicionada la obra o actividad de que se trate, a la modificación del proyecto o al establecimiento de medidas adicionales de prevención y mitigación, a fin de que se eviten, atenúen o compensen los impactos ambientales adversos susceptibles de ser producidos en la construcción, operación normal y en caso de accidente. Cuando se trate de autorizaciones condicionadas, la Secretaría señalará los requerimientos que deban observarse en la realización de la obra o actividad prevista, o
- III.- Negar la autorización solicitada, cuando:
 - a) Se contravenga lo establecido en esta Ley, sus reglamentos, las normas oficiales mexicanas y demás disposiciones aplicables;
 - b) La obra o actividad de que se trate pueda propiciar que una o más especies sean declaradas como amenazadas o en peligro de extinción o cuando se afecte a una de dichas especies, o
 - c) Exista falsedad en la información proporcionada por los promoventes, respecto de los impactos ambientales de la obra o actividad de que se trate

La Secretaría podrá exigir el otorgamiento de seguros o garantías respecto del cumplimiento de las condiciones establecidas en la autorización, en aquellos casos expresamente señalados en el reglamento de la presente Ley.

cuando durante la realización de las obras puedan producirse daños graves a los ecosistemas.

La resolución de la Secretaría sólo se referirá a los aspectos ambientales de las obras y actividades de que se trate.

ARTICULO 35 BIS .- La Secretaría dentro del plazo de sesenta días contados a partir de la recepción de la manifestación de impacto ambiental deberá emitir la resolución correspondiente.

La Secretaría podrá solicitar aclaraciones, rectificaciones o ampliaciones al contenido de la manifestación de impacto ambiental que le sea presentada, suspendiéndose el término que restare para concluir el procedimiento. En ningún caso la suspensión podrá exceder el plazo de sesenta días, contados a partir de que ésta sea declarada por la Secretaría, y siempre y cuando le sea entregada la información requerida.

Excepcionalmente, cuando por la complejidad y las dimensiones de una obra o actividad la Secretaría requiera de un plazo mayor para su evaluación, éste se podrá ampliar hasta por sesenta días adicionales, siempre que se justifique conforme a lo dispuesto en el reglamento de la presente Ley.

ARTICULO 35 BIS 1.- Las personas que presten servicios de impacto ambiental, serán responsables ante la Secretaría de los informes preventivos, manifestaciones de impacto ambiental y estudios de riesgo que elaboren, quienes declararán bajo protesta de decir verdad que en ellos se incorporan las mejores técnicas y metodologías existentes, así como la información y medidas de prevención y mitigación más efectivas.

Asimismo, los informes preventivos, las manifestaciones de impacto ambiental y los estudios de riesgo podrán ser presentados por los interesados, instituciones de investigación, colegios o asociaciones profesionales, en este caso la responsabilidad respecto del contenido del documento corresponderá a quien lo suscriba.

ARTICULO 35 BIS 2.- El impacto ambiental que pudiesen ocasionar las obras o actividades no comprendidas en el artículo 28 será evaluado por las autoridades del Distrito Federal o de los Estados, con la participación de los municipios respectivos, cuando por su ubicación, dimensiones o características produzcan impactos ambientales significativos sobre el medio ambiente, y estén expresamente señalados en la legislación ambiental estatal. En estos casos, la evaluación de impacto ambiental se podrá efectuar dentro de los procedimientos de autorización de uso del suelo, construcciones, fraccionamientos, u otros que establezcan las leyes estatales y las disposiciones que de ella se deriven. Dichos ordenamientos proveerán lo necesario a fin de hacer compatibles la política ambiental con la de desarrollo urbano y de evitar la duplicidad innecesaria de procedimientos administrativos en la materia.

ARTICULO 35 BIS 3.- Cuando las obras o actividades señaladas en el artículo 28 de esta Ley requieran, además de la autorización en materia de impacto ambiental, contar con autorización de inicio de obra, se deberá verificar que el responsable cuente con la autorización de impacto ambiental expedida en términos de lo dispuesto en este ordenamiento.

Asimismo, la Secretaría, a solicitud del promovente, integrará a la autorización en materia de impacto ambiental, los demás permisos, licencias y autorizaciones de su competencia, que se requieran para la realización de las obras y actividades a que se refiere este artículo

SECCIÓN VI

Normas Oficiales Mexicanas en Materia Ambiental

ARTICULO 36.- Para garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas, la Secretaría emitirá normas oficiales mexicanas en materia ambiental y para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, que tengan por objeto:

- I.- Establecer los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, metas, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en regiones, zonas, cuencas o ecosistemas, en aprovechamiento de recursos naturales, en el desarrollo de actividades económicas, en el uso y destino de bienes, en insumos y en

procesos;

- II.- Considerar las condiciones necesarias para el bienestar de la población y la preservación o restauración de los recursos naturales y la protección al ambiente;
- III.- Estimular o inducir a los agentes económicos para reorientar sus procesos y tecnologías a la protección del ambiente y al desarrollo sustentable;
- IV.- Otorgar certidumbre a largo plazo a la inversión e inducir a los agentes económicos a asumir los costos de la afectación ambiental que ocasionen, y
- V.- Fomentar actividades productivas en un marco de eficiencia y sustentabilidad.

La expedición y modificación de las normas oficiales mexicanas en materia ambiental, se sujetará al procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

ARTICULO 37.- En la formulación de normas oficiales mexicanas en materia ambiental deberá considerarse que el cumplimiento de sus previsiones deberá realizarse de conformidad con las características de cada proceso productivo o actividad sujeta a regulación, sin que ello implique el uso obligatorio de tecnologías específicas.

Cuando las normas oficiales mexicanas en materia ambiental establezcan el uso de equipos, procesos o tecnologías específicas, los destinatarios de las mismas podrán proponer a la Secretaría para su aprobación, los equipos, procesos o tecnologías alternativos mediante los cuales se ajustarán a las previsiones correspondientes.

Para tal efecto, los interesados acompañarán a su propuesta la justificación en que ésta se sustente para cumplir con los objetivos y finalidades establecidos en la norma oficial mexicana de que se trate.

Una vez recibida la propuesta, la Secretaría en un plazo que no excederá de treinta días emitirá la resolución respectiva. En caso de que no se emita dicha resolución en el plazo señalado, se considerará que ésta es negativa.

Cuando la resolución sea favorable, deberá publicarse en un órgano de difusión oficial y surtirá efectos en beneficio de quien lo solicite, respetando, en su caso, los derechos adquiridos en materia de propiedad industrial.

ARTICULO 37 BIS.- Las normas oficiales mexicanas en materia ambiental son de cumplimiento obligatorio en el territorio nacional y señalarán su ámbito de validez, vigencia y gradualidad en su aplicación.

SECCIÓN VII

Autorregulación y Auditorías Ambientales

ARTICULO 38.- Los productores, empresas u organizaciones empresariales podrán desarrollar procesos voluntarios de autorregulación ambiental, a través de los cuales mejoren su desempeño ambiental, respetando la legislación y normatividad vigente en la materia y se comprometan a superar o cumplir mayores niveles, metas o beneficios en materia de protección ambiental.

La Secretaría en el ámbito federal, inducirá o concertará:

- I.- El desarrollo de procesos productivos adecuados y compatibles con el ambiente, así como sistemas de protección y restauración en la materia, convenidos con cámaras de industria, comercio y otras actividades productivas, organizaciones de productores, organizaciones representativas de una zona o región, instituciones de investigación científica y tecnológica y otras organizaciones interesadas;
- II.- El cumplimiento de normas voluntarias o especificaciones técnicas en materia ambiental que sean más estrictas que las normas oficiales mexicanas o que se refieran a aspectos no previstas por éstas, las cuales serán

establecidas de común acuerdo con particulares o con asociaciones u organizaciones que los representen. Para tal efecto, la Secretaría podrá promover el establecimiento de normas mexicanas conforme a lo previsto en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización:

- III.- El establecimiento de sistemas de certificación de procesos o productos para inducir patrones de consumo que sean compatibles o que preserven, mejoren o restauren el medio ambiente, debiendo observar, en su caso, las disposiciones aplicables de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, y
- IV.- Las demás acciones que induzcan a las empresas a alcanzar los objetivos de la política ambiental superiores a las previstas en la normatividad ambiental establecida.

ARTICULO 38 BIS.- Los responsables del funcionamiento de una empresa podrán en forma voluntaria, a través de la auditoría ambiental, realizar el examen metodológico de sus operaciones, respecto de la contaminación y el riesgo que generan, así como el grado de cumplimiento de la normatividad ambiental y de los parámetros internacionales y de buenas prácticas de operación e ingeniería aplicables, con el objeto de definir las medidas preventivas y correctivas necesarias para proteger el medio ambiente.

La Secretaría desarrollará un programa dirigido a fomentar la realización de auditorías ambientales, y podrá supervisar su ejecución. Para tal efecto,

- I.- Elaborará los términos de referencia que establezcan la metodología para la realización de las auditorías ambientales;
- II.- Establecerá un sistema de aprobación y acreditamiento de peritos y auditores Para tal efecto, integrará un comité técnico constituido por representantes de instituciones de investigación, colegios y asociaciones profesionales y organizaciones del sector industrial, ambientales, determinando los procedimientos y requisitos que deberán cumplir los interesados para incorporarse a dicho sistema, debiendo, en su caso, observar lo dispuesto por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización
- III.- Desarrollará programas de capacitación en materia de peritajes y auditorías ambientales;
- IV.- Instrumentará un sistema de reconocimientos y estímulos que permita identificar a las industrias que cumplan oportunamente los compromisos adquiridos en las auditorías ambientales.
- V.- Promoverá la creación de centros regionales de apoyo a la mediana y pequeña industria, con el fin de facilitar la realización de auditorías en dichos sectores, y

Convendrá o concertará con personas físicas o morales, públicas o privadas, la realización de auditorías ambientales.

ARTICULO 38 BIS 1.- La Secretaría pondrá los programas preventivos y correctivos derivados de las auditorías ambientales, así como el diagnóstico básico del cual derivan, a disposición de quienes resulten o puedan resultar directamente afectados.

En todo caso, deberán observarse las disposiciones legales relativas a la confidencialidad de la información industrial y comercial.

ARTICULO 38 BIS 2.- Los Estados y el Distrito Federal podrán establecer sistemas de autorregulación y auditorías ambientales en los ámbitos de sus respectivas competencias.

SECCIÓN VIII

Investigación y Educación Ecológicas

ARTICULO 39.- Las autoridades competentes promoverán la incorporación de contenidos ecológicos en los diversos ciclos educativos, especialmente en el nivel básico, así como en la formación cultural de la niñez y la juventud.

Asimismo, propiciarán el fortalecimiento de la conciencia ecológica, a través de los medios de comunicación masiva.

La Secretaría, con la participación de la Secretaría de Educación Pública, promoverá que las instituciones de educación superior y los organismos dedicados a la investigación científica y tecnológica, desarrollen planes y programas para la formación de especialistas en la materia en todo el territorio nacional y para la investigación de las causas y efectos de los fenómenos ambientales

ARTICULO 40.- La Secretaría del Trabajo y Previsión Social, promoverá el desarrollo de la capacitación y adiestramiento en y para el trabajo en materia de protección al ambiente, y de preservación y restauración del equilibrio ecológico, con arreglo a lo que establece esta Ley y de conformidad con los sistemas, métodos y procedimientos que prevenga la legislación especial. Asimismo, propiciará la incorporación de contenidos ecológicos en los programas de las comisiones mixtas de seguridad e higiene.

ARTICULO 41.- El Gobierno Federal, las entidades federativas y los municipios con arreglo a lo que dispongan las legislaturas locales, fomentarán investigaciones científicas y promoverán programas para el desarrollo de técnicas y procedimientos que permitan prevenir, controlar y abatir la contaminación, propiciar el aprovechamiento racional de los recursos y proteger los ecosistemas. Para ello, se podrán celebrar convenios con instituciones de educación superior, centros de investigación, instituciones del sector social y privado, investigadores y especialistas en la materia.

ARTICULO 42.- Se deroga.

ARTICULO 43.- Se deroga.

TÍTULO SEGUNDO

Biodiversidad

CAPÍTULO I

Áreas Naturales Protegidas

SECCIÓN I

Disposiciones Generales

ARTICULO 44.- Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la Nación ejerce soberanía y jurisdicción, en las que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano, o que requieren ser preservadas y restauradas, quedarán sujetas al régimen previsto en esta Ley y los demás ordenamientos aplicables.

Los propietarios, poseedores o titulares de otros derechos sobre tierras, aguas y bosques comprendidos dentro de áreas naturales protegidas deberán sujetarse a las modalidades que de conformidad con la presente Ley, establezcan los decretos por los que se constituyan dichas áreas, así como a las demás previsiones contenidas en el programa de manejo y en los programas de ordenamiento ecológico que correspondan

ARTICULO 45.- El establecimiento de áreas naturales protegidas, tiene por objeto:

I.- Preservar los ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográficas y ecológicas y de lo

ecosistemas;

- II.- Salvarguardar la diversidad genética de las especies silvestres de las que depende la continuidad evolutiva; así como asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional, en particular preservar las especies que están en peligro de extinción, las amenazadas, las endémicas, las raras y las que se encuentran sujetas a protección especial;
- III.- Asegurar el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y sus elementos;
- IV.- Proporcionar un campo propicio para la investigación científica y el estudio de los ecosistemas y su equilibrio;
- V.- Generar, rescatar y divulgar conocimientos, prácticas y tecnologías, tradicionales o nuevas que permitan la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional;
- VI.- Proteger poblados, vías de comunicación, instalaciones industriales y aprovechamientos agrícolas, mediante zonas forestales en montañas donde se originen torrentes; el ciclo hidrológico de cuencas, así como las demás que tiendan a la protección de elementos circundantes con los que se relacione ecológicamente el área; y
- VII. Proteger los entornos naturales de zonas, monumentos y vestigios arqueológicos, históricos y artísticos, así como zonas turísticas, y otras áreas de importancia para la recreación, la cultura e identidad nacionales y de los pueblos indígenas.

SECCIÓN II

Tipos y Características de las Áreas Naturales Protegidas

ARTICULO 46.- Se consideran áreas naturales protegidas:

- I.- Reservas de la biosfera;
- II.- Se deroga
- III.- Parques nacionales;
- IV.- Monumentos naturales;
- V.- Se deroga.
- VI.- Areas de protección de recursos naturales.
- VII.- Areas de protección de flora y fauna;
- VIII.- Santuarios;
- IX.- Parques y Reservas Estatales, y
- X.- Zonas de preservación ecológica de los centros de población.

Para efectos de lo establecido en el presente Capítulo, son de competencia de la Federación las áreas naturales protegidas comprendidas en las fracciones I a VIII anteriormente señaladas.

Los Gobiernos de los Estados y del Distrito Federal, en los términos que establezca la legislación local en la materia, podrán establecer parques y reservas estatales en áreas relevantes a nivel de las entidades federativas, que reúnan las características señaladas en los artículos 48 y 50 respectivamente de esta Ley. Dichos parques y reservas no podrán establecerse en zonas previamente declaradas como áreas naturales protegidas de competencia de la

Federación, salvo que se trate de las señaladas en la fracción VI de este artículo.

Asimismo, corresponde a los municipios establecer las zonas de preservación ecológicas de los centros de población, conforme a lo previsto en la legislación local.

En las áreas naturales protegidas no podrá autorizarse la fundación de nuevos centros de población.

ARTICULO 47.- En el establecimiento, administración y manejo de las áreas naturales protegidas a que se refiere el artículo anterior, la Secretaría promoverá la participación de sus habitantes, propietarios o poseedores, gobiernos locales, pueblos indígenas, y demás organizaciones sociales, públicas y privadas, con objeto de propiciar el desarrollo integral de la comunidad y asegurar la protección y preservación de los ecosistemas y su biodiversidad.

Para tal efecto, la Secretaría podrá suscribir con los interesados los convenios de concertación o acuerdos de coordinación que correspondan.

ARTICULO 48.- Las reservas de la biosfera se constituirán en áreas biogeográficas relevantes a nivel nacional, representativas de uno o más ecosistemas no alterados significativamente por la acción del ser humano o que requieran ser preservados y restaurados, en los cuales habiten especies representativas de la biodiversidad nacional, incluyendo a las consideradas endémicas, amenazadas o en peligro de extinción.

En tales reservas podrá determinarse la existencia de la superficie o superficies mejor conservadas, o no alteradas, que alojen ecosistemas, o fenómenos naturales de especial importancia, o especies de flora y fauna que requieran protección especial, y que serán conceptuadas como zona o zonas núcleo. En ellas podrá autorizarse la realización de actividades de preservación de los ecosistemas y sus elementos, de investigación científica y educación ecológica, y limitarse o prohibirse aprovechamientos que alteren los ecosistemas.

En las propias reservas deberá determinarse la superficie o superficies que protejan la zona núcleo del impacto exterior, que serán conceptuadas como zonas de amortiguamiento, en donde sólo podrán realizarse actividades productivas emprendidas por las comunidades que ahí habiten al momento de la expedición de la declaratoria respectiva o con su participación, que sean estrictamente compatibles con los objetivos, criterios y programas de aprovechamiento sustentable, en los términos del decreto respectivo y del programa de manejo que se formule y expida, considerando las previsiones de los programas de ordenamiento ecológico que resulten aplicables.

ARTICULO 49.- En las zonas núcleo de las áreas naturales protegidas quedará expresamente prohibido:

- I - Verter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y cualquier clase de cauce, vaso o acuífero, así como desarrollar cualquier actividad contaminante;
- II.- Interrumpir, rellenar, desecar o desviar los flujos hidráulicos;
- III - Realizar actividades cinegéticas o de explotación y aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestres, y
- IV.- Ejecutar acciones que contravengan lo dispuesto por esta Ley, la declaratoria respectiva y las demás disposiciones que de ellas se deriven.

ARTICULO 50.- Los parques nacionales se constituirán, tratándose de representaciones biogeográficas, a nivel nacional, de uno o más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, su valor científico, educativo, de recreo, su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o bien por otras razones análogas de interés general

En los parques nacionales sólo podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la protección de sus recursos naturales, el incremento de su flora y fauna y en general, con la preservación de los ecosistemas y de sus elementos, así como con la investigación, recreación, turismo y educación ecológicos.

ARTICULO 51.- Para los fines señalados en el artículo anterior, así como para proteger y preservar los ecosistemas marinos y regular el aprovechamiento sustentable de la flora y fauna acuática, se establecerán parques nacionales en las zonas marinas mexicanas, que podrán incluir la zona federal marítimo terrestre contigua.

En estas áreas sólo se permitirán actividades relacionadas con la preservación de los ecosistemas acuáticos y sus elementos, las de investigación, repoblación, recreación y educación ecológica, así como los aprovechamientos de recursos naturales que procedan, de conformidad con lo que disponen esta Ley, la Ley de Pesca, la Ley Federal del Mar, las convenciones internacionales de las que México sea parte y los demás ordenamientos aplicables.

Las autorizaciones, concesiones o permisos para el aprovechamiento de los recursos naturales en estas áreas, así como el tránsito de embarcaciones en la zona o la construcción o utilización de infraestructura dentro de la misma, quedarán sujetas a lo que dispongan las declaratorias correspondientes.

Para el establecimiento, administración y vigilancia de los parques nacionales establecidos en las zonas marinas mexicanas, así como para la elaboración de su programa de manejo, se deberán coordinar, atendiendo a sus respectivas competencias, la Secretaría y la Secretaría de Marina.

ARTICULO 52.- Los monumentos naturales se establecerán en áreas que contengan uno o varios elementos naturales, consistentes en lugares u objetos naturales, que por su carácter único o excepcional, interés estético, valor histórico o científico, se resuelva incorporar a un régimen de protección absoluta. Tales monumentos no tienen la variedad de ecosistemas ni la superficie necesaria para ser incluidos en otras categorías de manejo.

En los monumentos naturales únicamente podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con su preservación, investigación científica, recreación y educación.

ARTICULO 53.- Las áreas de protección de recursos naturales, son aquellas destinadas a la preservación y protección del suelo, las cuencas hidrográficas, las aguas y en general los recursos naturales localizados en terrenos forestales de aptitud preferentemente forestal, siempre que dichas áreas no queden comprendidas en otra de las categorías previstas en el artículo 46 de esta Ley.

Se consideran dentro de esta categoría las reservas y zonas forestales, las zonas de protección de ríos, lagos, lagunas, manantiales y demás cuerpos considerados aguas nacionales, particularmente cuando éstos se destinen al abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones.

En las áreas de protección de recursos naturales sólo podrán realizarse actividades relacionadas con la preservación, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales en ellas comprendidos, así como con la investigación, recreación, turismo y educación ecológica, de conformidad con lo que disponga el decreto que las establezca, el programa de manejo respectivo y las demás disposiciones jurídicas aplicables.

ARTICULO 54.- Las áreas de protección de la flora y la fauna se constituirán de conformidad con las disposiciones de esta Ley, de las Leyes Federal de Caza, de Pesca y de las demás leyes aplicables, en los lugares que contienen los hábitat de cuyo equilibrio y preservación dependen la existencia, transformación y desarrollo de las especies de flora y fauna silvestres.

En dichas áreas podrá permitirse la realización de actividades relacionadas con la preservación, repoblación, propagación, aclimatación, refugio, investigación y aprovechamiento sustentable de las especies mencionadas, así como las relativas a educación y difusión en la materia.

Asimismo, podrá autorizarse el aprovechamiento de los recursos naturales a las comunidades que ahí habiten en el momento de la expedición de la declaratoria respectiva, o que resulte posible según los estudios que se realicen, el que deberá sujetarse a las normas oficiales mexicanas y usos del suelo que al efecto se establezcan en la propia declaratoria.

ARTICULO 55.- Los santuarios son aquellas áreas que se establecen en zonas caracterizadas por una considerable riqueza de flora o fauna, o por la presencia de especies, subespecies o hábitat de distribución restringida. Dichas áreas abarcarán cañadas, vegas, relictos, grutas, cavernas, cenotes, caletas, u otras unidades topográficas o geográficas que requieran ser preservadas o protegidas.

En los santuarios sólo se permitirán actividades de investigación, recreación y educación ambiental, compatibles con la naturaleza y características del área.

ARTICULO 56.- Las autoridades de los Estados y del Distrito Federal, podrán promover ante el Gobierno Federal, el reconocimiento de las áreas naturales protegidas que conforme a su legislación establezcan, con el propósito de compatibilizar los regímenes de protección correspondientes.

ARTICULO 56 BIS.- La Secretaría constituirá un Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas, que estará integrado por representantes de la misma, de otras dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, así como de instituciones académicas y centros de investigación, agrupaciones de productores y empresarios, organizaciones no gubernamentales y de otros organismos de carácter social o privado, así como personas físicas, con reconocido prestigio en la materia.

El Consejo fungirá como órgano de consulta y apoyo de la Secretaría en la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de la política para el establecimiento, manejo y vigilancia de las áreas naturales protegidas de su competencia.

Las opiniones y recomendaciones que formule el Consejo, deberán ser considerados por la Secretaría en el ejercicio de las facultades que en materia de áreas naturales protegidas le corresponden conforme a éste y otros ordenamientos jurídicos aplicables.

El Consejo podrá invitar a sus sesiones a representantes de los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, cuando se traten asuntos relacionados con áreas naturales protegidas de competencia federal que se encuentren dentro de su territorio. Asimismo, podrá invitar a representantes de ejidos, comunidades, propietarios, poseedores y en general a cualquier persona cuya participación sea necesaria conforme al asunto que en cada caso se trate

SECCIÓN III

Declaratorias para el Establecimiento, Administración y Vigilancia de Áreas Naturales Protegidas

ARTICULO 57.- Las áreas naturales protegidas señaladas en las fracciones I a VIII del artículo 46 de esta Ley, se establecerán mediante declaratoria que expida el Titular del Ejecutivo Federal conforme a ésta y las demás leyes aplicables

ARTICULO 58.- Previamente a la expedición de las declaratorias para el establecimiento de las áreas naturales protegidas a que se refiere el artículo anterior, se deberán realizar los estudios que lo justifiquen, en los términos del presente capítulo, los cuales deberán ser puestos a disposición del público. Asimismo, la Secretaría deberá solicitar la opinión de:

- I.- Los gobiernos locales en cuyas circunscripciones territoriales se localice el área natural de que se trate;
- II.- Las dependencias de la Administración Pública Federal que deban intervenir, de conformidad con sus atribuciones;
- III.- Las organizaciones sociales públicas o privadas, pueblos indígenas, y demás personas físicas o morales

interesadas, y

IV.- Las universidades, centros de investigación, instituciones y organismos de los sectores público, social y privado interesados en el establecimiento, administración y vigilancia de áreas naturales protegidas

ARTICULO 59.- Los pueblos indígenas, las organizaciones sociales, públicas o privadas, y demás personas interesadas, podrán promover ante la Secretaría el establecimiento, en terrenos de su propiedad o mediante contrato con terceros, de áreas naturales protegidas, cuando se trate de áreas destinadas a la preservación, protección y restauración de la biodiversidad. La Secretaría, en su caso, promoverá ante el Ejecutivo Federal la expedición de la declaratoria respectiva, mediante la cual se establecerá el manejo del área por parte del promovente, con la participación de la Secretaría conforme a las atribuciones que al respecto se le otorgan en esta Ley.

Asimismo, los sujetos señalados en el párrafo anterior, podrán destinar voluntariamente los predios que les pertenezcan a acciones de preservación de los ecosistemas y su biodiversidad. Para tal efecto, podrán solicitar a la Secretaría el reconocimiento respectivo. El certificado que emita dicha autoridad, deberá contener, por lo menos, el nombre del promovente, la denominación del área respectiva, su ubicación, superficie y colindancias, el régimen de manejo a que se sujetará y, en su

caso, el plazo de vigencia. Dichos predios se considerarán como áreas productivas dedicadas a una función de interés público.

ARTICULO 60.- Las declaratorias para el establecimiento de las áreas naturales protegidas señaladas en las fracciones I a VIII del artículo 46 de esta Ley deberán contener, por lo menos, los siguientes aspectos:

- I.- La delimitación precisa del área, señalando la superficie, ubicación, deslinde y en su caso, la zonificación correspondiente;
- II.- Las modalidades a que se sujetará dentro del área, el uso o aprovechamiento de los recursos naturales en general o específicamente de aquellos sujetos a protección;
- III.- La descripción de actividades que podrán llevarse a cabo en el área correspondiente, y las modalidades y limitaciones a que se sujetarán;
- IV.- La causa de utilidad pública que en su caso fundamente la expropiación de terrenos, para que la nación adquiera su dominio, cuando al establecerse un área natural protegida se requiera dicha resolución; en estos casos, deberán observarse las previsiones de las Leyes de Expropiación, Agraria y los demás ordenamientos aplicables;
- V.- Los lineamientos generales para la administración, el establecimiento de órganos colegiados representativos, la creación de fondos o fideicomisos y la elaboración del programa de manejo del área, y
- VI.- Los lineamientos para la realización de las acciones de preservación, restauración y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales dentro de las áreas naturales protegidas, para su administración y vigilancia, así como para la elaboración de las reglas administrativas a que se sujetarán las actividades dentro del área respectiva, conforme a lo dispuesto en ésta y otras leyes aplicables;

Las medidas que el Ejecutivo Federal podrá imponer para la preservación y protección de las áreas naturales protegidas, serán únicamente las que se establecen, según las materias respectivas, en la presente Ley, las Leyes Forestal, de Aguas Nacionales, de Pesca, Federal de Caza, y las demás que resulten aplicables.

La Secretaría promoverá el ordenamiento ecológico del territorio dentro y en las zonas de influencia de las áreas naturales protegidas, con el propósito de generar nuevos patrones de desarrollo regional acordes con objetivos de

sustentabilidad.

ARTICULO 61.- Las declaratorias deberán publicarse en el Diario Oficial de la Federación y se notificarán previamente a los propietarios o poseedores de los predios afectados, en forma personal cuando se conocieren sus domicilios; en caso contrario se hará una segunda publicación, la que surtirá efectos de notificación. Las declaratorias se inscribirán en él o los registros públicos de la propiedad que correspondan.

ARTICULO 62.- Una vez establecida un área natural protegida, sólo podrá ser modificada su extensión, y en su caso, los usos del suelo permitidos o cualquiera de sus disposiciones, por la autoridad que la haya establecido, siguiendo las mismas formalidades previstas en esta Ley para la expedición de la declaratoria respectiva

ARTICULO 63.- Las áreas naturales protegidas establecidas por el Ejecutivo Federal podrán comprender, de manera parcial o total, predios sujetos a cualquier régimen de propiedad.

El Ejecutivo Federal, a través de las dependencias competentes, realizará los programas de regularización de la tenencia de la tierra en las áreas naturales protegidas, con el objeto de dar seguridad jurídica a los propietarios y poseedores de los predios en ellas comprendidos.

La Secretaría promoverá que las autoridades Federales, Estatales, Municipales y del Distrito Federal, dentro del ámbito de su competencia, en los términos que establezcan las disposiciones jurídicas aplicables y, en su caso, los programas de manejo, den prioridad a los programas de regularización de la tenencia de la tierra en las áreas naturales protegidas de competencia federal.

Los terrenos nacionales ubicados dentro de áreas naturales protegidas de competencia federal, quedarán a disposición de la Secretaría, quien los destinará a los fines establecidos en el decreto correspondiente, conforme a las disposiciones jurídicas que resulten aplicables.

ARTICULO 64.- En el otorgamiento o expedición de permisos, licencias, concesiones, o en general de autorizaciones a que se sujetaren la exploración, explotación o aprovechamiento de recursos en áreas naturales protegidas, se observarán las disposiciones de la presente Ley, de las leyes en que se fundamenten las declaratorias de creación correspondiente, así como las prevenciones de las propias declaratorias y los programas de manejo.

El solicitante deberá en tales casos demostrar ante la autoridad competente, su capacidad técnica y económica para llevar a cabo la exploración, explotación o aprovechamiento de que se trate, sin causar deterioro al equilibrio ecológico.

La Secretaría, así como las Secretarías de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural y de la Reforma Agraria, prestarán oportunamente a ejidatarios, comuneros y pequeños propietarios la asesoría técnica necesaria para el cumplimiento de lo dispuesto en el párrafo anterior, cuando éstos no cuenten con suficientes recursos económicos para procurársela.

La Secretaría, tomando como base los estudios técnicos y socioeconómicos practicados, podrá solicitar a la autoridad competente, la cancelación o revocación del permiso, licencia, concesión o autorización correspondiente, cuando la exploración, explotación o aprovechamiento de recursos ocasione o pueda ocasionar deterioro al equilibrio ecológico.

ARTICULO 64 BIS.- El Ejecutivo Federal, a través de la Secretaría en coordinación con la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, así como los gobiernos de las entidades federativas y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias:

- I.- Promoverán las inversiones públicas y privadas para el establecimiento y manejo de las áreas naturales protegidas.

- II.- Establecerán o en su caso promoverán la utilización de mecanismos para captar recursos y financiar o apoyar el manejo de las áreas naturales protegidas;
- III.- Establecerán los incentivos económicos y los estímulos fiscales para las personas, y las organizaciones sociales, públicas o privadas, que participen en la administración y vigilancia de las áreas naturales protegidas, así como para quienes aporten recursos para tales fines o destinen sus predios a acciones de preservación en términos del artículo 59 de esta Ley, y
- IV.- Promoverán ante la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, que en las participaciones Federales a Estados o Municipios se considere como criterio, la superficie total que cada uno de éstos destine a la preservación de los ecosistemas y su biodiversidad, en términos de lo dispuesto en el artículo 46 de esta Ley.

ARTICULO 64 BIS 1.- La Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, podrán otorgar a los propietarios, poseedores, organizaciones sociales, públicas o privadas, pueblos indígenas, y demás personas interesadas, concesiones, permisos o autorizaciones para la realización de obras o actividades en las áreas naturales protegidas, de conformidad con lo que establece esta Ley, la declaratoria y el programa de manejo correspondientes.

Los núcleos agrarios, pueblos indígenas y demás propietarios o poseedores de los predios en los que se pretendan desarrollar las obras o actividades anteriormente señaladas, tendrán preferencia para obtener los permisos, concesiones y autorizaciones respectivos.

ARTICULO 65.- La Secretaría formulará, dentro del plazo de un año contado a partir de la publicación de la declaratoria respectiva en el Diario Oficial de la Federación, el programa de manejo del área natural protegida de que se trate, dando participación a los habitantes, propietarios y poseedores de los predios en ella incluidos, a las demás dependencias competentes, los gobiernos estatales, municipales y del Distrito Federal, en su caso, así como a organizaciones sociales, públicas o privadas, y demás personas interesadas.

Una vez establecida un área natural protegida de competencia federal, la Secretaría deberá designar al Director del área de que se trate, quién será responsable de coordinar la formulación, ejecución y evaluación del programa de manejo correspondiente, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las disposiciones que de ella se deriven.

ARTICULO 66.- El programa de manejo de las áreas naturales protegidas deberá contener, por lo menos, lo siguiente:

- I.- La descripción de las características físicas, biológicas, sociales y culturales del área natural protegida, en el contexto nacional, regional y local, así como el análisis de la situación que guarda la tenencia de la tierra en la superficie respectiva;
- II.- Las acciones a realizar a corto, mediano y largo plazo, estableciendo su vinculación con el Plan Nacional de Desarrollo, así como con los programas sectoriales correspondientes. Dichas acciones comprenderán, entre otras las siguientes: de investigación y educación ambientales, de protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, la flora y la fauna, para el desarrollo de actividades recreativas, turísticas, obras de infraestructura y demás actividades productivas, de financiamiento para la administración del área, de prevención y control de contingencias, de vigilancia y las demás que por las características propias del área natural protegida se requieran.
- III.- La forma en que se organizará la administración del área y los mecanismos de participación de los individuos y comunidades asentadas en la misma, así como de todas aquellas personas, instituciones, grupos y organizaciones sociales interesadas en su protección y aprovechamiento sustentable;
- IV.- Los objetivos específicos del área natural protegida;

V.- La referencia a las normas oficiales mexicanas aplicables a todas y cada una de las actividades a que esté sujeta el área;

VI.- Los inventarios biológicos existentes y los que se prevea realizar, y

VII. Las reglas de carácter administrativo a que se sujetarán las actividades que se desarrollen en el área natural protegida de que se trate.

La Secretaría deberá publicar en el Diario Oficial de la Federación, un resumen del programa de manejo respectivo y el plano de localización del área.

ARTICULO 67.- La Secretaría podrá, una vez que se cuente con el programa de manejo respectivo, otorgar a los gobiernos de los Estados, de los Municipios y del Distrito Federal, así como a ejidos, comunidades agrarias, pueblos indígenas, grupos y organizaciones sociales, y empresariales y demás personas físicas o morales interesadas, la administración de las áreas naturales protegidas a que se refieren las fracciones I a VIII del artículo 46 de esta Ley. Para tal efecto, se deberán suscribir los acuerdos o convenios que conforme a la legislación aplicable procedan.

Quienes en virtud de lo dispuesto en este artículo adquieran la responsabilidad de administrar las áreas naturales protegidas, estarán obligados a sujetarse a las previsiones contenidas en la presente Ley, los reglamentos, normas oficiales mexicanas que se expidan en la materia, así como a cumplir los decretos por los que se establezcan dichas áreas y los programas de manejo respectivos.

La Secretaría deberá supervisar y evaluar el cumplimiento de los acuerdos y convenios a que se refiere este precepto. Asimismo, deberá asegurarse que en las autorizaciones para la realización de actividades en áreas naturales protegidas de su competencia, se observen las previsiones anteriormente señaladas.

ARTICULO 68.- Se deroga.

ARTICULO 69.- Se deroga.

ARTICULO 70.- Se deroga.

ARTICULO 71.- Se deroga.

ARTICULO 72.- Se deroga.

ARTICULO 73.- Se deroga.

ARTICULO 74.- La Secretaría integrará el Registro Nacional de Áreas Naturales Protegidas, en donde deberán inscribirse los decretos mediante los cuales se declaren las áreas naturales protegidas de interés federal, y los instrumentos que los modifiquen. Deberán consignarse en dicho Registro los datos de la inscripción de los decretos respectivos en los registros públicos de la propiedad que correspondan. Asimismo, se deberá integrar el registro de los certificados a que se refiere el artículo 59 de esta Ley.

Cualquier persona podrá consultar el Registro Nacional de Áreas Naturales Protegidas, el cual deberá ser integrado al Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales.

ARTICULO 75.- Todos los actos, convenios y contratos relativos a la propiedad, posesión o cualquier derecho relacionado con bienes inmuebles ubicados en áreas naturales protegidas deberán contener referencia de la declaratoria correspondiente y de sus datos de inscripción en el Registro Público de la Propiedad.

Los notarios y cualesquiera otros fedatarios públicos sólo podrán autorizar las escrituras públicas, actos, convenios

o contratos en los que intervengan, cuando se cumpla con lo dispuesto en el presente artículo.

ARTICULO 75 BIS.- Los ingresos que la Federación perciba por concepto del otorgamiento de permisos, autorizaciones y licencias en materia de áreas naturales protegidas, conforme lo determinen los ordenamientos aplicables, se destinarán a la realización de acciones de preservación y restauración de la biodiversidad dentro de las áreas en las que se generen dichos ingresos.

SECCIÓN IV

Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas

ARTICULO 76.- La Secretaría integrará el Sistema Nacional de Areas Naturales Protegidas, con el propósito de incluir en el mismo las áreas que por su biodiversidad y características ecológicas sean consideradas de especial relevancia en el país.

La integración de áreas naturales protegidas de competencia federal al Sistema Nacional de Areas Naturales Protegidas, por parte de la Secretaría, requerirá la previa opinión favorable del Consejo Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

ARTICULO 77.- Las Dependencias de la Administración Pública Federal, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los municipios, deberán considerar en sus programas y acciones que afecten el territorio de un área natural protegida de competencia federal, así como en el otorgamiento de permisos, concesiones y autorizaciones para obras o actividades que se desarrollen en dichas áreas, las previsiones contenidas en la presente Ley, los reglamentos, normas oficiales mexicanas que se expidan en la materia, en los decretos por los que se establezcan las áreas naturales protegidas y en los programas de manejo respectivos.

CAPÍTULO II

Zonas de Restauración ARTICULO 78.- En aquellas áreas que presenten procesos de degradación o desertificación, o graves desequilibrios ecológicos, la Secretaría deberá formular y ejecutar programas de restauración ecológica, con el propósito de que se lleven a cabo las acciones necesarias para la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propicien la evolución y continuidad de los procesos naturales que en ella se desarrollaban.

En la formulación, ejecución y seguimiento de dichos programas, la Secretaría deberá promover la participación de los propietarios, poseedores, organizaciones sociales, públicas o privadas, pueblos indígenas, gobiernos locales, y demás personas interesadas.

ARTICULO 78 BIS.- En aquéllos casos en que se estén produciendo procesos acelerados de desertificación o degradación que impliquen la pérdida de recursos de muy difícil regeneración, recuperación o restablecimiento, o afectaciones irreversibles a los ecosistemas o sus elementos, la Secretaría, promoverá ante el Ejecutivo Federal la expedición de declaratorias para el establecimiento de zonas de restauración ecológica. Para tal efecto, elaborará previamente, los estudios que las justifiquen.

Las declaratorias deberán publicarse en el Diario Oficial de la Federación, y serán inscritas en el Registro Público de la Propiedad correspondiente.

Las declaratorias podrán comprender, de manera parcial o total, predios sujetos a cualquier régimen de propiedad, y expresarán:

- I.- La delimitación de la zona sujeta a restauración ecológica, precisando superficie, ubicación y deslinde;
- II.- Las acciones necesarias para regenerar, recuperar o restablecer las condiciones naturales de la zona;

- III.- Las condiciones a que se sujetarán, dentro de la zona, los usos del suelo, el aprovechamiento de los recursos naturales, la flora y la fauna, así como la realización de cualquier tipo de obra o actividad;
- IV.- Los lineamientos para la elaboración y ejecución del programa de restauración ecológica correspondiente, así como para la participación en dichas actividades de propietarios, poseedores, organizaciones sociales, públicas o privadas, pueblos indígenas, gobiernos locales y demás personas interesadas, y
- V.- Los plazos para la ejecución del programa de restauración ecológica respectivo.

ARTICULO 78 BIS 1.- Todos los actos y convenios relativos a la propiedad, posesión o cualquier otro derecho relacionado con bienes inmuebles ubicados en las zonas que fueren materia de las declaratorias a que se refiere el artículo 78 BIS quedarán sujetas a la aplicación de las modalidades previstas en las propias declaratorias.

Los notarios y cualesquiera otros fedatarios públicos, harán constar tal circunstancia al autorizar las escrituras públicas, actos, convenios o contratos en los que intervengan.

Será nulo todo acto, convenio o contrato que contravenga lo establecido en la mencionada declaratoria.

CAPÍTULO III

Flora y Fauna Silvestre

ARTICULO 79.- Para la preservación y aprovechamiento sustentable de la flora y fauna silvestre, se considerarán los siguientes criterios:

- I.- La preservación de la biodiversidad y del hábitat natural de las especies de flora y fauna que se encuentran en el territorio nacional y en las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción;
- II.- La continuidad de los procesos evolutivos de las especies de flora y fauna y demás recursos biológicos, destinando áreas representativas de los sistemas ecológicos del país a acciones de preservación e investigación;
- III.- La preservación de las especies endémicas, amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial;
- IV.- El combate al tráfico o apropiación ilegal de especies;
- V.- El fomento y creación de las estaciones biológicas de rehabilitación y repoblamiento de especies de fauna silvestre;
- VI.- La participación de las organizaciones sociales, públicas o privadas, y los demás interesados en la preservación de la biodiversidad;
- VII.- El fomento y desarrollo de la investigación de la fauna y flora silvestre, y de los materiales genéticos, con el objeto de conocer su valor científico, ambiental, económico y estratégico para la Nación,
- VIII.- El fomento del trato digno y respetuoso a las especies animales, con el propósito de evitar la crueldad en contra de éstas;
- IX.- El desarrollo de actividades productivas alternativas para las comunidades rurales, y
- X.- El conocimiento biológico tradicional y la participación de las comunidades, así como los pueblos indígenas en la elaboración de programas de biodiversidad de las áreas en que habiten.

ARTICULO 80.- Los criterios para la preservación y aprovechamiento sustentable de la flora y fauna silvestre, a que se refiere el artículo 79 de esta Ley, serán considerados en:

- I.- El otorgamiento de concesiones, permisos y, en general, de toda clase de autorizaciones para el aprovechamiento, posesión, administración, conservación, repoblación, propagación y desarrollo de la flora y fauna silvestres;
- II.- El establecimiento o modificación de vedas de la flora y fauna silvestres;
- III.- Las acciones de sanidad fitopecuaria;
- IV.- La protección y conservación de la flora y fauna del territorio nacional, contra la acción perjudicial de plagas y enfermedades, o la contaminación que pueda derivarse de actividades fitopecuarias;
- V.- El establecimiento de un sistema nacional de información sobre biodiversidad y de certificación del uso sustentable de sus componentes que desarrolle la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, así como la regulación de la preservación y restauración de flora y fauna silvestre;
- VI.- La formulación del programa anual de producción, repoblación, cultivo, siembra y disseminación de especies de la flora y fauna acuáticas;
- VII.- La creación de áreas de refugio para proteger las especies acuáticas que así lo requieran; y
- VIII.- La determinación de los métodos y medidas aplicables o indispensables para la conservación, cultivo y repoblación de los recursos pesqueros.

ARTICULO 81.- La Secretaría establecerá las vedas de la flora y fauna silvestre, y su modificación o levantamiento, con base en los estudios que para tal efecto previamente lleve a cabo

Las vedas tendrán como finalidad la preservación, repoblación, propagación, distribución, aclimatación o refugio de los especímenes, principalmente de aquellas especies endémicas, amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial.

Los instrumentos jurídicos mediante los cuales se establezcan vedas, deberán precisar su naturaleza y temporalidad, los límites de las áreas o zonas vedadas y las especies de la flora o la fauna comprendidas en ellas, de conformidad con las disposiciones legales que resulten aplicables.

Dichos instrumentos deberán publicarse en el órgano oficial de difusión del Estado o Estados donde se ubique el área vedada, sin perjuicio de lo dispuesto en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y demás ordenamientos aplicables.

ARTICULO 82.- Las disposiciones de esta Ley son aplicables a la posesión, administración, preservación, repoblación, propagación, importación, exportación y desarrollo de la flora y fauna silvestre y material genético, sin perjuicio de lo establecido en otros ordenamientos jurídicos

ARTICULO 83.- El aprovechamiento de los recursos naturales en áreas que sean el hábitat de especies de flora o fauna silvestres, especialmente de las endémicas, amenazadas o en peligro de extinción, deberá hacerse de manera que no se alteren las condiciones necesarias para la subsistencia, desarrollo y evolución de dichas especies

La Secretaría deberá promover y apoyar el manejo de la flora y fauna silvestre, con base en el conocimiento biológico tradicional, información técnica, científica y económica, con el propósito de hacer un aprovechamiento sustentable de las especies.

ARTICULO 84.- La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas para la preservación y aprovechamiento

sustentable de la flora y fauna silvestre y otros recursos biológicos.

ARTICULO 85.- Cuando así se requiera para la protección de especies, la Secretaría promoverá ante la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial el establecimiento de medidas de regulación o restricción, en forma total o parcial, a la exportación o importación de especímenes de la flora y fauna silvestres e impondrá las restricciones necesarias para la circulación o tránsito por el territorio nacional de especies de la flora y fauna silvestres procedentes del y destinadas al extranjero.

ARTICULO 86.- A la Secretaría le corresponde aplicar las disposiciones que sobre preservación y aprovechamiento sustentable de especies de fauna silvestre establezcan ésta y otras leyes, y autorizar su aprovechamiento en actividades económicas, sin perjuicio de las facultades que correspondan a otras dependencias, conforme a otras leyes.

ARTICULO 87.- El aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestre en actividades económicas podrá autorizarse cuando los particulares garanticen su reproducción controlada o desarrollo en cautiverio o semicautiverio o cuando la tasa de explotación sea menor a la de renovación natural de las poblaciones, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas que al efecto expida la Secretaría

No podrá autorizarse el aprovechamiento sobre poblaciones naturales de especies amenazadas o en peligro de extinción, excepto en los casos en que se garantice su reproducción controlada y el desarrollo de poblaciones de las especies que correspondan.

La autorización para el aprovechamiento sustentable de especies endémicas se otorgará conforme a las normas oficiales mexicanas que al efecto expida la Secretaría, siempre que dicho aprovechamiento no amenace o ponga en peligro de extinción a la especie.

El aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestre requiere el consentimiento expreso del propietario o legítimo poseedor del predio en que éstas se encuentren. Asimismo, la Secretaría podrá otorgar a dichos propietarios o poseedores, cuando garanticen la reproducción controlada y el desarrollo de poblaciones de fauna silvestre, los permisos cinegéticos que correspondan

La colecta de especies de flora y fauna silvestre, así como de otros recursos biológicos con fines de investigación científica, requiere de autorización de la Secretaría y deberá sujetarse a los términos y formalidades que se establezcan en las normas oficiales mexicanas que se expidan, así como en los demás ordenamientos que resulten aplicables. En todo caso, se deberá garantizar que los resultados de la investigación estén a disposición del público. Dichas autorizaciones no podrán amparar el aprovechamiento para fines de utilización en biotecnología, la cual se sujetará a lo dispuesto en el artículo 87 BIS.

El aprovechamiento de recursos forestales no maderables y de leña para usos domésticos se sujetará a las normas oficiales mexicanas que expida la Secretaría y demás disposiciones aplicables

ARTICULO 87 BIS.- El aprovechamiento de especies de flora y fauna silvestre, así como de otros recursos biológicos con fines de utilización en la biotecnología requiere de autorización de la Secretaría.

La autorización a que se refiere este artículo sólo podrá otorgarse si se cuenta con el consentimiento previo, expreso e informado, del propietario o legítimo poseedor del predio en el que el recurso biológico se encuentre.

Asimismo, dichos propietarios o legítimos poseedores tendrán derecho a una repartición equitativa de los beneficios que se deriven o puedan derivarse de los aprovechamientos a que se refiere este artículo, con arreglo a las disposiciones jurídicas aplicables.

La Secretaría y las demás dependencias competentes, establecerán los mecanismos necesarios para intercambiar información respecto de autorizaciones o resoluciones relativas al aprovechamiento de recursos biológicos para los

finas a que se refiere este precepto.

ARTICULO 87 BIS 1.- Los ingresos que la Federación perciba por concepto del otorgamiento de permisos, autorizaciones y licencias en materia de flora y fauna silvestre, conforme lo determinen los ordenamientos aplicables, se destinarán a la realización de acciones de preservación y restauración de la biodiversidad en las áreas que constituyan el hábitat de las especies de flora y fauna silvestre respecto de las cuales se otorgaron los permisos, licencias o autorizaciones correspondientes.

ARTICULO 87 BIS 2.- El Gobierno Federal, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, regularán el trato digno y respetuoso que deberá darse a los animales.

TÍTULO TERCERO

Aprovechamiento Sustentable de los Elementos Naturales

CAPÍTULO I

Aprovechamiento Sustentable del Agua y los Ecosistemas Acuáticos

ARTICULO 88.- Para el aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos se considerarán los siguientes criterios:

- I.- Corresponde al Estado y a la sociedad la protección de los ecosistemas acuáticos y del equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico;
- II.- El aprovechamiento sustentable de los recursos naturales que comprenden los ecosistemas acuáticos deben realizarse de manera que no se afecte su equilibrio ecológico;
- III.- Para mantener la integridad y el equilibrio de los elementos naturales que intervienen en el ciclo hidrológico, se deberá considerar la protección de suelos y áreas boscosas y selváticas y el mantenimiento de caudales básicos de las corrientes de agua, y la capacidad de recarga de los acuíferos, y
- IV.- La preservación y el aprovechamiento sustentable del agua, así como de los ecosistemas acuáticos es responsabilidad de sus usuarios, así como de quienes realicen obras o actividades que afecten dichos recursos.

ARTICULO 89.- Los criterios para el aprovechamiento sustentable del agua y de los ecosistemas acuáticos, serán considerados en:

- I.- La formulación e integración del Programa Nacional Hidráulico;
- II - El otorgamiento de concesiones, permisos, y en general toda clase de autorizaciones para el aprovechamiento de recursos naturales o la realización de actividades que afecten o puedan afectar el ciclo hidrológico;
- III.- El otorgamiento de autorizaciones para la desviación, extracción o derivación de aguas de propiedad nacional;
- IV.- El establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o de reserva.
- V.- Las suspensiones o revocaciones de permisos, autorizaciones, concesiones o asignaciones otorgados conforme a las disposiciones previstas en la Ley de Aguas Nacionales, en aquellos casos de obras o actividades que dañen los recursos hidráulicos nacionales o que afecten el equilibrio ecológico;
- VI.- La operación y administración de los sistemas de agua potable y alcantarillado que sirven a los centros de población e industrias;

VII.- Las previsiones contenidas en el programa director para el desarrollo urbano del Distrito Federal respecto de la política de reuso de aguas;

VIII. Las políticas y programas para la protección de especies acuáticas endémicas, amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial;

IX.- Las concesiones para la realización de actividades de acuacultura, en términos de lo previsto en la Ley de Pesca, y

X.- La creación y administración de áreas o zonas de protección pesquera.

ARTICULO 90.- La Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Salud, expedirán las normas oficiales mexicanas para el establecimiento y manejo de zonas de protección de ríos, manantiales, depósitos y en general, fuentes de abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones e industrias, y promoverá el establecimiento de reservas de agua para consumo humano.

ARTICULO 91.- El otorgamiento de las autorizaciones para afectar el curso o cauce de las corrientes de agua, se sujetará a los criterios ecológicos contenidos en la presente Ley.

ARTICULO 92.- Con el propósito de asegurar la disponibilidad del agua y abatir los niveles de desperdicio, las autoridades competentes promoverán el ahorro y uso eficiente del agua, el tratamiento de aguas residuales y su reuso.

ARTICULO 93.- La Secretaría, realizará las acciones necesarias para evitar, y en su caso controlar procesos de eutrofización, salinización y cualquier otro proceso de contaminación en las aguas nacionales

ARTICULO 94.- La exploración, explotación, aprovechamiento y administración de los recursos acuáticos vivos y no vivos, se sujetará a lo que establecen esta Ley, la Ley de Pesca, las normas oficiales mexicanas y las demás disposiciones aplicables.

ARTICULO 95.- La Secretaría deberá solicitar a los interesados, en los términos señalados en esta Ley, la realización de estudios de impacto ambiental previo al otorgamiento de concesiones, permisos y en general, autorizaciones para la realización de actividades pesqueras, cuando el aprovechamiento de las especies ponga en peligro su preservación o pueda causar desequilibrio ecológico.

ARTICULO 96.- La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas para la protección de los ecosistemas acuáticos y promoverá la concertación de acciones de preservación y restauración de los ecosistemas acuáticos con los sectores productivos y las comunidades

ARTICULO 97.- La Secretaría establecerá viveros, criaderos y reservas de especies de flora y fauna acuáticas

CAPÍTULO II

Preservación y Aprovechamiento Sustentable del Suelo y sus Recursos

ARTICULO 98.- Para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se considerarán los siguientes criterios.

- I.- El uso del suelo debe ser compatible con su vocación natural y no debe alterar el equilibrio de los ecosistemas.
- II.- El uso de los suelos debe hacerse de manera que éstos mantengan su integridad física y su capacidad productiva;

- III.- Los usos productivos del suelo deben evitar prácticas que favorezcan la erosión, degradación o modificación de las características topográficas, con efectos ecológicos adversos;
- IV.- En las acciones de preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, deberán considerarse las medidas necesarias para prevenir o reducir su erosión, deterioro de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y la pérdida duradera de la vegetación natural;
- V.- En las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, deberán llevarse a cabo las acciones de regeneración, recuperación y rehabilitación necesarias, a fin de restaurarlas, y
- VI.- La realización de las obras públicas o privadas que por sí mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural.

ARTICULO 99.- Los criterios ecológicos para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se considerarán en.

- I.- Los apoyos a las actividades agrícolas que otorgue el Gobierno Federal, de manera directa o indirecta, sean de naturaleza crediticia, técnica o de inversión, para que promuevan la progresiva incorporación de cultivos compatibles con la preservación del equilibrio ecológico y la restauración de los ecosistemas;
- II.- La fundación de centros de población y la radicación de asentamientos humanos;
- III.- El establecimiento de usos, reservas y destinos, en los planes de desarrollo urbano, así como en las acciones de mejoramiento y conservación de los centros de población;
- IV.- La determinación de usos, reservas y destinos en predios forestales;
- V.- El establecimiento de zonas y reservas forestales;
- VI.- La determinación o modificación de los límites establecidos en los coeficientes de agostadero;
- VII.- Las disposiciones, lineamientos técnicos y programas de protección y restauración de suelos en las actividades agropecuarias, forestales e hidráulicas;
- VIII.- El establecimiento de distritos de conservación del suelo;
- IX.- La ordenación forestal de las cuencas hidrográficas del territorio nacional;
- X.- El otorgamiento y la modificación, suspensión o revocación de permisos de aprovechamiento forestal.
- XI.- Las actividades de extracción de materias de subsuelo; la exploración, explotación, beneficio y aprovechamiento de sustancias minerales; las excavaciones y todas aquellas acciones que alteren la cubierta y suelos forestales, y
- XII.- La formulación de los programas de ordenamiento ecológico a que se refiere esta Ley.

ARTICULO 100.- Las autorizaciones para el aprovechamiento de recursos forestales implican la obligación de hacer un aprovechamiento sustentable de ese recurso. Cuando las actividades forestales deterioren gravemente el equilibrio ecológico, afecten la biodiversidad de la zona, así como la regeneración y capacidad productiva de los terrenos, la Secretaría revocará, modificará o suspenderá la autorización respectiva, en términos de lo dispuesto por esta Ley y la Ley Forestal.

ARTICULO 101.- En las zonas selváticas, el Gobierno Federal atenderá en forma prioritaria, de conformidad con las disposiciones aplicables:

- I.- La preservación y el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas selváticos, donde existan actividades agropecuarias establecidas;
- II.- El cambio progresivo de la práctica de roza, tumba y quema a otras que no impliquen deterioro de los ecosistemas, o de aquéllas que no permitan su regeneración natural o que alteren los procesos de sucesión ecológica;
- IV.- El cumplimiento, en la extracción de recursos no renovables, de los criterios establecidos en esta Ley, así como de las normas oficiales mexicanas que al efecto se expidan;
- V.- La introducción de cultivos compatibles con los ecosistemas y que favorezcan su restauración cuando hayan sufrido deterioro;
- VI.- La regulación ecológica de los asentamientos humanos,
- VII. La prevención de los fenómenos de erosión, deterioro de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y la pérdida duradera de la vegetación natural, y

La regeneración, recuperación y rehabilitación de las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, a fin de restaurarlas.

ARTICULO 101 BIS.- En la realización de actividades en zonas áridas, deberán observarse los criterios que para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se establecen en esta Ley y las demás disposiciones que resulten aplicables.

ARTICULO 102.- Todas las autorizaciones que afecten el uso del suelo en las zonas selváticas o áridas, así como el equilibrio ecológico de sus ecosistemas, quedan sujetas a los criterios y disposiciones que establecen esta Ley y demás aplicables.

ARTICULO 103.- Quienes realicen actividades agrícolas y pecuarias deberán llevar a cabo las prácticas de preservación, aprovechamiento sustentable y restauración necesarias para evitar la degradación del suelo y desequilibrios ecológicos y, en su caso, lograr su rehabilitación, en los términos de lo dispuesto por ésta y las demás leyes aplicables.

ARTICULO 104.- La Secretaría promoverá ante la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural y las demás dependencias competentes, la introducción y generalización de prácticas de protección y restauración de los suelos en las actividades agropecuarias, así como la realización de estudios de impacto ambiental previos al otorgamiento de autorizaciones para efectuar cambios del uso del suelo, cuando existan elementos que permitan prever grave deterioro de los suelos afectados y del equilibrio ecológico en la zona

ARTICULO 105.- En los estímulos fiscales que se otorguen a las actividades forestales, deberán considerarse criterios ecológicos de manera que se promuevan el desarrollo y fomento integral de la actividad forestal, el establecimiento y ampliación de plantaciones forestales y las obras para la protección de suelos forestales, en los términos de esta Ley y de la Ley Forestal.

ARTICULO 106.- Se deroga. **ARTICULO 107.-** Se deroga. **CAPÍTULO III**

De la Exploración y Explotación de los Recursos

no Renovables en el Equilibrio Ecológico

ARTICULO 108.- Para prevenir y controlar los efectos generados en la exploración y explotación de los recursos no renovables en el equilibrio ecológico e integridad de los ecosistemas, la Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas que permitan:

- I.- El control de la calidad de las aguas y la protección de las que sean utilizadas o sean el resultado de esas actividades, de modo que puedan ser objeto de otros usos;
- II.- La protección de los suelos y de la flora y fauna silvestres, de manera que las alteraciones topográficas que generen esas actividades sean oportuna y debidamente tratadas; y
- III.- La adecuada ubicación y formas de los depósitos de desmontes, relaves y escorias de las minas y establecimiento de beneficio de los minerales

ARTICULO 109.- Las normas oficiales mexicanas a que se refiere el artículo anterior serán observadas por los titulares de concesiones, autorizaciones y permisos para el uso, aprovechamiento, exploración, explotación y beneficio de los recursos naturales no renovables.

TÍTULO CUARTO

Protección al Ambiente

CAPÍTULO I

Disposiciones Generales

ARTICULO 109 BIS.- La Secretaría, en los términos que señalen los reglamentos de esta Ley, deberá integrar un inventario de emisiones atmosféricas, descargas de aguas residuales en cuerpos receptores federales o que se infiltren al subsuelo, materiales y residuos peligrosos de su competencia, coordinar los registros que establezca la Ley y crear un sistema consolidado de información basado en las autorizaciones, licencias o permisos que en la materia deberán otorgarse

ARTICULO 109 BIS 1.- La Secretaría deberá establecer los mecanismos y procedimientos necesarios, con el propósito de que los interesados realicen un sólo trámite, en aquellos casos en que para la operación y funcionamiento de establecimientos industriales, comerciales o de servicios se requiera obtener diversos permisos, licencias o autorizaciones que deban ser otorgados por la propia dependencia.

CAPÍTULO II

Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera

ARTICULO 110.- Para la protección a la atmósfera se considerarán los siguientes criterios:

- I.- La calidad del aire debe ser satisfactoria en todos los asentamientos humanos y las regiones del país; y
- II.- Las emisiones de contaminantes de la atmósfera, sean de fuentes artificiales o naturales, fijas o móviles, deben ser reducidas y controladas, para asegurar una calidad del aire satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico.

ARTICULO 111.- Para controlar, reducir o evitar la contaminación de la atmósfera, la Secretaría tendrá las siguientes facultades:

- I.- Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan la calidad ambiental de las distintas áreas, zonas o regiones del territorio nacional, con base en los valores de concentración máxima permisible para la salud pública de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaría de Salud;

- II.- Integrar y mantener actualizado el inventario de las fuentes emisoras de contaminantes a la atmósfera de jurisdicción federal, y coordinarse con los gobiernos locales para la integración del inventario nacional y los regionales correspondientes;
- III.- Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan por contaminante y por fuente de contaminación, los niveles máximos permisibles de emisión de olores, gases así como de partículas sólidas y líquidas a la atmósfera provenientes de fuentes fijas y móviles;
- IV.- Formular y aplicar programas para la reducción de emisión de contaminantes a la atmósfera, nacional. Dichos programas deberán prever los objetivos que se pretende alcanzar, los plazos correspondientes y los mecanismos para su instrumentación, con base en la calidad del aire que se determine para cada área, zona o región del territorio
- V.- Promover y apoyar técnicamente a los gobiernos locales en la formulación y aplicación de programas de gestión de calidad del aire, que tengan por objeto el cumplimiento de la normatividad aplicable;
- VI.- Requerir a los responsables de la operación de fuentes fijas de jurisdicción federal, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 37 de la presente Ley, su reglamento y en las normas oficiales mexicanas respectivas;
- VII.-Expedir las normas oficiales mexicanas para el establecimiento y operación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire;
- VIII.Expedir las normas oficiales mexicanas para la certificación por la autoridad competente, de los niveles de - emisión de contaminantes a la atmósfera provenientes de fuentes determinadas;
- IX.- Expedir, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, las normas oficiales mexicanas que establezcan los niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera, provenientes de vehículos automotores nuevos en planta y de vehículos automotores en circulación, considerando los valores de concentración máxima permisible para el ser humano de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaría de Salud.
- X.- Definir niveles máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera por fuentes, áreas, zonas o regiones, de tal manera que no se rebasen las capacidades de asimilación de las cuencas atmosféricas y se cumplan las normas oficiales mexicanas de calidad del aire;
- XI.- Promover en coordinación con las autoridades competentes, de conformidad con las disposiciones que resulte aplicables, sistemas de derechos transferibles de emisión de contaminantes a la atmósfera;
- XII.-Aprobar los programas de gestión de calidad del aire elaborados por los gobiernos locales para el cumplimiento de las normas oficiales mexicanas respectivas.
- XIII.Promover ante los responsables de la operación de fuentes contaminantes, la aplicación de nuevas tecnologías, - con el propósito de reducir sus emisiones a la atmósfera, y
- XIV.Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan las previsiones a que deberá sujetarse la operación de - fuentes fijas que emitan contaminantes a la atmósfera, en casos de contingencias y emergencias ambientales.

ARTICULO 111 BIS.- Para la operación y funcionamiento de las fuentes fijas de jurisdicción federal que emitan o puedan emitir olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera, se requerirá autorización de la Secretaría

Para los efectos a que se refiere esta Ley, se consideran fuentes fijas de jurisdicción federal, las industrias química,

del petróleo y petroquímica, de pinturas y tintas, automotriz, de celulosa y papel, metalúrgica, del vidrio, de generación de energía eléctrica, del asbesto, cementera y calera y de tratamiento de residuos peligrosos

El reglamento que al efecto se expida determinará los subsectores específicos pertenecientes a cada uno de los sectores industriales antes señalados, cuyos establecimientos se sujetarán a las disposiciones de la legislación federal, en lo que se refiere a la emisión de contaminantes a la atmósfera.

ARTICULO 112.- En materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, los gobiernos de los Estados, del Distrito Federal y de los Municipios, de conformidad con la distribución de atribuciones establecida en los artículos 7o., 8o. y 9o. de esta Ley, así como con la legislación local en la materia:

- I.- Controlarán la contaminación del aire en los bienes y zonas de jurisdicción local, así como en fuentes fijas que funcionen como establecimientos industriales, comerciales y de servicios, siempre que no estén comprendidos en el artículo 111 BIS de esta Ley;
- II.- Aplicarán los criterios generales para la protección a la atmósfera en los planes de desarrollo urbano de su competencia, definiendo las zonas en que sea permitida la instalación de industrias contaminantes;
- III.- Requerirán a los responsables de la operación de fuentes fijas de jurisdicción local, el cumplimiento de los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes, de conformidad con lo dispuesto en el reglamento de la presente Ley y en las normas oficiales mexicanas respectivas.
- IV.- Integrarán y mantendrán actualizado el inventario de fuentes de contaminación;
- V.- Establecerán y operarán, sistemas de verificación de emisiones de automotores en circulación;
- VI.- Establecerán y operarán, con el apoyo técnico, en su caso, de la Secretaría, sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Los gobiernos locales remitirán a la Secretaría los reportes locales de monitoreo atmosférico, a fin de que aquélla los integre al Sistema Nacional de Información Ambiental;
- VII.- Establecerán requisitos y procedimientos para regular las emisiones del transporte público, excepto el federal, y las medidas de tránsito, y en su caso, la suspensión de circulación, en casos graves de contaminación;
- VIII.- Tomarán las medidas preventivas necesarias para evitar contingencias ambientales por contaminación atmosférica;
- IX.- Elaborarán los informes, sobre el estado del medio ambiente en la entidad o municipio correspondiente, que convengan con la Secretaría a través de los acuerdos de coordinación que se celebren;
- X.- Impondrán sanciones y medidas por infracciones a las leyes que al efecto expidan las legislaturas locales, o a los bandos y reglamentos de policía y buen gobierno que expidan los ayuntamientos, de acuerdo con esta Ley;
- XI.- Formularán y aplicarán, con base en las normas oficiales mexicanas que expida la Federación para establecer la calidad ambiental en el territorio nacional, programas de gestión de calidad del aire, y
- XII.- Ejercerán las demás facultades que les confieren las disposiciones legales y reglamentarias aplicables.

ARTICULO 113.- No deberán emitirse contaminantes a la atmósfera que ocasionen o puedan ocasionar desequilibrios ecológicos o daños al ambiente. En todas las emisiones a la atmósfera, deberán ser observadas las previsiones de esta Ley y de las disposiciones reglamentarias que de ella emanen, así como las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría.

ARTICULO 114.- Las autoridades competentes promoverán, en las zonas que se hubieren determinado como aptas para uso industrial, próximas a áreas habitacionales, la instalación de industrias que utilicen tecnologías y

combustibles que generen menor contaminación.

ARTICULO 115.- La Secretaría promoverá que en la determinación de usos del suelo que definan los programas de desarrollo urbano respectivos, se consideren las condiciones topográficas, climatológicas y meteorológicas, para asegurar la adecuada dispersión de contaminantes.

ARTICULO 116.- Para el otorgamiento de estímulos fiscales, las autoridades competentes considerarán a quienes:

- I.- Adquieran, instalen u operen equipo para el control de emisiones contaminantes a la atmósfera;
- II.- Fabriquen, instalen o proporcionen mantenimiento a equipo de filtrado, combustión, control, y en general, de tratamiento de emisiones que contaminen la atmósfera;
- III.- Realicen investigaciones de tecnología cuya aplicación disminuya la generación de emisiones contaminantes;
- IV.- Ubiquen o relocalicen sus instalaciones para evitar emisiones contaminantes en zonas urbanas

CAPÍTULO III

Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos

ARTICULO 117.- Para la prevención y control de la contaminación del agua se considerarán los siguientes criterios:

- I.- La prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país;
- II.- Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo;
- III.- El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas;
- IV.- Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo; y
- V.- La participación y corresponsabilidad de la sociedad es condición indispensable para evitar la contaminación del agua.

ARTICULO 118.- Los criterios para la prevención y control de la contaminación del agua serán considerados en

- I.- La expedición de normas oficiales mexicanas para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para evitar riesgos y daños a la salud pública;
- II.- La formulación de las normas oficiales mexicanas que deberá satisfacer el tratamiento del agua para el uso y consumo humano, así como para la infiltración y descarga de aguas residuales en cuerpos receptores considerados aguas nacionales;
- III.- Los convenios que celebre el Ejecutivo Federal para entrega de agua en bloque a los sistemas usuarios o a usuarios, especialmente en lo que se refiere a la determinación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales que deban instalarse;
- IV.- El establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o de reserva en términos de la Ley de Aguas Nacionales;

V.- Las concesiones, asignaciones, permisos y en general autorizaciones que deban obtener los concesionarios, asignatarios o permisionarios, y en general los usuarios de las aguas propiedad de la nación, para infiltrar aguas residuales en los terrenos, o para descargarlas en otros cuerpos receptores distintos de los alcantarillados de las poblaciones;

VI.- La organización, dirección y reglamentación de los trabajos de hidrología en cuencas, cauces y álveos de aguas nacionales, superficiales y subterráneos.

VII. La clasificación de cuerpos receptores de descarga de aguas residuales, de acuerdo a su capacidad de asimilación o dilución y la carga contaminante que éstos puedan recibir; y

ARTICULO 119.- La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas que se requieran para prevenir y controlar la contaminación de las aguas nacionales, conforme a lo dispuesto en esta Ley, en la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y las demás disposiciones que resulten aplicables.

ARTICULO 119 BIS.- En materia de prevención y control de la contaminación del agua, corresponde a los gobiernos de los Estados y de los Municipios, por sí o a través de sus organismos públicos que administren el agua, así como al del Distrito Federal, de conformidad con la distribución de competencias establecida en esta Ley y conforme lo dispongan sus leyes locales en la materia:

I.- El control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado;

II.- La vigilancia de las normas oficiales mexicanas correspondientes, así como requerir a quienes generen descargas a dichos sistemas y no cumplan con éstas, la instalación de sistemas de tratamiento;

III.- Determinar el monto de los derechos correspondientes para que el municipio o autoridad estatal respectiva, pueda llevar a cabo el tratamiento necesario, y en su caso, proceder a la imposición de las sanciones a que haya lugar, y

IV.- Llevar y actualizar el registro de las descargas a los sistemas de drenaje y alcantarillado que administren, el que será integrado al registro nacional de descargas a cargo de la Secretaría.

ARTICULO 120.- Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local:

I.- Las descargas de origen industrial;

II.- Las descargas de origen municipal y su mezcla incontrolada con otras descargas;

III.- Las descargas derivadas de actividades agropecuarias;

IV.- Las descargas de desechos, sustancias o residuos generados en las actividades de extracción de recursos no renovables;

V.- La aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas;

VI.- Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos; y

VII. El vertimiento de residuos sólidos, materiales peligrosos y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, en cuerpos y corrientes de agua.

ARTICULO 121.- No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de

drenaje y alcantarillado de los centros de población.

ARTICULO 122.- Las aguas residuales provenientes de usos públicos urbanos y las de usos industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas, ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes de agua, así como las que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo, y en general, las que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir:

I.- Contaminación de los cuerpos receptores;

II.- Interferencias en los procesos de depuración de las aguas; y

III.- Trastornos, impedimentos o alteraciones en los correctos aprovechamientos, o en el funcionamiento adecuado de los sistemas, y en la capacidad hidráulica en las cuencas, cauces, vasos, mantos acuíferos y demás depósitos de propiedad nacional, así como de los sistemas de alcantarillado.

ARTICULO 123.- Todas las descargas en las redes colectoras, ríos, acuíferos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de descarga que determine la Secretaría o las autoridades locales. Corresponderá a quien genere dichas descargas, realizar el tratamiento previo requerido.

ARTICULO 124.- Cuando las aguas residuales afecten o puedan afectar fuentes de abastecimiento de agua, la Secretaría lo comunicará a la Secretaría de Salud y negará el permiso o autorización correspondiente, o revocará, y en su caso, ordenará la suspensión del suministro.

ARTICULO 125.- Se deroga.

ARTICULO 126.- Los equipos de tratamiento de las aguas residuales de origen urbano que diseñen, operen o administren los municipios, las autoridades estatales, o el Distrito Federal, deberán cumplir con las normas oficiales mexicanas que al efecto se expidan.

ARTICULO 127.- La Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Salud, emitirán opinión, con base en los estudios de la cuenca y sistemas correspondientes, para la programación y construcción de obras e instalaciones de purificación de aguas residuales de procedencia industrial.

ARTICULO 128.- Las aguas residuales provenientes de los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano, podrán utilizarse en la industria y en la agricultura, si se someten en los casos que se requiera, al tratamiento que cumpla con las normas oficiales mexicanas emitidas por la Secretaría, y en su caso, por la Secretaría de Salud.

En los aprovechamientos existentes de aguas residuales en la agricultura, se promoverán acciones para mejorar la calidad del recurso, la reglamentación de los cultivos y las prácticas de riego.

ARTICULO 129.- El otorgamiento de asignaciones, autorizaciones, concesiones o permisos para la explotación, uso o aprovechamiento de aguas en actividades económicas susceptibles de contaminar dicho recurso, estará condicionado al tratamiento previo necesario de las aguas residuales que se produzcan.

ARTICULO 130.- La Secretaría autorizará el vertido de aguas residuales en aguas marinas, de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y las normas oficiales mexicanas que al respecto expida. Cuando el origen de las descargas provenga de fuentes móviles o de plataformas fijas en el mar territorial y la zona económica exclusiva, la Secretaría se coordinará con la Secretaría de Marina para la expedición de las autorizaciones correspondientes.

ARTICULO 131.- Para la protección del medio marino, la Secretaría emitirá las normas oficiales mexicanas para la explotación, preservación y administración de los recursos naturales, vivos y abióticos, del lecho y el subsuelo.

del mar y de las aguas suprayacentes, así como las que deberán observarse para la realización de actividades de exploración y explotación en la zona económica exclusiva.

ARTICULO 132.- La Secretaría se coordinará con las Secretarías de Marina, de Energía, de Salud y de Comunicaciones y Transportes, a efecto de que dentro de sus respectivas atribuciones intervengan en la prevención y control de la contaminación del medio marino, así como en la preservación y restauración del equilibrio de sus ecosistemas, con arreglo a lo establecido en la presente Ley, en la Ley de Aguas Nacionales, la Ley Federal del Mar, las convenciones internacionales de las que México forma parte y las demás disposiciones aplicables

ARTICULO 133.- La Secretaría, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud conforme a otros ordenamientos legales, realizará un sistemático y permanente monitoreo de la calidad de las aguas, para detectar la presencia de contaminantes o exceso de desechos orgánicos y aplicar las medidas que procedan. En los casos de aguas de jurisdicción local se coordinará con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios.

CAPÍTULO IV

Prevención y Control de la Contaminación del Suelo

ARTICULO 134.- Para la prevención y control de la contaminación del suelo, se considerarán los siguientes criterios:

- I.- Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;
- II.- Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;
- III.- Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes;
- IV.- La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas y considerar sus efectos sobre la salud humana a fin de prevenir los daños que pudieran ocasionar, y
- V.- En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

ARTICULO 135.- Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se considerarán, en los siguientes casos:

- I.- La ordenación y regulación del desarrollo urbano;
- II.- La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;
- III.- La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen; y
- IV.- El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

ARTICULO 136.- Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar

- I.- La contaminación del suelo;
- II.- Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;
- III.- Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación, y
- IV.- Riesgos y problemas de salud.

ARTICULO 137.- Queda sujeto a la autorización de los Municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales.

La Secretaría expedirá las normas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales.

ARTICULO 138.- La Secretaría promoverá la celebración de acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para:

- I - La implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales; y
- II.- La identificación de alternativas de reutilización y disposición final de residuos sólidos municipales, incluyendo la elaboración de inventarios de los mismos y sus fuentes generadoras.

ARTICULO 139.- Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

ARTICULO 140.- La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las normas oficiales mexicanas que al respecto expida la Secretaría, en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

ARTICULO 141.- La Secretaría, en coordinación con las Secretarías de Comercio y Fomento Industrial y de Salud, expedirán normas oficiales mexicanas para la fabricación y utilización de empaques y envases para todo tipo de productos, cuyos materiales permitan reducir la generación de residuos sólidos.

Asimismo, dichas Dependencias promoverán ante los organismos nacionales de normalización respectivos, la emisión de normas mexicanas en las materias a las que se refiere este precepto.

ARTICULO 142.- En ningún caso podrá autorizarse la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en el territorio nacional o en las zonas en las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Las autorizaciones para el tránsito por el territorio nacional de residuos no peligrosos con destino a otra Nación, sólo podrán otorgarse cuando exista previo consentimiento de ésta.

ARTICULO 143.- Los plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, quedarán sujetos a las normas oficiales mexicanas que expidan en el ámbito de sus respectivas competencias, la Secretaría y las Secretarías de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, de Salud y de Comercio y Fomento Industrial. El Reglamento de esta Ley establecerá la regulación, que dentro del mismo marco de coordinación deba observarse en actividades relacionadas con dichos materiales, incluyendo la disposición final de sus residuos, empaques y envases vacíos, medidas para evitar efectos adversos en los ecosistemas y los procedimientos para el otorgamiento de las autorizaciones correspondientes.

ARTICULO 144.- Atendiendo a lo dispuesto por la presente Ley, la Ley Federal de Sanidad Vegetal y las demás disposiciones legales y reglamentarias aplicables, la Secretaría coordinadamente con las Secretarías de Salud, de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural y de Comercio y Fomento Industrial, participará en la determinación de restricciones arancelarias y no arancelarias relativas a la importación y exportación de materiales peligrosos.

No podrán otorgarse autorizaciones para la importación de plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, cuando su uso no esté permitido en el país en el que se hayan elaborado o fabricado.

CAPÍTULO V

Actividades Consideradas como Altamente Riesgosas

ARTICULO 145.- La Secretaría promoverá que en la determinación de los usos del suelo se especifiquen las zonas en las que se permita el establecimiento de industrias, comercios o servicios considerados riesgosos por la gravedad de los efectos que puedan generar en los ecosistemas o en el ambiente tomándose en consideración:

- I.- Las condiciones topográficas, meteorológicas, climatológicas, geológicas y sísmicas de las zonas;
- II.- Su proximidad a centros de población, previendo las tendencias de expansión del respectivo asentamiento y la creación de nuevos asentamientos;
- III.- Los impactos que tendría un posible evento extraordinario de la industria, comercio o servicio de que se trate, sobre los centros de población y sobre los recursos naturales;
- IV.- La compatibilidad con otras actividades de las zonas;
- V.- La infraestructura existente y necesaria para la atención de emergencias ecológicas; y
- VI.- La infraestructura para la dotación de servicios básicos.

ARTICULO 146.- La Secretaría, previa opinión de las Secretarías de Energía, de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Gobernación y del Trabajo y Previsión Social, conforme al Reglamento que para tal efecto se expida, establecerá la clasificación de las actividades que deban considerarse altamente riesgosas en virtud de las características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas para el equilibrio ecológico o el ambiente, de los materiales que se generen o manejen en los establecimientos industriales, comerciales o de servicios, considerando, además, los volúmenes de manejo y la ubicación del establecimiento.

ARTICULO 147.- La realización de actividades industriales, comerciales o de servicios altamente riesgosas, se llevarán a cabo con apego a lo dispuesto por esta Ley, las disposiciones reglamentarias que de ella emanen y las normas oficiales mexicanas a que se refiere el artículo anterior.

Quienes realicen actividades altamente riesgosas, en los términos del Reglamento correspondiente, deberán formular y presentar a la Secretaría un estudio de riesgo ambiental, así como someter a la aprobación de dicha dependencia y de las Secretarías de Gobernación, de Energía, de Comercio y

Fomento Industrial, de Salud, y del Trabajo y Previsión Social, los programas para la prevención de accidentes en la realización de tales actividades, que puedan causar graves desequilibrios ecológicos.

ARTICULO 148.- Cuando para garantizar la seguridad de los vecinos de una industria que lleve a cabo actividades altamente riesgosas, sea necesario establecer una zona intermedia de salvaguarda, el Gobierno Federal podrá, mediante declaratoria, establecer restricciones a los usos urbanos que pudieran ocasionar riesgos para la población. La Secretaría promoverá, ante las autoridades locales competentes, que los planes o programas de desarrollo urbano establezcan que en dichas zonas no se permitirán los usos habitacionales, comerciales u otros que

pongan en riesgo a la población.

ARTICULO 149.- Los Estados y el Distrito Federal regularán la realización de actividades que no sean consideradas altamente riesgosas, cuando éstas afecten el equilibrio de los ecosistemas o el ambiente dentro de la circunscripción territorial correspondiente, de conformidad con las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables.

La legislación local definirá las bases a fin de que la Federación, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios, coordinen sus acciones respecto de las actividades a que se refiere este precepto.

CAPÍTULO VI

Materiales y Residuos Peligrosos

ARTICULO 150.- Los materiales y residuos peligrosos deberán ser manejados con arreglo a la presente Ley, su Reglamento y las normas oficiales mexicanas que expida la Secretaría, previa opinión de las Secretarías de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Energía, de Comunicaciones y Transportes, de Marina y de Gobernación. La regulación del manejo de esos materiales y residuos incluirá según corresponda, su uso, recolección, almacenamiento, transporte, reuso, reciclaje, tratamiento y disposición final

El Reglamento y las normas oficiales mexicanas a que se refiere el párrafo anterior, contendrán los criterios y listados que clasifiquen los materiales y residuos peligrosos identificándolos por su grado de peligrosidad y considerando sus características y volúmenes. Corresponde a la Secretaría la regulación y el control de los materiales y residuos peligrosos.

Asimismo, la Secretaría en coordinación con las dependencias a que se refiere el presente artículo, expedirá las normas oficiales mexicanas en las que se establecerán los requisitos para el etiquetado y envasado de materiales y residuos peligrosos, así como para la evaluación de riesgo e información sobre contingencias y accidentes que pudieran generarse por su manejo, particularmente tratándose de sustancias químicas.

ARTICULO 151.- La responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En el caso de que se contrate los servicios de manejo y disposición final de los residuos peligrosos con empresas autorizadas por la Secretaría y los residuos sean entregados a dichas empresas, la responsabilidad por las operaciones será de éstas independientemente de la responsabilidad que, en su caso, tenga quien los generó.

Quienes generen, reusen o reciclen residuos peligrosos, deberán hacerlo del conocimiento de la Secretaría en los términos previstos en el Reglamento de la presente Ley.

En las autorizaciones para el establecimiento de confinamientos de residuos peligrosos, solo se incluirán los residuos que no puedan ser técnica y económicamente sujetos de reuso, reciclamiento o destrucción térmica o físico química, y no se permitirá el confinamiento de residuos peligrosos en estado líquido.

ARTICULO 151 BIS.- Requiere autorización previa de la Secretaría.

- I.- La prestación de servicios a terceros que tenga por objeto la operación de sistemas para la recolección, almacenamiento, transporte, reuso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos;
- II.- La instalación y operación de sistemas para el tratamiento o disposición final de residuos peligrosos, o para su reciclaje cuando éste tenga por objeto la recuperación de energía, mediante su incineración, y
- III.- La instalación y operación, por parte del generador de residuos peligrosos, de sistemas para su reuso, reciclaje y disposición final, fuera de la instalación en donde se generaron dichos residuos.

ARTICULO 152.- La Secretaría promoverá programas tendientes a prevenir y reducir la generación de residuos peligrosos, así como a estimular su reuso y reciclaje.

En aquellos casos en que los residuos peligrosos puedan ser utilizados en un proceso distinto al que los generó, el Reglamento de la presente Ley y las normas oficiales mexicanas que se expidan, deberán establecer los mecanismos y procedimientos que hagan posible su manejo eficiente desde el punto de vista ambiental y económico.

Los residuos peligrosos que sean usados, tratados o reciclados en un proceso distinto al que los generó, dentro del mismo predio, serán sujetos a un control interno por parte de la empresa responsable, de acuerdo con las formalidades que establezca el Reglamento de la presente Ley.

En el caso de que los residuos señalados en el párrafo anterior, sean transportados a un predio distinto a aquél en el que se generaron, se estará a lo dispuesto en la normatividad aplicable al transporte terrestre de residuos peligrosos.

ARTICULO 152 BIS.- Cuando la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos, produzca contaminación del suelo, los responsables de dichas operaciones deberán llevar a cabo las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo, con el propósito de que éste pueda ser destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable, para el predio o zona respectiva.

ARTICULO 153.- La importación o exportación de materiales o residuos peligrosos se sujetará a las restricciones que establezca el Ejecutivo Federal, de conformidad con lo dispuesto en la Ley de Comercio Exterior. En todo caso deberán observarse las siguientes disposiciones:

- I.- Corresponderá a la Secretaría el control y la vigilancia ecológica de los materiales o residuos peligrosos importados o a exportarse, aplicando las medidas de seguridad que correspondan, sin perjuicios de lo que sobre este particular prevé la Ley Aduanera;
- II.- Únicamente podrá autorizarse la importación de materiales o residuos peligrosos para su tratamiento, reciclaje o reuso, cuando su utilización sea conforme a las leyes, reglamentos, normas oficiales mexicanas y demás disposiciones vigentes;
- III.- No podrá autorizarse la importación de materiales o residuos peligrosos cuyo único objeto sea su disposición final o simple depósito, almacenamiento o confinamiento en el territorio nacional o en las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, o cuando su uso o fabricación no esté permitido en el país en que se hubiere elaborado;
- IV.- No podrá autorizarse el tránsito por territorio nacional de materiales peligrosos que no satisfagan las especificaciones de uso o consumo conforme a las que fueron elaborados, o cuya elaboración, uso o consumo se encuentren prohibidos o restringidos en el país al que estuvieren destinados; ni podrá autorizarse el tránsito de tales materiales o residuos peligrosos, cuando provengan del extranjero para ser destinados a un tercer país;
- V.- El otorgamiento de autorizaciones para la exportación de materiales o residuos peligrosos quedará sujeto a que exista consentimiento expreso del país receptor;
- VI.- Los materiales y residuos peligrosos generados en los procesos de producción, transformación, elaboración o reparación en los que se haya utilizado materia prima introducida al país bajo el régimen de importación temporal, inclusive los regulados en el artículo 85 de la Ley Aduanera, deberán ser retornados al país de procedencia dentro del plazo que para tal efecto determine la Secretaría;

VII.-El otorgamiento de autorizaciones por parte de la Secretaría para la importación o exportación de materiales o residuos peligrosos quedará sujeto a que se garantice debidamente el cumplimiento de lo que establezca la presente Ley y las demás disposiciones aplicables así como la reparación de los daños y perjuicios que pudieran causarse tanto en el territorio nacional como en el extranjero;

Asimismo, la exportación de residuos peligrosos deberá negarse cuando se contemple su reimportación al territorio nacional; no exista consentimiento expreso del país receptor; el país de destino exija reciprocidad; o implique un incumplimiento de los compromisos asumidos por México en los Tratados y Convenciones Internacionales en la materia; y

VIII. En adición a lo que establezcan otras disposiciones aplicables, podrán revocarse las autorizaciones que se hubieren otorgado para la importación o exportación de materiales y residuos peligrosos, sin perjuicio de la imposición de la sanción o sanciones que corresponda en los siguientes casos:

a) Cuando por causas supervinientes, se compruebe que los materiales o residuos peligrosos autorizados constituyen mayor riesgo para el equilibrio ecológico que el que se tuvo en cuenta para el otorgamiento de la autorización correspondiente;

b) Cuando la operación de importación o exportación no cumplan los requisitos fijados en la guía ecológica que expida la Secretaría;

c) Cuando los materiales o residuos peligrosos ya no posean los atributos o características conforme a los cuales fueron autorizados; y

d) Cuando se determine que la autorización fue transferida a una persona distinta a la que solicitó la autorización, o cuando la solicitud correspondiente contenga datos falsos, o presentados de manera que se oculte información necesaria para la correcta apreciación de la solicitud.

CAPÍTULO VII

Energía Nuclear

ARTICULO 154.- La Secretaría de Energía y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, con la participación que, en su caso, corresponda a la Secretaría de Salud, cuidarán que la exploración, explotación y beneficio de minerales radioactivos, el aprovechamiento de los combustibles nucleares, los usos de la energía nuclear y en general, las actividades relacionadas con la misma, se lleven a cabo con apego a las normas oficiales mexicanas sobre seguridad nuclear, radiológica y física de las instalaciones nucleares o radioactivas, de manera que se eviten riesgos a la salud humana y se asegure la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente, correspondiendo a la Secretaría realizar la evaluación de impacto ambiental.

CAPÍTULO VIII

Ruido, Vibraciones, Energía Térmica y Lumínica, Olores y Contaminación Visual

ARTICULO 155.- Quedan prohibidas las emisiones de ruido, vibraciones, energía térmica y lumínica y la generación de contaminación visual, en cuanto rebasen los límites máximos establecidos en las normas oficiales mexicanas que para ese efecto expida la Secretaría, considerando los valores de concentración máxima permisibles para el ser humano de contaminantes en el ambiente que determine la Secretaría de Salud. Las autoridades federales o locales, según su esfera de competencia, adoptarán las medidas para impedir que se transgredan dichos límites y en su caso, aplicarán las sanciones correspondientes.

En la construcción de obras o instalaciones que generen energía térmica o lumínica, ruido o vibraciones, así como en la operación o funcionamiento de las existentes deberán llevarse a cabo acciones preventivas y correctivas para

evitar los efectos nocivos de tales contaminantes en el equilibrio ecológico y el ambiente.

ARTICULO 156.- Las normas oficiales mexicanas en materias objeto del presente Capítulo, establecerán los procedimientos a fin de prevenir y controlar la contaminación por ruido, vibraciones, energía térmica, luminica, radiaciones electromagnéticas y olores, y fijarán los límites de emisión respectivos.

La Secretaría de Salud realizará los análisis, estudios, investigaciones y vigilancia necesarias con el objeto de localizar el origen o procedencia, naturaleza, grado, magnitud y frecuencia de las emisiones para determinar cuándo se producen daños a la salud. La Secretaría, en coordinación con organismos públicos o privados, nacionales o internacionales, integrará la información relacionada con este tipo de contaminación, así como de métodos y tecnología de control y tratamiento de la misma

TÍTULO QUINTO

Participación Social e Información Ambiental

CAPÍTULO I

Participación Social

ARTICULO 157.- El Gobierno Federal deberá promover la participación corresponsable de la sociedad en la planeación, ejecución, evaluación y vigilancia de la política ambiental y de recursos naturales.

ARTICULO 158.- Para los efectos del artículo anterior, la Secretaría:

ARTICULO 159.- La Secretaría integrará órganos de consulta en los que participen entidades y dependencias de la administración pública, instituciones académicas y organizaciones sociales y empresariales. Dichos órganos tendrán funciones de asesoría, evaluación y seguimiento en materia de política ambiental y podrán emitir las opiniones y observaciones que estimen pertinentes. Su organización y funcionamiento se sujetará a los acuerdos que para el efecto expida la Secretaría

Cuando la Secretaría deba resolver un asunto sobre el cual los órganos a que se refiere el párrafo anterior hubiesen emitido una opinión, la misma deberá expresar las causas de aceptación o rechazo de dicha opinión.

CAPÍTULO II

Derecho a la Información Ambiental

ARTICULO 159 BIS.- La Secretaría desarrollará un Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales que tendrá por objeto registrar, organizar, actualizar y difundir la información ambiental nacional, que estará disponible para su consulta y que se coordinará y complementará con el Sistema de Cuentas Nacionales a cargo del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.

En dicho Sistema, la Secretaría deberá integrar, entre otros aspectos, información relativa a los inventarios de recursos naturales existentes en el territorio nacional, a los mecanismos y resultados obtenidos del monitoreo de la calidad del aire, del agua y del suelo, al ordenamiento ecológico del territorio, así como la información señalada en el artículo 109 BIS y la correspondiente a los registros, programas y acciones que se realicen para la preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

La Secretaría reunirá informes y documentos relevantes que resulten de las actividades científicas, académicas, trabajos técnicos o de cualquier otra índole en materia ambiental y de preservación de recursos naturales, realizados en el país por personas físicas o morales, nacionales o extranjeras, los que serán remitidos al Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales

ARTICULO 159 BIS 1.- La Secretaría deberá elaborar y publicar bianualmente un informe detallado de la situación general existente en el país en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente.

ARTICULO 159 BIS 2.- La Secretaría editará una Gaceta en la que se publicarán las disposiciones jurídicas, normas oficiales mexicanas, decretos, reglamentos, acuerdos y demás actos administrativos, así como información de interés general en materia ambiental, que se publiquen por el Gobierno Federal o los gobiernos locales, o documentos internacionales en materia ambiental de interés para México, independientemente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación o en otros órganos de difusión. Igualmente en dicha Gaceta se publicará información oficial relacionada con las áreas naturales protegidas y la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

ARTICULO 159 BIS 3.- Toda persona tendrá derecho a que la Secretaría, los Estados, el Distrito Federal y los Municipios pongan a su disposición la información ambiental que les soliciten, en los términos previstos por esta Ley. En su caso, los gastos que se generen, correrán por cuenta del solicitante.

- I.- Convocará, en el ámbito del Sistema Nacional de Planeación Democrática, a las organizaciones obreras, empresariales, de campesinos y productores agropecuarios, pesqueros y forestales, comunidades agrarias, pueblos indígenas, instituciones educativas, organizaciones sociales y privadas no lucrativas y demás personas interesadas para que manifiesten su opinión y propuestas;
- II.- Celebrará convenios de concertación con organizaciones obreras y grupos sociales para la protección del ambiente en los lugares de trabajo y unidades habitacionales; con pueblos indígenas, comunidades agrarias y demás organizaciones campesinas para el establecimiento, administración y manejo de áreas naturales protegidas, y para brindarles asesoría ecológica en las actividades relacionadas con el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales; con organizaciones empresariales, en los casos previstos en esta Ley para la protección del ambiente; con instituciones educativas y académicas, para la realización de estudios e investigaciones en la materia; con organizaciones civiles e instituciones privadas no lucrativas, para emprender acciones ecológicas conjuntas; así como con representaciones sociales y con particulares interesados en la preservación y restauración del equilibrio ecológico para la protección al ambiente;
- III.- Celebrará convenios con los medios de comunicación masiva para la difusión, información y promoción de acciones de preservación del equilibrio ecológico y la protección al ambiente;
- IV.- Promoverá el establecimiento de reconocimientos a los esfuerzos más destacados de la sociedad para preservar y restaurar el equilibrio ecológico y proteger el ambiente.
- V.- Impulsará el fortalecimiento de la conciencia ecológica, a través de la realización de acciones conjuntas con la comunidad para la preservación y mejoramiento del ambiente, el aprovechamiento racional de los recursos naturales y el correcto manejo de desechos. Para ello, la Secretaría podrá, en forma coordinada con los Estados y Municipios correspondientes, celebrar convenios de concertación con comunidades urbanas y rurales, así como con diversas organizaciones sociales, y
- VI.- Concertará acciones e inversiones con los sectores social y privado y con instituciones académicas, grupos y organizaciones sociales, pueblos indígenas y demás personas físicas y morales interesadas, para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

Para los efectos de lo dispuesto en el presente ordenamiento, se considera información ambiental, cualquier información escrita, visual o en forma de base de datos, de que dispongan las autoridades ambientales en materia de agua, aire, suelo, flora, fauna y recursos naturales en general, así como sobre las actividades o medidas que les afectan o puedan afectarlos.

Toda petición de información ambiental deberá presentarse por escrito, especificando claramente la información que se solicita y los motivos de la petición. Los solicitantes deberán identificarse indicando su nombre o razón

social y domicilio.

ARTICULO 159 BIS 4.- Las autoridades a que se refiere el artículo anterior, denegarán la entrega de información cuando:

- I.- Se considere por disposición legal que la información es confidencial o que por su propia naturaleza su difusión afecta la seguridad nacional;
- II.- Se trate de información relativa a asuntos que son materia de procedimientos judiciales o de inspección y vigilancia, pendientes de resolución,
- III.- Se trate de información aportada por terceros cuando los mismos no estén obligados por disposición legal a proporcionarla, o
- IV.- Se trate de información sobre inventarios e insumos y tecnologías de proceso, incluyendo la descripción del mismo.

ARTICULO 159 BIS 5.- La autoridad ambiental deberá responder por escrito a los solicitantes de información ambiental en un plazo no mayor a veinte días a partir de la recepción de la petición respectiva. En caso de que la autoridad conteste negativamente la solicitud, deberá señalar las razones que motivaron su determinación.

Si transcurrido el plazo establecido en el párrafo anterior la autoridad ambiental no emite su respuesta por escrito, la petición se entenderá resuelta en sentido negativo para el promovente.

La autoridad ambiental, dentro de los diez días siguientes a la solicitud de información, deberá notificar al generador o propietario de la misma de la recepción de la solicitud.

Los afectados por actos de la Secretaría regulados en este Capítulo, podrán ser impugnados mediante la interposición del recurso de revisión, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y en la Ley Federal de Procedimiento Administrativo.

ARTICULO 159 BIS 6.- Quien reciba información ambiental de las autoridades competentes, en los términos del presente Capítulo, será responsable de su adecuada utilización y deberá responder por los daños y perjuicios que se ocasionen por su indebido manejo

TITULO SEXTO

Medidas De Control y Seguridad y Sanciones

CAPÍTULO I

Disposiciones Generales

ARTICULO 160.- Las disposiciones de este título se aplicarán en la realización de actos de inspección y vigilancia, ejecución de medidas de seguridad, determinación de infracciones administrativas y de comisión de delitos y sus sanciones, y procedimientos y recursos administrativos, cuando se trate de asuntos de competencia federal regulados por esta Ley, salvo que otras leyes regulen en forma específica dichas cuestiones, en relación con las materias de que trata este propio ordenamiento.

En las materias anteriormente señaladas, se aplicarán supletoriamente las disposiciones de las Leyes Federales de Procedimiento Administrativo y sobre Metrología y Normalización. Tratándose de materias referidas en esta Ley que se encuentran reguladas por leyes especiales, el presente ordenamiento será de aplicación supletoria por lo que se refiere a los procedimientos de inspección y vigilancia.

CAPITULO II

Inspección y Vigilancia

ARTICULO 161.- La Secretaría realizará los actos de inspección y vigilancia del cumplimiento de las disposiciones contenidas en el presente ordenamiento, así como de las que del mismo se deriven.

ARTICULO 162.- Las autoridades competentes podrán realizar, por conducto de personal debidamente autorizado, visitas de inspección, sin perjuicio de otras medidas previstas en las leyes que puedan llevar a cabo para verificar el cumplimiento de este ordenamiento.

Dicho personal, al realizar las visitas de inspección, deberá contar con el documento oficial que los acredite o autorice a practicar la inspección o verificación, así como la orden escrita debidamente fundada y motivada, expedida por autoridad competente en la que se precisará el lugar o zona que habrá de inspeccionarse, el objeto de la diligencia y el alcance de ésta.

ARTICULO 163.- El personal autorizado, al iniciar la inspección se identificará debidamente con la persona con quien se entienda la diligencia, exhibirá la orden respectiva y le entregará copia de la misma con firma autógrafa, requiriéndola para que en el acto designe dos testigos.

En caso de negativa o de que los designados no acepten fungir como testigos, el personal autorizado podrá designarlos, haciendo constar esta situación en el acta administrativa que al efecto se levante, sin que esta circunstancia invalide los efectos de la inspección.

ARTICULO 164.- En toda visita de inspección se levantará acta, en la que se harán constar en forma circunstanciada los hechos u omisiones que se hubiesen presentado durante la diligencia, así como lo previsto en el artículo 67 de la Ley Federal de Procedimiento Administrativo.

Concluida la inspección, se dará oportunidad a la persona con la que se entendió la diligencia para que en el mismo acto formule observaciones en relación con los hechos u omisiones asentados en el acta respectiva, y para que ofrezca las pruebas que considere convenientes o haga uso de ese derecho en el término de cinco días siguientes a la fecha en que la diligencia se hubiere practicado.

A continuación se procederá a firmar el acta por la persona con quien se entendió la diligencia, por los testigos y por el personal autorizado, quien entregará copia del acta al interesado.

Si la persona con quien se entendió la diligencia o los testigos, se negaren a firmar el acta, o el interesado se negare a aceptar copia de la misma, dichas circunstancias se asentarán en ella, sin que esto afecte su validez y valor probatorio.

ARTICULO 165.- La persona con quien se entienda la diligencia estará obligada a permitir al personal autorizado el acceso al lugar o lugares sujetos a inspección en los términos previstos en la orden escrita a que se hace referencia en el artículo 162 de esta Ley, así como a proporcionar toda clase de información que conduzca a la verificación del cumplimiento de esta Ley y demás disposiciones aplicables, con excepción de lo relativo a derechos de propiedad industrial que sean confidenciales conforme a la Ley. La información deberá mantenerse por la autoridad en absoluta reserva, si así lo solicita el interesado, salvo en caso de requerimiento judicial.

ARTICULO 166.- La autoridad competente podrá solicitar el auxilio de la fuerza pública para efectuar la visita de inspección, cuando alguna o algunas personas obstaculicen o se opongan a la práctica de la diligencia, independientemente de las sanciones a que haya lugar.

ARTICULO 167.- Recibida el acta de inspección por la autoridad ordenadora, requerirá al interesado, mediante notificación personal o por correo certificado con acuse de recibo, para que adopte de inmediato las medidas correctivas o de urgente aplicación necesarias para cumplir con las disposiciones jurídicas aplicables, así como con

los permisos, licencias, autorizaciones o concesiones respectivas, fundando y motivando el requerimiento, señalando el plazo que corresponda, y para que dentro del término de quince días exponga lo que a su derecho convenga y, en su caso, aporte las pruebas que considere procedentes, en relación con la actuación de la Secretaría.

Admitidas y desahogadas las pruebas ofrecidas por el interesado, o habiendo transcurrido el plazo a que se refiere el párrafo anterior, sin que haya hecho uso de ese derecho, se pondrán a su disposición las actuaciones, para que en un plazo tres días hábiles, presente por escrito sus alegatos.

ARTÍCULO 168.- Una vez recibidos los alegatos o transcurrido el término para presentarlos, la Secretaría procederá, dentro de los veinte días siguientes, a dictar por escrito la resolución respectiva, misma que se notificará al interesado, personalmente o por correo certificado con acuse de recibo.

ARTÍCULO 169.- En la resolución administrativa correspondiente, se señalarán o, en su caso, adicionarán, las medidas que deberán llevarse a cabo para corregir las deficiencias o irregularidades observadas, el plazo otorgado al infractor para satisfacerlas y las sanciones a que se hubiere hecho acreedor conforme a las disposiciones aplicables.

Dentro de los cinco días hábiles que sigan al vencimiento del plazo otorgado al infractor para subsanar las deficiencias e irregularidades observadas, éste deberá comunicar por escrito y en forma detallada a la autoridad ordenadora, haber dado cumplimiento a las medidas ordenadas en los términos del requerimiento respectivo.

Cuando se trate de segunda o posterior inspección para verificar el cumplimiento de un requerimiento o requerimientos anteriores, y del acta correspondiente se desprenda que no se ha dado cumplimiento a las medidas previamente ordenadas, la autoridad competente podrá imponer además de la sanción o sanciones que procedan conforme al artículo 171 de esta Ley, una multa adicional que no exceda de los límites máximos señalados en dicho precepto.

En los casos en que el infractor realice las medidas correctivas o de urgente aplicación o subsane las irregularidades detectadas, en los plazos ordenados por la Secretaría, siempre y cuando el infractor no sea reincidente, y no se trate de alguno de los supuestos previstos en el artículo 170 de esta Ley, ésta podrá revocar o modificar la sanción o sanciones impuestas.

En los casos en que proceda, la autoridad federal hará del conocimiento del Ministerio Público la realización de actos u omisiones constatados en el ejercicio de sus facultades que pudieran configurar uno o más delitos

CAPITULO III

Medidas de Seguridad

ARTÍCULO 170.- Cuando exista riesgo inminente de desequilibrio ecológico, o de daño o deterioro grave a los recursos naturales, casos de contaminación con repercusiones peligrosas para los ecosistemas, sus componentes o para la salud pública, la Secretaría, fundada y motivadamente, podrá ordenar alguna o algunas de las siguientes medidas de seguridad:

- I.- La clausura temporal, parcial o total de las fuentes contaminantes, así como de las instalaciones en que se manejen o almacenen especímenes, productos o subproductos de especies de flora o de fauna silvestre, recursos forestales, o se desarrollen las actividades que den lugar a los supuestos a que se refiere el primer párrafo de este artículo;
- II.- El aseguramiento precautorio de materiales y residuos peligrosos, así como de especímenes, productos o subproductos de especies de flora o de fauna silvestre o su material genético, recursos forestales, además de los bienes, vehículos, utensilios e instrumentos directamente relacionados con la conducta que da lugar a la imposición de la medida de seguridad, o

III.- La neutralización o cualquier acción análoga que impida que materiales o residuos peligrosos generen los efectos previstos en el primer párrafo de este artículo.

Asimismo, la Secretaría podrá promover ante la autoridad competente, la ejecución de alguna o algunas de las medidas de seguridad que se establezcan en otros ordenamientos.

ARTICULO 170 BIS.- Cuando la Secretaría ordene alguna de las medidas de seguridad previstas en esta Ley, indicará al interesado, cuando proceda, las acciones que debe llevar a cabo para subsanar las irregularidades que motivaron la imposición de dichas medidas, así como los plazos para su realización, a fin de que una vez cumplidas éstas, se ordene el retiro de la medida de seguridad impuesta.

CAPITULO IV

Sanciones Administrativas

ARTICULO 171.- Las violaciones a los preceptos de esta Ley, sus reglamentos y las disposiciones que de ella emanen serán sancionadas administrativamente por la Secretaría, con una o más de las siguientes sanciones

I.- Multa por el equivalente de veinte a veinte mil días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal en el momento de imponer la sanción;

II.- Clausura temporal o definitiva, total o parcial, cuando:

- a) El infractor no hubiere cumplido en los plazos y condiciones impuestos por la autoridad, con las medidas correctivas o de urgente aplicación ordenadas;
- b) En casos de reincidencia cuando las infracciones generen efectos negativos al ambiente, o
- c) Se trate de desobediencia reiterada, en tres o más ocasiones, al cumplimiento de alguna o algunas medidas correctivas o de urgente aplicación impuestas por la autoridad.

III.- Arresto administrativo hasta por treinta y seis horas

IV.- El decomiso de los instrumentos, ejemplares, productos o subproductos directamente relacionados con infracciones relativas a recursos forestales, especies de flora y fauna silvestre o recursos genéticos, conforme a lo previsto en la presente Ley, y

V.- La suspensión o revocación de las concesiones, licencias, permisos o autorizaciones correspondientes.

Si una vez vencido el plazo concedido por la autoridad para subsanar la o las infracciones que se hubieren cometido, resultare que dicha infracción o infracciones aún subsisten, podrán imponerse multas por cada día que transcurra sin obedecer el mandato, sin que el total de las multas exceda del monto máximo permitido, conforme a la fracción I de este artículo.

En el caso de reincidencia, el monto de la multa podrá ser hasta por dos veces del monto originalmente impuesto, sin exceder del doble del máximo permitido, así como la clausura definitiva.

Se considera reincidente al infractor que incurra más de una vez en conductas que impliquen infracciones a un mismo precepto, en un periodo de dos años, contados a partir de la fecha en que se levante el acta en que se hizo constar la primera infracción, siempre que ésta no hubiese sido desvirtuada.

ARTICULO 172.- Cuando la gravedad de la infracción lo amerite, la autoridad, solicitará a quien los hubiere otorgado, la suspensión, revocación o cancelación de la concesión, permiso, licencia y en general de toda autorización otorgada para la realización de actividades comerciales, industriales o de servicios, o para el aprovechamiento de recursos naturales que haya dado lugar a la infracción.

ARTICULO 173.- Para la imposición de las sanciones por infracciones a esta Ley, se tomará en cuenta:

- I.- La gravedad de la infracción, considerando principalmente los siguientes criterios: impacto en la salud pública; generación de desequilibrios ecológicos, la afectación de recursos naturales o de la biodiversidad; y, en su caso, los niveles en que se hubieran rebasado los límites establecidos en la norma oficial mexicana aplicable;
- II.- Las condiciones económicas del infractor;
- III.- La reincidencia, si la hubiere;
- IV.- El carácter intencional o negligente de la acción u omisión constitutiva de la infracción, y
- V.- El beneficio directamente obtenido por el infractor por los actos que motiven la sanción.

En el caso en que el infractor realice las medidas correctivas o de urgente aplicación o subsane las irregularidades en que hubiere incurrido, previamente a que la Secretaría imponga una sanción, dicha autoridad deberá considerar tal situación como atenuante de la infracción cometida.

La autoridad correspondiente podrá otorgar al infractor, la opción para pagar la multa o realizar inversiones equivalentes en la adquisición e instalación de equipo para evitar contaminación o en la protección, preservación o restauración del ambiente y los recursos naturales, siempre y cuando se garanticen las obligaciones del infractor, no se trate de alguno de los supuestos previstos en el artículo 170 de esta Ley y la autoridad justifique plenamente su decisión.

ARTICULO 174.- Cuando proceda como sanción el decomiso o la clausura temporal o definitiva, total o parcial, el personal comisionado para ejecutarla procederá a levantar acta detallada de la diligencia, observando las disposiciones aplicables a la realización de inspecciones. En los casos en que se imponga como sanción la clausura temporal, la Secretaría deberá indicar al infractor las medidas correctivas y acciones que debe llevar a cabo para subsanar las irregularidades que motivaron dicha sanción, así como los plazos para su realización.

ARTICULO 174 BIS.- La Secretaría dará a los bienes decomisados alguno de los siguientes destinos:

- I.- Venta directa en aquellos casos en que el valor de lo decomisado no exceda de 5,000 veces el salario mínimo general vigente en el Distrito Federal al momento de imponer la sanción.
- II.- Remate en subasta pública cuando el valor de lo decomisado exceda de 5,000 veces el salario diario mínimo general vigente en el Distrito Federal al momento de imponer la sanción.
- III.- Donación a organismos públicos e instituciones científicas o de enseñanza superior o de beneficencia pública, según la naturaleza del bien decomisado y de acuerdo a las funciones y actividades que realice el donatario, siempre y cuando no sean lucrativas. Tratándose de especies y subespecies de flora y fauna silvestre, éstas podrán ser donadas a zoológicos públicos siempre que se garantice la existencia de condiciones adecuadas para su desarrollo, o
- IV.- Destrucción cuando se trate de productos o subproductos, de flora y fauna silvestre, de productos forestales plagados o que tengan alguna enfermedad que impida su aprovechamiento, así como artes de pesca y caza prohibidos por las disposiciones jurídicas aplicables.

ARTICULO 174 BIS 1.- Para efectos de lo previsto en las fracciones I y II del artículo anterior, únicamente serán procedentes dichos supuestos, cuando los bienes decomisados sean susceptibles de apropiación conforme a las disposiciones jurídicas aplicables.

En la determinación del valor de los bienes sujetos a remate o venta, la Secretaría considerará el precio que

respecto de dichos bienes corra en el mercado, al momento de realizarse la operación.

En ningún caso, los responsables de la infracción que hubiera dado lugar al decomiso podrán participar ni beneficiarse de los actos señalados en el artículo 174 BIS de esta Ley, mediante los cuales se lleve a cabo la enajenación de los bienes decomisados.

ARTICULO 175.- La Secretaría podrá promover ante las autoridades federales o locales competentes, con base en los estudios que haga para ese efecto, la limitación o suspensión de la instalación o funcionamiento de industrias, comercios, servicios, desarrollos urbanos, turísticos o cualquier actividad que afecte o pueda afectar el ambiente, los recursos naturales, o causar desequilibrio ecológico o pérdida de la biodiversidad.

ARTICULO 175 BIS.- Los ingresos que se obtengan de las multas por infracciones a lo dispuesto en esta Ley, sus reglamentos y demás disposiciones que de ella se deriven, así como los que se obtengan del remate en subasta pública o la venta directa de los bienes decomisados, se destinarán a la integración de fondos para desarrollar programas vinculados con la inspección y la vigilancia en las materias a que se refiere esta Ley.

CAPÍTULO V

Recurso de Revisión

ARTICULO 176.- Las resoluciones definitivas dictadas en los procedimientos administrativos con motivo de la aplicación de esta Ley, sus reglamentos y disposiciones que de ella emanen, podrán ser impugnadas por los afectados, mediante el recurso de revisión, dentro de los quince días hábiles siguientes a la fecha de su notificación, o ante las instancias jurisdiccionales competentes.

El recurso de revisión se interpondrá directamente ante la autoridad que emitió la resolución impugnada, quien en su caso, acordará su admisión, y el otorgamiento o denegación de la suspensión del acto recurrido, turnando el recurso a su superior jerárquico para su resolución definitiva.

ARTICULO 177.- Cuando con la interposición del recurso de revisión, el promovente solicite la suspensión del decomiso, la autoridad podrá ordenar la devolución de los bienes respectivos al interesado, siempre y cuando:

I.- Sea procedente el recurso, y

II.- Se exhiba garantía por el monto del valor de lo decomisado, el cual será determinado por la Secretaría, de acuerdo con el precio que corra en el mercado, al momento en que deba otorgarse dicha garantía.

En el supuesto en que no se cumplan los requisitos anteriores, la Secretaría determinará el destino final de los productos perecederos y de las especies de flora y fauna silvestre vivas, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley y las demás que resulten aplicables.

Por lo que se refiere a los bienes distintos a los señalados en el párrafo anterior, éstos se mantendrán en depósito y no podrá disponerse de ellos hasta en tanto cause estado la resolución correspondiente.

ARTICULO 178.- No procederá la suspensión del decomiso, en los siguientes casos:

I.- Cuando se trate de especies de flora y fauna silvestre que carezcan de la concesión, permiso o autorización correspondiente;

II.- Cuando se trate de especies de flora y fauna silvestre extraídas o capturadas en época, zona o lugar no comprendidos en la concesión, permiso o autorización respectivos, así como en volúmenes superiores a los establecidos;

III.- Cuando se trate de especies de flora y fauna silvestre declaradas en veda o sean consideradas raras.

amenazadas, en peligro de extinción o sujetas a protección especial conforme a esta Ley u otras disposiciones jurídicas aplicables;

IV.- Cuando se trate de especies de flora y fauna silvestre decomisadas a extranjeros, o en embarcaciones o transportes extranjeros,

V.- Cuando se trate de productos o subproductos de flora y fauna silvestre, armas de caza, artes de pesca y demás objetos o utensilios prohibidos por la normatividad aplicable, y

Cuando se trate de materias primas forestales maderables y no maderables, provenientes de aprovechamientos para los cuales no exista autorización.

ARTICULO 179.- Por lo que se refiere a los demás trámites relativos a la sustanciación del recurso de revisión a que se refiere el artículo 176 del presente ordenamiento, se estará a lo dispuesto por la Ley Federal de Procedimiento Administrativo.

ARTICULO 180.- Tratándose de obras o actividades que contravengan las disposiciones de esta Ley, los programas de ordenamiento ecológico, las declaratorias de áreas naturales protegidas o los reglamentos y normas oficiales mexicanas derivadas de la misma, las personas físicas y morales de las comunidades afectadas tendrán derecho a impugnar los actos administrativos correspondientes, así como a exigir que se lleven a cabo las acciones necesarias para que sean observadas las disposiciones jurídicas aplicables, siempre que demuestren en el procedimiento que dichas obras o actividades originan o pueden originar un daño a los recursos naturales, la flora o la fauna silvestre, la salud pública o la calidad de vida. Para tal efecto, deberán interponer el recurso administrativo de revisión a que se refiere este capítulo.

ARTICULO 181.- En caso de que se expidan licencias, permisos, autorizaciones o concesiones contraviniendo esta Ley, serán nulas y no producirán efecto legal alguno, y los servidores públicos responsables serán sancionados conforme a lo dispuesto en la legislación en la materia. Dicha nulidad podrá ser exigida por medio del recurso a que se refiere el artículo anterior.

CAPITULO VI

De Los Delitos Del Orden Federal

ARTICULO 182.- En aquellos casos en que, como resultado del ejercicio de sus atribuciones, la Secretaría tenga conocimiento de actos u omisiones que pudieran constituir delitos conforme a lo previsto en la legislación aplicable, formulará ante el Ministerio Público Federal la denuncia correspondiente.

Toda persona podrá presentar directamente las denuncias penales que correspondan a los delitos ambientales previstos en la legislación aplicable

La Secretaría proporcionará, en las materias de su competencia, los dictámenes técnicos o periciales que le soliciten el Ministerio Público o las autoridades judiciales, con motivo de las denuncias presentadas por la comisión de delitos ambientales.

ARTICULO 183.- Se deroga. (Nota: Los artículos 183 a 187 se derogan en virtud de las reformas al Código Penal)

ARTICULO 184.- Se deroga.

ARTICULO 185.- Se deroga.

ARTICULO 186.- Se deroga.

ARTICULO 187.- Se deroga.

ARTICULO 188.- Las leyes de las entidades federativas establecerán las sanciones penales y administrativas por violaciones en materia ambiental del orden local.

CAPITULO VII

Denuncia Popular

ARTICULO 189.- Toda persona, grupos sociales, organizaciones no gubernamentales, asociaciones y sociedades podrán denunciar ante la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente o ante otras autoridades todo hecho, acto u omisión que produzca o pueda producir desequilibrio ecológico o daños al ambiente o a los recursos naturales, o contravenga las disposiciones de la presente Ley y de los demás ordenamientos que regulen materias relacionadas con la protección al ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico

Si en la localidad no existiere representación de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, la denuncia se podrá formular ante la autoridad municipal o, a elección del denunciante, ante las oficinas más próximas de dicha representación.

Si la denuncia fuera presentada ante la autoridad municipal y resulta del orden federal, deberá ser remitida para su atención y trámite a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

ARTICULO 190.- La denuncia popular podrá ejercitarse por cualquier persona, bastando que se presente por escrito y contenga:

- I.- El nombre o razón social, domicilio, teléfono si lo tiene, del denunciante y, en su caso, de su representante legal;
- II.- Los actos, hechos u omisiones denunciados;
- III.- Los datos que permitan identificar al presunto infractor o localizar la fuente contaminante, y
- IV.- Las pruebas que en su caso ofrezca el denunciante.

Asimismo, podrá formularse la denuncia por vía telefónica, en cuyo supuesto el servidor público que la reciba, levantará acta circunstanciada, y el denunciante deberá ratificarla por escrito, cumpliendo con los requisitos establecidos en el presente artículo, en un término de tres días hábiles siguientes a la formulación de la denuncia, sin perjuicio de que la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente investigue de oficio los hechos constitutivos de la denuncia.

No se admitirán denuncias notoriamente improcedentes o infundadas, aquéllas en las que se advierta mala fe, carencia de fundamento o inexistencia de petición, lo cual se notificará al denunciante.

Si el denunciante solicita a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente guardar secreto respecto de su identidad, por razones de seguridad e interés particular, ésta llevará a cabo el seguimiento de la denuncia conforme a las atribuciones que la presente Ley y demás disposiciones jurídicas aplicables le otorgan.

ARTICULO 191.- La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, una vez recibida la denuncia, acusará recibo de su recepción, le asignará un número de expediente y la registrará. En caso de recibirse dos o más denuncias por los mismos hechos, actos u omisiones, se acordará la acumulación en un sólo expediente, debiéndose notificar a los denunciantes el acuerdo respectivo.

Una vez registrada la denuncia, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente dentro de los 10 días siguientes a su presentación, notificará al denunciante el acuerdo de calificación correspondiente, señalando el trámite que se

le ha dado a la misma.

Si la denuncia presentada fuera competencia de otra autoridad, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente acusará de recibo al denunciante pero no admitirá la instancia y la turnará a la autoridad competente para su trámite y resolución, notificándole de tal hecho al denunciante, mediante acuerdo fundado y motivado.

ARTICULO 192.- Una vez admitida la instancia, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente llevará a cabo la identificación del denunciante, y hará del conocimiento la denuncia a la persona o personas, o a las autoridades a quienes se imputen los hechos denunciados o a quienes pueda afectar el resultado de la acción emprendida, a fin de que presenten los documentos y pruebas que a su derecho convenga en un plazo máximo de 15 días hábiles, a partir de la notificación respectiva.

La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente efectuará las diligencias necesarias con el propósito de determinar la existencia de actos, hechos u omisiones constitutivos de la denuncia.

Asimismo, en los casos previstos en esta Ley, podrá iniciar los procedimientos de inspección y vigilancia que fueran procedentes, en cuyo caso se observarán las disposiciones respectivas del presente Título.

ARTICULO 193.- El denunciante podrá coadyuvar con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, aportándole las pruebas, documentación e información que estime pertinentes. Dicha dependencia deberá manifestar las consideraciones adoptadas respecto de la información proporcionada por el denunciante, al momento de resolver la denuncia.

ARTICULO 194.- La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente podrá solicitar a las instituciones académicas, centros de investigación y organismos del sector público, social y privado, la elaboración de estudios, dictámenes o peritajes sobre cuestiones planteadas en las denuncias que le sean presentadas.

ARTICULO 195.- Si del resultado de la investigación realizada por la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, se desprende que se trata de actos, hechos u omisiones en que hubieren incurrido autoridades federales, estatales o municipales, emitirá las recomendaciones necesarias para promover ante éstas la ejecución de las acciones procedentes.

Las recomendaciones que emita la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente serán públicas, autónomas y no vinculatorias

ARTICULO 196.- Cuando una denuncia popular no implique violaciones a la normatividad ambiental, ni afecte cuestiones de orden público e interés social, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente podrá sujetar la misma a un procedimiento de conciliación. En todo caso, se deberá escuchar a las partes involucradas.

ARTICULO 197.- En caso de que no se comprueben que los actos, hechos u omisiones denunciados producen o pueden producir desequilibrio ecológico o daños al ambiente o a los recursos naturales o contravengan las disposiciones de la presente Ley, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente lo hará del conocimiento del denunciante, a efecto de que éste emita las observaciones que juzgue convenientes.

ARTICULO 198.- La formulación de la denuncia popular, así como los acuerdos, resoluciones y recomendaciones que emita la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, no afectarán el ejercicio de otros derechos o medios de defensa que pudieran corresponder a los afectados conforme a las disposiciones jurídicas aplicables, no suspenderán ni interrumpirán sus plazos preclusivos, de prescripción o de caducidad. Esta circunstancia deberá señalarse a los interesados en el acuerdo de admisión de la instancia.

ARTICULO 199.- Los expedientes de denuncia popular que hubieren sido abiertos, podrán ser concluidos por las siguientes causas:

- I.- Por incompetencia de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente para conocer de la denuncia popular planteada;
 - II.- Por haberse dictado la recomendación correspondiente;
 - III.- Cuando no existan contravenciones a la normatividad ambiental;
 - V.- Por falta de interés del denunciante en los términos de este Capítulo;
 - VII.- Por haberse dictado anteriormente un acuerdo de acumulación de expedientes;
 - VIII.- Por haberse solucionado la denuncia popular mediante conciliación entre las partes.
- Por la emisión de una resolución derivada del procedimiento de inspección, o

Por desistimiento del denunciante.

ARTICULO 200.- Las leyes de las entidades federativas establecerán el procedimiento para la atención de la denuncia popular cuando se trate de actos, hechos u omisiones que produzcan o puedan producir desequilibrios ecológicos o daños al ambiente, por violaciones a la legislación local ambiental

ARTICULO 201.- Las autoridades y servidores públicos involucrados en asuntos de la competencia de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, o que por razón de sus funciones o actividades puedan proporcionar información pertinente, deberán cumplir en sus términos con las peticiones que dicha dependencia les formule en tal sentido.

Las autoridades y servidores públicos a los que se les solicite información o documentación que se estime con carácter reservado, conforme a lo dispuesto en la legislación aplicable, lo comunicarán a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. En este supuesto, dicha dependencia deberá manejar la información proporcionada bajo la más estricta confidencialidad.

ARTICULO 202.- La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente en el ámbito de sus atribuciones, está facultada para iniciar las acciones que procedan, ante las autoridades judiciales competentes, cuando conozca de actos, hechos u omisiones que constituyan violaciones a la legislación administrativa o penal.

ARTICULO 203.- Sin perjuicio de las sanciones penales o administrativas que procedan, toda persona que contamine o deteriore el ambiente o afecte los recursos naturales o la biodiversidad, será responsable y estará obligada a reparar los daños causados, de conformidad con la legislación civil aplicable.

El término para demandar la responsabilidad ambiental, será de cinco años contados a partir del momento en que se produzca el acto, hecho u omisión correspondiente

ARTICULO 204.- Cuando por infracción a las disposiciones de esta Ley se hubieren ocasionado daños o perjuicios, los interesados podrán solicitar a la Secretaría, la formulación de un dictamen técnico al respecto, el cual tendrá valor de prueba, en caso de ser presentado en juicio."

TRANSITORIOS

ARTICULO PRIMERO.- El presente Decreto entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

ARTICULO SEGUNDO.- Se derogan la Ley sobre la Zona Exclusiva de Pesca de la Nación, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de enero de 1967, la Ley de Conservación del Suelo y Agua, publicada en dicho órgano de difusión el 6 de julio de 1946, así como todas las disposiciones legales que se opongan a lo

previsto en el presente Decreto.

ARTICULO TERCERO.- Los gobiernos de las Entidades Federativas, así como los Ayuntamientos, deberán adecuar sus leyes, reglamentos, ordenanzas, bandos de policía y buen gobierno y demás disposiciones aplicables, a lo establecido en el presente Decreto.

ARTICULO CUARTO.- Los procedimientos y recursos administrativos relacionados con las materias de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, iniciados con anterioridad a la entrada en vigor del presente Decreto, se tramitarán y resolverán conforme a las disposiciones vigentes en ese momento, y las demás disposiciones aplicables en la materia de que se trate

ARTICULO QUINTO.- La Federación, en coordinación con las autoridades de las Entidades Federativas y Municipales, según corresponda, aplicará lo dispuesto en este Decreto en el ámbito local, en aquellas materias cuya competencia no correspondía a dichos órdenes de gobierno antes de la entrada en vigor del presente Decreto, hasta en tanto sean expedidos y modificados los ordenamientos señalados en el ARTICULO TERCERO TRANSITORIO.

ARTICULO SEXTO.- Las autorizaciones, permisos, licencias y concesiones otorgadas con anterioridad a la fecha de entrada en vigor del presente Decreto, seguirán vigentes: su prórroga se sujetará a las disposiciones del presente Decreto.

ARTICULO SEPTIMO.- La Secretaría, mediante acuerdo que se publicará en el Diario Oficial de la Federación, deberá determinar la categoría de área natural protegida que, conforme a lo dispuesto en este Decreto, corresponderá a las áreas o zonas que hayan sido establecidas con anterioridad a la entrada en vigor del mismo, con la finalidad de cumplir alguno o algunos de los propósitos establecidos en el artículo 45 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, o cuya caracterización sea análoga o similar a la descripción de alguna de las áreas naturales protegidas de competencia federal previstas en el artículo 46 de dicho ordenamiento.

ARTICULO OCTAVO.- Tratándose de las reservas forestales, reservas forestales nacionales, zonas protectoras forestales, zonas de restauración y propagación forestal y las zonas de protección de ríos, manantiales, depósitos y en general, fuentes para el abastecimiento de agua para el servicio de las poblaciones, la Secretaría deberá realizar los estudios y análisis que sean necesarios para determinar si las condiciones que dieron lugar a su establecimiento no se han modificado y si los propósitos previstos en el instrumento mediante el cual se declaró su constitución, corresponde a los objetivos y características señalados en los artículos 45 y 53 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

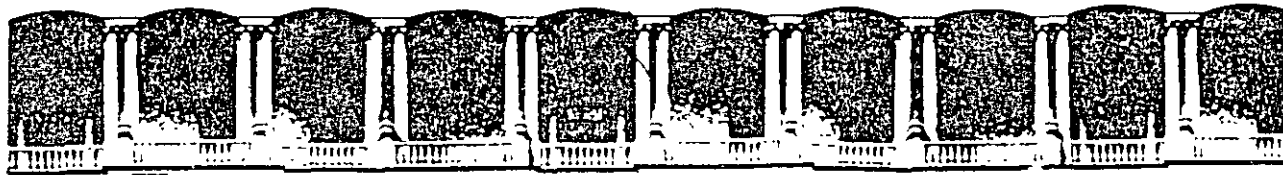
En caso de que conforme a los estudios y análisis que se lleven a cabo, sea necesario modificar los decretos mediante los cuales se declaran las áreas y zonas anteriormente señaladas, la Secretaría deberá promover ante el Ejecutivo Federal la expedición del decreto que corresponda, previa opinión favorable del Consejo Nacional de Areas Naturales Protegidas.

Asimismo, la Secretaría deberá poner a disposición de los gobiernos locales, propietarios, poseedores, grupos y organizaciones sociales, públicas o privadas, instituciones de investigación y educación superior y demás personas interesadas, los estudios o análisis que realice para los efectos a que se refiere este artículo, con el propósito de que éstos le presenten las opiniones y propuestas que consideren procedentes. La Secretaría deberá incorporar en dichos estudios y análisis las consideraciones que estime pertinentes en relación con las opiniones y propuestas que le sean remitidas, a fin de hacerlas del conocimiento del Consejo Nacional de Areas Naturales Protegidas, previamente a que éste emita su recomendación, respecto de la procedencia de la modificación del decreto correspondiente.

ARTICULO NOVENO.- En el caso de las áreas y zonas a que se refiere el artículo anterior, sólo se requerirá la autorización en materia de impacto ambiental a que se refiere el artículo 28 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, cuando la obra o actividad de que se trate quede comprendida en alguno de los supuestos previstos en las fracciones I a X o XII y XIII del precepto citado. Dicha autorización se otorgará de

conformidad con lo dispuesto en el propio ordenamiento y las disposiciones que del mismo se deriven.

ARTICULO DECIMO.- En tanto se expidan las disposiciones reglamentarias que se deriven del presente Decreto, seguirán en vigor las que han regido hasta ahora, en lo que no la contravengan.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

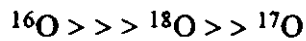
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Evaluación de Riesgo

M. en I. Antonio Cardona Benavides
Guanajuato, Guanajuato
1998.

MOLECULA DEL AGUA

Abundancia de isotopos de oxigeno

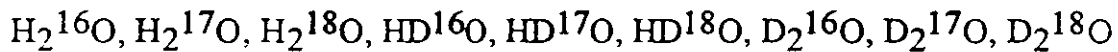


Abundancia de isotopos de hidrogeno

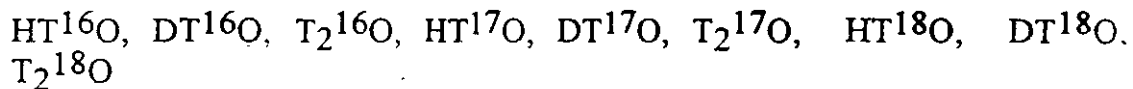


\Rightarrow 48 moléculas diferentes, 39 radioactivas

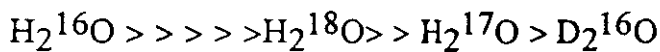
\Rightarrow 9 moléculas estables de agua



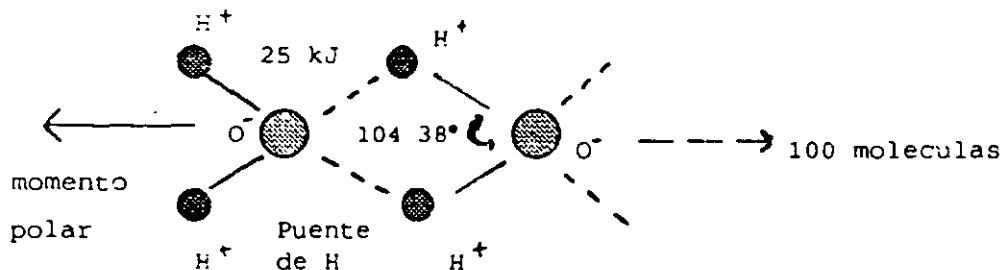
aunque, también es posible encontrar las siguientes moléculas



abundancia relativa



Agregado molecular de agua a 20°C



En una molécula gramo de agua la energía de los puentes o ligaduras de Hidrogeno constituye alrededor de 25 KJ. Esto provoca que el agua sea un líquido prácticamente incompresible.

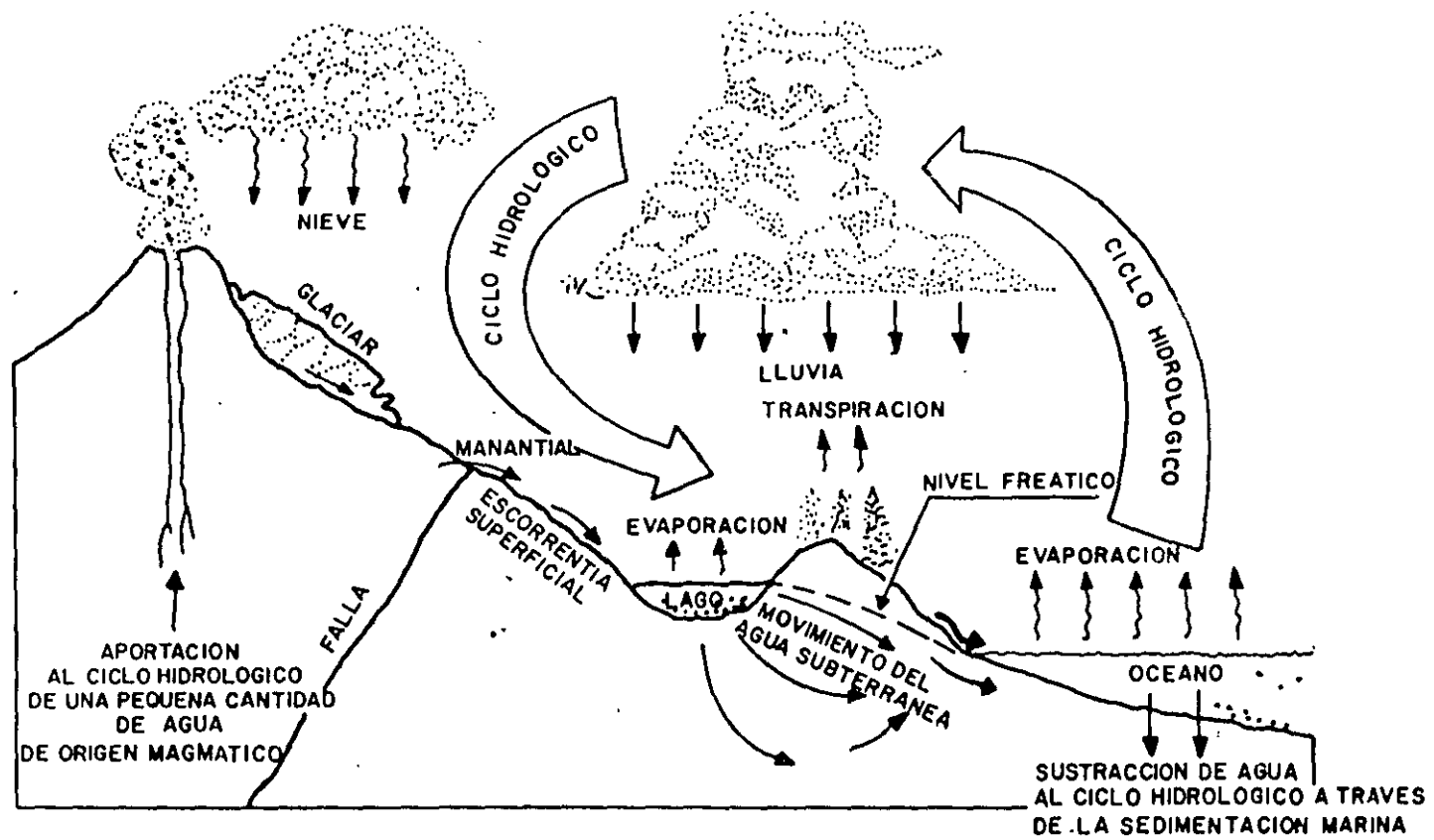
Propiedades Físico-Químicas del agua

Propiedad	Simbología	Valor	Peculiaridades
Densidad	ρ	998.2 g/cm ³	f(T)
Viscosidad	μ	1.0 x 10 ⁻² centipoise	f(1/T)
Coef. Cinemático de Viscosidad	ν	1.01 x 10 ⁻⁶ m ² /s [stockes]	f(1/T)
Coef. Conductividad Térmica	K	140 x 10 ⁻⁵ cal / cm s	no es buena conductora de calor
Calor de fusión	C _f	79.71 cal/g C	
Calor de vaporización	C _v	595.4 cal/g C	
Calor específico	C _e	1.0 cal/g °C	buena moderadora del clima
Coef. Lamé Modulo de rigidez	μ	0	En líquidos no existen ondas longitudinales
Vel. ondas P	V _p	1.485 Km/s	-
Compresibilidad isotérmica		4.6 cm ² /dina 10 ⁻¹¹	f(T)
Coef. de Compresibilidad	β	4.88 x 10 ⁻¹⁰ m ² /N	$\beta = 1/\epsilon$
Coef. de elasticidad	ϵ	0.205 x 10 ¹⁰ N/m ²	
Indice de Refracción para luz de sodio	I _r	1333	
Resistividad (agua Kohlrausse)	ρ_{\max}	28 x 10 ⁶ ohm cm ⁻¹	f(1/mineralización)
Conductividad eléctrica específica	μ	5 x 10 ⁻⁶ S/m	f(mineralización)
Constante o permeabilidad dieléctrica	ϵ	80.4	f(1/frecuencia) hace del agua el disolvente natural mas fuerte
Tensión superficial		72.75 dinas/cm	

valores a T de 20° C

PROPIEDADES "ANÓMALAS" DEL AGUA

- Al congelarse, aumenta su volumen 10 % a presión normal
- Al aumentar la presión desciende la temperatura de fusión, en las sustancias comunes el proceso es inverso.
- Con excepción de algunas sustancias, tiene mayor peso en estado líquido que en estado sólido.
- Tiene máxima densidad a 3.98 °C
- Posee el mayor calor específico - capacidad calórica- de todas las sustancias sólidas o líquidas
- La temperatura de congelación decae con el aumento de presión
- Tiene el mayor Calor de Evaporación de todos los líquidos comunes
- Tiene el mayor Calor de Fundición (excepto el amoníaco)
- La mayor constante dieléctrica de los líquidos comunes
- Es el mejor solvente natural conocido
- La molécula de agua posee un momento dipolar muy alto
- Posee una tensión superficial excepcionalmente grande.



CICLO HIDROLOGICO

Un RS es un RIP si muestra alguna de las siguientes características:

- **Flamabilidad** Punto Ignición menor a 60° C.
Sólido que bajo condiciones normales presenta combustión espontánea
- **Corrosividad** un RS con $12.5 < \text{pH} < 2$ o líquido que corroe acero a razón de cm/año a una $T = 55^\circ \text{C}$
- **Reactividad** Un RS -inestable que reacciona violentamente sin detonación
 - reacciona violentamente con agua
 - forma mezcla explosiva con agua
 - genera gases tóxicos, vapores, humos cuando se añade agua
 - contiene cianuro o sulfatos y genera gases tóxicos, vapores o humos a $2 < \text{pH} < 12.5$
 - detona cuando es calentado bajo confinamiento
 - detona a P y T normales
 - catalogado como explosivo
- **Toxicidad** Afecta adversamente a la salud. Puede ser cancerígeno o no-cancerígeno

RESIDUOS SOLIDOS (RS)

Desechos de actividades antropogenicas

no se incluyen

- Descargas de liquidos domesticos
- Descargas de aguas residuales industriales
- Retorno de riego
- Material nuclear
- Residuos mineros

RESIDUOS INDUSTRIALES PELIGROSOS (RIP)

Es un RS o una combinacion de RS's que por su cantidad, concentracion de solutos o las caracteristicas fisicas, quimicas o infecciosas puede:

- Causar o incrementar mortalidad o enfermedades
- Ser un riesgo potencial para la salud o el medio ambiente cuando son tratados, almacenados, transportados o dispuestos inadecuadamente.

Un RS puede ser considerado como un RIP si

- Muestra al analizarlo cualquier caracteristica de un RIP
- Ha sido definido y catalogado como RIP
- Es una mezcla que contiene RS's y por lo menos un RIP
- No esta excluido de las regulaciones vigentes como RIP

Un RS es un **RIP** si muestra alguna de las siguientes características:

* **Flamabilidad** Punto ignición menor a 60° C.
Sólido que bajo condiciones normales presenta combustión espontánea

* **Corrosividad** un RS con $12.5 < \text{pH} < 2$ o líquido que corroe acero a razón de 6 cm/año a una $T = 55^\circ \text{C}$

* **Reactividad** Un RS -inestable que reacciona violentamente sin detonación

-reacciona violentamente con agua

-forma mezcla explosiva con agua

-genera gases tóxicos, vapores, humos cuando se añade agua

-contiene cianuro o sulfatos y genera gases tóxicos, vapores o humos a $2 < \text{pH} < 12.5$

-detona cuando es calentado bajo confinamiento

-detona a P y T normales

-catalogado como explosivo

* **Toxicidad** Afecta adversamente a la salud. Puede ser cancerígeno o no-cancerígeno

ACTIVIDADES ANTROPOGENICAS QUE APORTAN CONTAMINANTES AL AGUA SUBTERRANEA

DISPOSICION DE RESIDUOS	
SISTEMAS SEPTICOS	Bacterias, virus, nitratos, fosfatos cloruros, TCE
BASUREROS (ACTIVOS)	SDT, metales, Fe, Mn, Cd, acidos, compuestos orgánicos
POZOS INYECCION	SDT, bacterias, Na,
ALMACENAJE Y MANEJO MAT.	
TANQUES SUBTERRANEOS	B, T, X, hidrocarburos
AGROQUIMICOS	Nitratos, compuestos orgánicos
DUCTOS	B, T, X, hidrocarburos
ACTIVIDADES MINERAS	
JALES	Acidos, Fe, Mn, U, Th. Mo, Se, As
ACTIVIDADES PETROLERAS	
POZOS	Salmueras
ACTIVIDADES AGROPECUARIAS	
AGROQUIMICOS	Nitratos, fosfatos, compuestos orgánicos
IRRIGACION	SDT, nitratos, fosfatos
HECES ANIMALES	Nitratos, nitritos, bacterias, fosfatos
ACTIVIDADES URBANAS	
FUGAS DRENAJE	Bacterias, hidrocarburos, STD, plomo
FUGAS DUCTOS	Hidrocarburos { gasolinas }, solventes

Modificado del U.S. Geol. Survey, 1988

Contaminant	Examples of uses
Aromatic hydrocarbons	
Acetanilide	Intermediate manufacturing, pharmaceuticals, <u>dyestuffs</u>
Alkyl benzene sulfonates	Detergents
Aniline	<u>Dyestuffs</u> , intermediate, photographic chemicals, pharmaceuticals, <u>herbicides</u> , <u>fungicides</u> , petroleum refining, explosives
Anthracene	<u>Dyestuffs</u> , intermediate, semiconductor research
Benzene	Detergents, intermediate, <u>solvents</u> , antiknock gasoline
Benzidine	<u>Dyestuffs</u> , reagent, stiffening agent in rubber compounding
Benzyl alcohol	<u>Solvent</u> , perfumes and flavors, photographic developer inks, <u>dye-stuffs</u> , intermediate
Butoxymethylbenzene	NA ^o
Chrysene	Organic synthesis, coal tar by-product
Creosote mixture	<u>Wood preservatives</u> , disinfectants
Dibenz[a,h.]anthracene	NA
Di-butyl-p-benzoquinone	NA
Dihydrotrimethylquinoline	Rubber antioxidant
4,4-Dinitrosodiphenylamine	NA
Ethylbenzene	Intermediate, <u>solvent</u> , gasoline
Fluoranthene	Coal tar by-product
Fluorene	Resinous products, <u>dyestuffs</u> , <u>insecticides</u> , coal tar by-product
Fluorescein	Dyestuffs
Isopropyl benzene	<u>Solvent</u> , chemical manufacturing
4,4'-methylene-bis-2-chloroaniline (MOCA)	Curing agent for polyurethanes and epoxy resins
Methylthiobenzothiazole	NA
Napthalene	<u>Solvent</u> , lubricant, explosives, preservatives, intermediate, <u>fungicide</u> , moth repellant
o-Nitroaniline	<u>Dyestuffs</u> , intermediate, interior paint pigments, chemical manufacturing
Nitrobenzene	<u>Solvent</u> , polishes, chemical manufacturing
4-Nitrophenol	Chemical manufacturing
n-Nitrosodiphenylamine	<u>Pesticides</u> , retarder of vulcanization of rubber
Phenanthrene	<u>Dyestuffs</u> , explosives, synthesis of drugs, biochemical research
n-Propylbenzene	Dyestuffs, solvent
Pyrene	Biochemical research, coal tar by-product
Styrene (vinyl benzene)	Plastics, resins, protective coatings, intermediate
Toluene	Adhesive solvent in plastics, <u>solvent</u> , aviation and high-octane blending stock, diluent and thinner, chemicals, explosives, detergents
1,2,4-Trimethylbenzene	<u>Manufacture of dyestuffs</u> , pharmaceuticals, chemical manufacturing
Xylenes (m, o, p)	Aviation gasoline, protective coatings, solvent, synthesis of organic chemicals, gasoline
Oxygenated hydrocarbons	
Acetic acid	Food additives, plastics, <u>dyestuffs</u> , pharmaceuticals, photographic chemicals, <u>insecticides</u>
Acetone	<u>Dyestuffs</u> , <u>solvent</u> , chemical manufacturing, cleaning and drying of precision equipment
Benzophenone	Organic synthesis, odor fixative, flavoring, pharmaceuticals
Butyl acetate	<u>Solvent</u>
n-Butyl-benzylphthalate	Plastics, intermediate

Source: Office of Technology Assessment, *Protecting The Nation's Groundwater from Contamination*, 1984, pp. 23-31.

Contaminant	Examples of uses
Oxygenated hydrocarbons (cont'd)	
Di-n-butyl phthalate	Plasticizer, <u>solvent</u> , adhesives, <u>insecticides</u> , safety glass, inks, paper coatings
Diethyl ether	Chemical manufacturing, <u>solvent</u> , analytical chemistry, anesthetic, perfumes
Diethyl phthalate	Plastics, explosives, <u>solvent</u> , <u>insecticides</u> , perfumes
Diisopropyl ether	<u>Solvent</u> , rubber cements, paint and varnish removers
2,4-Dimethyl-3-hexanol	Intermediate, <u>solvent</u> , lubricant
2,4-Dimethyl phenol	Pharmaceuticals, plastics, disinfectants, <u>solvent</u> , <u>dyestuffs</u> , <u>insecticides</u> , <u>fungicides</u> , additives to lubricants and gasoline
Di-n-octyl phthalate	Plasticizer for polyvinyl chloride and other vinyls
1,4-Dioxane	<u>Solvent</u> , lacquers, paints, varnishes, cleaning and detergent preparations, <u>fumigants</u> , paint and varnish removers, wetting agent, cosmetics
Ethyl acrylate	Polymers, acrylic paints, intermediate
Formic acid	<u>Dyeing</u> and finishing, chemicals, <u>manufacture of fumigants</u> , <u>insecticides</u> , <u>solvents</u> , plastics, refrigerants
Methanol (methyl alcohol)	Chemical manufacturing, <u>solvents</u> , automotive antifreeze, fuels
Methylcyclohexanone	<u>Solvent</u> , <u>lacquers</u>
Methyl ethyl ketone	<u>Solvent</u> , paint removers, cements and adhesives, cleaning fluids, printing, acrylic coatings
Methylphenyl acetamide	NA
Phenols (e.g., p-tert-butylphenol)	Resins, <u>solvent</u> , pharmaceuticals, reagent, <u>dyestuffs</u> and indicators, germicidal paints
Phthalic acid	<u>Dyestuffs</u> , medicine, perfumes, reagent
2-Propanol	Chemical manufacturing, <u>solvent</u> , deicing agent, pharmaceuticals, perfumes, lacquers, dehydrating agent, preservatives
2-Propyl-1-heptanol	<u>Solvent</u>
Tetrahydrofuran	<u>Solvent</u>
Varsol	Paint and varnish thinner
Hydrocarbons with specific elements (e.g., with N, P, S, Cl, Br, I, F)	
Acetyl chloride	Dyestuffs, pharmaceuticals, organic preparations
Alachlor (Lasso)	<u>Herbicides</u>
Aldicarb (sulfoxide and sulfone; Temik)	<u>Insecticide</u> , <u>nematocide</u>
Aldrin	<u>Insecticides</u>
Atrazine	<u>Herbicides</u> , <u>plant growth regulator</u> , weed-control agent
Benzoyl chloride	Medicine, intermediate
Bromacil	<u>Herbicides</u>
Bromobenzene	<u>Solvent</u> , motor oils, organic synthesis
Bromochloromethane	Fire extinguishers, organic synthesis
Bromodichloromethane	<u>Solvent</u> , fire extinguisher fluid, mineral and salt separations
Bromoform	<u>Solvent</u> , intermediate
Carbofuran	<u>Insecticide</u> , <u>nematocide</u>
Carbon tetrachloride	Degreasers, refrigerants and propellants, <u>fumigants</u> , chemical manufacturing
Chlordane	<u>Insecticides</u> , oil emulsions
Chlorobenzene	<u>Solvent</u> , <u>pesticides</u> , chemical manufacturing
Chloroform	Plastics, <u>fumigants</u> , <u>insecticides</u> , refrigerants and propellants

Contaminant	Examples of uses
Hydrocarbons with specific elements (cont'd)	
1,2-Dichloropropane	<u>Solvent</u> , intermediate, scouring compounds, <u>fumigant</u> , <u>nematocide</u> , additive for antiknock fluids
Dicyclopentadiene (DCPD)	<u>Insecticide manufacture</u>
Dieldrin	<u>Insecticides</u>
Diiodomethane	Organic synthesis
Diisopropylmethyl phosphonate (DIMP)	Nerve gas manufacture
Dimethyl disulfide	NA
Dimethylformamide	<u>Solvent</u> , organic synthesis
2,4-Dinitrophenol (Dinoseb, DNBP)	<u>Herbicides</u>
Dithiane	Mustard gas manufacture
Dioxins (e.g., TCDD)	Impurity in the herbicide 2,4,5-T
Dodecyl mercaptan (lauryl mercaptan)	Manufacture of synthetic rubber and plastics, pharmaceuticals, <u>insecticides</u> , <u>fungicides</u>
Endosulfan	<u>Insecticides</u>
Endrin	<u>Insecticides</u>
Ethyl chloride	Chemical manufacturing, anesthetic, <u>solvent</u> , refrigerants, <u>insecticides</u>
Bis-2-ethylhexylphthalate	Plastics
Di-2-ethylexylphthalate	Plasticizers
Fluorobenzene	<u>Insecticide</u> and <u>larvicide intermediate</u>
Fluoroform	Refrigerants, intermediate, blowing agent for foams
Heptachlor	<u>Insecticides</u>
Heptachlorepoide	Degradation product of heptachlor, also acts as an insecticide
Hexachlorobicycloheptadiene	NA
Hexachlorobutadiene	<u>Solvent</u> , transformer and hydraulic fluid, heat-transfer liquid
α -Hexachlorocyclohexane (= Benzenehexachloride, or α -BHC)	<u>Insecticides</u>
β -Hexachlorocyclohexane (β -BHC)	<u>Insecticides</u>
γ -Hexachlorocyclohexane (γ -BHC, or Lindane)	<u>Insecticides</u>
Hexachlorocyclopentadiene	Intermediate for resins, <u>dyestuffs</u> , <u>pesticides</u> , <u>fungicides</u> , pharmaceuticals
Hexachloroethane	<u>Solvent</u> , pyrotechnics and smoke devices, explosives, organic synthesis
Hexachloronorbornadiene	NA
Isodrin	Intermediate compound in manufacture of Endrin
Kepone	<u>Pesticides</u>
Malathion	<u>Insecticides</u>
Methoxychlor	<u>Insecticides</u>
Methyl bromide	<u>Fumigants</u> , <u>pesticides</u> , organic synthesis
Methyl parathion	<u>Insecticides</u>
Oxathine	Mustard gas manufacture
Parathion	<u>Insecticides</u>
Pentachlorophenol (PCP)	<u>Insecticides</u> , <u>fungicides</u> , <u>bactericides</u> , <u>algicides</u> , <u>herbicides</u> , wood preservative
Phorate (Disulfoton)	<u>Insecticides</u>
Polybrominated biphenyls (PBBs)	Flame retardant for plastics, paper, and textiles
Polychlorinated biphenyls (PCBs)	Heat-exchange and insulating fluids in closed systems
Prometon	<u>Herbicides</u>

Contaminant	Examples of uses
Hydrocarbons with specific elements (cont'd)	
RDX (Cyclonite)	<u>Explosives</u>
Simazine	<u>Herbicides</u>
Tetrachlorobenzene	NA ^a
Tetrachloroethanes (1,1,1,2 and 1,1,2,2)	Degreasers, <u>paint removers</u> , varnishes, <u>lacquers</u> , photographic film, organic synthesis, <u>solvent</u> , <u>insecticides</u> , fumigants, weed killer
Tetrachloroethylene (or perchloroethylene, PCE)	<u>Degreasers</u> , <u>drycleaning</u> , <u>solvent</u> , drying agent, chemical manufacturing, heat-transfer medium, <u>vermifuge</u>
Toxaphene	<u>Insecticides</u>
Triazine	<u>Herbicides</u>
1,2,4-Trichlorobenzene	<u>Solvent</u> , <u>dyestuffs</u> , <u>insecticides</u> , lubricants, heat-transfer medium (e.g., coolant)
Trichloroethanes (1,1,1 and 1,1,2)	<u>Pesticides</u> , <u>degreasers</u> , <u>solvent</u>
1,1,2-Trichloroethylene (TCE)	<u>Degreasers</u> , paints, <u>drycleaning</u> , <u>dyestuffs</u> , textiles, <u>solvent</u> , refrigerant and heat exchange liquid, <u>fumigant</u> , intermediate, aerospace operations
Trichlorofluoromethane (Freon 11)	<u>Solvent</u> , refrigerants, fire extinguishers, intermediate
2,4,6-Trichlorophenol	<u>Fungicides</u> , <u>herbicides</u> , <u>defoliant</u>
2,4,5-Trichlorophenoxyacetic acid (2,4,5-T)	<u>Herbicides</u> , <u>defoliant</u>
2,4,5-Trichlorophenoxypropionic acid (2,4,5-TP or Silvex)	<u>Herbicides</u> and <u>plant growth regulator</u>
Trichlorotrifluoroethane	<u>Dry-cleaning</u> , fire extinguishers, refrigerants, intermediate, drying agent
Trinitrotoluene (TNT)	Explosives, intermediate in dyestuffs and photographic chemicals
Tris-(2,3-dibromopropyl) phosphate	Flame retardant
Vinyl chloride	Organic synthesis, polyvinyl chloride and copolymers, adhesives
Other hydrocarbons	
Alkyl sulfonates	Detergents
Cyclohexane	Organic synthesis, <u>solvent</u> , oil extraction
1,3,5,7-Cyclooctatetraene	Organic research
Dicyclopentadiene (DCPD)	<u>Intermediate for insecticides</u> , paints and varnishes, flame retardants
2,3-Dimethylhexane	NA
Fuel oil	Fuel, heating
Gasoline	Fuel
Jet fuels	Fuel
Kerosene	Fuel, heating <u>solvent</u> , <u>insecticides</u>
Lignin	Newsprint, ceramic binder, <u>dyestuffs</u> , drilling fuel additive, plastics
Methylene blue activated substances (MBAS)	Dyestuffs, analytical chemistry
Propane	Fuel, <u>solvent</u> , refrigerants, propellants, organic synthesis
Tannin	Chemical manufacturing, tanning, textiles, electroplating, inks, pharmaceuticals, photography, paper
4,5,8-Trimethyl-1-nonene	NA
Undecane	Petroleum research, organic synthesis
Metals and cations	
Aluminum	Alloys, foundry, paints, protective coatings, electrical industry, packaging, building and construction, machinery and equipment
Antimony	Hardening alloys, solders, sheet and pipe, pyrotechnics

Contaminant	Examples of uses
Metals and cations (cont'd)	
Arsenic	<u>Alloys</u> , <u>dyestuffs</u> , medicine, solders, electronic devices, <u>insecticides</u> , <u>rodenticides</u> , <u>herbicide</u> , preservative
Barium	<u>Alloys</u> , lubricant
Beryllium	Structural material in space technology, inertial guidance systems, additive to rocket fuels, moderator and reflector of neutrons in nuclear reactors
Cadmium	<u>Alloys</u> , coatings, batteries, electrical equipment, fire-protection systems, paints, <u>fungicides</u> , photography
Calcium	<u>Alloys</u> , <u>fertilizers</u> , reducing agent
Chromium	<u>Alloys</u> , protective coatings, paints, nuclear and high-temperature research
Cobalt	<u>Alloys</u> , <u>ceramics</u> , drugs, paints, <u>glass</u> , <u>printing</u> , catalyst, electroplating, lamp filaments
Copper	<u>Alloys</u> , paints, electrical wiring, machinery, construction materials, electroplating, piping, <u>insecticides</u>
Iron	<u>Alloys</u> , machinery, magnets
Lead	<u>Alloys</u> , batteries, gasoline additive, sheet and pipe, paints, radiation shielding
Lithium	<u>Alloys</u> , pharmaceuticals, coolant, batteries, solders, propellants
Magnesium	<u>Alloys</u> , batteries, pyrotechnics, precision instruments, optical mirrors
Manganese	<u>Alloys</u> , purifying agent
Mercury	<u>Alloys</u> , electrical apparatus, instruments, <u>fungicides</u> , <u>bactericides</u> , mildew proofing, paper, pharmaceuticals
Molybdenum	<u>Alloys</u> , pigments, lubricant
Nickel	<u>Alloys</u> , ceramics, batteries, electroplating, catalyst
Palladium	<u>Alloys</u> , catalyst, jewelry, protective coatings, electrical equipment
Potassium	<u>Alloys</u> , catalyst
Selenium	<u>Alloys</u> , electronics, ceramics, catalyst
Silver	<u>Alloys</u> , photography, chemical manufacturing, mirrors, electronic equipment, jewelry, equipment, catalyst, pharmaceuticals
Sodium	Chemical manufacturing, catalyst, coolant, nonglare lighting for highways, laboratory reagent
Thallium	<u>Alloys</u> , glass, <u>pesticides</u> , photoelectric applications
Titanium	<u>Alloys</u> , structural materials, abrasives, coatings
Vanadium	<u>Alloys</u> , catalysts, target material for x-rays
Zinc	<u>Alloys</u> , electroplating, electronics, automotive parts, <u>fungicides</u> , roofing, cable wrappings, nutrition
Nonmetals and anions	
Ammonia	<u>Fertilizers</u> , chemical manufacturing, refrigerants, synthetic fibers, fuels, <u>dyestuffs</u>
Boron	<u>Alloys</u> , fibers and filaments, semiconductors, propellants
Chlorides	Chemical manufacturing, water purification, shrink-proofing, flame-retardants, food processing
Cyanides	Polymer production (heavy duty tires), coatings, metallurgy, <u>pesticides</u>
Fluorides	Toothpastes and other dentrifices, additive to drinking water
Nitrates	<u>Fertilizers</u> , food preservatives
Nitrites	<u>Fertilizers</u> , food preservatives

MECANISMOS DE TRANSPORTE

- i) ADVECCION
- ii) DISPERSION
- iii) ADVEC. - DISPERS.
- iv) ADVEC. - RETARDO LINEAL (SORPSION)
- v) DISPERSION - RET. LIN.
- vi) ADVEC. - DISP. - RET. LIN.
- vii) i) \rightarrow vi) - DEC. RAD.
- viii) i) \rightarrow vii) - REACC. SOLUTO

EL Retardo Lineal engloba todos los efectos de la interacción del soluto con el medio geológico.

- Absorción, reacciones químicas, reacciones biológicas

Absorción // Partición del soluto orgánico entre la fase sólida y líquida.

Reac. Quím // Oxidación, hidrólisis, catalisis de halogenación reductiva, sustitución nucleofílica

Reac. Biol. // Mec. de biotransf. (metabolismo directo, cometabolismo)

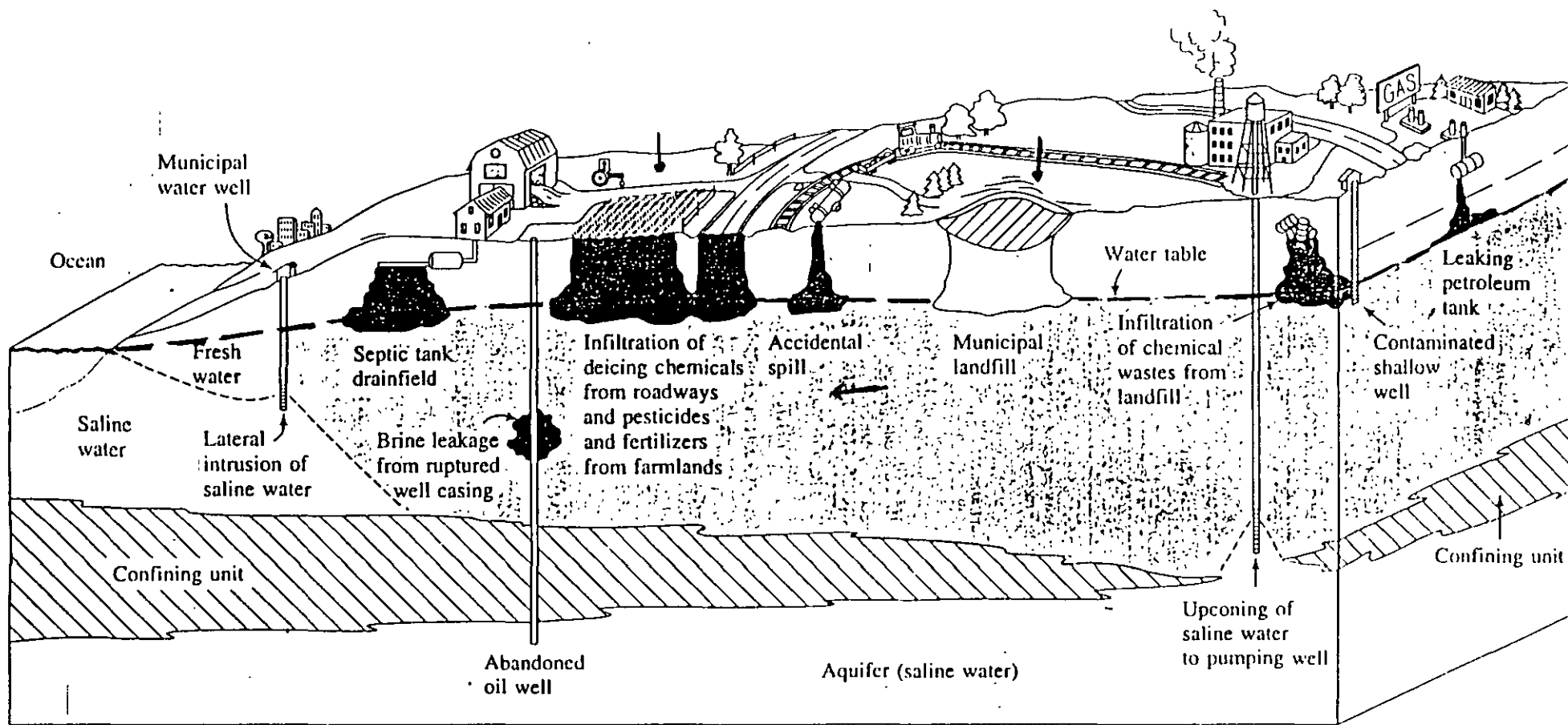


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.

BALANCE DE MASA

$$\text{VARIACION MASA} = S_E - S_S \pm \Delta S$$

$$\text{SI } \Delta S = 0 \quad q = n(c\bar{v})$$

$$\text{SI } \Delta S \neq 0 \quad q = n(c\bar{v} - D\nabla c)$$

donde $D\nabla c$ se deriva de la Primera ley de Fick

SI C CAMBIA CON t y $n = \text{Cte.}$

SE APLICA LA SEGUNDA LEY DE FICK \Rightarrow

$$\frac{\partial(nc)}{\partial t} = \nabla q$$

FLUJO UNIDIRECCIONAL

$$q = n[c\bar{v} - D \partial c / \partial x]$$

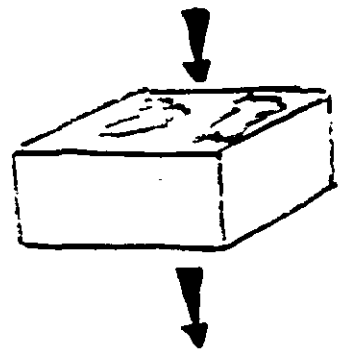
y

$$\frac{\partial(nc)}{\partial t} = \partial q / \partial x \Rightarrow \text{SI } n = \text{Cte}$$

$$n \frac{\partial c}{\partial t} = n\bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} + nc \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - n \frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial D}{\partial x} - nD \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

$$\text{SI } \bar{v} \text{ y } D = \text{Cte} \Rightarrow$$

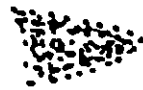
$$\frac{\partial c}{\partial t} = \bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$



ADVECCION

DISPERSION

• $\longrightarrow \bar{v}$



} Dispersión Transversal

} Dispersión Longitudinal

$$D_{LON} \geq D_{TRANS}$$

$$D_L = \sigma_L^2 / 2t$$

$$D_T = \sigma_T^2 / 2t$$

σ_L^2 = extensión lateral pluma

σ_T^2 = extensión transversal de la pluma

NUMERO PECKET N_p

CONTRIBUCION DE DISPERSION MECANICA Y DIFUSION

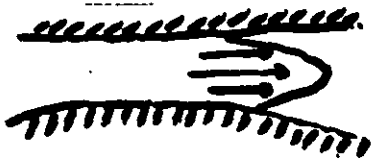
$$N_p = v \times d / D_d = v \times d / D_c$$

d = diametro grano promedio

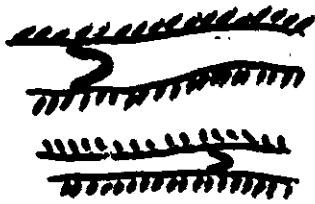
MECANISMOS DE DISPERSION

Escala Microscópica / Escala Macroscópica

Difusión Molecular Dispersión Mecánica



Perfil Velocidad



Diferentes dimens. poros



Ramificación Canales.



La dispersión mecánica puede ser representada como un proceso fickiano operando a escala macro.

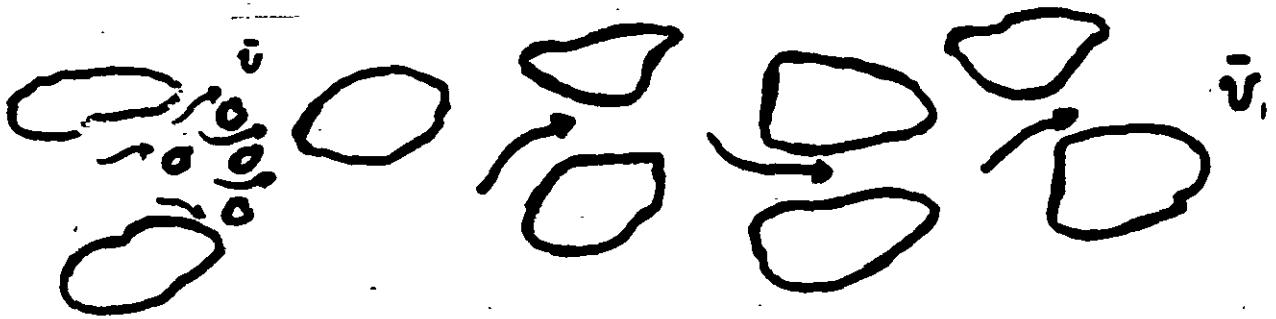
En la difusión fickiana

la difusión del flujo de soluto
es proporcional al gradiente de la concentración

$$J_d \sim \nabla c$$

$$J_d = -D_a \frac{\partial c}{\partial x}$$

FACTOR DE ESCALA



Dispersión a
pequeña escala

Dispersión a
gran escala

$$D = D_m + D_e$$

\downarrow \downarrow
 Coef. Disp Mec. Coef. Dif. Mol.

$$D_m = \alpha \bar{v}$$

\downarrow
dispersividad

$$D_e = D_0 \tau$$

\downarrow \rightarrow
 Coef. Dif. libre Relacionada
 Tortuosidad
 Medio Poroso

$$\alpha \begin{matrix} \alpha(x) & ? \\ \alpha(t) & ? \\ \alpha(x,t) & ? \end{matrix}$$

$$\tau < 1$$

$$\tau \sim d^* \text{ ó } (d/d^*)^2 \text{ ó } d^*/d$$

$$D_0 = D_0^t (1 + S/nK_d)^{-1}$$

Coef. Dif. Efectivo \downarrow
 Coef. Distrib.

$$K_d = K_s / K_f$$

\downarrow
función de distribución

ZONA NO SATURADA

RETENCION DE HUMEDAD

i) Adsorción

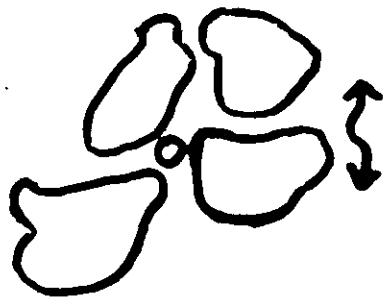
En Mat. grano fino:
mayor densidad carga
mayor area especf.



Molecula de Agua
(Orientada)

Rango de interacción 100 Å

ii) Retención Capilar



Aire a dif. presiones
dif. efecto capilar

Contenido de agua θ a presión ψ con $h = \psi + z$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} = M(\theta)$$

Capacidad de humedad especifica

Ecuación de flujo

$$M(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot K(\theta) \nabla h$$

Ec. dif. parc. no-lin. 2º orden

$$M, K = f(\theta)$$

$$M, K(\bar{x}, t) ?$$

TRANSFORMACION, RETARDACION Y ATENUACION DE SOLUTOS

INTERACCION SOLUTO AGUA SUBTERRANEA MATRIZ POROSA

RETARDACION

$$\bar{v}_s < \bar{v}_a$$

ROCA - SOLUTO

ADSORCION, SORPSION QUIMICA, ABSORCION
INTERCAMBIO IONICO



PARTICION

DISTRIB. SOLUTO Y FLUJO Y ROCA

EC. TRANSPORTE

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x}$$

ec. dif. parcial lineal hiperv. hom. 1.
2 var. indep.

- ADV -

* Medio incompresible, flujo estacionario
no disp., no absorc., ...

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$C = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{x - vt}{(4Dt)^{1/2}} \right\}$$

- DISP -

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x}$$

ADV - DISP

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v}_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{S}{n} K_f \frac{\partial C}{\partial t}$$

ADV - DISP RET. LIN.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{S}{n} K_d \frac{\partial C}{\partial t} - \lambda C - \frac{S}{n} K_d \lambda C$$

ADV - DISP RET. LIN. DEC. RAD. REACC.

$$R = 1 + \frac{S}{n} K_d \quad \text{Coef. de Retardación}$$

K_d = Coef. Distribución

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\bar{v}}{R} \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda C$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{S}{n} \frac{\partial S}{\partial t}$$

$\frac{\partial S}{\partial t}$ ~ veloc.
absorcio.

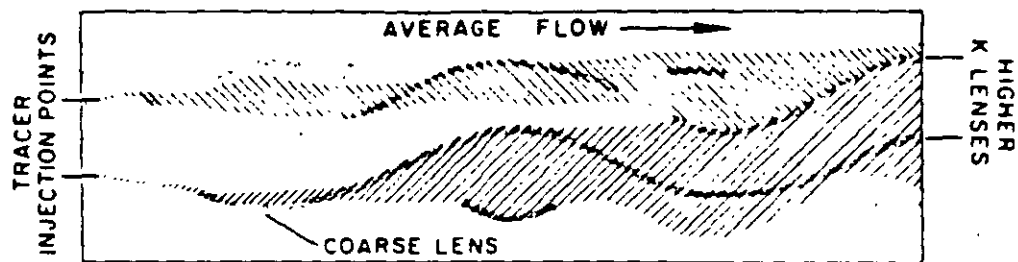


Fig. 6. Macroscopic dispersion as represented in a laboratory experiment (adapted from Skibitzkie and Robinson, 1963). "Higher K lenses" refers to lenses of high hydraulic conductivity.

Dispersión Macroscópica

Dispersión - difusión medio doble porosidad

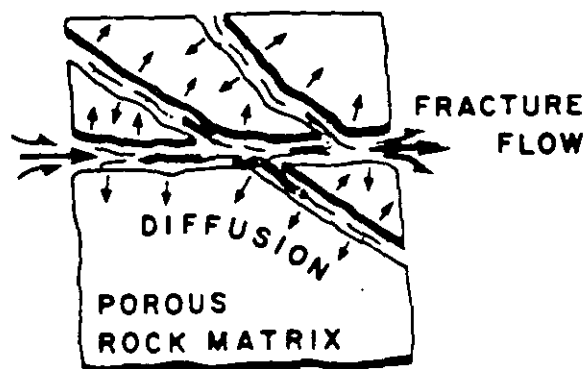
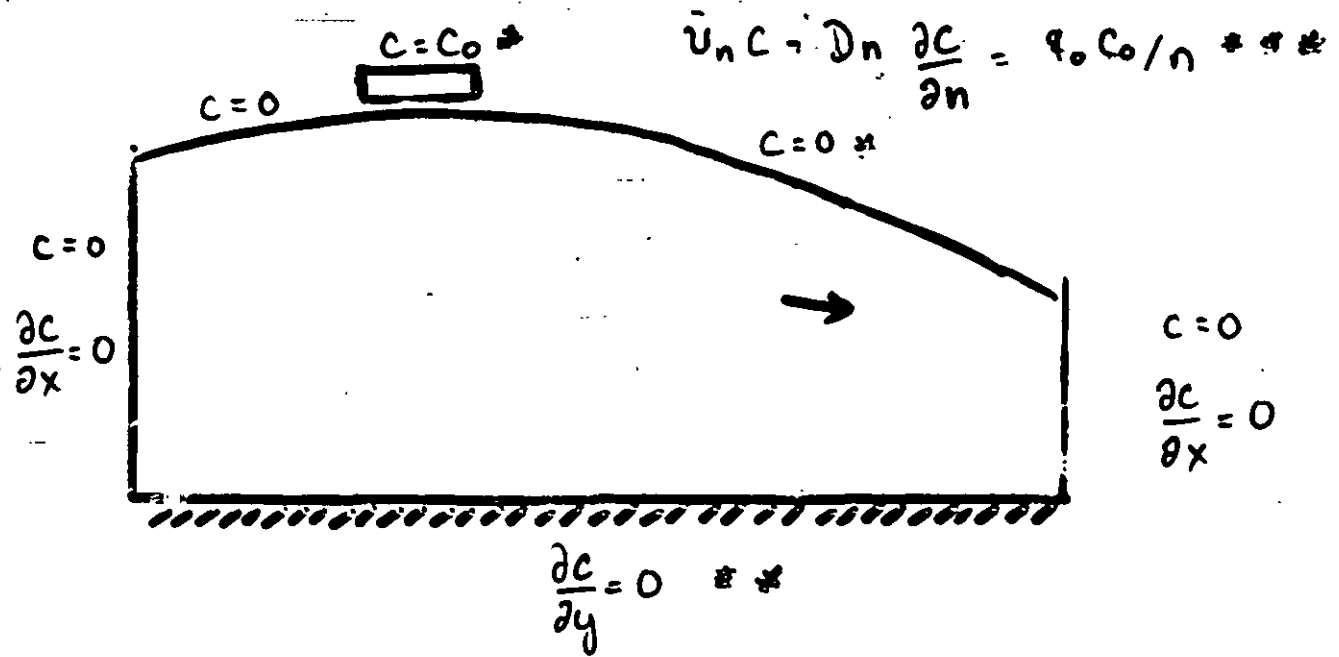
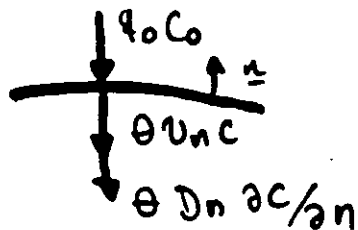


FIGURE 2-5 Schematic diagram representing flow through fracture and diffusion of contaminants from fractures into the rock matrix of dual porosity medium

Condiciones frontera



- * Primer tipo (concentración conocida)
- * * Segundo tipo ($q_0 = u_n = 0$) (Gradiente conocido)
- * * * tercer tipo (flujo soluto conocido)



$$C(0, t) = C_0 \quad t \geq 0$$

$$C(x, 0) = 0 \quad x \geq 0$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad t \geq 0$$

Soluciones

Advección - Dispersión

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$C(x=0) = C_0$$

$$C = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x - \bar{v}t}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left(\frac{\bar{v}x}{D} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x + \bar{v}t}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$



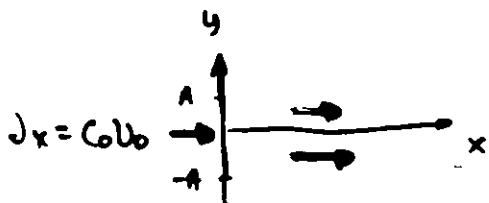
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_t \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

Caso no-estac.

$$C(x, y, t) = C_0 \frac{\bar{v}}{4\sqrt{\pi D_L}} \int_{t=0}^t \frac{1}{\sqrt{t}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{v}t)^2}{4D_L t} \right] - \left[\operatorname{erf} \left(\frac{A+y}{2\sqrt{D_t t}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{A-y}{2\sqrt{D_t t}} \right) \right] dt$$

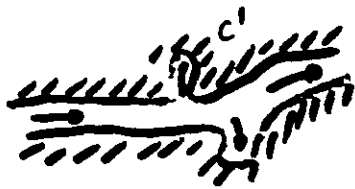
Caso estacionario

$$C(x, y) = C_0 \frac{\bar{v}}{2\bar{u} \sqrt{D_L D_t}} \exp \left(\frac{\bar{v}x}{2D_L} \right) \int_{-A}^A K_0 \{ \omega(\xi) \} d\xi$$



ADVECCION - DISPERSION

(MEDIOS - NO-HOMOG. NO-ISOT.)



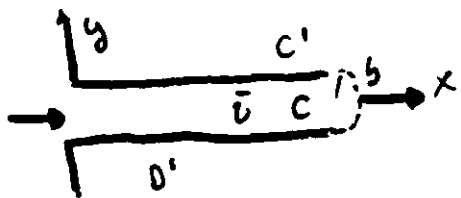
Difusión en zonas de estancamiento produce efectos de "capacitancia"

$$f \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - (1-f) \frac{\partial C'}{\partial t}$$

$$\text{con } (1-f) \frac{\partial C'}{\partial t} = D_c (C - C')$$

$C'(n, t) ?$

$f(C, n) ?$



Difusión en matriz porosa-fracturada

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{q}{b}$$

D' dif. matriz

$$\text{con } q = -D_e \frac{\partial C'}{\partial y}$$

b constante ?

$C'(C) ?$

* Dispersion longitudinal tiende a ser no-gausiana

* Efecto de capacitancia produce mayor dispersión longitudinal

transp. matriz

$$\frac{D'}{R'} \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} = \frac{\partial C'}{\partial t}$$

con $R' = 1 + \frac{S_{km}}{n}$ Coef. Rel. mat' : 2

$$q^* = -n D' \frac{\partial^2 C'}{\partial y^2} \Big|_{y=b}$$

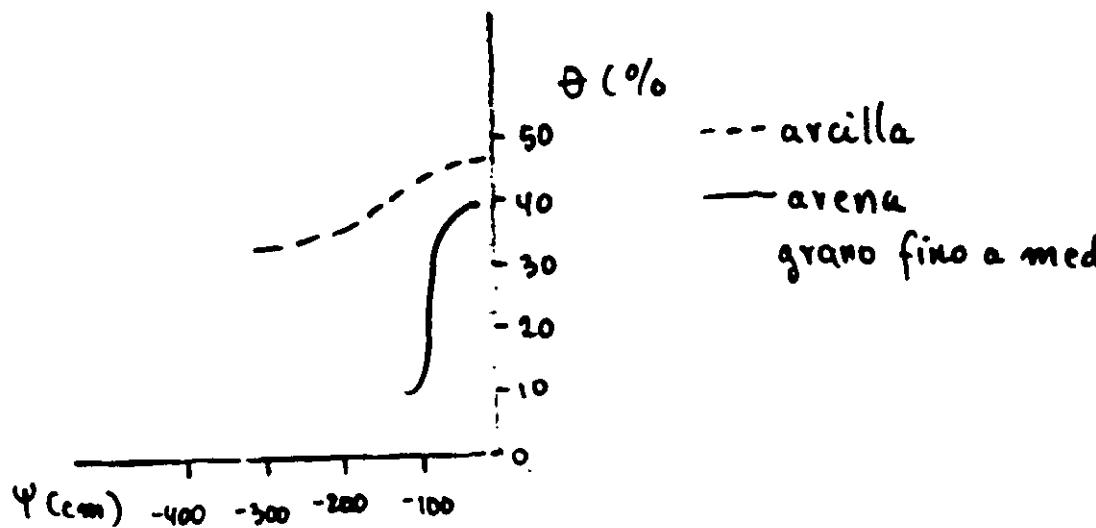
flujo difusivo en la interfase

TRANSP. ZONA NO-SATURADA.

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \bar{v} n \frac{\partial C}{\partial x}$$

$$\theta, \bar{v} (\bar{x}, t) \quad ?$$

$$\theta (T, t) \quad ?$$



Termino advectivo puede ser eliminado \Rightarrow dispersión predomina dif. Molecular.

De puede ser 1-2 ordenes de magnitud menor que en la zona saturada

$$D_e = 1-2 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{algunos iones}$$

POSIBLES AFECTACIONES A LA SALUD POR INGESTA DE AGUA CON METALES

Al	ALUMINIO	Cambios en la absorción de fosfatos en el tracto gastrointestinal
Sb	ANTIMONIO	Incrementa colesterol, decese glucosa, mutageno (?)
As	ARSENICO	Cancer dermal, hepático, renal, discromias, queratosis, polineuritis
Be	BERILIO	Disminución peso corporal, carcinogénico
Cd	CADMIO	Disfunciones renales, enfermedad Itai-itai {osteoporosis}
Cu	COBRE	Vomito, diarrea
Cr	CROMO	Cancer estomacal, irritación tracto gastrointestinal
Fe	FIERRO	Artritis reumatoide {incrementa daños}
Mg	MAGNESIO	Somnolencia, hipotonia, disminu. presión
Hg	MERCURIO	Disturbios emocionales y sicológicos. Neuralgia, dermatografismo, fatiga
Mo	MOLIBDENO	Molibnedosis {diarrea, anorexia, disturbios neurologicos }
Ni	NIQUEL	Cambios en el peso de organos, dermatitis en manos.
Pb	PLOMO	Neuropatía periférica, encefalopatía
Se	SELENIO	Selenosis [caída de pelo y uñas] disfunción hepática
Tl	TALIO	Decese glucosa, afectación sistema nervioso central
V	VANADIO	Inhibe síntesis colesterol

Modificado de Merian, 1991

POSIBLES AFECTACIONES A LA SALUD POR INGESTA DE AGUA CON COMPUESTOS ORGANICOS

Atrazine	Incremento peso corazón e hígado
Bromodiclorometano	Carcinoma hepático
Benceno	Leucemia
Cloroformo	Tumores en los riñones
1,1-Dicloroetano 1,1-DCA	Perdida de peso corporal
1,1-Dicloroetileno 1,1-DCE	Degeneración hepatocelular
1,2 Dicloropropano 1,2-DCP	Carcinoma hepático
1,4-Diclorobenceno 1,4-DCB	Carcinoma hepatocelular
Endrin	Incremento peso del hígado
Etilbenceno	Incremento peso hígado riñones
Heptacloro	Carcinoma hepático
Hexaclorobenceno	Carcinoma hepático
Lindano	Carcinoma hepático
Monoclorobenceno	Nodulos neoplásticos hepáticos
1,1,1-Tricloroetano -TCA	Mortalidad fetal
1,2,4-Triclorobenceno -TCB	Incremento peso gland. suprarrenal
Tetracloroetano	Cambios en el cont. grasa hígado
Tolueno	Neurotoxicidad
Triclorofluorometano	Incremento de N en urea
Triclorotrifluoroetano	Incremento en peso hepático
Cloruro de vinilo	Carcinoma hepático
Xileno	Perdida peso corporal

Modificado de Wang R., 1994

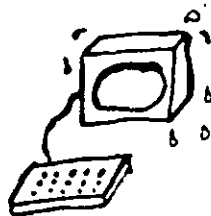
**Potencial de migración en el agua subterránea de contaminantes
orgánicos.**

Compuesto	Mobilidad Potencial	Potencial de Migración
Tricloroetano	59.4	4470
Tetracloroetano	47.6	4104
Triclorometano	71.5	3208
1,4-Diclorobenceno	35.2	2659
1,3-Diclorobenceno	42.6	2571
1,2-Diclorobenceno	39.4	1875
Benceno	62.6	1046
Clorobenceno	50.7	1023
Etilbenceno	45.9	539
Trans-1,2-Dicloroetano	61.3	328
Diclorometano	78.5	78
Tetraclorometano	59.7	57

Modificado de Lesage S., 1992

PROTOCOLO HIDROGEOQUIMICO.

OK!



MODELACION

HIPOTESIS !!??



CORRELACION
GEOLOGICA
HIDROGEOLOGICA

CRITERIOS !?



INTERPRETACION
QUIMICA
HIDROGEOLOGICA
HIDROGEOQUIMICA

CONCENTRACIONES



RESOLUCION



ANALISIS
INORGANICO
BACTERIOLOGICO
ORGANICO

REACC. QUIMICAS



ALMACENAMIENTO
CAPAC. LAB.



MANEJO Y TRANSPORTE
MUESTRAS.

ENVASES VS REAC. QUIM.

DETERM. IN SITU

TECNICAS EXTRACCION

REPRESENTATIVIDAD

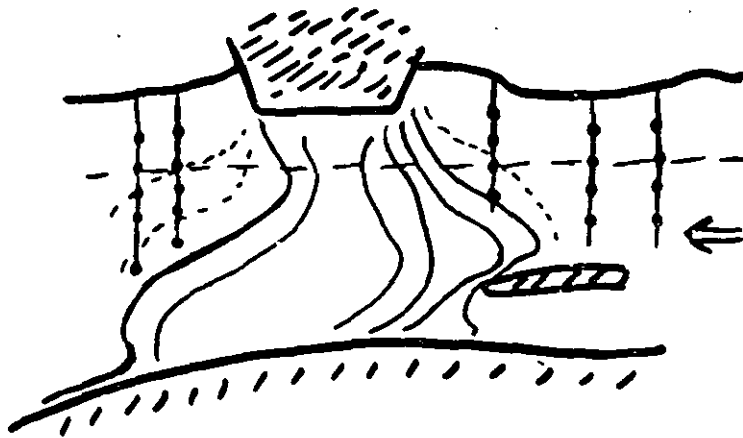


PLAN. MONITOREO



SEL. PUNTOS OBSERVACION

SISTEMAS MONITOREO



QUE DESEAMOS
MEDIR

QUE PODEMOS
MEDIR

QUE MEDIMOS

INCREMENTO
ABSORCION

COMO MEDIMOS

ACERO INOXID.
PVC RIGIDO
FIBRA VIDRIO IMPREGN. CON EPOXY
POLIVINILIDENO PF
POLITETRAFLUOROETILENO PTFE
POLIETILENO FLEXIBLE
POLIVINIL PVC FLEXIBLE

CO\$TO

QUIEN PAGA ?

QUIEN EJECUTA ?

A QUIEN BENEFICIA ! ?

TIEMPO

CUANDO ?

DONDE ?

YA PARA QUE !

IMPACTO

ECOLOGICO

SOCIAL

ECONOMICO

INVESTIGACION

IMPLEMENTACION ?

O: N PAPER'S !

APOYO ECONOM. - ACABEI

FUENTES POTENCIALES CONTAMINACION

INVENTARIO

LOCALIZACION

GEOLOGIA

SISTEMAS ACUIFEROS

PARAMETRIZACION

ENTORNO SOCIAL

ELEMENTOS POLVANTES

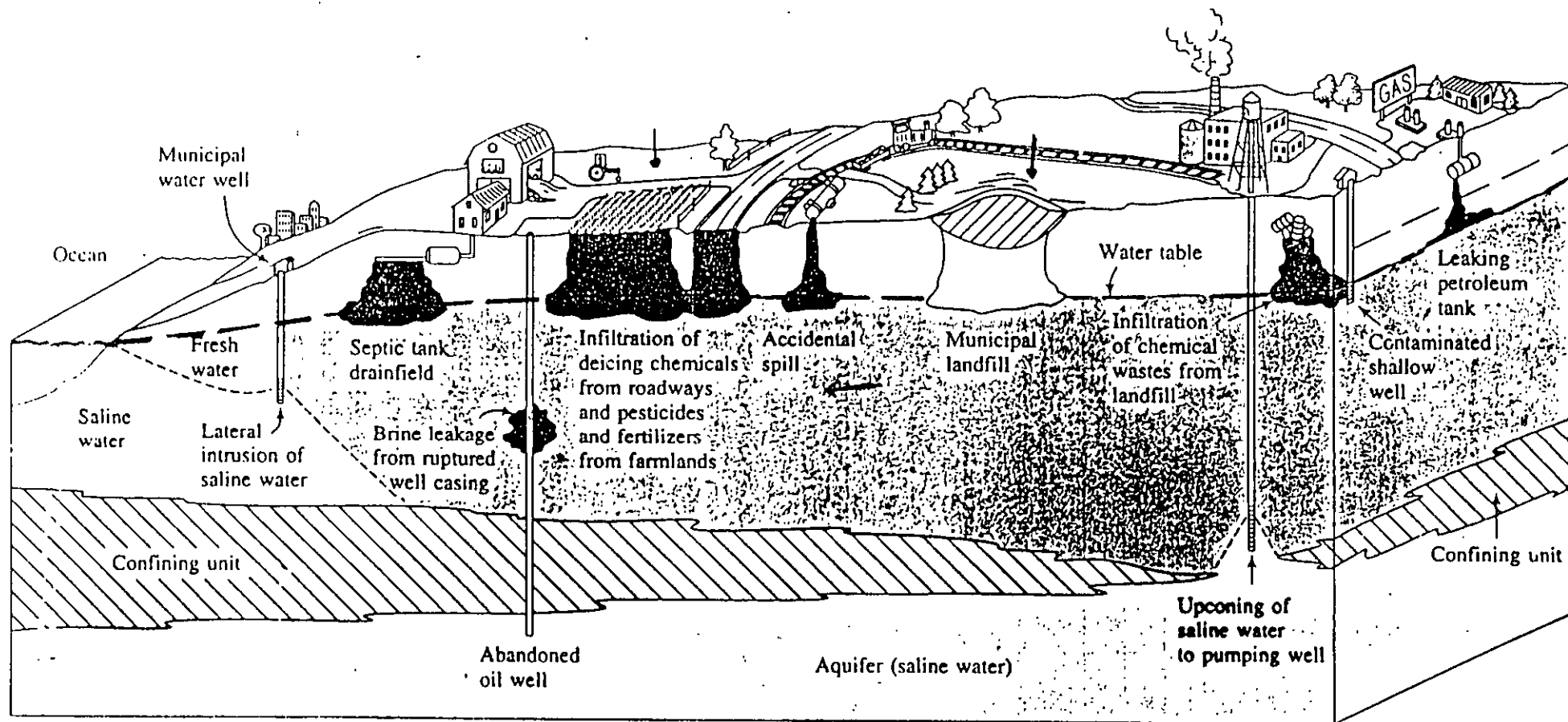
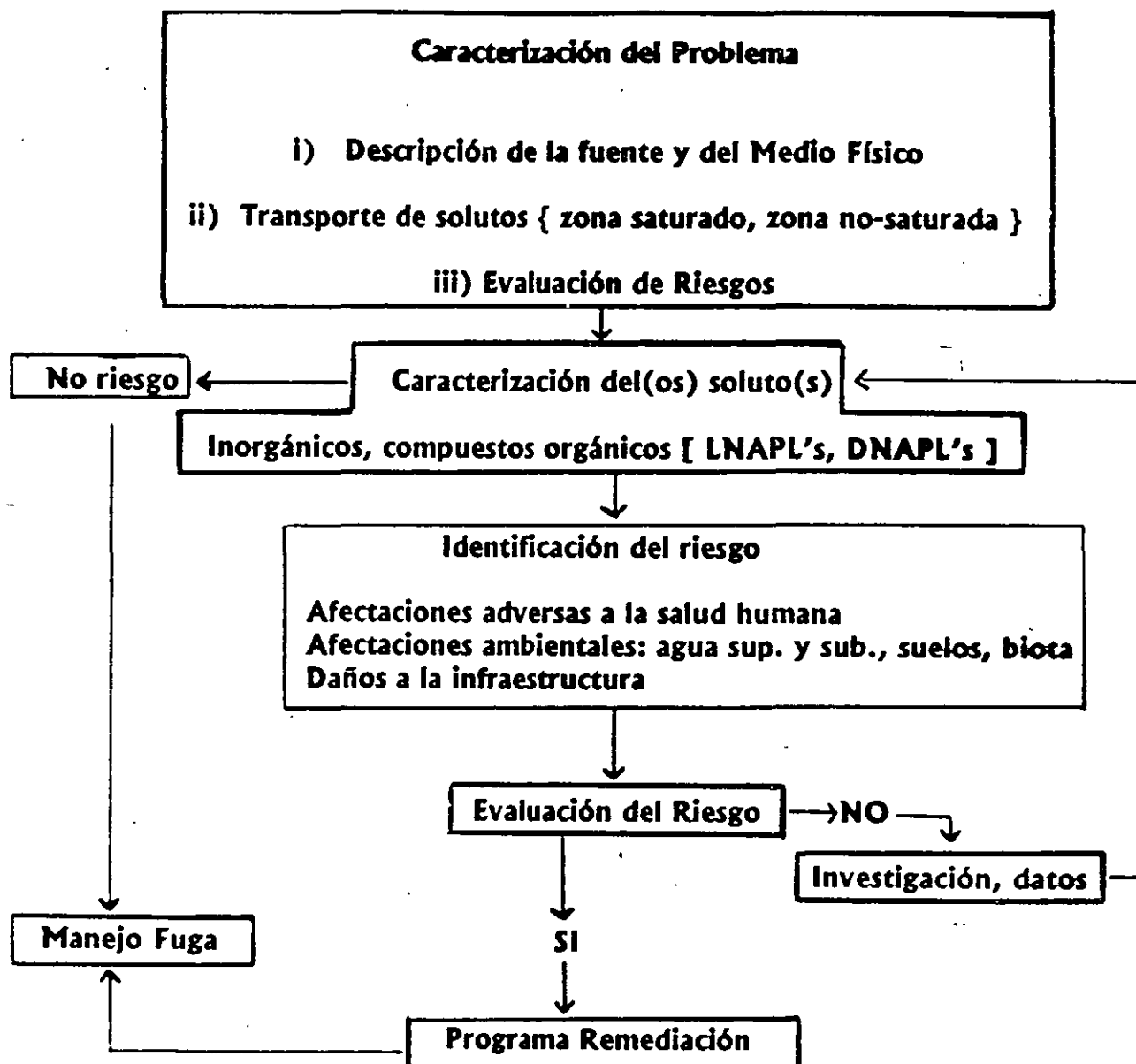


FIGURE 1.1 Mechanisms of ground-water contamination.

35

FUGAS DE CONTENEDORES



Contaminación de Sistemas Acuíferos.

Rodríguez-Castillo Ramiro
Depto. de Recursos Naturales
Instituto de Geofísica UNAM.

Los sistemas acuíferos son susceptibles de ser contaminados por fuentes poluentes localizadas en la superficie. Estas dan origen a infiltraciones que alcanzan los niveles de saturación y migran a través del medio permeable dando lugar a nubes o plumas contaminantes. La naturaleza de los lixiviados determina su poder contaminante.

El estudio de estos procesos puede hacerse desde varios enfoques académicos. El más común es el geohidrológico que engloba los aspectos geológicos e hidrodinámicos, tanto del flujo como del soluto. La modelación matemática y computacional comprende tópicos relacionados con el flujo y transporte de los contaminantes, efectuando predicciones sobre su evolución espacial y temporal ante diversas alternativas. En la Hidrogeoquímica se analiza el comportamiento químico del soluto y su relación con el medio que circula. Existen métodos de prospección geofísica enfocadas al monitoreo superficial de la extensión lateral de la pluma contaminante. La Isotopia Hidrológica proporciona información sobre el origen del flujo su permanencia y circulación en el acuífero. El sector salud estudia los efectos nocivos de los poluentes, su sintomatología, cuadros clínicos y las relaciones causa-efecto.

Incluso desde el punto de vista jurídico también se pueden llevar a cabo investigaciones sobre normatividad y su implementación legal.

Como puede apreciarse una investigación de este tipo es eminentemente interdisciplinaria y requiere de un colectivo científico tan amplio como los objetivos del estudio a realizarse.

FUENTES DE CONTAMINACION

Por contaminación o polución del agua debe entenderse la alteración degradación de su estado y composición natural al incorporarse un elemento, material, sustancia, compuesto que en su conjunto se le puede dar el nombre de soluto, así como toda fuente de energía térmica, radiaciones ionizantes que degradan su calidad natural, perjudicando o alterando con ésto, de alguna manera, toda forma de vida.

El proceso de contaminación se lleva a cabo de dos maneras fundamentales:

1) Por la acción del hombre consciente o inconscientemente, debido a una mala planeación económica y técnica, a la incapacidad y falta de cooperación por parte de las autoridades, lo que se ha dado por denominar contaminación antropógena.

2) Por la acción de la naturaleza, proceso al que se ha adoptado llamar alteración natural de la calidad, más que contaminación.

Trataremos aquí los tipos de contaminación antropógena y sus aspectos más relevantes, relacionados con sus fuentes y sus componentes más importantes.

Contaminación Urbana. -

La alteración de la calidad del agua ocasionada por la actividad urbana es debida a la mala distribución y/o evacuación de los desechos producidos por la población. Existen dos formas principales de desechos o residuos urbanos:

a) Desechos sólidos. - Son aquellos restos orgánicos e inorgánicos que se generan en casas habitación, parques, jardines, vía pública, oficinas, mercados, comercios, construcciones, establecimientos de servicios e inclusive desechos peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios y centros de investigación. La característica más notable de los residuos sólidos urbanos es su diversidad el cual es un problema de facetas múltiples.

Algunos ejemplos de desechos sólidos son:

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| - algodón | - papel |
| - cartón | - pañal desechable |
| - cenizas | - plástico de película |
| - cuero | - plástico rígido |
| - cartón encerado | - poliuretano |
| - fibra dura vegetal | - poliestireno expandido |
| - fibras sintéticas | - residuos de jardinería |
| - hueso | - residuos alimenticios |
| - hule | - trapos |
| - latas | - vidrios |
| - loza y cerámica | - residuos voluminosos |
| - madera | autos, muebles, etc.) |
| - material de construcción | - residuos de mercado |

Es importante señalar que, cuando se depositan los desechos sólidos en un terreno sin haber sido planeado de acuerdo a las normas internacionales de sanidad, -lo que en nuestro medio es lo más común, denominándose tiraderos, basureros, depósitos a cielo abierto.- al llover la precipitación se incorpora a la basura, contribuyendo a acelerar los procesos de degradación, formando un residuo líquido con gran cantidad de sólidos en suspensión (lixiviado) el cual junto con los líquidos que se derivan de los desechos mismos, puede infiltrarse e incorporarse a un acuífero de dos maneras según el tipo de terreno: si es fisurado o con grietas el lixiviado llega rápido al agua subterránea y con todo su poder contaminante íntegro; cuando el terreno es poroso, tarda en llegar al acuífero o no llega por ser retenido y/o absorbido sufriendo parte del lixiviado modificaciones en su composición, influyendo en el acuífero en menor medida.

b) Aguas residuales. - Son aquellas producidas por labores domésticas como lavado, eliminación de excretas, pozos, fosas sépticas mal planeadas; por servicios como lavado de calles, escurrentía urbana, alcantarillado y drenajes en malas condiciones; o por comerciales e industriales (que pueden ser lo más contaminantes por su variado contenido de compuestos orgánicos sintéticos. Se incorporan en este rubro las aguas "negras" de producción urbana que incluyen a la mayoría de las aguas residuales citadas.

Otra fuente posible de contaminación urbana, sobre todo bacteriológica y viral, son los cementerios al no tenerse conocimiento del tipo de terreno así como por mala planeación, diseño y construcción de éstos.

Contaminación Agrícola. -

A muy largo plazo esta contaminación es importante ya que abarca grandes zonas, al introducir al terreno cantidades considerables de abonos sintéticos y pesticidas de manera repetida en varias ocasiones al año dependiendo del tipo de producción agrícola. Las fuentes principales de contaminación agrícola son:

a) Los abonos sintéticos, los cuáles son compuestos químicos con alto contenido de elementos contaminantes como son:

Nitrógeno.- En forma de nitratos que afectan la salud y particularmente la de los lactantes. La cantidad de nitrato en el agua que se percola hacia el acuífero depende, entre otros factores de

- necesidad real del cultivo en el cual se aplica un cierto tipo de fertilizantes, su composición química, cantidad y frecuencia de aplicación,
- la cantidad de nitrógeno que el suelo ya contiene características del terreno, así como el sistema hidrológico local.

Fósforo.- El cual permanece retenido en el suelo.

Potasio.- Cuando se trata de pequeños porcentajes no es

dañino.

Existen factores importantes que influyen durante la infiltración de fertilizantes hacia las aguas subterráneas:

- cantidades excesivas de abono, que las plantas no aprovechan
- el uso de fertilizantes equivocados al tipo de planta clima;
- la precipitación e irrigación, que favorecen la infiltración y
- bajas temperaturas.

b) Los pesticidas.- Son productos tales como fungicidas, herbicidas, insecticidas, fumigantes y rodenticidas, o sea, compuestos químicos orgánicos sintéticos, altamente tóxicos y de uso común.

Los métodos de aplicación no controlados en el campo y la eliminación de envases son los factores más importantes que intervienen en la contaminación de aguas subterráneas. Estos pesticidas se aplican en forma líquida (atomizados) y sólidos (polvo o gránulos), alcanzando éstos con el agua de lluvia los niveles freáticos en terrenos permeables.

c) Contaminaciones puntuales.- Este tipo de contaminación es debida al almacenamiento de fertilizantes orgánicos naturales (estiércol) e inorgánicos, exceso de excrementos de ganado en establos y fosas sépticas.

Contaminación Industrial.-

Toda industria en el proceso de transformación de los recursos naturales desecha una gran variedad de sustancias químicas, orgánicas e inorgánicas en estados sólido, líquido y graseoso que forma parte de los recursos o que se incorporan en alguna parte del proceso, los cuáles actúan como contaminantes de aguas subterráneas al infiltrarse en el terreno donde éstas se depositan.

La actividad industrial origina gran diversidad de productos de desechos que si son líquidos se descargan en aguas corrientes y si son sólidos se depositan en basureros industriales, los cuáles no siempre son diseñados ni supervisados, pudiendose originar lixiviados con alto grado de toxicidad. Se sabe que algunos son dañinos para el hombre, en tanto que los efectos de otros son minimos y/o desconocidos. Algunos desechos industriales son compuestos orgánicos que pueden ser degradados por las bacterias, pero muy lentamente, de modo que llevan olores y sabores desagradables a lo largo de las corrientes de agua y hasta distancias considerables; por ejemplo, el desagüe doméstico contiene cantidades significativas de sustancias no biodegradables de origen desconocido y que algunas de éstas reaccionan con el cloro, que se utiliza para desinfectar el agua. Estos compuestos orgánicos clorinados son de graves consecuencias ya que pueden actuar como agentes cancerígenos. Los metales se

corroen (se oxidan) en el agua, y los productos disueltos o suspendidos de la oxidación se convierten en contaminantes. El plomo es uno de los venenos industriales más importantes transportados por el agua, su fuente principal la ha constituido siempre la tubería de plomo utilizada en las redes de suministro de agua. El plomo y arsénico fluyen a través de minerales que los contienen y dan lugar a venenos acumulativos. Los compuestos de otros metales como cobre, cadmio, plata y cromo son contaminantes industriales del agua, siendo este último el mejor indicador de contaminación industrial. Debido sobre todo a la alta concentración de metales pesados, las sustancias inorgánicas pueden llegar a ser tóxicas. Las sustancias orgánicas sintéticas tienen un grado de toxicidad variable y sus constituyentes presentan por lo regular alta resistencia a la degradación (fenoles, detergentes, grasas, insecticidas, etc.). Habría que tomar en cuenta que se han clasificado más de 6,000,000 de compuestos orgánicos, 40,000 de los cuales son generados de manera constante en diversos procesos industriales. Las sustancias orgánicas naturales son tóxicas en bajo grado pero pueden ser contaminantes portadores de virus y bacterias.

Las fuentes principales de contaminación industrial son:

- a) Aguas residuales vertidas sin control ni tratamiento en cauces, en pozos de inyección, depósitos de aguas tratadas o en cualquier tipo de terreno. Por lo general su contenido es rico en grasas, aceites y otros derivados del petróleo.
- b) Aguas con tratamiento insuficiente y usadas en agricultura o incorporadas a la red hidrológica local.
- c) Residuos sólidos o líquidos que son vertidos en terrenos permeables con un poder depurador natural insuficiente (Hidrocarburos, salmuera).
- d) Almacenamiento de materias primas líquidas o sólidas.
- e) Accidentes en el transporte de sustancias contaminantes, especialmente las tóxicas.
- f) Las fugas de tanques de almacenamiento y conducciones de tubería en un período de tiempo considerable.
- g) Desperdicios mineros.-

Es una contaminación netamente mineral que se relaciona con evacuaciones de aguas de mina y con lavaderos de mineral, por lavado de escombreras por el agua de lluvia o aguas de superficie, en especial aquellas escombreras que contienen materiales oxidables, tales como sulfuros y materias carbonosas. La acumulación de los residuos mineros recibe la denominación de "hales". En el procesamiento de sales solubles como en la fabricación de la potasa, se pueden tener vertidos muy importantes de salmueras. En la minería del petróleo se obtienen cantidades considerables de aguas de salinidad elevada que son también una importantes fuente de

contaminación mineral de aguas subterráneas. Algunas veces puede existir una contaminación orgánica derivada del vertido de aceites de flotación degradados o de productos relacionados con el petróleo.

Existen métodos de explotación minera que con determinantes en los procesos de contaminación y que a continuación se citan:

i) El sistema de explotación con hundimientos controlados, pueden ocasionar la conexión de acuíferos situados al techo, o provocar accesos de aguas superficiales a través de las subsidencias, con los posibles aportes de mala calidad.

ii) La explotación a cielo abierto es un camino directo a la entrada de aguas contaminantes desde el exterior o a través de la acción antrópica desarrollada en la explotación.

iii) La explotación con relleno supone la introducción de materiales contaminantes y rocas solubles con aportes también contaminantes a las aguas, a través de la fácil comunicación que constituyen los huecos mineros.

iv) La explotación por disolución de minerales solubles en agua, tales como la sal común, potasa, bórax, fosfatos y natrón, se realiza mediante inyección de agua en el yacimiento, a través de pozos y sondeos con la posterior extracción de agua. El recorrido del agua puede alterar la calidad del acuífero, por tratarse de productos altamente contaminantes.

v) En muchos casos también hay que tener presente la utilización de los huecos formados en profundidad, para el almacenamiento de gas licuado, gas natural u otros hidrocarburos, así como los residuos radiactivos, que su vez pueden ser fuente de contaminación.

Estos procesos de explotación a menudo requieren eliminar importantes cantidades de salmueras, que hay que considerar como fuentes contaminantes de primera magnitud. Además, éstos métodos no sólo plantean el problema temporal de la contaminación, sino que dejan latente unas condiciones muy favorables para que ésta continúe.

Las sustancias contaminantes aportadas por las fuentes anteriores sufren un proceso de autodepuración cuando se infiltra por la zona no saturada y dependiendo de su espesor y del tipo de terreno será el grado de depuración.

Diversidad de desechos sólidos industriales:

- | | |
|-----------------------------|---------------------------------|
| - Desechos de acetileno | - Desechos de la manufactura de |
| - Desechos agrícolas | de alimentos. |
| - Aluminio | - Residuos de productos |
| - Antimonio | animales |
| - Ceniza, escorias y polvos | - Asfalto |
| de chimenea | - Residuos de bausita |

- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| - Berilio | - Bismuto |
| - Latón | - Desechos de cervecería, |
| - Desechos de ladrillería | destilación y fermentación |
| - Bronce | - Cadmio |
| - Calcio | - Carburos |
| - Desperdicios químicos | - Cromo (Cromatos) |
| - Carbón | - Cobalto |
| - Café | - Cobre |
| - Algodón | - Desperdicios de lechería |
| - Desperdicios de Fluoruro | - Desechos de fundición |
| - Residuos de frutas | - Germanio |
| - Vidrio | - Fibra de vidrio |
| - Yeso | - Cáñamo |
| - Escoria de fluoruro de | - Residuos inorgánicos |
| hidrógeno | - Hierro |
| - Plomo | - Desechos de curtido y |
| - Cal | manufactura de pieles |
| - Magnesio | - Manganeseo |
| - Mica | - Lana mineral |
| - Melazas | - Molibdeno |
| - Chatarra no ferrosa | - Nylon |
| - Desechos orgánicos | - Pintura |
| - Papel | - Residuos de Petróleo |
| - Salmuera | - Plásticos |
| - Desechos de cerámica | - Metales preciosos |
| - Escoria y desechos de | - Refractario |
| pirita | - Caucho |
| - Espumas de sal | - Arena |
| - Productos pesqueros | - Sodio |
| comestibles | - Almidón |
| - Remolacha | - Fibras de caña de azúcar |
| - Azufre | - Tantalio |
| - Tetractilo de plomo | - Textiles |
| - Estaño | - Titanio |
| - Tabaco | - Tungsteno |
| - Uranio | - Vanadio |
| - Desperdicios de hortalizas | - Desechos de madera |
| - Lana | - Cinc |
| - Aleación de cincón | - Etcétera. |

En nuestro medio no existe el control y manejo óptimos de los desechos industriales peligrosos como son los derivados del petróleo, industria química y farmacéutica, gasera, cementera, minera y otras pequeñas como son las tintorerías, laboratorios, talleres mecánicos y de material eléctrico y electrónico. En los valles de México y Toluca la presencia de industrias ha producido la acumulación de desechos tóxicos que han ocasionado transtornos en la salud de la población, como es el caso de una planta procesadora de cromatos de sodio y potasio y sulfatos de sodio, con el consiguiente "entierro" sin mayor estudio o medidas adecuadas de depositación de éstos compuestos. Los desechos industriales peligrosos constituyen un riesgo potencial en todas las etapas de su ciclo, durante su generación, recolección y transporte, almacenamiento o en los sitios de recepción, así como durante su tratamiento y disposición final. Considerando cada una de las etapas mencionadas, debe haber un control sistemático como

parte de una política integral de los manejos adecuados de éstos desechos. Este control permitiría que desde la fuente generadora se separaran los desechos de acuerdo con sus propiedades y características. Con ello se facilitaría su reuso, en caso de ser factible, así como su tratamiento adecuado y se evitaría que se mezclaran con otras sustancias que aumentan su volumen y peligrosidad, o bien se lograría hacer más seguro su confinamiento en los sitios destinados para su disposición final. El programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) consideran prioritarios los siguientes desechos peligrosos:

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| - Ácidos | - Plaguicidas, pesticidas |
| - Bases industriales | y herbicidas |
| - Intermediarios químicos | - Metales y sus derivados |
| - Plastificantes compuestos | - Productos para la guerra |
| - Solventes | química |
| - Saborizantes y aromas | - Catalizadores y reactivos |
| - Cianuros | - Productos derivados del |
| - Productos farmacéuticos | petróleo como acetonas, |
| | fenoles, ésteres, etc. |

Los problemas de contaminación de aguas subterráneas por sustancias peligrosas pueden ser agrupadas en tres categorías generales:

- 1) Contaminación causada por líquidos que permiten mezclarse con otros (miscibles) y por medios porosos que ayudan a llevarse a cabo la mezcla,
- 2) contaminación causada por líquidos poco factibles a mezclarse (inmiscibles), de menor densidad que el agua tal que éstos no se mueven en y por debajo del acuífero y
- 3) contaminación por líquidos inmiscibles que son más densos que el agua y por lo tanto pueden hundirse por la zona permeable.

La primer categoría es el problema clásico de contaminación de aguas subterráneas, la segunda incluye problemas referentes a aceites y gasolinas, La tercera se refiere a un gran número de productos líquidos producidos por la industria química. Algunos hidrocarburos son menos viscosos que el agua mientras que otros son moderadamente solubles. Estas características representan una severa amenaza a la calidad del agua porque pueden moverse en la parte baja de la zona permeable. Los componentes contaminantes están sujetos a la influencia de procesos de atenuación como dispersión, absorción, intercambio iónico y biodegradación.

Lluvia ácida. - Otra fuente de contaminación es la llamada lluvia ácida y es aquella cuyo pH es menor que 5.6, o sea, es una mezcla de ácidos fuertes y débiles. El pH de la lluvia es el resultado final de las reacciones de neutralización entre ácidos y bases presentes en la misma. Los ácidos fuertes son las sustancias que influyen sobre el pH de la lluvia. Los contaminantes emitidos a la atmósfera van a ser dispersados por el viento, éstos van a ser eliminados de la atmósfera por deposición húmeda, o sea, por la lluvia, granizo o nieves. El proceso es muy complejo, ya que según

el tipo de sustancia ésta se puede eliminar en diferentes formas.

La incorporación dentro de las nubes consiste en la introducción de contaminantes durante los procesos de condensación del vapor de agua en las nubes, aquí los contaminantes forman parte de los núcleos de condensación, quedando atrapados dentro de las gotas que integran la nube. Al caer las gotas como tales, o en forma de granizo o nieve, llevan los elementos contaminantes al suelo, éstos a su vez se filtran a través del subsuelo, llegando así al acuífero y por lo tanto lo contamina. Los principales ácidos contaminantes por el fenómeno de la lluvia ácida son:



Intrusión marina. -

Es una fuente de contaminación debida al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando el agua dulce. El agua captada en un acuífero se contamina (saliniza) cuando la porción activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de agua dulce y agua salada o por la propia agua salada, porque la extracción ocasiona movimientos relativos de la superficie piezométrica, los cuales dan lugar a movimientos ascendentes de la interfase. Esta contaminación puede provenir de la infiltración de agua de otros acuíferos salinizados. También debe considerarse la contaminación por inundaciones de agua salada durante tormentas si el pozo está en una llanura costera de muy baja costa, o debido a la mayor penetración del agua del mar en ríos y lagunas costeras durante las mismas, o incluso por lluvias salinas originadas por fuertes tormentas litorales. Entre dos fluidos miscibles, tales como agua dulce y agua salada, no existe una interfase brusca sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla. Esta zona de mezcla o de transición, refleja con intensidad variable las propiedades químicas e hidráulicas de cada uno de los líquidos originales y su anchura depende de la difusividad y dispersividad del medio y de las características del movimiento.

La zona de mezcla dentro de la cual se sitúa la interfase teórica, es una zona dinámica en la cual se mueve no sólo como consecuencia de las diferencias de densidades sino también debido a cambios de nivel piezométrico en ambos líquidos. El peso específico del agua dulce se puede tomar como $= 1000 \text{ kg/m}^3$ con escaso error dentro del margen de temperaturas normales. El peso específico del agua marina es mayor, y puede tomarse entre 1020 y 1030 kg/m^3 según la salinidad y temperatura, siendo el valor más usual el de $= 1025 \text{ kg/m}^3$ (para 1900 ppm en Cl^-). La viscosidad del agua marina es del orden de un 30% mayor que la del agua dulce a igual temperatura.

Las relaciones entre el agua dulce y el agua salada en regiones costeras es de gran interés ya que muchos acuíferos vierten sus aguas directamente en el mar. Este flujo de agua dulce crea un

estado de equilibrio entre ambas aguas que sólo sufre modificaciones naturales a largo plazo, debidas a cambios climáticos o movimientos relativos de la tierra y el mar. La ubicación de poblaciones, en México, a lo largo de sus costas y generación de agricultura e industria, originan una importante extracción de agua subterránea y por lo tanto, una substancial modificación de las relaciones agua dulce - salada.

El análisis de esta relación es complejo por las diferencias entre los fluidos (viscosidad, densidad y temperatura). Para la mejor comprensión de esta relación se especificará la formula de Ghyben - Herzberg:

Su estudio se basa en el equilibrio estático de las columnas de agua de diferente densidad, asumiendo las siguientes hipótesis:

- i) El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por lo tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- ii) No existe flujo de agua salada.
- iii) La interfase es un plano, no existiendo zona de mezcla.

Equilibrándose la presión del agua dulce y salada en un punto arbitrario, se encuentra que la interfase se sitúa a una profundidad bajo el nivel del mar igual a 40 veces la cota del agua dulce sobre el nivel medio del mar en aquel punto.

Las fuentes de contaminación de aguas subterráneas se pueden clasificar sobre una base posicional o geográfica: puntual, lineal y dispersa.

Las fuentes puntuales son tales como fosas sépticas, desperdicios municipales sólidos, desperdicios de animales, desperdicios mineros y otros sistemas relativamente pequeños de distribución de desechos en el suelo.

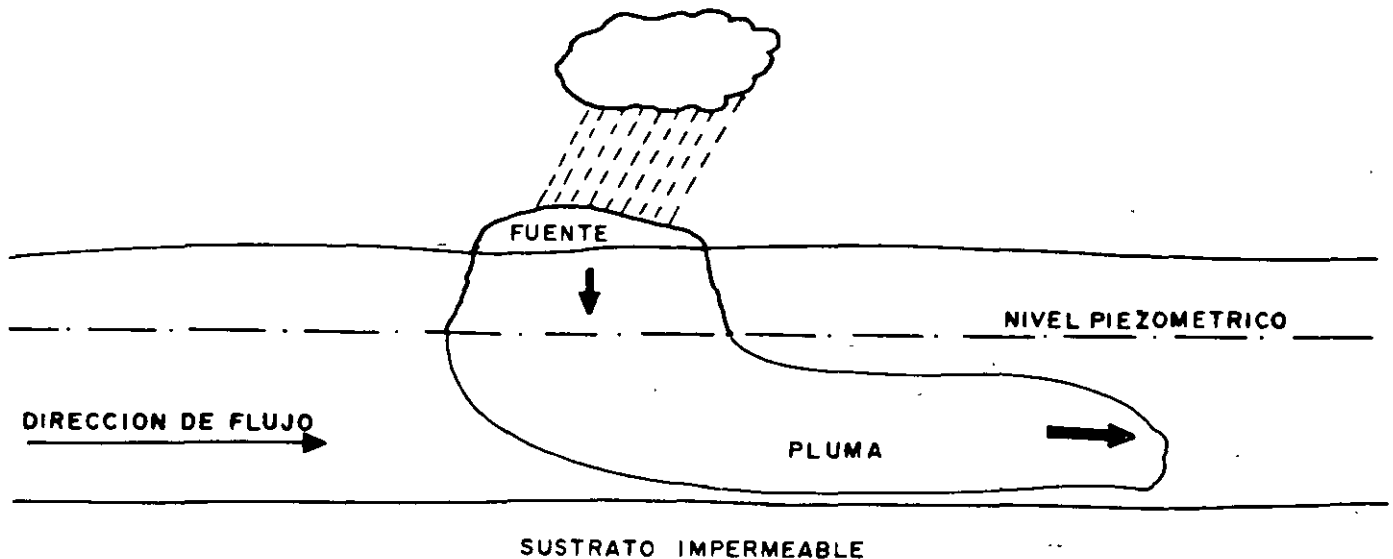
Las fuentes lineales son aquellas tales como derrames en sistemas de alcantarillado y tuberías, desperdicios mineros. salmuera, etc.

Las fuentes dispersas se extienden a través de grandes áreas, tales como la aplicación de químicos sobre el terreno para la agricultura, rellenos sanitarios, desperdicios mineros, "cementorios" clandestinos de sustancias o elementos tóxicos, intrusión de agua de mar, etc.

Mecanismos de Contaminación:

La fenomenología que controla el desplazamiento de un poluante a través de una matriz porosa puede ser transcrita en terminos tales que permiten establecer ecuaciones que describen la migración de un soluto en el flujo subterráneo.

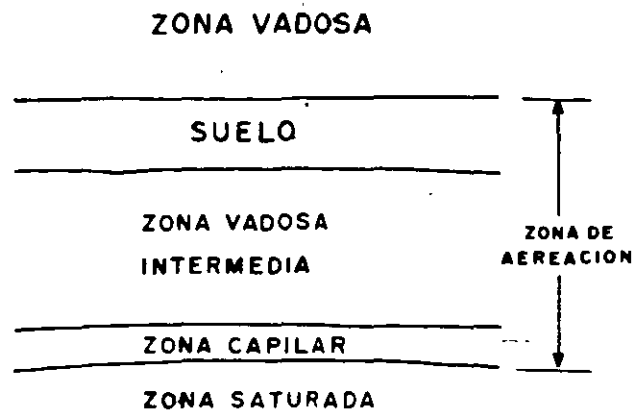
El establecimiento de un marco teórico adecuado requiere antes de la proposición de un modelo general hidrodinámico que conceptualiza el flujo de un poluante hacia un acuífero.



Un esquema general puede ser representado por una fuente puntual en la superficie del terreno con flujo del poluante en la zona no saturada el cual se continua en la franja capilar para llegar a la zona saturada en donde se inicia el proceso de mezcla y migración en el flujo subterráneo dando lugar a una nube o pluma contaminante.

Transporte en la Zona No Saturada:

El flujo y transporte son mucho más complejos en la zona no saturada que en la saturada. Refiriéndose esta de manera genérica, como la parte que se encuentra arriba del nivel de saturación, aunque la presencia de la franja capilar provoque - que se busque una definición más concisa aceptándose ahora la que establece que se trata de una zona continua de fase gaseosa.



Cuando el poluante se desplaza en ella origina fuerzas interfaciales (fase líquida y gaseosa) que dan a esta zona propiedades únicas.

El contaminante migra como resultado de procesos advectivos y dispersivos en ambas fases. El flujo del soluto es controlado por la carga hidráulica h^* , misma que es originada por la presión (Ψ) y la fuerza de gravedad (z).

donde Ψ se relaciona con la succión, la presión capilar y un potencial asociado a la matriz porosa. De estas componentes la succión es la presión negativa que tiende a extraer el agua de la matriz porosa. La forma en la cual el medio retiene el agua contra la presión negativa es una de las propiedades fundamentales de los medios no-saturados. Debiéndose esto por un lado a las fuerzas de absorción y por otra o las fuerzas capilares.

Las primeras resultan de la interacción de la molécula de agua, cuyo lado positivo es orientado hacia la carga negativa de las superficies minerales. Las segundas ocurren como resultado de la interfase curva entre la fase líquida y la gaseosa. La primera predomina en los medios secos o con materiales de textura fina.

Transporte en la zona saturada:

El transporte de un soluto en un medio saturado puede ser transcrito matemáticamente considerando que las reacciones entre la nube y el medio son mínimas, esto es se desprecian fenómenos de absorción, precipitación, reducción e intercambio iónico.

Si consideramos como primer y más simple, mecanismo, el transporte del soluto como producto solo de la velocidad del flujo, esto es por absorción, el desplazamiento tendrá lugar a la velocidad lineal promedio del flujo, entonces la evolución -

de advección,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

donde $\bar{v} = \bar{q} / \eta$ y \bar{q} es el flujo darciano y η la porosidad efectiva.

La advección es también referida por algunos autores como convección.

Este último término no es ampliamente usado por su asociación a transporte de masas como respuesta a gradientes de densidad inducida por diferencias en temperatura.

Si el soluto se desplaza en el flujo con velocidades y direcciones distintas a \bar{v} por efectos de variaciones en la permeabilidad, por el proceso de mezcla por variaciones aleatorias en la fase acuosa y por difusión molecular interviene lo que se conoce como dispersión que no es otra cosa que un mecanismo de dilución del poluante en el flujo subterráneo.

Como se menciona la dispersión es causada por efectos microscópicos y macroscópicos.

A nivel microscópico la dispersión incluye los efectos de dispersión mecánica y difusión molecular la primera debido a las variaciones de velocidad entre el centro y las paredes de un poro y a las variaciones causadas por la inhomogeneidad en la poro

sidad. La segunda es debido a que los constituyentes del poluante (especies) se mueven de altas a bajas concentraciones.

A escala macroscópica la dispersión es provocada por la presencia de heterogeneidades en la matriz porosa.

La transcripción matemática del transporte por dispersión considera la absorción y en su forma más simple unidimensional, para solutos que no interactúan con la matriz porosa, circulando en un medio saturado, homogéneo, isotrópico y con régimen de flujo estacionario, es

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x}$$

en donde el parámetro nuevo es D que es el coeficiente de dispersión hidrodinámica en la dirección del flujo. D resume los efectos macro y micro por lo que puede expresarse en ambos términos esto es (Freeze, 1979).

$$D = \alpha \bar{v} + D^*$$

con α , la dispersividad dinámica que es una propiedad del medio y D^* que es coeficiente de difusión molecular.

Si la velocidad del flujo es baja, esto es \bar{v} puede ser considerada cero, la advección se elimina y el coeficiente de dispersión se reduce al de difusión, transformándose la ecuación de absorción-dispersión en una de difusión

$$\frac{\partial C}{\partial t} = d' \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

con d' el coeficiente de difusión efectiva. Cuando ocurren reacciones químicas, pueden darse cambios en la concentración del soluto. Estas reacciones químicas y bioquímicas pueden ser agrupadas en 6 categorías: reacciones de absorción-desabsorción reacciones ácidas-básicas, solución-precipitación, oxidación-reducción, complejación, formación de pares iónicos y síntesis microbiológico celular. Los contaminantes radioactivos son influenciados además por el decaimiento radiactivo de sus componentes.

Así para medios saturados homogéneos e isotrópicos con flujos estacionarios, la ecuación de advección-dispersión que incluye los efectos de absorción es,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\rho_r}{\eta} \frac{\partial S}{\partial t}$$

con ρ_r la densidad de la matriz porosa y S la masa del constituyente químico absorbido por la parte sólida de la matriz por unidad de masa de sólido, esto es $\frac{\partial S}{\partial t}$ representa la velocidad a la que el soluto es absorbido y $\frac{\rho_r}{\eta} \frac{\partial S}{\partial t}$ nos indica el cambio en la concentración en el fluido a causa de los fenómenos de absorción engloba las propiedades "medibles" del medio y de las reacciones químicas de inte-

res.

Los fenomenos de absorción llegan a ocurrir a velocidades mayores del flujo, S. que pudiera referirse como el grado de absorción es una función de la concentración del soluto en solución

$$\Rightarrow S = f(c)$$

$$\Rightarrow + \partial S / \partial t = \partial S / \partial c \cdot \partial c / \partial t$$

$$\Rightarrow \quad \bar{S}_r / \eta \cdot \partial S / \partial t = \bar{S}_r / \eta \cdot \partial S / \partial c \cdot \partial c / \partial t$$

en la que el termino $\partial S / \partial c$ nos indica partición del soluto entre la solución y el solido, la cual es determinada en laboratorio a temperatura constante por lo que las relaciones entre S y C son conocidas como isothermas.

Si el soluto incluye especies radioactivas a la ecuación habría que agregar un termino más que incluya el decaimiento del soluto.

$$\partial c / \partial t = D \partial^2 c / \partial x^2 - \bar{v} \partial c / \partial x + \bar{S}_r / \eta \cdot \partial S / \partial t - \lambda C$$

$$\text{con } C = C_0 e^{-\lambda t} \quad \text{y} \quad \lambda = \ln 2 / T_{1/2} \quad \text{con}$$

$T_{1/2}$ la vida media del elemento radioactivo.

La expresión anterior describe el transporte unidimensional de un soluto en un medio homogéneo e isotrópico y considera los fenomenos más importantes que contro-

lan el desplazamiento del mismo.

El primer termino es el dispersivo el segundo es el advection, el tercero es el que considera la absorción y el último el que involucra el decaimiento.

CALIDAD DEL AGUA:

La calidad es la propiedad del agua que le permite seguir siendo útil, de beber al hombre y a especies animales, sustenta toda la vida marina, sirve para irrigar la tierra, y sirve como medio de recreación.

Esta calidad se puede conocer a través del contenido de elementos y sustancias en el agua, haciendo un exámen minucioso en el cual se obtengan resultados cualitativos y cuantitativos de cada uno de ellos.

Para definir el grado de contaminación del agua se determinan los parámetros por medio de análisis físicos, químicos orgánicos e inorgánicos y bacteriológicos, incluyendo los virales.

Dependiendo de las características del agua, cada muestreo es diferente, o sea, su forma de recolección, cantidades de muestras, tipos de envases, limpieza de los mismos, etc., esto es en base al grado de contaminación del agua a tratar.

Los resultados de los análisis se comparan con las normas establecidas por el Gobierno en base a la normatividad internacional. Las pruebas de laboratorio son de gran importancia, ya que ayudan a formar una opinión de que tan adecuada resulta el agua de una fuente de abastecimiento para un uso determinado. Los principales -

criterios para evaluar el grado de contaminación del agua se basan en los siguientes factores:

- concentración de microorganismos coliformes
- déficit de saturación de oxígeno
- demanda bioquímica de oxígeno
- concentración de sólidos en suspensión
- concentración de petróleo, fenoles, agentes tóxicos
- radiactividad

Los análisis que se hacen al agua se dividen en:

a) Físicos

- Temperatura. La variación de la temperatura puede indicar principio de contaminación. La temperatura del agua contaminada tiende a ser mayor que la natural en el mismo medio.
- Color. La variedad en el color da indicios de contaminación, sobre todo cuando es diferente al color natural del agua.
- Olor. En general el olor se debe a la presencia de materia orgánica en descomposición o a compuestos químicos como fenoles.
- Turbiedad. Las aguas contaminadas normalmente son turbias, porque contienen ma-

teria sólida en suspensión o volátil.

-Residuos sólidos. Se llama residuo a aquel que queda en un recipiente después de la evaporación de una muestra de agua y de su secado subsecuente a una temperatura definida.

-Conductividad eléctrica. Mide la concentración de electrolitos debido a la conductancia tan alta que tienen los iones hidrógeno u oxhidrilo. La conductividad eléctrica se relaciona con la concentración de sólidos disueltos.

-Resistividad eléctrica. Se relaciona con el grado de mineralización del agua.

-Radiactividad. La contaminación del agua se ha incrementado debido a la instalación de Plantas nucleares y el acelerado uso de radioisótopos, tanto en la industria como en la medicina. La vida media de los isótopos que constituyen los principales desperdicios radiactivos son:

	Elemento	vida media
	Bario 140	12 días
	Cesium 144	28 días
	Cesium 137	30 años
	Estroncio 89	53 días
	Estroncio 90	19.9 años

Iodo	131	8	días
Itrio	91	61	días
Niobio	95	35	días
Zirconio	95	65	días

b) Químicos.-El análisis químico proporciona datos útiles y específicos respecto al estado de descomposición de las aguas negras o corrientes contaminadas, para fines de tratamiento, evacuación y prevención.

i) Gases disueltos

- Oxígeno disuelto. Es muy importante la presencia de oxígeno disuelto en el agua, para que se lleve a cabo el proceso aeróbico de descomposición de la materia orgánica.

-Amoníaco. La presencia de amoníaco en el agua es frecuentemente interpretado como una contaminación reciente con productos nitrogenados; en aguas subterráneas -- puede provenir también de la disolución de estratos que contengan sales amoniacales.

-Bióxido de Carbono

-Cloro

-Hidrógeno

-Sulfuro de Hidrógeno

-Nitrógeno. En los análisis de agua negras se pueden hacer cinco tipos de determinaciones de nitrógeno: amoniacal, orgánico o protéico, albuminoide, nitritos y nitratos.

Los nitratos provienen generalmente de la materia orgánica nitrogenada de origen animal. Los nitritos se relacionan con una contaminación de aguas negras o deechos industriales sujeta a oxidación.

-Oxígeno

--Bióxido de Azufre

ii) Cationes

-Aluminio

-Amonio

-Bacterias reductoras del sulfato.

-Toxicidad aguda para la vida marina.

d) Bacteriológicos.-

Las corrientes contaminadas (aguas negras o industriales) contienen microorganismos que pueden clasificarse en : algas, hongos, bacterias, protozoos y formas superiores de vida. Las bacterias tienen la particularidad de reproducirse rápidamente, algunas

pueden crecer y subdividirse en sólo 15 minutos. De acuerdo a las temperaturas óptimas para el desarrollo de las bacterias, éstas se dividen en psicrófilas cuando viven entre los 15° y 20° C; mesófilas entre 25° y 45° C termófilas entre 45° y 55° C.

Las bacterias que producen enfermedades en el hombre se denominan patógenas y en general son parásitos que viven a la temperatura del cuerpo humano. Las principales enfermedades causadas por bacterias y transmitidas por el agua son la fiebre tifoidea, la disentería, el cólera y ciertos tipos de trastornos gastrointestinales.

De acuerdo al medio de desarrollo las bacterias se dividen en:

1. Naturales del agua En general no son patógenas; son típicas las pseudomonas, la serratia flavobacterium y chorobacterium.
2. Provenientes del suelo. No son patógenas y son frecuentes los bacillus y aerobacillus.
3. De origen intestinal o de aguas negras. Pueden ser o no patógenas; entre las no patógenas se hallan la Escherichiacoli (típica del hombre), aerobacter y proteus. Entre las patógenas la salmonella y la shigella; y el bacillus clostridium que es altamente peligrosa.

Número más probable (NMP). La estimación del conjunto de bacterias del grupo - -

coliforme presentes en un determinado volúmen de agua, será el índice de la intensidad de contaminación. Para diferentes números de muestras con pruebas de fermentación, es posible hacer una estimación cuantitativa del número de bacterias coliformes presentes, con esto se puede determinar el número probable de organismos de ese grupo que haya en un determinado volúmen de agua. Esto proporciona un índice de contaminación, el cual usualmente se expresa como "número más probable" (NMP) de bacterias del grupo observado. El NMP se basa en leyes de probabilidad empleando los resultados positivos y negativos de tubos incubados y de acuerdo con la porción de muestra.

Algas.-El sabor y olor de algunas aguas puede deberse a la proliferación de vegetales acuáticos unicelulares (algas) que flotan en forma libre. Generalmente son microscópicas. Las algas secretan aceites que son descargados durante sus proceso vitales y que son liberados después de la muerte y desintegración de las células, produciendo los olores y sabores característicos en las aguas. Las algas constituyen el alimento principal de los animales acuáticos; son productoras de oxígeno en el agua y facilitan la misma cuando se tiene bastante materia orgánica en vía de descomposición, por otro lado obstruyen las fases de potabilización del agua, principalmente la de filtrado. Por su acción fotosintética, son muy importantes en los procesos de purificación de agua

CONTAMINADAS.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Remediación de Suelos

**Dra. Susana Saval Bohórquez
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

vas

AMBIENTE Y SANEAMIENTO

Jorge Mentrui
Empresa
y Medio
Ambiente

pág.

54

R. Ferro y A. Ovina
Gestión
Ambiental de
Residuo

pág.

64

Brasil
Ley de
Medio
Ambiente

página

40

Las características propias de cada tipo de contaminante, de la zona de trabajo y de la metodología utilizada condicionan la forma de operación y, en consecuencia, los distintos conceptos técnicos y científicos en los que la remediación se basa.

Remediación de suelos

Biorremediación

Susana Savel (*)

La característica más importante de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes; algunos de ellos pueden ser completamente degradados, de forma tal que cumple con la primera ley de la termodinámica. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización. La complejidad química de los contaminantes y la limitación de nutrientes esenciales para la actividad metabólica, hacen que el proceso requiera de varios años, y en algunos casos no se logra su completa degradación.

La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para el saneamiento de suelos y acuíferos contaminados, donde se aprovecha el potencial de los microorganismos para mineralizar o transformar contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos. El proceso obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos, los cuales se seleccionan de manera natural en presencia de contaminantes y la actividad biodegradadora puede ser estimulada por adición de nutrientes básicos. Entre las alternativas que existen para el saneamiento de sitios contaminados, la biorremediación es la mejor opción desde los puntos de vista ambiental y económico, sin embargo, no puede ser aplicada a todos los casos. En este trabajo se describe el procedimiento para aplicar tecnologías de biorremediación haciendo énfasis en los aspectos más importantes que deben ser tomados en consideración.

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos en México, son los ocasionados por derrames de hidrocarburos como: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, entre otros. Cada uno de estos materiales tiene su propia complejidad química, y la situación se agrava porque en una mayoría de casos los contaminantes se presentan en forma de mezcla y, además, se encuentran intemperizados.

En general, los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta. Petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes a simple vista cuando se encuentran en la superficie. Si son depositados en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero los lixiviados generados por las lluvias arrastran los compuestos solubles. Gasolinas, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo porque su viscosidad es menor a la del agua, durante su trayectoria son adsorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático, ahí se dispersan de acuerdo a la dirección de la corriente subterránea, creando así manchas de contaminación de gran superficie.

bioremediación

Entre las alternativas que existen en el mercado para el saneamiento de sitios contaminados, la biorremediación se ha perfilado como una opción muy atractiva por ser relativamente económica, versátil, efectiva y amable al ambiente.

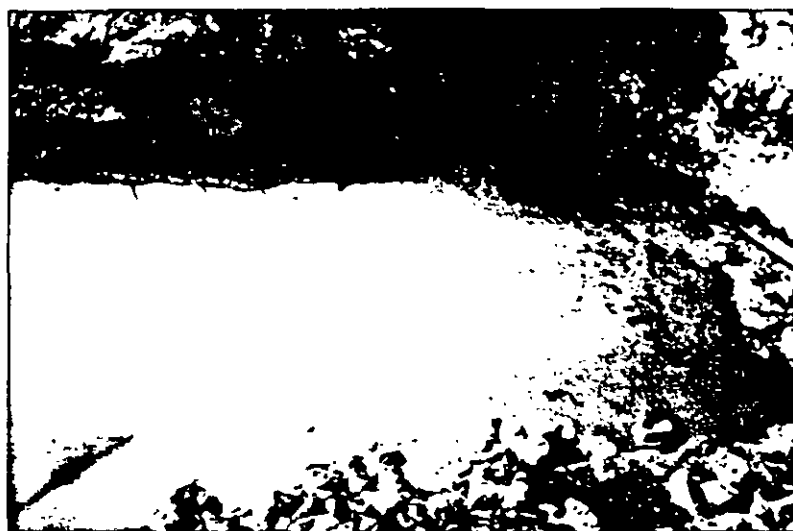
Características de las tecnologías de biorremediación

La más importante característica de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes, algunos de ellos pueden ser completamente degradados, de forma tal que cumple con la primera ley de la termodinámica. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización. La complejidad química de los contaminantes y la limitación de nutrientes esenciales para la actividad metabólica, hacen que el proceso requiera de varios años, y en algunos casos no se logra su completa degradación.

En los sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos que no son atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollaron capacidad degradadora. En esos casos, la mejor opción es utilizar la flora autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes, probablemente será necesario recurrir a preparados microbianos frescos.

Ventajas de la biorremediación

Una ventaja importante de la biorremediación es su bajo costo en relación con otros tratamientos. Es



difícil hacer una comparación de costos, porque es necesario conocer las características de cada sitio en particular, pero en términos generales se puede decir que la biorremediación es por lo

menos 10 veces más económica que la incineración y 3 veces más económica que algunas tecnologías fisicoquímicas de inmovilización. Este bajo costo se debe a varios factores, como un menor gasto de energía, bajo costo de los nutrientes y la operación bajo condiciones ambientales, que hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo como México.

La biorremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados hasta compuestos inocuos como el bióxido de carbono. Además de que cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren.

La versatilidad de la biorremediación se basa en que puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente

Entre las alternativas que existen en el mercado para el saneamiento de sitios contaminados, la biorremediación se ha perfilado como una opción muy atractiva.

se requiere la adición de nutrientes para la actividad metabólica de la flora degradadora autóctona: bioincremento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesaria la adición de microorganismos degradadores exógenos; o bien, bioventeo cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para aportar el oxígeno requerido para el metabolismo. En cualquiera de las opciones anteriores, puede realizarse fuera del sitio si la contaminación está en el suelo superficial, pero necesariamente in situ cuando los contaminantes han alcanzado el manto freático.

Cuando el tratamiento se hace fuera del sitio, pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre superficie impermeables que permitan la colección de lixiviados, de manera que no se contamine el suelo limpio (Fig. 1). Además, después de la biorremediación el suelo se puede destinar al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas más conocidas.

En el caso de aguas subterráneas, la biorremediación se aplica a través del bombeo-tratamiento-inyección que consiste en extraer el agua subterránea,

promover la biodegradación de los contaminantes en reactores instalados en la superficie y posteriormente devolverla al acuífero, o bien, inyectar nutrientes y bacterias, de tal forma que se establece una recirculación y el sitio mismo se convierte en un biorreactor (Fig. 2). A pesar de ser la tecnología más empleada a nivel mundial existen ciertos aspectos que determinan el éxito de su aplicación por ejemplo, los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien, estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa.

Desventajas de la biorremediación

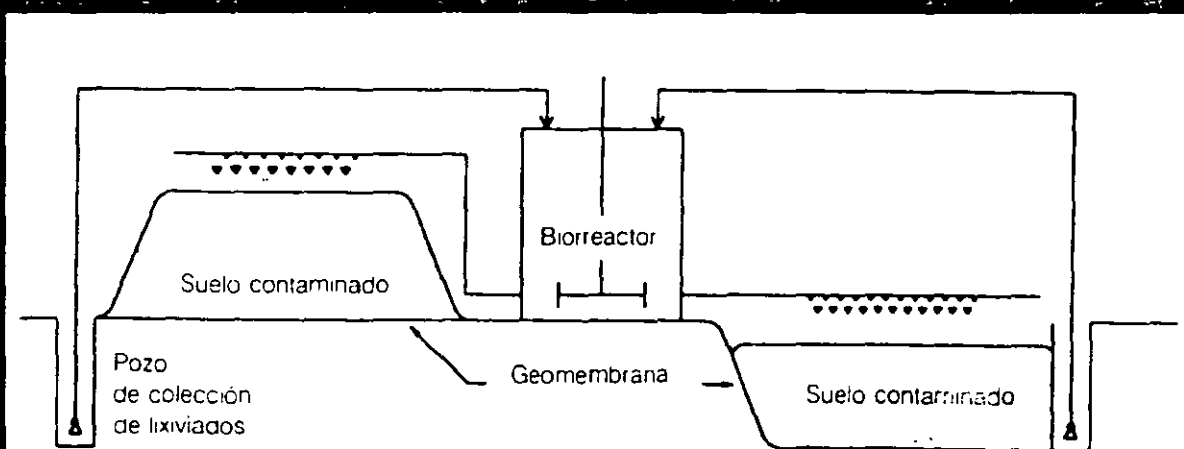
La biorremediación no puede aplicarse en campo cuando:

- se tienen compuestos radioactivos
- los compuestos orgánicos contaminantes son altamente halogenados
- existen metales pesados en concentraciones tales que inhiben la actividad microbiana
- las condiciones microambientales son desfavorables

Debido a que cada microorganismo tiene sus propias características, la tolerancia que presentan a cada situación es muy particular. Puede ocurrir que cuando las concentraciones de los contaminantes orgánicos son muy altas, se observan fenómenos de inhibición de la actividad microbiana.

Cuando el material geológico es netamente arcilloso, no es muy recomendable la biorremediación, porque la baja permeabilidad limita la transferencia de masa en el sistema. Lo anterior es determinante

Figura 1. Diagrama conceptual de una biorremediación de suelo superficial fuera del sitio: biopila (izquierda) y biocelda (derecha).



La caracterización de un sitio contaminado debe considerarse como un diagnóstico muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las actividades de remediación.

cuando la contaminación llega hasta el nivel freático y el tratamiento necesariamente será in situ. Para suelos superficiales este problema puede superarse si se agregan residuos agroindustriales, con lo cual se aumenta la permeabilidad y se favorece así, la transferencia de masa.

Desarrollo de proyectos de biorremediación

En el desarrollo de proyectos en biorremediación es conveniente integrar expertos en las diferentes disciplinas involucradas, como son: biotecnología, geohidrología, ciencias del suelo, ingeniería, química y legislación ambiental, quienes deben integrarse completamente en el problema desde que se inicia la caracterización. Esto permitirá sentar las bases para plantear estrategias que conduzcan a la solución de cada problema en particular.

La caracterización de un sitio contaminado debe considerarse como un diagnóstico muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las actividades de remediación. El trabajo de campo se inicia con la prospección del sitio y su caracterización en la que se incluyen cuatro enfoques básicos: geohidrológico, fisicoquímico, microbiológico y química de contaminantes. La evaluación integrada de los resultados obtenidos permitirán definir la posibilidad de aplicar una biorremediación mediante estrategias ad hoc para cada sitio.

En la práctica común, la caracterización microbiológica es poco considerada, a pesar de que es determinante para definir la aplicabilidad de una biorremediación. Consta de dos tipos de estudios, la cuantificación de los microorganismos presentes incluyendo las pruebas de biofactibilidad, y los estudios de biodegradabilidad o biotratabilidad en el laboratorio. Estos últimos son indispensables para predecir el tiempo que tomará la biodegradación en campo.

La estrategia para el saneamiento de un sitio es única para cada caso, y debe estar bien soportada en los resultados de su caracterización, de la misma forma que el médico que opera a un paciente, es aquel que diagnosticó la enfermedad y después de varios estudios y análisis sugiere una cirugía. Dada la importancia de la caracterización de un sitio, no se debe considerar que ésta es solo un requisito administrativo, sino una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos y se deben involucrar expertos en cada área.

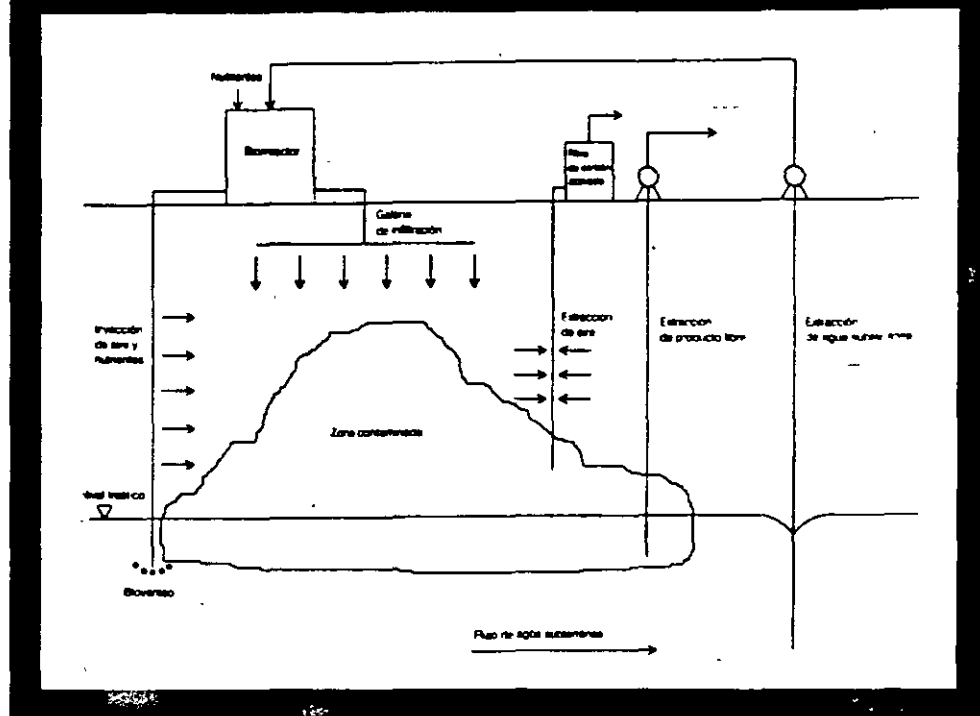
Por lo que respecta al seguimiento de la concentración de contaminantes, existen dos enfoques uno de ellos es seguir la reducción de los compuestos

químicos más tóxicos los cuales sirven como parámetros indicadores y el otro es utilizar una medida más general de hidrocarburos totales. Para ejemplificar el primer caso, en sitios contaminados con gasolinas se puede hacer referencia a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), mientras que en sitios contaminados con diesel o derivados más pesados, se cuantifican hidrocarburos polinucleoaromáticos entre 2 y 5 anillos. Al establecer los límites de limpieza será necesario definir cuál de los dos conceptos es el más adecuado, dado que el primero se refiere a la reducción de la toxicidad y el segundo al saneamiento del sitio. La tendencia actual parece inclinarse hacia una evaluación de riesgo, pero también se recurre a normativas extranjeras que varían en un amplio margen. La primera opción toma su tiempo y tiene un costo, con la segunda se tendrá la incertidumbre de saber si fue la más adecuada.

Riesgos de la biorremediación

Una de las preocupaciones actuales dentro del campo de la biorremediación, es la constante introducción de productos comerciales patentados de origen microbiano. Desde un punto de vista muy riguroso, se sabe que los microorganismos nativos no son patentables porque son parte de la biodiversidad, solamente se pueden patentar aquellos que han sido modificados genéticamente. Esto deja ver la posibilidad de que varios productos patentados sean producto de la biotecnología molecular.

Por otro lado, se ha visto que existen en el mercado gran cantidad de productos microbianos vendidos como "polvos mágicos" desconocidos capaces de destruir todo tipo de contaminantes, los cuales están siendo comercializados por gente de negocios



que no tiene conocimientos de microbiología o de biotecnología y mucho menos, de bioseguridad. Una de las recomendaciones de los fabricantes de productos microbianos es realizar aplicaciones consecutivas al suelo contaminado con la finalidad de alcanzar una cierta proporción microbiana, pero la realidad en muchos casos es que los microorganismos que se dicen "mágicos" no logran adaptarse a las condiciones adversas del sitio, y por más adiciones que se hagan no se registra la actividad degradadora.

Además de los productos microbianos, también se venden aditivos que son productos químicos patentados de formulación también desconocida, los cuales pueden ser nutrientes, o bien, agentes tensoactivos (surfactantes). Estos últimos no siempre son biodegradables y cuando son agregados al suelo o a cuerpos de agua ayudan a la dispersión de los contaminantes, más que a su degradación. Cuando la aplicación de dichos productos se hace en una biopila o biocelda se pueden controlar dentro del sistema, pero si el tratamiento es in situ la dispersión de contaminantes puede llegar hasta las aguas subterráneas o cuerpos de agua superficiales alejados del sitio de tratamiento.

Aplicación de tecnologías de biorremediación

A pesar de que no se cuenta con un inventario de sitios contaminados que sea del dominio público y que sirva de base para la estimación del mercado real de la biorremediación en México, es obvio que éste existe por tratarse de un país netamente petrolero. De hecho, esa es la razón por la que un importante número de compañías de servicios ambientales aparecen diariamente con la finalidad de vender sus productos o servicios de biorremediación. En varios casos los resultados han sido poco exitosos, por las bajas eficiencias de limpieza y un mayor deterioro ambiental por la adición de químicos desconocidos, mientras que otros casos los resultados han sido exitosos.

La necesidad de dar solución urgente a varios problemas ambientales, muchas veces lleva a la aplicación de tecnologías disponibles en el mercado que no siempre aportan los resultados esperados. Para lograr éxito durante la aplicación de cualquier tipo de tecnología, es indispensable adaptar e innovar para casos específicos, o incluso realizar nuevos desarrollos, esta situación aún no se ha

conceptualizado dentro del campo de la biorremediación.

Un aspecto al que se le ha dado poca importancia es que las características de cada suelo son diferentes y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat.

Un aspecto al que se le ha dado poca importancia es que las características de cada suelo son diferentes, y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat.

adaptan fácilmente a cualquier hábitat. El suelo de un sitio específico, tienen características físicas, químicas y biológicas muy particulares, que los hacen diferentes a los suelos de otro lugar del mundo. Por lo que respecta a las características de los contaminantes, conviene resaltar dos aspectos que son: su complejidad química y el hecho de que en algunos casos, tienen ya un avanzado grado de intemperismo. Estos aspectos, que por lo general no son tomados en consideración, dificultan el tratamiento de un suelo contaminado y algunas tecnologías probadas exitosamente en otros países no han funcionado en México.

Las compañías que cuentan con un buen respaldo científico deben tener bien identificadas las virtudes y limitaciones de sus tecnologías, con la finalidad de tomar la decisión de cuándo es conveniente sugerir su aplicación y cuándo es mejor recomendar otra opción. Para aquellas tecnologías que se han aplicado en el extranjero es indispensable asegurarse de que hayan tenido experiencias previas al tratar contaminantes de composición conocida y comparables al tipo de contaminantes que comúnmente se encuentran en México.

Un aspecto adicional que se debe considerar que la mejor propuesta económica no siempre corresponde a la mejor alternativa técnica. Es importante realizar buenos trabajos de caracterización del sitio, de la contaminación y de la factibilidad de realizar el proceso por vía biotecnológica, pero en la práctica común éstos son muy limitados y no están encaminados a comprobar que la biorremediación funcionará en campo. Si se le dedicara más tiempo y recursos, permitiría conocer perfectamente el comportamiento del sitio y así plantear estrategias ad hoc para su remediación.

Las oportunidades de negocio para la biorremediación existen, pero dada la gran variedad de opcio-

nes que existen en el mercado y la poca experiencia de las empresas ambientales en este campo, se ha planteado la necesidad de establecer políticas en las que se demuestren aspectos como:

- conocer la base científica de funcionamiento de la tecnología
- las experiencias previas, buenas y malas, en otros sitios donde se hayan tratado contaminantes de composición química similar
- que se cuenta con el personal técnico idóneo que será responsable del proyecto en campo y que domina la tecnología, de tal forma que pueda solucionar imprevistos durante el proceso
- haber realizado una caracterización completa del sitio, incluyendo las pruebas de biofactibilidad para el problema específico que va a ser tratado
- justificar el uso de productos microbianos y de aditivos, dar a conocer su composición y características de seguridad hacia el ambiente
- contar con un protocolo bien elaborado donde se establezca el seguimiento que se dará al proceso durante la aplicación de la tecnología en campo

En los casos donde no se tengan experiencias previas, sería conveniente realizar pruebas piloto de demostración en campo, antes de operar en escala real. **as**

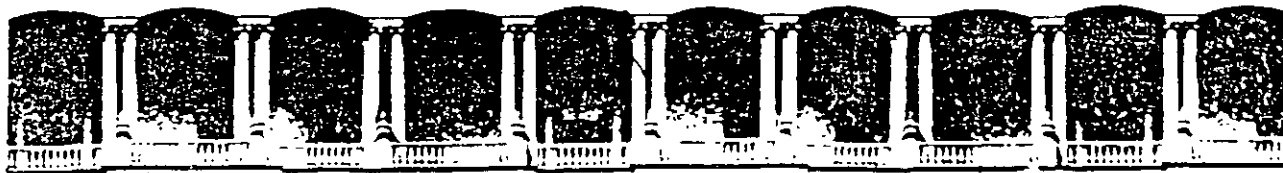
(*) La Dra. Susana Saval está a cargo de la Coordinación de Biotecnologías Ambientales, Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de México (UNAM). El presente artículo fue publicado en la Revista Ingeniería y Ciencias Ambientales, Año 10, N° 34, Femisca, México, 1998.

Agradecimientos

Al Ing. Federico Hach por su ayuda a la elaboración de los esquemas presentados

Bibliografía

- Aber J., 1993. Bioremediation firms rush to marketplace. *BioTechnology* 11: 973-975.
- Avery A.R. and Ellis G.M., 1992. Bioremediation: an effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Environ. Progress* 11(4): 318-323.
- Blackburn J.W. and Harker W.F., 1993. The impact of biochemistry, bioavailability and bioactivity on the selection of bioremediation techniques. *TIBTECH* 11: 328-333.
- Caplan J.A., 1993. The worldwide bioremediation industry: prospects for profit. *TIBTECH* 11: 320-323.
- Finnerty W.R., 1994. Biosurfactants in environmental biotechnology. *Curr. Op. Biotechnol.* 5: 291-295.
- Gibson D.T. and Subramanian V., 1984. Microbial degradation of aromatic hydrocarbons, in Gibson D.T. (Ed.) *Microbial degradation of organic compounds*. Microbiology Series Vol. 13: 181-252.
- Harvey R.W., 1993. Fate and transport of bacteria injected into aquifers. *Curr. Op. in Biotechnol.* 4: 312-317.
- Heitzer A. and Sawyer G.S., 1993. Monitoring efficacy of bioremediation. *TIBTECH* 11: 334-343.
- Liu S. and Sufita J.M., 1993. Ecology and evolution of microbial populations for bioremediation. *TIBTECH* 11: 344-352.
- Riser-Roberts E., 1992. Bioremediation of petroleum-contaminated sites. C.K. Smoley, Boca Raton, FL, USA.
- Rogers J.A., Tedaldi D.J., and Kavanaugh M.C., 1993. A screening protocol for bioremediation of contaminated soil. *Environ. Progress* 12(2): 146-156.
- Saval S., 1995. Remediación y restauración, en: PEMEX. Ambiente y Energía. Los Retos del Futuro, coordinación: UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp. 151-189.
- Sollero J.L. and Castañón R., 1996. Environmental Biotechnologies in Mexico: Potential and Constraints for Development and Diffusion. In: *Biotechnology for Sustainable Development*, University of Tennessee, Knoxville, USA.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Bioremediation in México Current Status and Perspectives

**Dra. Susana Saval Bohórquez
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

WAITRO

World Association of Industrial
and Technological Research Organizations



INSTITUTO DE
ECOLOGIA A.C.
Biotecnología Ambiental



Centro Internacional de Tecnologías
Limpias y Desarrollo Sustentable A.C.



TERCER SIMPOSIUM INTERNACIONAL

Eugenia J. Olguín, Gloria Sánchez, Sonia Galicia y Elizabeth Hernández
Compiladores

8-10 de Junio de 1998
Veracruz.Ver.

BIOREMEDIATION IN MEXICO: CURRENT STATUS AND PERSPECTIVES

Susana Saval
Instituto de Ingeniería, UNAM
Apartado Postal 70472, 04510 México, D.F., Mexico
e-mail: ssb@pumas.iingen.unam.mx

Introduction

Bioremediation technologies have been developed on a worldwide basis as a successful alternative for clean-up of contaminated soils and aquifers because of their economical and safe practices. Hydrocarbon contamination problems that have at present become evident in Mexico have in turn promoted the arrival of a large variety of bioremediation schemes of different types. A gap is however perceived in the knowledge of its benefits and shortcomings. The current status of bioremediation in Mexico is discussed in this paper from their perception as a large-scale application biotechnological process.

Current status

Amendments to the General Act of Ecological Balance and Environmental Protection made at the end of 1996 included the legal definition of environmental liability in Mexico. In doing so the existence of a large number of contaminated sites became evident as a result of countless years of unsuitable practices for handling of materials, particularly in what refers to hydrocarbons. It was therefore possible to welcome an important market for the remediation of contaminated sites, and

particularly the bioremediation techniques.

This awareness has promoted the incorporation of an increasing number of companies, both local and abroad, interested in marketing their products or services of bioremediation in Mexico. Some foreign firms have entered directly into the market and some others through representatives in Mexico by means of strategic alliances. Among the local companies, mention can be made of those devoted to environmental services, geophysical and soil mechanics studies or drilling. A typical and serious concern is that these companies have no experts on microbiology or biotechnology among their staff and therefore their major activity consists in importing foreign formulations to be sold in Mexico as products with a minimal description of their contents.

Some of these companies sell the service as a package that includes earthworks, supply of products and their application. In these cases, the contractors just follow the instructions received from the manufacturer for applying the compounds in the field with no further knowledge of the benefits and risks involved in each of the stages of the procedure. This is what they call "technology".

There exist a wide variety of products available in the bioremediation-related market, among them:

- Liquid bacterial concentrates
- Powdered bacterial concentrates mixed with bran flour as a base
- Liquid enzymatic concentrates
- Liquid concentrates of nutrients
- Powdered fertilizers
- Liquid surfactants
- Mixes of surfactants and nutrients

In general terms, the marketing of these products is by the pack and no previous information prior to their application is required with respect to the type of contaminants, their concentration, type or soil or moisture degree, among other well-known parameters. The recipe is exclusive and if the products from one package are not used, there is no guaranty of a successful performance. The use of these products is commonly oriented to contaminated soils that have been excavated to carry out the treatment of site.

Certain companies provide services that also include the use of equipment designed for specific functions. As an example mention can be made of bioreactors combined with aeration and aerators to inject micro-bubbles of compressed air into the saturated zone. The latter option is applied when pollution has affected the phreatic level and the treatment need to be applied *in situ*. Very few of these processes have been implemented in Mexico.

When confronted to such a large variety of options, the costs also vary widely, but not a single reference parameter can be found.

In what refers to powdered bacterial concentrates, manufacturer's instructions indicate that they should be subjected to a "reactivation process" a few hours prior to their application. This reactivation implies the hydration of bacteria in a predetermined volume of water that may even include some nutrients. For this activity that is performed with no reasonable basis, any type of bucket is used and the mix is prepared with a shovel or even with the hand if no tools are available.

Some products have good performance, but the problem arises in its handling and application to the field.

The problem is in their handling and application.

It is also worth mentioning that genetically engineered bacteria have been used in some bioremediation projects in spite of the risk involved in their handling and dispersion.

Improvements related to the application of bioremediation in the field include the use of fertilizers and surfactants. Powdered fertilizers are spread in the soil with no previous dissolution and with no assurance of a uniform distribution. On the other hand, liquid enzymatic solutions and surfactants are sprayed into the soil or in bodies of water with no dosage or control whatsoever to prevent additional environmental problems.

Some cases have also been observed in which the contaminated soil is mixed with clean soil to decrease the concentration of contaminants and to expedite the bioremediation process.

Another example of the lack of technical background in the area, mention can be

made of the application of strong chemical oxidizers to contaminated soils or a single ventilation of gasoline contaminated soils through the so-called "bioremediation technologies".

The perception received by many of us who have witnessed how several local and foreign companies perform large-scale bioremediation projects falls short of our expectations, particularly when awareness exists about the extreme care required to handle any biotechnological process where the major roles are played by biological entities, bacteria and enzymes which are susceptible of being adversely affected by extreme micro-environmental conditions.

The actual situation is by no means so pessimistic. There are also very reliable companies and some others with a strong technological background, which are quite familiar with this area of endeavor. They are engaged in formulating and proportioning their own products, and they even prepare their own inocula. Other firms profit from the indigenous microbial diversity with degrading capabilities and they only stimulate such an activity with the addition of fertilizers. Some others have discovered a large potential on natural attenuation in certain locations where only a follow up is necessary.

In view of the diversity of techniques for bioremediation and as a result of poor practices that have been detected, the environmental authorities set up programs for the curricular assessment of each of the remediation contractors with the support received from academia; however, it was a time-consumption procedure and the benefits obtained fell short from the expected results.

At present, the trend is to implement in the field the bioremediation techniques with a closer follow up since the very beginning. The problem is that as a result of the lack of sufficient knowledge in the field of bioremediation and in the procedures necessary for follow up, it is possible that the information thus obtained becomes quite limited.

In what refers to the academic sector, during the last two years several task forces have emerged in various universities and research centers to perform studies on biodegradation of petroleum, its distilled fuels and its by-products, each of them with a different approach. The largest percentage of investigations is carried out at laboratory level by using well-controlled ideal models that, although being unrealistic, they constitute the only way to find an answer to many of the queries. In some other cases, large-scale studies are carried out where the greatest challenge is to apply the results of the laboratory research to the contaminated sites.

Bioremediation as a biotechnological process

Because the practice of bioremediation is carried out in the field, its execution should be regarded as an engineering problem of scaling.

By assuming the previous definition, special attention shall be then paid on the most suitable way to implement a bioremediation project. This technique involves three stages, two of them in advance to the scaling-up to field, namely: characterization and biotreatability studies (Fig. 1).

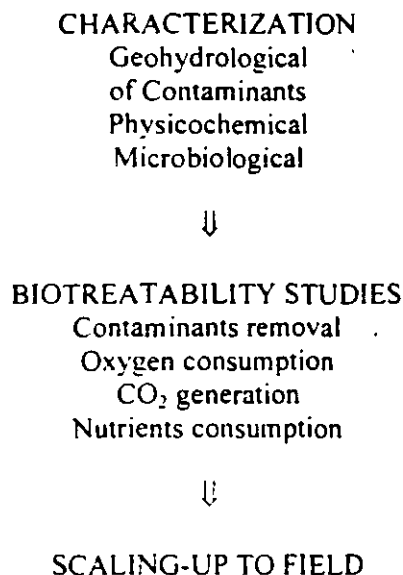


Fig. 1 Bioremediation project sequence

In what relates to the characterization, it includes four basic aspects: geohydrology, chemistry of contaminants, physicochemistry and microbiology of the soil. In general terms, the characterization process in Mexico is not carried out in depth; only some of the geohydrologic aspects required to determine the volume of soil to be treated are covered with the purpose of determining the cost of the clean-up. There is already a start-up problem because the contaminated site is not yet well known prior to the beginning of bioremediation. From field experience it has been shown that the better emphasis is placed on the characterization, the easier the field problem comprehension; therefore, a large part of the remediation has already been solved.

If the characterization is complete, it would be understood that from the

geohydrological work results it will be possible to determine the size and shape of the contamination plume; such work is likely to become a heterogeneous bioreactor by its own nature. The geohydrological surveys are also beneficial to define the different alternatives for the operation of the bioreactor so as to reduce the degree of heterogeneity of the system and the presence of idle zones, by drilling wells. It will be therefore possible to increase the mass transfer and to achieve a dynamic bioreactor.

On the other hand, the soil characteristics that constitute the microenvironment where the bacteria will play their role can be disclosed by determining the physicochemical soil parameters. The chemical characterization of the contaminants is necessary because those that will perform as substrate could be determined as well as those that might inhibit the metabolic activity.

The microbiologic characterization includes the quantification of both heterotrophic and degrading population. A recent development has been the identification of the degrading capability by means of the catabolic genes involved in the metabolic paths of common hydrocarbons, such as for example, toluene (*xylE*), naphthalene (*ndoB*) and dodecane (*alkB*). These analyses can be performed in soil samples and even in the commercial bacterial concentrates intended to be used.

Perspectives

If the background referred to above is taken into account, it can be concluded that bioremediation in Mexico needs to be implemented in the field with a better

knowledge of the factors involved and with a higher commitment to consider it as a truly clean biotechnological process. It is therefore required to integrate all the different disciplines involved in a single task force.

The case histories related to the biological treatment of wastewater provide an example that the success of this technology is just a matter of time and willingness. The oldest wastewater plants with biological treatment were built by civil engineers specialized in sanitary engineering; they handled the process with a lack of knowledge of the benefits and shortcomings of the involved bacteria. Many of the plants commissioned failed to achieve the expected results; the performance of the plants showed a major improvement when microbiologists and biotechnology experts familiar with this area became involved and contributed with new knowledge and experience. A similar situation is expected to occur in the future in what refers to bioremediation.

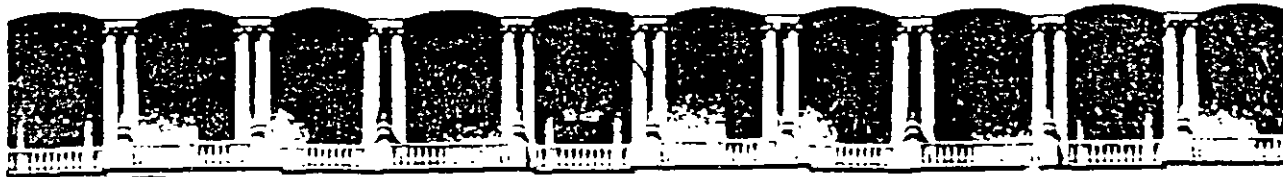
There is still a lot of work to do; it is a known fact that bioremediation of soils and aquifers in Mexico is at an early stage. The participation of interdisciplinary teams is necessary to define operation policies such as soil sampling techniques, chemical analysis techniques, studies of assessment of health and environmental risks, as well as the development of clean-up criteria, just to mention a few of the most important aspects.

Concluding remarks

Within the framework of sustainable development, bioremediation provides important perspectives to solve many of

the problems derived from hydrocarbon contamination of soils and aquifers that occur in Mexico. It is necessary to incorporate biotechnologists into the different disciplines involved as well as to achieve a more decisive participation of the academic sector with the companies that render environmental services for the purpose of achieving an environmentally friendly practice with bioremediation.

As a concluding comment, mention should be made that this paper was not intended to provide statistical figures because the number of companies that offer products or services related to bioremediation is constantly increasing. The interest of integrating this presentation derives from the experience obtained in the course of several years devoted to the assessment of environmental companies and of the execution of bioremediation projects in the field, in which the Institute of Engineering has become involved with different entities of the public and private sectors.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Seminario Internacional sobre restauración de sitios contaminados

**Dra. Susana Saval Bohórquez
Guanajuato, Guanajuato
1998.**



Agencia de Cooperación
Internacional del Japón

CENICA

Centro Nacional de Investigación
y Capacitación Ambiental
MÉXICO - JAPÓN



INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA
SEMARNAP

MEMORIA

En el Marco del Programa
de Cooperación Técnica
México - Japón

SEMINARIO INTERNACIONAL SOBRE RESTAURACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

MÉXICO
del 26 al 29 de mayo de 1997



Sociedad Alemana de
Cooperación Técnica



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

LA BIOREMEDIACIÓN COMO ALTERNATIVA PARA LA LIMPIEZA DE SITIOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

*Susana Saval
Investigadora
Instituto de Ingeniería, UNAM*

Introducción

La bioremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados. Ésta puede ser aplicada exitosamente cuando los contaminantes son compuestos orgánicos biodegradables, como es el caso de los hidrocarburos. En bioremediación se aprovecha la capacidad metabólica de microorganismos que en el suelo se encargan de reciclar la materia y la energía.

Cuando ocurre un derrame de hidrocarburos en un sitio, la flora microbiana presente se somete a un proceso de selección natural, en el cual los microorganismos que sobreviven son aquellos que desarrollan capacidad para tolerarlos, e incluso degradarlos. Los procesos de bioremediación no violan la primera ley de la termodinámica, es decir, que los contaminantes no se destruyen sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes. Si la transformación de los hidrocarburos llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización.

Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados, la bioremediación se ha perfilado como la mejor opción desde los puntos de vista ambiental y económico. Sin embargo, no puede ser aplicada a todos los casos, por lo que para recomendar su uso deben realizarse estudios de biofactibilidad que comprueben la biodegradación de los contaminantes.

Las tecnologías de bioremediación serias cuentan con un respaldo científico bien establecido, sin embargo, en el mercado ambiental se pueden encontrar productos de todo tipo, que incluso pueden aumentar el riesgo de un problema de contaminación en lugar de reducirlo. En este trabajo se hace un análisis de las tecnologías de bioremediación y se plantea la necesidad de establecer políticas de evaluación para evitar la aplicación de aquellas que no garanticen la limpieza de sitios contaminados.

Contaminación por hidrocarburos

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos en México, son los ocasionados por derrames de hidrocarburos como: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados. Cada uno de estos materiales tiene su propia complejidad química, y la situación se agrava porque en muchos casos los contaminantes se presentan en forma de mezcla, o bien, se encuentran intemperizados.

En general, los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ésta. Petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes a simple vista cuando se encuentran en la superficie. Si son depositados en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero los lixiviados generados por las lluvias arras-

tran los compuestos solubles. Gasolinas, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo, durante su trayectoria son adsorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático, ahí se dispersan de acuerdo a la dirección de la corriente subterránea, creando así manchas de contaminación de gran superficie.

Conceptos de remediación y restauración

En el artículo 3 fracción XXXIII de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, *restauración* se define como *el conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales*. De manera muy similar, lo establece la Ley Ambiental del Distrito Federal en su artículo 6 fracción XXXIII.

De acuerdo al Diccionario de la Lengua Española, *restaurar* es *reparar, renovar o volver a poner algo en el estado que antes tenía; reparar una pintura, escultura o edificio del deterioro que ha sufrido*. Este es el concepto que se maneja en las leyes referidas a la restauración de edificios y monumentos.

Al tratar de interpretar las leyes ambientales, el término restauración sería aplicable solamente en sitios donde antes de que ocurriera una contaminación se apreciaba la evolución y continuidad de los procesos naturales, y podría interpretarse como una actividad meramente cosmética, más que de saneamiento o de limpieza.

El término *remediación*, no está registrado en los diccionarios de la lengua española, tal vez por eso en México no ha sido incluido en documentos oficiales. Sin embargo, se ha vuelto del dominio público como una

traducción de "*remediation*" que en Estados Unidos, Canadá y otros países de lengua inglesa, se ha venido usando para referirse a todas aquellas actividades de limpieza de sitios contaminados. Un término que sí aparece en los diccionarios de la lengua española es el verbo *remediar*, cuya definición es *poner remedio al daño; corregir o enmendar una cosa; socorrer una necesidad o urgencia; librar, apartar o separar de un riesgo; evitar que suceda algo de que pueda derivarse algún daño o molestia*. Si nos ubicamos dentro del terreno ambiental esta definición es más precisa, ya que después de detectar un problema de contaminación lo que se busca es evitar un riesgo a la salud y al ecosistema en general.

A este respecto, tal vez sería menos grave adoptar el término remediación, o bien sus sinónimos técnicos, limpieza o saneamiento, en lugar de seguir utilizando el término restauración cuya definición puede entenderse como una actividad cosmética. Algo que ilustra lo anterior, es el hecho de enterrar los contaminantes y encima sembrar plantas. En estos casos será visible la evolución de los procesos naturales en la superficie, pero quedará fuera de nuestra vista lo que ocurra en el subsuelo y ahí los contaminantes podrán migrar hacia la profundidad en función de las características del sitio, creando un problema de mayor riesgo para el ambiente circundante y los habitantes de la región.

Alternativas tecnológicas para la remediación de sitios contaminados

En el mercado ambiental se ofrecen tecnologías de todo tipo para la remediación de sitios contaminados, las cuales se pueden clasificar en diferentes formas. De acuerdo a su base de funcionamiento, se clasifican en térmicas, fisicoquímicas y biológicas.

Las tecnologías térmicas están representadas por la incineración y la desorción. Para las fisicoquímicas existe una gran variedad de opciones como: microencapsulación, lavado, estabilización, solidificación, extracción al vacío y extracción de producto líquido, entre otras. Las tecnologías biológicas son las de bioremediación en las que se utilizan microorganismos y la fitorremediación que consiste en la utilización de plantas para recuperar suelos superficiales.

Características de las tecnologías de bioremediación

La capacidad de ciertos microorganismos para degradar hidrocarburos es lo que dio origen al desarrollo y aplicación de tecnologías de bioremediación, las cuales se han perfilado a nivel mundial como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados.

La más importante característica de la bioremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes, algunos de ellos pueden ser completamente degradados. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa mineralización. La complejidad química de los contaminantes y la ausencia de otros nutrientes esenciales para la actividad metabólica hacen que el proceso requiera de varios años, y en algunos casos no se logra su completa degradación.

En los sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos que no son atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollaron capacidades degradadoras. En esos casos, la mejor opción es utilizar la flora

autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes será necesario recurrir a preparados microbianos.

Ventajas de la bioremediación

Una ventaja importante de la bioremediación es su bajo costo en relación con otros tratamientos (Alper, 1993). Este bajo costo se debe a varios factores, como un menor gasto de energía, bajo costo de los nutrientes y la operación bajo condiciones ambientales, esto hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo.

La bioremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados a compuestos inocuos como el bióxido de carbono. Otra característica es que cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren.

La bioremediación es versátil porque puede adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente se requiere la adición de nutrientes para la actividad metabólica de la flora degradadora autóctona; bioincremento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesaria la adición de microorganismos degradadores exógenos; o bien, bioventeo cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para estimular la actividad microbiana degradadora presente en el lugar. Cualquier opción puede realizarse fuera del sitio, si la contaminación es superficial, pero necesariamente *in situ* cuando los contaminantes han alcanzado el nivel freático.

Cuando se trata de suelos superficiales y el tratamiento se hace fuera del sitio, pueden utilizarse bioceldas o biopilas sobre

superficies impermeables que permitan la colección de lixiviados, de manera que no se contamine el espacio limpio. Además, después de la bioremediación el suelo se puede destinar al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas más conocidas.

En el caso de aguas subterráneas, la bioremediación se aplica a través del bombeo-tratamiento-recarga que consiste en extraer el agua subterránea, tratarla en la superficie y posteriormente devolverla al acuífero, o bien, inyectar nutrientes y bacterias, de tal forma que se establece una recirculación.

A pesar de ser la tecnología más empleada a nivel mundial, existen ciertos aspectos que determinan el éxito de su aplicación, por ejemplo: los contaminantes pueden estar fuertemente adsorbidos al material geológico, o bien, estar presentes en zonas de baja permeabilidad, lo que ocasiona limitaciones en la transferencia de masa.

Desventajas de la bioremediación

La bioremediación no puede aplicarse en campo cuando:

- se tienen compuestos radioactivos
- los compuestos orgánicos contaminantes son altamente halogenados
- existen metales pesados en concentraciones tales que inhiben la actividad microbiana
- las condiciones microambientales son muy extremas

Debido a que cada microorganismo tiene sus propias características, la tolerancia que presentan a cada situación es muy particular. Puede ocurrir que cuando las concentraciones de los contaminantes or-

gánicos son muy altas, se observen fenómenos de inhibición.

Tampoco es muy recomendable la bioremediación cuando el material geológico es netamente arcilloso, porque su baja permeabilidad limita la transferencia de masa en el sistema. Lo anterior es determinante cuando la contaminación está en el nivel freático y el tratamiento es *in situ*. Para suelos superficiales este problema puede superarse si se agrega arena, o bien, algunos residuos agroindustriales, con lo cual se aumenta la permeabilidad y se favorece así, la transferencia de masa.

Riesgos de la Bioremediación

Una de las preocupaciones actuales dentro del campo de la bioremediación en México, es la constante introducción de productos comerciales patentados de origen microbiano. Desde un punto de vista muy riguroso, se sabe que los microorganismos nativos no son patentables porque son parte de la biodiversidad, solamente se pueden patentar aquellos que han sido manipulados genéticamente.

Se ha visto que a México han llegado productos microbianos vendidos como "polvos mágicos" desconocidos, capaces de destruir todo tipo de contaminantes, los cuales están siendo comercializados por gente de negocios que no tiene conocimientos de microbiología o de biotecnología y mucho menos, de bioseguridad.

Una de las recomendaciones de los fabricantes de productos microbianos es realizar aplicaciones consecutivas al suelo con la finalidad de alcanzar una cierta proporción, pero la realidad en muchos casos es que los microorganismos mágicos no logran adaptarse a las condiciones del sitio, y por más adiciones que se hagan no se registra la actividad degradadora.

Además de los productos microbianos, también se venden aditivos que son productos químicos patentados de formulación también desconocida, los cuales pueden ser nutrientes, o bien, tensoactivos (Saval, 1995). Estos últimos no siempre son biodegradables y cuando son agregados al suelo ayudan a la dispersión de los contaminantes, más que a su degradación. Cuando la aplicación de dichos productos se hace en una biopila o biocelda se pueden controlar dentro del sistema, pero si el tratamiento es *in situ* la dispersión de contaminantes ocurre en las aguas subterráneas.

Desarrollo de proyectos de bioremediación

En el desarrollo de proyectos en bioremediación es conveniente integrar expertos en las diferentes disciplinas involucradas, esto es, biotecnología, geohidrología y ciencias del suelo, quienes deben integrarse completamente en el problema desde que se inicia la caracterización. Ésto permitirá sentar las bases para plantear estrategias que conduzcan a la solución de cada problema en particular.

La caracterización de un sitio contaminado debe considerarse como un diagnóstico muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las actividades de remediación. El trabajo de campo se inicia con la prospección del sitio y su caracterización en la que se incluyen tres enfoques básicos: geohidrológico, fisicoquímico y microbiológico. La evaluación integrada de los resultados obtenidos permitirá definir la posibilidad de aplicar una bioremediación mediante estrategias *ad hoc* para cada sitio.

En la práctica común, la caracterización microbiológica es poco considerada, a pesar

de que es determinante para definir la aplicabilidad de la bioremediación. Consta de dos tipos de estudios, la cuantificación de los microorganismos presentes y las pruebas de biofactibilidad en el laboratorio. Estas últimas son indispensables para predecir el tiempo que tomará la biodegradación.

La estrategia para la limpieza de un sitio es única para cada caso, y debe estar bien soportada en los resultados de su caracterización, de la misma forma que el médico que opera a un paciente, es aquel que diagnosticó la enfermedad después de varios estudios y análisis. Dada la importancia de la caracterización de un sitio, no se debe considerar que ésta es solo un requisito administrativo, sino una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos y se deben involucrar expertos en el área.

Por lo que respecta al seguimiento de la concentración de contaminantes, existen dos enfoques, uno de ellos es seguir la reducción de los compuestos químicos más tóxicos, los cuales sirven como indicadores, y el otro es utilizar un parámetro más general. Por ejemplo, en el caso de sitios contaminados con gasolinas, se puede hacer referencia a los hidrocarburos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX), o bien, al contenido de hidrocarburos totales. Al establecer los límites de limpieza será necesario definir cuál de los dos conceptos es el más adecuado, dado que el primero se refiere a la reducción de la toxicidad y el segundo a la limpieza del sitio. La tendencia actual es basarse en una evaluación de riesgo, pero también se recurre a normatividades extranjeras que varían en un amplio margen (Saval, 1995). La primera opción toma su tiempo y tiene un costo, con la segunda se tendrá la incertidumbre de saber si fue la más adecuada.

Participación del Instituto de Ingeniería en actividades de Bioremediación

La Coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería se ha involucrado en diversos proyectos patrocinados por el sector paraestatal, con el interés de aplicar la bioremediación en casos reales. Los contaminantes más estudiados se refieren a combustibles derivados del petróleo, presentes en suelos superficiales y en aguas subterráneas. Durante el desarrollo de estos proyectos se han alcanzado varios logros como son:

- La aportación de elementos para generar una cultura de bioremediación de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos.
- El establecimiento de criterios para la evaluación de tecnologías de remediación de suelos contaminados.
- El desarrollo de metodologías para la caracterización fisicoquímica y microbiológica de suelos contaminados.
- La participación activa en la formación de recursos humanos altamente calificados.
- La interacción con otras disciplinas relacionadas con el área.

Discusión

A pesar de que no se cuenta en México con un inventario de sitios contaminados que sea del dominio público y que sirva de base para la estimación del mercado real de la bioremediación, éste existe (Solleiro y Castañón, 1996). De hecho, esa es la razón por la que un gran número de compañías extranjeras llegan a México con la finalidad de vender sus productos o sus servicios de aplicación de tecnologías. En varios casos los resultados han sido poco exitosos, por las bajas eficiencias de lim-

pieza y un mayor deterioro ambiental por la adición de químicos desconocidos.

La necesidad de dar solución urgente a varios problemas ambientales, muchas veces lleva a la aplicación de tecnologías disponibles en el mercado que no siempre aportan los resultados esperados. La razón de lo anterior, es que las bacterias contenidas en los productos comerciales que se aplican, son incapaces de sobrevivir en ambientes diferentes a los de su origen. Un aspecto indispensable para lograr éxito durante la aplicación de cualquier tipo de tecnología, es la necesidad de adaptar e innovar, o incluso realizar nuevos desarrollos, situación que no se ha dado para la bioremediación.

Algo que no se ha tomado en cuenta es que las características de cada suelo son diferentes y que no es una regla general que los microorganismos se adapten fácilmente a cualquier hábitat. En el caso de México, los suelos tienen características físicas, químicas y biológicas muy particulares, que los hacen diferentes a los suelos de otro lugar del mundo. Por lo que respecta a las características de los contaminantes, conviene resaltar dos aspectos que son: su complejidad química y el hecho de que en algunos casos, tienen ya un avanzado grado de intemperismo. Estas situaciones que por lo general no son tomadas en consideración, dificultan el tratamiento de un suelo contaminado y algunas tecnologías probadas exitosamente en otros países no han funcionado en México.

Las tecnologías que cuentan con un buen respaldo científico se deben tener bien identificadas sus virtudes y sus limitaciones. Para aquellas que se han aplicado en el extranjero es indispensable asegurarse de que hayan tenido experiencias previas al tratar contaminantes de composición conocida y comparables al tipo de contaminan-

tes que comúnmente se encuentran en México.

Un aspecto adicional que conviene señalar es que una gran mayoría de instrumentos jurídico-administrativos que se manejan en la práctica cotidiana, perjudican el desarrollo de trabajos ambientales enfocados a la limpieza de sitios. Para tomar una buena decisión se debe considerar que la mejor propuesta económica no siempre corresponde a la mejor alternativa técnica, y por otro lado, aquella empresa que caracteriza un sitio contaminado es quien mejor lo conoce y más rápidamente puede plantear estrategias para su remediación. Algo que está ocurriendo en la práctica es que la empresa que inicia trabajos en un sitio caracterizado tiempo atrás, necesariamente debe repetir el diagnóstico, en virtud de que los contaminantes se han movido de lugar, esto hace que se requiera más del tiempo programado para el proyecto.

Conclusiones

Los retos actuales más importantes para trabajar en bioremediación en México son: demostrar que funciona en el suelo que pretende ser tratado y que son tecnologías ambientalmente seguras que no causarán alteraciones negativas al ecosistema.

Las oportunidades de negocio para la bioremediación existen, dada la gran variedad de opciones que existen en el mercado y la poca experiencia de las empresas ambientales en este campo, se plantea la necesidad de establecer políticas en las que se revisen los siguientes aspectos:

- descripción detallada de la tecnología
- resultados de experiencias previas en otros sitios donde se hayan tratado contaminantes de composición química similar

- perfil del personal técnico que será responsable del proyecto y dominio de la tecnología
- revisión de los resultados de la caracterización del sitio
- resultados de las pruebas de biofactibilidad realizadas para el problema específico que va a ser tratado
- justificación del uso de productos microbianos y de aditivos
- parámetros por analizar durante la aplicación de la tecnología en cualquier escala
- hoja descriptiva y de seguridad de los productos a utilizar
- seguridad ambiental en el sitio de tratamiento y sus alrededores

En los casos donde no se tengan experiencias previas bajo las condiciones que imperan en México, conviene realizar pruebas piloto o de demostración en campo antes de operar en escala real.

Bibliografía

1. Alper, J. (1993). Biotreatment firms rush to marketplace. *Bio/Technology* 11: 973-975.
2. Liu S. and Suflita J.M. (1993). Ecology and evolution of microbial populations for bioremediation. *TIBTECH*. 11: 344-352.
3. Saval, S. (1995). Remediación y restauración, en *PEMEX: Ambiente y Energía. Los Retos del Futuro*, coedición UNAM-Petróleos Mexicanos, México, pp 151-189.
4. Solleiro, J.L. and Castañón, R. (1996). Environmental Biotechnologies in Mexico: Potential and Constraints for Development and Diffusion. In *Biotechnology for Sustainable Development*, University of Tennessee, Knoxville, USA, in press.

MESA REDONDA III

Requisitos y Técnicas de Restauración

Presidente y Moderador: Ing. Sergio Sánchez Martínez,
Secretaría del Medio Ambiente del Departamento del Distrito Federal.
Integrantes: Los participantes del panel "Requisitos y técnicas de restauración".

Objetivo

Originar una discusión sobre los requisitos y técnicas de restauración existentes así como de la forma en que éstas pudieran ser adaptadas o modificadas para generar un avance tecnológico en materia de restauración de sitios de acuerdo a las necesidades, condiciones y características propias del país.

Introducción

Algunos de los puntos focales presentados durante el transcurso de las ponencias del día fueron, entre otros, los siguientes:

- ♦ Una adecuada planeación de los trabajos de restauración es determinante para garantizar su eficiencia.
- ♦ La previa realización de estudios de riesgo detallados es indispensable para garantizar una restauración adecuada y reducir sus costos.
- ♦ Los estudios de riesgo deben considerar futuros usos del suelo y no solamente el uso que tienen en la actualidad.
- ♦ Existe una amplia diversidad de tecnologías para la restauración de sitios contaminados, tales como tratamientos físico-químicos y biológicos. Las tecnologías más deseables son las que pueden ser aplicadas a contaminación mixta de suelos y aguas subterráneas.

- ♦ La bioremediación es una tecnología amigable al medio ambiente y sus costos son relativamente más accesibles que el de otras tecnologías, por lo cual está adquiriendo un papel cada vez más relevante a nivel mundial.
- ♦ Existe una gran variedad de tecnologías de bioremediación *in-situ* y *ex-situ*, aunque la más común es el *Landfarming*.
- ♦ La bioremediación es la estrategia más factible para atender casos de contaminación en zonas rurales por su bajo costo y sencillez para aplicarla.
- ♦ Aparte de los factores que generalmente se consideran en la evaluación de una tecnología y que están relacionados con su aplicabilidad, disponibilidad y costos, deben considerarse también los siguientes:
 - a) Un riesgo mínimo de aplicación tanto desde el punto de vista ambiental como social.
 - b) Un amplio espectro de aplicación a distintas situaciones y contaminantes.
 - c) Eficacia para alcanzar los niveles de limpieza establecidos en los estudios de riesgo.
 - d) Aceptación pública.
- ♦ Para su aplicación, es necesario:
 - e) la caracterización detallada de las condiciones del sitio.

f) un análisis preciso del tipo de contaminantes.

g) la realización de pruebas microbiológicas para evaluar la eficiencia del método y para adaptarlo al caso.

- ♦ Referente a las experiencias en la restauración de sitios en México, resulta prioritario establecer y homogeneizar criterios para la evaluación de las empresas que prestan los servicios de restauración. Por otro lado resulta importante evaluar las experiencias que se han tenido en casos específicos y bajo las condiciones particulares de México, identificando los alcances y limitaciones de las tecnologías aplicadas.

Discusión de la mesa redonda:

Se presentarán comentarios y experiencias sobre la calidad de tecnologías para restauración, así como su incorporación para el desarrollo de un marco tecnológico en México. Especialmente se presentaron las siguientes preguntas y respuestas.

¿Se considera conveniente la certificación de tecnologías en México aun cuando el estado de arte sea suficientemente conocido?

Esta certificación de tecnología no sería conveniente en el sentido estricto, porque hay que considerar que existe una relación intrínseca entre empresa y tecnología. Además las tecnologías de empresas extranjeras requieren de un socio mexicano para operar en nuestro país, lo que se necesita es permitir la generación de experiencias en México, ya que las tecnologías que llegan del extranjero requieren de grandes esfuerzos para su adaptación, innovación e incluso, nuevos desarrollos. Por lo tanto es conveniente

hacer una evaluación de empresas tecnología.

Otro requisito importante para seleccionar la tecnología más apropiada es que los estudios de riesgo establezcan un nivel de limpieza que sea real y que la tecnología se pueda aplicar a un costo razonable.

Si queremos establecer requisitos para certificar tecnologías es muy importante determinar la política, es decir, que es lo que se requiere hacer, si se requiere proteger el suelo, evitar la contaminación del agua, evitar una emisión a la atmósfera o evitar la dilución de los contaminantes; por lo cual es necesario crear normas o puntos de referencia en concentraciones de contaminantes para que a partir de ellos se desarrollen los estudios de riesgo.

Para el esquema de certificación planteado por el Instituto Nacional de Ecología podría realizarse una preselección y basándose en estos puntos realizar algunas pruebas de laboratorio a nivel piloto, para que aquellas empresas que superen esas pruebas se les permita realizar pruebas de campo, de manera representativa, para que finalmente a aquellas que aprueben esa última prueba, se les proporcione una certificación bajo ciertos límites con respecto a contaminantes y localidades. Sin embargo, existe el inconveniente de que la realización de estas pruebas generaría costos para dichas empresas, resultando esto en un impedimento para dicha aplicación. Pero un buen principio sería partir de la base de datos de la EPA, sobre tecnologías certificadas para definir las investigaciones necesarias para el desarrollo de tecnología certificada en México.

Ya que en México aún se están generando experiencias en el campo de la certificación, sería más conveniente, crear

lineamientos y procedimientos para que una vez que hayan sido comprobados y demuestren su eficiencia, se proceda a su análisis para la posterior creación de normas.

¿Cuáles serían los requisitos prioritarios que deben cumplir las empresas que prestan servicios de restauración para llevar a cabo sus actividades?

Estos requisitos podrían ser el establecimiento de una responsabilidad compartida entre las autoridades y las empresas; generar experiencias así como adaptar las diversas tecnologías a las condiciones locales; establecer un perfil del personal técnico responsable del proyecto; conocer los alcances y limitaciones de la tecnología sustentados en que ésta se desarrolle con bases científicas; justificar el uso de cualquier tipo de productos o compuestos que se utilicen, específicamente en la bioremediación y finalmente determinar cual será la estrategia de monitoreo basándose en los parámetros a los que se les va a dar seguimiento.

¿Cómo avanzar en la adaptación de los estudios que existen ya sobre bioremediación para orientarlos en el desarrollo de una tecnología adecuada a México?

La bioremediación resulta muy prometedora pensando en el caso de que el principal problema de contaminación que se presenta en México, es por hidrocarburos.

No obstante lo anterior, no convendría a México partir de cero en cuanto al desarrollo de tecnologías porque ya existen tecnologías y experiencias que en el extranjero han sido probadas, por ello habría que partir de éstas y adaptarlas a las

condiciones y características del sitio en México, así como generar un procedimiento en el que se puedan identificar los sitios modelo en los que se pudieran realizar estudios piloto para la evaluación de tecnologías.

Se puede obtener información sobre los avances en la tecnología en la EPA o en las memorias de Congresos Internacionales.

¿El esquema de desmantelamiento, y posterior restauración del sitio ocupado por la empresa Tetraetilo de México debería ser pluralizado?

Podría pluralizarse este esquema en algunos aspectos tales como la creación de reservas económicas que se utilizarán para cuando se lleve a cabo el desmantelamiento de la planta y el intercambio de información y experiencias entre universidades y empresas, así como también dependencias gubernamentales y por otro lado, la experiencia de Tetraetilo de México ha mostrado que la elaboración de la metodología de restauración debe ser de restitución integral, que no se limite únicamente al predio de las instalaciones sino que incluya también los alrededores. Como fue el primer caso en que se establecieron parámetros para realizar el estudio de caracterización y restauración en México, se acordó con la PROFEPA y el INE, que este estudio se dejara como un acervo cultural a disposición de los que estén interesados en ello.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

PEMEX. Ambiente y Energía. Los retos del Futuro

Dra. Susana Saval Bohórquez
Guanajuato, Guanajuato
1998.

PEMEX: AMBIENTE Y ENERGÍA

Los retos del futuro

Primera edición: 1995

DR. © 1995. Universidad Nacional Autónoma de México

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Circuito Maestro Mario de la Cueva
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, México, D.F.

Impreso y hecho en México

ISBN 968-36-4802-9

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Serie E: Varios, núm. 69

Edición y formación en computadora al cuidado de Isidro Saucedo



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PETRÓLEOS MEXICANOS

MÉXICO, 1995

REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Susana SAVAL BOHÓRQUEZ

SUMARIO. I. Introducción. II. El concepto de contaminación; III. Fuentes de contaminación en instalaciones petroleras. IV. Dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos. V. La auditoría ambiental como parte de la caracterización de un sitio. VI. El concepto de remediación. 1. Tomando como referencia normas extranjeras. 2. Por evaluación de riesgo. 3. En función del uso que se dará al suelo. VII. Alternativas tecnológicas para la remediación de suelos. 1. Biorremediación. 2. Arrastre por aire (Air Stripping). 3. Extracción al vacío. 4. Solidificación/Estabilización. 5. Lavado de suelo. 6. Desorción térmica. 7. Por arrastre de vapor. 8. Incineración. 9. Confinamiento. 10. Volatilización. VIII. Costos de remediación. IX. Criterios para la selección de tecnologías de remediación. X. Acciones para la remediación de suelos en México. 1. Las empresas de consultoría ambiental. 2. Los organismos gubernamentales involucrados en materia ambiental. 3. El papel de las universidades. 4. Educación ambiental para la sociedad. XI. Los compromisos de PEMEX. XII. Conclusiones. XIII. Bibliografía.

I. INTRODUCCIÓN

El suelo y el subsuelo son términos que difícilmente pueden emplearse por separado. En un lenguaje coloquial, suelo es la superficie y subsuelo hacia la profundidad, sin existir una referencia para saber que tan profundo es el suelo y desde donde empieza el subsuelo.

Suelo y subsuelo constituyen un recurso natural que desempeña diversas funciones entre las que destacan su papel como medio filtrante durante la recarga de acuíferos y de protección de los mismos, también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y de la cadena alimentaria, además de ser el espacio donde se realizan actividades agrícolas y ganaderas y áreas verdes de generación de oxígeno.

Aunque se ha venido haciendo mucho énfasis en el establecimiento de medidas preventivas con el fin de reducir o eliminar la descarga de materiales extraños al medio ambiente, no se puede ignorar la contaminación que ocurrió en el pasado.

Ante la inmensa superficie de zonas afectadas por la actividad humana, surge la necesidad de tomar acciones para controlar la dispersión de contaminantes y buscar su eliminación. En los países más avanzados se han desarrollado tecnologías para remediación y restauración de sitios, sin embargo, dado que cada sitio dañado constituye una problemática específica, se requiere el establecimiento de criterios y gran cantidad de información para decidir cómo controlar y eliminar los contaminantes.

Existen varios términos que comúnmente se usan como sinónimos: *remediación (remediation)*, *limpieza (clean-up)*, *restauración (restoration)*, *recuperación (reclamation)*, sin embargo, es necesario entender el contexto en el que estos se emplean, ya que puede hacerse alguna diferenciación entre ellos.

Se entiende por remediación o limpieza a las acciones que se toman para la reducción o eliminación de los niveles de contaminantes en suelo y subsuelo. Restauración o recuperación es la acción de devolver a un sitio, sus características originales. Es decir, rescatar o mejorar la función y la imagen que el suelo tenía antes de haber sido afectado por los contaminantes.

El concepto del suelo

a) Desde el punto de vista científico-tecnológico

El suelo se define como un material no consolidado sobre la superficie de la tierra, que ha sido formado mediante una dinámica natural a partir de la corteza terrestre con la influencia de factores genéticos y ambientales, proceso que ha tomado miles de años para tenerlo en su estado comúnmente conocido. Es un medio complejo y dinámico en constante evolución.

El suelo y el subsuelo en su conjunto, porque no pueden ser entidades separadas, tienen diversas funciones como: filtro amortiguador y transformador, productor de alimentos, hábitat biológico y reserva genética, medio físico para la construcción, fuente de materias primas y herencia cultural.

Suelo y subsuelo son el filtro que limpia el agua de lluvia que recarga los acuíferos y que los protege contra la contaminación. El agua de lluvia arrastra un sinúmero de compuestos, durante su recorrido éstos son retenidos en el subsuelo, de aquí que se hable de una capacidad amortiguadora. Algunos compuestos son transformados por la microbiota nativa, antes de llegar a los acuíferos. Para resaltar esta importante función del suelo conviene recordar que los acuíferos constituyen la fuente de suministro de agua de las poblaciones.

Como productor de alimentos, el suelo es la base para la vida del hombre y los animales, permite la implantación de las raíces de las plantas y les proporciona agua y elementos nutritivos. La producción de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad y fertilidad de terrenos agrícolas.

El suelo desempeña también una importante función como hábitat biológico y reserva genética. Se pueden desarrollar gran cantidad de vegetales y animales que forman parte de la cadena alimentaria y constituyen la riqueza de la biodiversidad, por lo que deben ser protegidos de su posible extinción.

Para la construcción, el suelo es la base física de las edificaciones, sean viviendas, industrias, lugares de recreación, sistemas de transporte o sitios para disposición de residuos. También, es fuente de materias primas como arcillas, arena, grava y minerales.

Finalmente, el suelo alberga una importante herencia cultural, representada por tesoros arqueológicos y paleontológicos, que son una fuente única de información que debe ser mantenida como un testimonio de la historia de la tierra y de la humanidad.

Todo lo anterior lleva a pensar en la necesidad de prevenir daño al suelo y recuperarlo cuando éste es afectado, pero nunca destruirlo, debido a que es un recurso natural difícilmente renovable.

b) Desde el punto de vista jurídico-administrativo

El suelo es parte del patrimonio nacional, independientemente de su valor y de su uso, razón por la que su cuidado es corresponsabilidad de todos los mexicanos. El artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que

la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponden originalmente a la Nación [por lo que] se dictarán medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico... y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que pueda sufrir en perjuicio de la sociedad.

Por otro lado, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental es el instrumento fundamental de referencia que sirve como base para todas aquellas acciones relativas a nuestros recursos naturales. El título IV, capítulo III lleva por nombre *Prevención y Control de Contaminación del Suelo*, consta de 11 artículos, del 134 al 144 inclusive, pero en su redacción existe poca precisión. Menciona que los residuos sólidos son la principal fuente de contaminación del suelo, siendo que son uno de los tantos ejemplos de contaminación. La LGEEPA parece no considerar otros contaminantes que se derraman como parte de actividades industriales, como los residuos del procesamiento del petróleo, incluyendo combustibles y petroquímicos, aceites gastados y metales, los cuales se consideran residuos peligrosos.

Gran parte de los contaminantes del suelo y el subsuelo se generan en instalaciones que cuentan con tanques de almacenamiento de combustibles, los cuales son utilizados como materias primas. También en cementerios industriales que son zonas restringidas o de difícil acceso. Otros ejemplos de contaminantes son las aguas residuales que son vertidas sobre el suelo sin previo tratamiento, los lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento, la infiltración en canales de aguas residuales a cielo abierto, las fugas de alcantarillados y los agroquímicos.

La LGEEPA es el instrumento fundamental de referencia para realizar las auditorías ambientales, si partimos de la base que la legislación ambiental en materia de suelo es deficiente, las auditorías ambientales que oficialmente se realizan deben ser también deficientes. De ahí surge la necesidad de contar con una ley precisa en los aspectos considerados y clara en su redacción para evitar interpretaciones erróneas.

Otros instrumentos de referencia necesarios para que la ley pueda aplicarse y que no existen son: un Reglamento para la Protección del Medio Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación del Suelo y del Subsuelo y las normas oficiales mexicanas correspondientes.

Como producto de estos vacíos en la legislación, no se le ha dado al suelo su valor como un recurso natural y por lo que no se ha enfatizado la necesidad de limpiar las zonas dañadas.

c) Desde el punto de vista político y social

En la vida diaria de nuestro México, el suelo es visto con solamente dos ópticas, como el escenario de actividades agrícolas y forestales o bien como una superficie donde se asientan edificaciones.

Prácticamente todos los problemas de contaminación de suelos son ocasionados por actividades antropogénicas, ya sea por derrames accidentales o irresponsables, durante la descarga de subproductos o bien durante el transporte dentro y fuera de instalaciones industriales o de mantenimiento.

Somos una sociedad sin una cultura ambiental, no hemos sido educados para respetar a nuestro ambiente y esto ha sido la consecuencia de una actitud pasiva, que ha llegado incluso a nuestros gobernantes. En el pasado no se exigió a las industrias corregir los daños ocasionados por el derrame de contaminantes y ahora, la carencia de instrumentos legales y regulatorios en materia de suelo envuelve a todos los aspectos involucrados, en un círculo vicioso del que cada vez es más difícil salir.

Para involucrar a la sociedad, necesita haber pruebas de que hay voluntad política y ética detrás de todas las acciones encaminadas a mejorar el ambiente y la calidad de vida. La sociedad pierde cada vez más credibilidad en los funcionarios públicos, los problemas ambientales se han convertido en un tema de discursos políticos y el ambiente está cada vez más deteriorado. Esto ha venido a causar mayor desinterés de la sociedad, la cual asume un papel pasivo y ya no expresa sus ideas.

d) Desde el punto de vista internacional

Aparentemente, hasta la fecha no se ha reportado la migración de contaminantes a los países vecinos, que hayan sido vertidos en nuestro territorio. Debemos estar concientes de que los contaminantes no distinguen fronteras y si las condiciones de un sitio favorecen su migración, estaríamos en graves problemas, de ahí la necesidad de tomar acciones antes de que pase más tiempo. Algo que nos ha evitado más problemas es el hecho de que el petróleo, por sus características, penetra muy lentamente

las capas del suelo, más bien se encuentra en la parte superficial. Cuando los derrames han ocurrido en las costas se ha facilitado relativamente su recuperación, dado que el aceite crudo flota en la superficie.

El compromiso que adquirimos recientemente ante la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá, es un reto de competitividad ante estas dos grandes potencias en el terreno comercial, pero también ambiental a través de los Acuerdos de Cooperación Ambiental y Laboral. Entre los objetivos prioritarios de los Acuerdos de Cooperación Ambiental, quedó establecido: *fortalecer la conservación, la protección y el mejoramiento del ambiente a partir de la cooperación y el apoyo mutuo en políticas ambientales con un alto nivel de protección; esto incluye el establecimiento de las leyes y reglamentos, así como su observancia y cumplimiento.*

El hecho de no contar con una legislación clara en materia de suelo y subsuelo, nos pone en desventaja, por lo que se hace prioritaria una modificación razonable.

Estados Unidos cuenta con una legislación bien establecida en materia prevención y control de la contaminación de suelo y subsuelo. La ley federal directamente exige la limpieza del sitio contaminado con petróleo, a través del Acta de Conservación y Recuperación de Recursos (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA). Otras leyes rigen durante la remediación del sitio, como el Acta Global de Respuesta, Compensación y Responsabilidad (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability, CERCLA) de 1980, mejor conocida como *Superfund* y el Acta de Reautorización a las Mejoras del Superfund (Superfund Amendments Reauthorization Act, SARA) de 1986, así como el Acta de Seguridad de Agua Potable (Safe Drinking Water Act, SDWA) y el Acta de Agua Limpia (Clean Water Act, CWA). El organismo encargado de que estas leyes se cumplan es la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA).

La EPA tiene varias estrategias para obligar a la limpieza de sitios, una de ellas se refiere a la obligación de reportar derrames o "liberaciones al ambiente", hay enormes multas y hasta encarcelamiento para aquellos que no lo hagan. Cuando un derrame ocurre, a través de la RCRA se obtiene la licencia para aislar el sitio por considerar que en el lugar hay materiales peligrosos, su limpieza se obliga por una resolución que se toma en la corte y los estándares impuestos para la limpieza son sustancialmente más

estrictos y caros. Esto hace más atractivo el limpiar un derrame por voluntad propia en lugar de llevar el asunto a juicio.

Por lo que respecta a Canadá, el gobierno federal ha promulgado varias leyes ambientales de aplicación general, además de que cada provincia tiene sus propios esquemas que regulan la descarga o emisión de sustancias en el ambiente y establecen medidas de protección ambiental y procedimientos de evaluación ambiental. En Canadá ha sido muy fácil la toma de acciones a emergencias ambientales, debido a que como parte de su cultura todos los recursos naturales realmente se protegen de la contaminación. Por ejemplo, la declaración inicial del Acta Canadiense de Protección Ambiental (Canadian Environmental Protection Act, CEPA) de 1988 dice que: *la protección del ambiente es esencial para el bienestar de Canadá, la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente es de interés nacional, en parte por aspectos de salud y además porque éstas no pueden ser contenidas dentro de barreras geográficas y es necesario cumplir con las obligaciones internacionales en materia ambiental.*

Por otro lado, los propósitos del Acta Canadiense de Evaluación Ambiental (Canadian Environmental Assessment Act, CEAA, que sustituye a Environmental Review Process Guidelines Order, EARP) de 1992, son *asegurar que los efectos ambientales de proyectos se revisen cuidadosamente antes de que las autoridades responsables inicien su desarrollo*, esto asegura también que *los proyectos que se realicen en Canadá o en sus territorios federales no causen efectos ambientales adversos ni dentro ni fuera de la jurisdicción en la cual los proyectos son llevados a cabo.* Además de la claridad de esta legislación, la participación pública ha sido un factor fundamental para que se tenga un ambiente verdaderamente limpio que incluye: agua, aire y suelo. El Plan Verde para un Ambiente Saludable (Green Plan for a Healthy Environment) ha establecido objetivos muy precisos para trabajar por un ambiente limpio.

Una situación que vale la pena señalar, es el hecho de que en México la limpieza de sitios contaminados se ha venido dando como una condición de inversionistas extranjeros interesados en la compra de empresas mexicanas. Es decir, para que el inversionista extranjero decida comprar o invertir capital en una empresa mexicana, es necesario demostrar que no hay contaminantes en el subsuelo del terreno donde la empresa ha venido realizando sus actividades desde años atrás, si los hay, se debe limpiar el sitio en un tiempo que legalmente se determina al momento de

la transacción. Esta situación ha abierto mercado a todo tipo de tecnologías y consultoras ambientales extranjeras, de las cuales se hablará más adelante.

II EL CONCEPTO DE CONTAMINACIÓN

El término contaminación puede definirse como la introducción al ambiente de un compuesto, en cantidad tal que incrementa su concentración natural y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de la materia y energía.

El petróleo es una mezcla muy compleja de cientos de compuestos químicos, sus características y la proporción de sus constituyentes varían en función de su origen geológico y geográfico. El petróleo es un producto natural, por lo que la propia naturaleza es capaz de reincorporar una muy pequeña fracción de éste a los ciclos biogeoquímicos, ya que la complejidad química de algunos de sus constituyentes hace que el proceso requiera de varios años.

Cuando la cantidad de petróleo en el ambiente es mayor de la que puede ser reciclada, el petróleo se convierte en un contaminante presentando un impacto negativo, ya que entre sus componentes existen altas concentraciones de sustancias que son consideradas como residuos peligrosos por su efecto dañino a la salud. Ejemplos de éstos son: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos, naftaleno, antraceno, fenantreno, cresoles, fenol, ciclopentano, ciclohexano y etileno. Algunos de ellos son cancerígenos como es el caso de benceno, naftaleno, antraceno y fenantreno. Por lo anterior, los derrames de petróleo son considerados residuos peligrosos.

Otros productos, como los bifenilos policlorados son completamente sintéticos y altamente tóxicos, es decir, muy ajenos a la naturaleza, por lo que no pueden ser degradados de manera natural, ni reincorporados a ésta.

Cada sitio tiene sus características particulares y por lo tanto su propia dinámica, esa es la razón por la que cada región puede tener diferente normatividad relacionada con los límites máximos permisibles para los contaminantes.

III. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN INSTALACIONES PETROLERAS

Como producto de las actividades petroleras los suelos son alterados por la construcción de rutas de acceso, remoción de la cubierta vegetal o edáfica para la instalación de campamentos y actitudes depredatorias sobre recursos bióticos por parte de los que realizan dichas actividades. Las vías de acceso se convierten en vectores de colonización espontánea y de asentamientos irregulares, sin importar los riesgos de fuga y explosión. Esto causa perturbación de los ecosistemas, desaparición de especies vegetales y desplazamiento de especies animales del lugar.

La contaminación de suelos y acuíferos ocasionada por la industria petrolera se presenta durante actividades de extracción, refinación, petroquímica, transporte, distribución, almacenamiento y comercialización, por lo que todas las empresas de PEMEX están involucradas, Refinación, Exploración y Producción, Gas y Petroquímica Básica, Petroquímica.

En las actividades de extracción se observan derrames y explosiones de hidrocarburos, acumulación de residuos de perforación y lodos aceitosos. En refinación y petroquímica se requieren grandes extensiones para la construcción de tanques de almacenamiento, así como de plantas industriales de transformación, sistemas para la generación y distribución de fluidos, vapores y de enfriamiento de agua. Se observa un consumo indiscriminado de agua, derrames, explosiones y descargas de residuos industriales de alta toxicidad y no biodegradables. Durante el transporte se presentan riesgos por derrame de residuos peligrosos.

Las redes de ductos de distribución están siempre sujetas a riesgos de accidentes de diversa índole como derrames, explosiones, incendios y fuga de gases. El almacenamiento en tanques es una situación similar.

Las tuberías, ductos y tanques de almacenamiento de combustibles, generalmente no se revisan con la frecuencia requerida, por lo que no se toman las medidas preventivas necesarias y los casos se atienden una vez que ocurre la ruptura de éstos. Además, las instalaciones petroleras están a la intemperie y una gran parte se encuentran en zonas costeras, donde la corrosión acaba con todos los elementos metálicos presentes. Otros derrames de hidrocarburos que ocurren accidentalmente y son menos considerados se refieren a las volcaduras de pipas y son parte de las actividades de transporte.

Los sitios de comercialización manejan menores volúmenes de hidrocarburos y derivados (gas doméstico, petróleo diáfano, diésel, gasolinas, grasas, aceites, solventes, resinas), pero generalmente estos lugares no cuentan con dispositivos adecuados para el control de emisiones y derrames al suelo, así como sistemas de recolección.

Algunos problemas de contaminación que han sido producto de descargas de residuos se encuentran en zonas pantanosas, donde el nivel freático sube de manera sorprendente en la temporada de lluvias. En estas zonas se hace muy difícil el acceso aún para realizar actividades de prospección.

Otro foco de contaminación de subsuelo en las industrias de refinación y petroquímica son las instalaciones antiguas que no fueron completamente desmanteladas y se han convertido en cementerios industriales. En estos sitios, la contaminación con hidrocarburos es mínima, los principales contaminantes son compuestos inorgánicos, muchos de ellos tóxicos, que se lavan fácilmente por efecto de las lluvias y así penetran al subsuelo.

IV. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELOS Y ACUÍFEROS

Una vez que ha ocurrido un derrame de contaminantes en el suelo, ocurren diversos fenómenos naturales que tienden a dirigirlos hacia las aguas subterráneas. Esto hace necesario el entender la forma en que los contaminantes penetran, migran y se dispersan en el subsuelo.

En términos generales, el comportamiento de los contaminantes está en función de sus características fisicoquímicas en las que se incluyen principalmente densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del medio que los rodea como son el tipo de suelo, su permeabilidad, el tamaño de las partículas, su contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales, también tienen una gran influencia. Todas las variables en su conjunto, definen el tamaño y la distribución tridimensional del bulbo o mancha de contaminación en una zona específica.

De acuerdo a su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: aquellos cuya densidad es menor que la del agua se denominan ligeros mientras que a los que poseen una densidad mayor a la del agua se les conoce como densos. Esta clasificación es importante ya que es lo que determina el comportamiento de los contaminantes en el acuífero. Los

ligeros tienden a formar una capa en forma de "nata" en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea, como las gasolinas, los aceites y el petróleo crudo. Los densos por el contrario, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden migrar en dirección al flujo del agua subterránea contaminando así el acuífero en toda su profundidad, ejemplo de éstos son los bifenilos policlorados.

La combinación de las características del subsuelo, de los contaminantes y las condiciones climatológicas del sitio pueden dar lugar a los diferentes procesos de transporte y distribución de contaminantes. Para entender el transporte y destino de contaminantes en el subsuelo es necesario realizar una buena caracterización del sitio con la cual se conocerán la carga hidráulica y la estratigrafía, así como los coeficientes de adsorción y la permeabilidad del suelo. Con esta información es posible calibrar modelos matemáticos que sean representativos de la distribución tridimensional de los contaminantes en el sitio.

V. LA AUDITORÍA AMBIENTAL COMO PARTE DE LA CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO

Por definición, una auditoría ambiental en materia de suelos se refiere a la identificación y evaluación del estado de la contaminación en suelo y subsuelo, incluyendo las aguas subterráneas.

Por otro lado, la caracterización de un sitio del que ya se sabe que ha sido afectado, se refiere a los estudios que permitirán conocer las características de funcionamiento del subsuelo como filtro amortiguador y el comportamiento de los contaminantes en él. Los estudios preliminares de dicha caracterización corresponden a los de una auditoría ambiental.

En los países avanzados, no se practican las auditorías ambientales de esta forma, basta con detectar la presencia de un contaminante en suelo o aguas subterráneas para proceder directa e inmediatamente a la caracterización geohidrológica y química del sitio y de los alrededores. La meta final de estas actividades es proponer alternativas para la limpieza del sitio.

Las etapas básicas de la caracterización de un sitio, que también corresponden a la de una auditoría ambiental en materia de suelo y subsuelo, se describen a continuación:

Recopilación de la información. En principio se requiere un plano del terreno donde se encuentran las instalaciones donde se puedan identificar las instalaciones subterráneas (tanques y ductos), los talleres de mantenimiento, las zonas de disposición de desechos e instalaciones antiguas. Estos datos servirán para detectar la fuente de la contaminación, por lo que es de gran utilidad ubicar las instalaciones en un plano que incluya las zonas circundantes para definir sitios que servirán como control. También se deberán recopilar datos hidrogeológicos, relacionados con la profundidad del nivel freático, la dirección del flujo de la corriente subterránea y la conductividad hidráulica, información que servirá para pronosticar la migración de los contaminantes hacia el acuífero. Un plano de ubicación de los pozos existentes y su caudal de extracción permitirán predecir el efecto sobre la población aledaña.

Reconocimiento del sitio. En la visita a campo se podrá contrastar toda la información recabada. En el caso de instalaciones petroleras o petroquímicas, se podrán registrar las áreas visiblemente contaminadas así como instalaciones o zonas potencialmente contaminantes.

Investigación inicial de la contaminación. La información obtenida servirá como base para definir los puntos donde se deberán perforar los pozos de monitoreo y donde se habrán de tomar muestras de suelo a las diferentes profundidades. Las muestras deberán ser llevadas a un laboratorio químico para la identificación y cuantificación de los contaminantes presentes. En la actualidad ya existen equipos analíticos para realizar pruebas en campo, lo que evita la pérdida de contaminantes de características volátiles. Con la información obtenida será posible realizar un diagnóstico del sitio, en el que se podrán identificar las manchas de contaminación y los gradientes que se forman en función de las características del suelo. Cuando se determinan las características de permeabilidad y porosidad en las muestras de suelo, se pueden correr modelos de migración de los contaminantes que son una herramienta de gran utilidad para el pronóstico y de seguimiento en las actividades de remediación.

Como resultado de la carencia de una legislación clara en materia de suelo y subsuelo en México, el ejercicio de la auditoría ambiental en esta materia se confunde. En los formatos oficiales lo referente a "*Control de la Contaminación del Suelo*" únicamente cuestiona sobre la generación y disposición de residuos sólidos y peligrosos, mientras que las instalaciones subterráneas que merecen mayor investigación dentro de esta materia, se dejan dentro de una sección titulada *Instalaciones*, a la cual se le da menor

importancia. Tampoco se considera que en los tanques subterráneos o sobre tierra pueden albergar combustibles o solventes que son empleados como materias primas, por lo que no corresponden a residuos, aunque pueden tener el mismo grado de peligrosidad.

En instalaciones petroleras en operación se han practicado auditorías ambientales, con el propósito de identificar áreas afectadas. Esto ha dado como resultado un inventario de los residuos generados, la detección de fuentes de contaminación y zonas de alto riesgo actual y potencial. No obstante, hace falta complementar la información sobre el tipo y la concentración de contaminantes presentes y las características de los suelos afectados, es decir, se requiere una caracterización completa para estimar la extensión de las manchas de contaminación y su posible llegada a las aguas subterráneas.

Durante la realización de las auditorías ambientales es indispensable considerar los terrenos aledaños a las instalaciones petroleras, mismos que en ocasiones han servido como cementerios o como zonas de vertido de desechos petroleros y que por la cercanía de poblaciones representan un alto riesgo para la salud.

VI. EL CONCEPTO DE REMEDIACIÓN

Una vez que se ha diagnosticado el estado de contaminación de un sitio, suelo y subsuelo, se deben plantear alternativas para su limpieza y establecer los niveles de limpieza. Es decir, el límite máximo de contaminantes que se aceptará en un suelo después de haber sido sometido a un tratamiento de remediación.

Dado que en México no existen norma oficiales (NOM) que establezcan estos niveles de limpieza, se puede seguir uno de los siguientes caminos: 1) tomando como referencia normas extranjeras, 2) por evaluación de riesgo o 3) en función del uso que se dará al suelo.

La concentración de contaminantes se expresa a través de un parámetro indicador, que corresponde al contaminante que está en mayor proporción o que es el más peligroso. Debido a que tampoco contamos con métodos analíticos oficiales para determinar la concentración de contaminantes en México, se acostumbra recurrir a los establecidos por otras instituciones oficiales extranjeras. Los más comunes son los métodos EPA (Environmental Protection Agency) y los ASTM (American Society for Testing

Materials), los cuales son identificados por una clave formada por dos números, el primero es progresivo y el segundo indica el año de publicación que en ciertos casos corresponde a una modificación del procedimiento.

La concentración de los contaminantes se puede evaluar de manera global como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), o bien se elige el más tóxico de sus componentes. En el caso de las gasolinas se cuantifican los hidrocarburos monoaromáticos totales como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) o cada uno de ellos por separado, algunos eligen solamente el benceno por ser el más tóxico. Para gasolinas y diésel también se cuantifican los HTP, para el caso del diésel se puede cuantificar alguno de sus hidrocarburos polinucleoaromáticos (HPNA) como naftaleno, antraceno o fenantreno que son también muy tóxicos. Existen varios métodos para cuantificar un mismo parámetro, pero algunos son específicos para muestras de agua y otros para muestras de suelo.

1. Tomando como referencia normas extranjeras

El ejemplo clásico es tomar como referencia los estándares establecidos por la EPA en los Estados Unidos. En ese país, no existe un listado de normas único, los gobiernos estatales han establecido sus propios límites permisibles, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo. En la Tabla 1 se presentan valores que rigen en algunos de los estados. Podrá observarse que para un mismo parámetro indicador, hay una amplia variación de nivel permisible, también se observa que las concentraciones en suelo (mg/kg o ppm, partes por millón) son mayores a las que se piden en agua (ug/l o ppb, partes por billón) debido a que se emplean los estándares para agua potable. Los niveles de limpieza para el benceno va de 0.005 a 50 mg/kg en suelo y de 0.2 a 71 ug/l en agua subterránea, en el caso del tolueno va de 0.3 a 200 mg/kg en suelo y hasta 200,000 ug/l para agua. La concentración permisible de gasolina en suelo medida como HTP es de 50 a 1000 mg/kg y solamente en dos estados, Georgia y New Jersey, se registra el uso de hidrocarburos polinucleoaromáticos como parámetros indicadores de la presencia de diésel o gasolina.

Tabla 1. Límites permisibles de contaminantes en suelos y aguas subterráneas en algunos estados de los Estados Unidos de Norteamérica

Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)		Método analítico	
			Suelo	Agua subterránea	Suelo	Agua subterránea
			(mg/kg)	(ug/l)		
Alabama	gasolina	benceno		5		EPA 602,624
		tolueno		1000		EPA 602,624
		etilbenceno		700		EPA 602,624
		xilenos		10,000		EPA 602,624
	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100		EPA 9071 EPA 418.1	
Arizona	gasolina	HTP		1		EPA 418.1
		benceno	0.13	5	EPA 8 020	EPA 502.2
		tolueno	200	1000	EPA 8 020	EPA 502.2
		etilbenceno	68	700	EPA 8020	EPA 502.2
		xilenos	44	10,000	EPA 8020	EPA 502.2
Arkansas	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100-1000		EPA 418.1 EPA 8015M	
		BTEX	0-400		EPA 8020	
California	gasolina	benceno	0.3-1		EPA 8020	
		tolueno	0.3-50		EPA 8020	
		etilbenceno	1-50		EPA 8020	
		xilenos	1-50		EPA 8020	
Delaware	gasolina diésel	HTP	100		EPA 418.1M EPA 9071 EPA 8015M	
		BTEX	10		EPA 3010 + 8020	

Tabla 1. Continuación.					
Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)		Método analítico
Florida	gasolina	benceno		1	EPA 602
		BTEX		50	EPA 602
Georgia	diésel	naftalenos		100	EPA 610
	gasolina	benceno		5-71	EPA 8020
		tolueno		1000-200,000	EPA 8020
		etilbenceno		700	EPA 8020
	gasolina	xilenos		28,718	EPA 8020
		BTEX		10,000	EPA 8020
		HTP	20-100		EPA 8020
		HTP	100-500		California M
	diésel	benzopireno		0.03-0.2	EPA 550
		antraceno		110,000	EPA 8270
Idaho		criseno		0.3	EPA 8270
		fluorantreno		370	EPA 8270
		fluoreno		14,000	EPA 8270
		pireno		11,000	EPA 8270
	gasolina	benceno		5	EPA 8020
		tolueno		1000	EPA 8020
		etilbenceno		700	EPA 8020
		xilenos		10,000	EPA 8020
		HTP	40-200		EPA 9015
	diésel	HTP	100-2000		EPA 8015
Kansas	acete gastado	HTP	100		EPA 418.1
	gasolina	benceno	1.4	5	EPA 502.2
		tolueno		1000	EPA 502.2
		etilbenceno		680	EPA 502.2

Tabla 1. Continuación.					
Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)		Método analítico
		xilenos		440	EPA 202.2
	gasolina	HTP	100		
	diésel				
	acete gastado				
	diésel	naftaleno		143	
Kentucky	gasolina	BTEX(c/u)	1	5	EPA 8240
Louisiana	gasolina	BTEX	100		EPA 8020
Michigan	gasolina	benceno	24	1	EPA 8020
		tolueno	16,000	790	EPA 8020
		etilbenceno	1500	74	EPA 8020
		xilenos	5600	280	EPA 8020
Missouri	gasolina	HTP	50-500	5-10	EPA 418.1
Montana	gasolina	HTP	100		
Nebraska	gasolina	benceno	0.005-50	5	EPA 8021
		BTEX	1-10,000		EPA 8021
Nevada	gasolina	HTP	100		EPA 8015
New Jersey	diésel	benceno	3-13	0.2	EPA SW 846
		tolueno	1000	1000	EPA SW 846
		etilbenceno	1000	700	EPA SW 846
		xileno	110-1000	40	EPA SW 846
		antraceno	10,000	2000	EPA SW 846
		naftaleno	230-4200		EPA SW 846

HTP: hidrocarburos totales del petróleo; BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos; M: método modificado.

2 Por evaluación de riesgo

Se refiere a los valores deducidos después de una evaluación de los riesgos específicos del lugar de estudio. Las normas oficiales en los estados de Estados Unidos fueron establecidas bajo este criterio.

Los estudios de evaluación de riesgo son el resultado de estudios de análisis de peligrosidad, de exposición y de riesgo. Con el análisis de peligrosidad se determina la toxicidad de los contaminantes en el sitio; mientras que con el de exposición se evalúan los medios por los cuales un ser humano encuentra los contaminantes que se generan de un sitio. En el análisis de riesgo, los niveles de exposición humana para un compuesto químico y la toxicidad resultante de tal exposición se compara con un valor de toxicidad crítica para ese compuesto. El valor de toxicidad crítica generalmente representa un nivel de exposición aceptable para el compuesto. Si el valor de toxicidad crítica se excede, las acciones de remediación de un sitio son inminentes.

El análisis de riesgo consta de tres principales criterios:

- la aditividad del nivel de peligrosidad para químicos que tienen efectos tóxicos similares (por ejemplo hemólisis de eritrocitos, daño nervioso o daño hepático);
- la aditividad del nivel de peligrosidad para exposición de un mismo compuesto encontrado en varias fuentes (por ejemplo agua, alimentos de origen vegetal y animal);
- los efectos sinérgicos, que se refiere al nivel de peligrosidad de dos o más compuestos que es mayor cuando están juntos en comparación con la suma de los efectos de los mismos compuestos por separado.

Existen siete metodologías para realizar estudios de evaluación de riesgo que se han desarrollado en los Estados Unidos, todas ellas deben incluir variables que claramente representen los niveles de peligrosidad, de exposición y de riesgo para un sitio en particular. En la Tabla 2 se resumen las diferentes metodologías, los criterios que emplean cada una de ellas están marcados con una cruz.

Las metodologías más interesantes son aquellas que consideran situaciones reales, como la presencia de mezclas de contaminantes tal como el petróleo y sus derivados, además de medios múltiples de exposición (suelo, agua, alimentos de origen vegetal y animal). La única que considera estos

dos aspectos es la desarrollada por la EPA (3) en la cual la evaluación de la salud pública involucra el establecimiento de objetivos y la estimación del riesgo para alternativas de remediación, por lo que toma en cuenta los siguientes aspectos:

- la posibilidad de nuevas formas de exposición causadas por la remediación;
- la necesidad de indicadores químicos;
- las concentraciones tóxicas son determinadas en los puntos de exposición;
- las velocidades de liberación de contaminantes;
- el riesgo crónico de compuestos no-carcinógenos;
- el efecto de la remediación sobre la salud a corto plazo;
- la permanencia de contaminantes por el fracaso de una remediación.

Aparentemente en México se han difundido muy poco este tipo de metodologías, por lo que sería muy conveniente profundizar en ellas para entender la forma en que se establecen los límites permisibles, que finalmente para el caso de los Estados Unidos corresponde al inciso anterior (6.2).

Tabla 2. Comparación de las diferentes metodologías para evaluación de riesgo*

Criterio	1	2	3	4	5	6	7
<i>Peligrosidad</i>							
Valor de toxicidad	X	X	X	X	X	X	
Toxicidad aguda no-carcinógena	X	X	X	X		X	
Toxicidad crónica no-carcinógena	X	X	X	X		X	
Toxicidad crónica carcinógena	X		X	X	X	X	
Mezclas de contaminantes			X	X	X		X
Factor de peso del cuerpo	X	X	X	X			
Factores farmacocinéticos	X						

Tabla 2 Continuación							
Criterio	1	2	3	4	5	6	7
Exposición							
Inhalación de aire	X	X	X			X	X
Inhalación de polvos	X	X	X				
Ingestión de agua	X	X	X			X	
Ingestión de suelo				X	X		
Absorción dérmica							
Consumo de vegetales	X	X					
Consumo de carne	X	X					
Consumo de pescado	X	X	X				
Destino ambiental	X	X	X				X
Factor de vida media			X	X			X
Factores específicos del sitio	X	X	X			X	X
Analisis de riesgo							
Aditividad del efecto de toxicidad	X		X				
Exposición a medios múltiples	X	X	X				
Efectos sinérgicos							

*Metodologías

- 1 Departamento de Servicios de Salud de California
- 2 Rosenblatt D H, Dacre J C, and Cogley
- 3 Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)
- 4 Ford K L, and Gurha P
- 5 Stockman S K, and Dime R.
- 6 Departamento de Ecología del Estado de Washington
7. Departamento de Servicios de Salud del Estado de California

3 En función del uso que se dará al suelo

En esta opción se analizan las propiedades de un suelo en función de algún uso que se le vaya a dar, también se analiza si su contaminación es un riesgo para la salud de los habitantes aledaños a la zona. Lo más común es pensar que el suelo se va a utilizar como medio para el crecimiento de

especies vegetales, aunque no necesariamente como una actividad económica, también se puede usar el suelo como material estructural en una construcción. Este es el criterio que se sigue en Holanda que también tiene alguna base en estudios de evaluación de riesgo. Algunos ejemplos de límites permisibles para contaminantes establecidos por la legislación holandesa se muestran en la Tabla 3, se podrá observar que éstos son más estrictos que los norteamericanos.

Tabla 3. Comparación de la concentración permisible de algunos contaminantes entre Estados Unidos* y Holanda

Contaminante	Suelo (mg/kg)		Agua subterránea (ug/l)	
	Estados Unidos	Holanda	Estados Unidos	Holanda
Cromo	800	100	50	1
Plomo	500	85	50	15
Benceno	0.1	0.05	5	0.2
Tolueno	50	0.05	1000	0.2

*Las cifras corresponden a promedios de todos los estados.

VII. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS

El desarrollo de las tecnologías de remediación a nivel mundial, se inició en los países desarrollados hace más de 10 años. El interés se dio después de haber encontrado en los acuíferos que abastecen de agua a las poblaciones, residuos de compuestos considerados peligrosos en concentraciones que sobrepasaban los límites permitidos.

Con la finalidad de proteger la salud de la humanidad, los gobiernos de países desarrollados establecieron como una actividad prioritaria, la búsqueda de opciones para reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos. En el caso de los Estados Unidos de Norteamérica, fueron la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía, a través del Superfund, quienes organizaron a las diferentes instituciones de investigación públicas y privadas para el desarrollo de tecnologías tendientes a la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con desechos militares en las localidades que funcionaron como puntos estratégicos durante la II Guerra Mundial. Otros países desarrollados siguieron caminos similares.

Como parte de las acciones que tomó el Superfund con patrocinio de la EPA, en 1990 se realizó un proyecto para evaluar las tecnologías europeas más exitosas e innovadoras donde se tenía un mayor avance. En la primera fase se identificaron 95 tecnologías innovadoras en uso o en investigación y se seleccionaron las más prometedoras, mismas que se estudiaron en la siguiente fase del proyecto, finalmente en la tercera fase, se seleccionaron las más exitosas tecnologías a gran escala que fueron extracción al vacío de un suelo contaminado con hidrocarburos, lavado *in situ* de un suelo contaminado con cadmio, arrastre con vapor *in situ* y otras tecnologías de biolabranza y lavado de suelo.

Las actividades de investigación realizadas en los Estados Unidos dieron origen a diversas tecnologías de remediación, todas ellas con diferentes bases de funcionamiento. Las que primero se desarrollaron fueron de tipo fisicoquímico, como la incineración, y la solidificación/estabilización. Posteriormente, surgieron otras innovadoras como la desorción térmica, la extracción con vapor, el lavado de suelo y las de tipo biológico. Otras tecnologías más recientes fueron la vitrificación, la encapsulación y el venteo seguido de condensación.

De manera simultánea al desarrollo de tecnologías de remediación se dio el auge de técnicas para la caracterización y monitoreo hidrogeológicos. De esta forma se desarrollaron diferentes arreglos de piezómetros que permitían conocer de una manera rápida la conductividad hidráulica, así como técnicas de perforación para la toma de muestras inalteradas, sin dejar atrás el desarrollo de modelos matemáticos y de paquetes de cómputo para generar mapas tridimensionales de la distribución de contaminantes.

Existen en el mercado mundial, diversas tecnologías para remediación que ya se han comercializado. Debe tomarse en consideración que no todas las tecnologías son aplicables a todos los casos. Para estar seguro de esto se deben realizar estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio y de ser posible pruebas de demostración en campo.

Las tecnologías de remediación pueden aplicarse *in situ* ó *ex situ*, generalmente las tecnologías *in situ* se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que el bulbo de contaminación se extienda en todo el acuífero. Las tecnologías *ex situ* se utilizan cuando la contaminación se presenta solamente en la parte superficial del suelo o bien en la zona no saturada hasta donde la maquinaria pesada permita la extracción del material.

Antes de iniciar un proceso de remediación es muy importante cerrar la fuente de contaminación, para asegurar la efectividad de cualquier estrategia planteada.

A continuación se analiza, de una manera general, la base de funcionamiento de las diferentes tecnologías de remediación disponibles en el mercado, tratando de hacer énfasis a su aplicación en sitios contaminados con hidrocarburos del petróleo.

1. Biorremediación

La presencia prolongada de los contaminantes en los suelos ha ocasionado que muchas bacterias ahí presentes hayan desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos. Esta capacidad es precisamente la base de las tecnologías de biorremediación, que en los últimos años han surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos. Una de las principales características de la biorremediación es que los contaminantes realmente se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solamente se transfieren de lugar.

Por lo que respecta a las técnicas de base microbiológica, inicialmente se aplicaron el composteo y la biolabranza (*land-farming*), así como el uso de reactores con cepas puras de bacterias degradadoras combinado con el bombeo e inyección del agua subterránea a través de pozos. Posteriormente, se aplicaron otras técnicas innovadoras como la bioestimulación y el bioventeo. La diferencia entre las diferentes tecnologías de biorremediación se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Funcionamiento de las diferentes tecnologías de biorremediación

Tecnología	Base de funcionamiento
Bioestimulación	Adición de nutrientes para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Bioaumentación	Adición de bacterias previamente seleccionadas por su capacidad para degradar contaminantes.
Bioventeo	Suministro de aire para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Biolabranza	El suelo se extiende en una capa de tamaño regular y se revuelve periódicamente.

En general, las ventajas de las tecnologías de biorremediación son:

- los contaminantes son realmente transformados y algunos completamente biodegradados;
- se utilizan bacterias cuyo hábitat natural es el suelo, sin introducir otras potencialmente peligrosas;
- es una tecnología segura y económica;
- el suelo puede ser reutilizado;
- las bacterias mueren cuando los nutrientes y los contaminantes orgánicos se agotan.

Entre las desventajas de la biorremediación están:

- que las bacterias pueden inhibirse por la presencia de tóxicos o altas concentraciones de contaminantes;
- el proceso no tiene éxito en suelos de baja permeabilidad;
- algunos aditivos como los surfactantes pueden tener efecto adverso en aplicaciones *in situ*;
- requiere largos periodos de tiempo;
- no es aplicable en sitios con muy altas concentraciones de hidrocarburos altamente halogenados, metales y desechos radioactivos.

Para los procesos *ex situ* se prefiere utilizar aditivos con actividad de superficie conocidos comúnmente como surfactantes. Dado que los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua, la función de los surfactantes es favorecer su solubilidad y hacerlos con ello más susceptibles de ser degradados por los microorganismos. Los surfactantes pueden ser sintéticos o de origen biológico, estos últimos tienen la ventaja de ser biodegradables por los mismos microorganismos del suelo, por lo que son preferidos sobre los primeros.

2. Arrastre por aire (air stripping)

Esta tecnología se aplica a contaminantes volátiles presentes en el agua subterránea. El aire se inyecta a profundidad y la recuperación de los contaminantes se realiza en una torre empacada o en un tanque de aeración y requiere acoplarse a otro tipo de proceso para recuperar o destruir los contaminantes retirados del sitio. Esta tecnología es muy empleada por su

efectividad y tiene la ventaja de tener un bajo costo de operación. Las desventajas son:

- uso limitado a compuestos volátiles;
- generación de ruido;
- los contaminantes no se destruyen por lo que requiere acoplarse a otro tipo de tecnología.

3. Extracción al vacío

Este tipo de tecnología se aplica solamente para la extracción de compuestos volátiles, por lo que no es una opción recomendable para la remediación de suelos contaminados con petróleo, pero sí es atractiva para manchas superficiales de gasolinas. Sobre la zona afectada se colocan cubiertas que permiten captar los gases extraídos. Este proceso requiere ser acoplado a otro para eliminar los contaminantes o bien recuperarlos y reciclarlos.

4. Solidificación/estabilización

Las tecnologías de solidificación y estabilización son empleadas para la inmovilización de contaminantes, reduciendo la generación de lixiviados. Son muy útiles para el tratamiento de residuos altamente peligrosos y que no pueden ser destruidos o transformados, como es el caso de los compuestos inorgánicos.

El origen de las tecnologías de solidificación es muy antiguo, se conocen como mezclas suelo-cemento y se han empleado para mejorar la capacidad de soporte de carga de un terreno. Dada la experiencia de su uso en la construcción de terraplenes y su facilidad de manejo, fueron adaptadas posteriormente a la remediación de suelos. Para que estas tecnologías tengan éxito, se debe asegurar un perfecto mezclado entre el cemento y el suelo y la humedad necesaria para lograr fraguado. No son adecuadas para suelos con alto contenido de grasas y aceites, por lo que no se recomiendan para suelos contaminados con hidrocarburos. La mezcla suelo-cemento, producto de la solidificación, tiene características de resistencia a la compresión que dependen de los aditivos empleados, que no son más que catalizadores del fraguado. Los valores de resistencia alcanzados son los que determinarán la utilidad del material obtenido, que

puede ser como base de un camino, terreno para recreación o cimiento de una pequeña construcción, aunque en términos generales el suelo tratado pierde algunas de sus propiedades originales.

Las tecnologías de estabilización emplean productos químicos inertes que microencapsulan los compuestos contaminantes, dando como resultado un material sólido en forma de pequeñas partículas. El suelo contaminado debe mezclarse perfectamente para lograr que los contaminantes queden retenidos permanentemente. El material resultante puede utilizarse como suelo o mezclarse con tierra no contaminada para permitir el desarrollo de especies vegetales.

Un aspecto importante que debe cuidarse al emplear este tipo de tecnologías es la composición química de los aditivos empleados, los cuales pueden contener compuestos que en concentraciones elevadas representan un riesgo para la salud. Estas tecnologías tienen la facilidad aplicarse en el propio sitio y la ventaja de requerir muy cortos tiempos de tratamiento, aunque solamente se emplean para manchas de contaminación superficiales.

5. Lavado de suelo

Esta tecnología se utiliza solamente para procesos *ex situ*. Con el suelo contaminado se construyen pilas las cuales se bañan con solventes orgánicos o mezclas de ellos, puede permitirse una recirculación para optimizar el uso del solvente. Tanto los solventes como los hidrocarburos pueden separarse y reciclarse, sin embargo, implica un gasto importante de solventes, un costo de separación de éstos y un alto riesgo de explosión.

6. Desorción térmica

El proceso se realiza *ex situ*, el suelo contaminado se introduce al sistema con ayuda de un tornillo sinfín y se aplica temperatura para que los contaminantes vayan desorbiéndose y puedan recuperarse de manera similar a una destilación. La desorción térmica tiene un menor costo que la incineración, el tiempo de tratamiento depende de las características del suelo y del contaminante y tiene la ventaja de que el suelo puede ser reutilizado. Sin embargo, no es una alternativa recomendable para suelos contaminados con petróleo, ya que conforme se va aumentando la tempe-

ratura el manejo del material se hace muy difícil y no se logran recuperar los contaminantes.

7. Por arrastre de vapor

Esta tecnología se basa en el mismo principio que la de arrastre con aire, la diferencia radica en la inyección de vapor a través de pozos. Los contaminantes que logran desorberse del suelo son los que se recuperan, pueden recuperarse para reciclarse o bien acoplarse a otro tipo de proceso para que puedan ser destruidos. No es muy recomendable para suelos contaminados con petróleo.

8. Incineración

La incineración es el tratamiento de elección para la destrucción de residuos peligrosos y la solución efectiva para suelos con alta concentración de contaminantes orgánicos, los cuales se llevan a una completa mineralización transformándose en dióxido de carbono el cual se descarga a la atmósfera, pero se genera una alta concentración de partículas suspendidas por lo que un buen equipo debe contar con sistemas de control de emisiones para asegurar que se trata de una tecnología limpia.

El material inorgánico resultante requiere tratarse como residuo peligroso antes de su disposición final, si rebasa las concentraciones permisibles (generalmente basado en normas extranjeras). Cuando esto ocurre se debe enviar a confinamiento. La operación de un proceso de incineración implica un alto costo, que está influido por la necesidad de transportación a la planta de tratamiento.

9. Confinamiento

El confinamiento no es precisamente una opción de remediación, se recomienda cuando se tienen residuos peligrosos que no pueden ser tratados mediante otras tecnologías, o bien acoplado a otros procesos como la incineración. Para esta opción debe considerarse el costo de envasado del material en contenedores especiales y el de transporte al sitio de confinamiento. En México aún no se cuenta con instalaciones seguras para ello, por lo que es preferible buscar otras opciones antes de pensar en el confinamiento.

10. Vitificación

Consiste en introducir dos electrodos en el suelo donde se localiza la mancha de contaminación, suministrar una muy alta carga eléctrica para lograr la vitificación de los contaminantes. La tecnología solamente opera en la zona no saturada, es aún más costosa que la incineración, por lo que no ha logrado llevarse a una escala mayor, solamente se ha operado a escala de demostración en campo.

De lo anterior se podría resumir que las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo son la biorremediación, algunas técnicas de estabilización y la incineración. Para asegurarse de cual es la idónea para un sitio en particular, es indispensable realizar pruebas preliminares de tratabilidad en el laboratorio, donde deben simularse las condiciones que prevalecen en el campo. Lo más recomendable es realizar pruebas de demostración en campo a escala piloto, sin embargo, ésta tiene un costo alto por lo que muchas compañías prefieren no hacerlo.

VIII. COSTOS DE REMEDIACIÓN

Un proyecto de remediación abarca tres etapas principales: la caracterización, las pruebas de tratabilidad y la conceptualización del proceso de tratamiento, es decir, el diseño, adecuación y puesta en funcionamiento del mismo.

Hacer un desglose de los gastos de un proyecto de remediación, es algo muy sano, ya que permite entender lo complejo del problema y la urgente necesidad de progreso que tiene México en esta materia.

Para estimar los costos de un proyecto de remediación se deben considerar los siguientes rubros: equipo, trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete. Los gastos generados en cada uno se desglosan a continuación.

Equipo

Los gastos requeridos corresponden a inversión, operación y desgaste del equipo, con la consecuente necesidad de mantenimiento. El equipo se

necesita en actividades de prospección y monitoreo, así como durante las propias actividades de remediación:

- prospección: perforación de pozos, toma de muestras;
- operación: bombas, compresoras, sistemas de extracción, mezcladoras, movimiento de materiales, reactores, centrífugas, filtros;
- monitoreo: toma de muestras y análisis *in situ*.

Trabajo de campo

Este incluye lo siguiente:

- reconocimiento del sitio con ayuda de planos de localización;
- perforación de pozos para toma de muestras, para monitoreo o para procesos de extracción-tratamiento-inyección;
- instalación de equipo de proceso o auxiliares;
- movimiento de materiales común en los procesos *ex situ*;
- operación y supervisión en todas las actividades.

Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio es de dos tipos analítico y de adecuación a las condiciones de campo:

- análisis químicos para conocer el tipo y concentración de los contaminantes;
- análisis fisicoquímicos para conocer las características del suelo;
- pruebas de tratabilidad para evaluar la capacidad y eficiencia de la eliminación de contaminantes.

Trabajo de gabinete

Es una actividad de tipo administrativo para integrar todas las actividades referentes al proyecto, a ésta corresponden:

- calendarización;
- planeación;
- diseño;

- análisis e interpretación de resultados;
- elaboración de informes.

IX. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

El suelo es un recurso natural difícilmente renovable, por lo que para eliminar los contaminantes de un sitio afectado, deben buscarse alternativas factibles y económicas que no lleven a la destrucción o confinamiento del suelo a menos que sea el último recurso.

Hay en el mercado diversas tecnologías de remediación y también diversas compañías que ofrecen sus servicios. En aspectos de remediación de suelos y otros servicios para el control de la contaminación no es recomendable adjudicar un contrato únicamente por licitación, ya que se corre el riesgo de un fracaso en el servicio y consecuentemente una pérdida de recursos y de tiempo.

La selección de una tecnología va acompañada de la selección de la compañía que la aplicará. Hay dos caminos principales para realizar esta selección, una es evaluar los antecedentes curriculares de la compañía y la otra evaluar las bases científicas de las tecnologías. Se puede hacer una selección en trabajo de gabinete, o bien probar las tecnologías en campo a escala de demostración. Un ejemplo de ésta opción se ha venido desarrollando para PEMEX-Refinación a través del servicio EOE-7242, en el que participan el Instituto Mexicano del Petróleo y la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Ingeniería. Los criterios que se han considerado para la evaluación se presentan a continuación

Evaluación en trabajo de gabinete:

- experiencia previa avalada por usuarios y por una autoridad ambiental;
- base científico-tecnológica de los desarrollos;
- estrategia para la evaluación técnica del problema;
- antecedentes curriculares del personal técnico.

Evaluación en campo:

- desarrollo de pruebas de tratabilidad en el laboratorio;
- estrategia para las pruebas de demostración en campo;
- capacidad técnica del personal;
- apoyo analítico especializado;
- efectividad en la eliminación de contaminantes;
- tiempo en que se logra la eliminación de contaminantes;
- costo por unidad de volumen tratado;
- impacto ambiental del proceso;
- seguridad ambiental durante y posterior al tratamiento.

A cada uno de los rubros anteriores se le asignó un peso específico con la finalidad de hacer una evaluación objetiva que arrojará cifras y no únicamente estimaciones. A través de la estrategia planteada se ha logrado la evaluación tanto de la eficiencia de la tecnología como del desempeño de la compañía, además de que se han podido probar diferentes tipos de tecnologías. Para la realización de las pruebas en campo se eligió un suelo con altos niveles de contaminación, medida como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), con la idea de que las tecnologías que logren resultados exitosos en los peores casos, puedan hacerlo en suelos menos contaminados. A través de esta evaluación PEMEX-Refinación podrá contar con los elementos técnicos y económicos para asignar contratos con mayores posibilidades de éxito.

X. ACCIONES PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS EN MÉXICO

1. Las empresas de consultoría ambiental

Como se mencionó anteriormente, la remediación de suelos es una práctica que se está dando recientemente en México, para el caso de PEMEX, la institución ya cuenta con listas de prestadores de servicios que han venido realizando trabajos petroleros, dichas compañías cuentan con autorización del Instituto Nacional de Ecología para el transporte y manejo de residuos peligrosos. Esas mismas compañías han encontrado buenas oportunidades de negocio, ofreciendo servicios de remediación, el problema es que sus técnicos no cuentan con los conocimientos necesarios para

realizar dichos servicios. Algunas de ellas se han asociado a través de las llamadas *joint ventures* con firmas extranjeras y sus asociados toman participación directa en los proyectos, otras son solamente representantes de firmas extranjeras y aplican las tecnologías como una receta de cocina, pero no pueden dar soluciones a imprevistos porque no tienen el dominio de la tecnología.

Un aspecto que llama la atención, es el hecho de que en una gran proporción, las compañías se presentan como "líderes" en procesos de remediación. En la práctica se ha podido constatar que ese adjetivo es sólo parte de la mercadotecnia y que lo que dicen no siempre es verdad. Aquí es donde debe plantearse una estrategia de selección para no arriesgar con principiantes, dado que el presupuesto para actividades de control ambiental generalmente es limitado, dado que se trata de acciones que no generarán ganancias económicas.

2. Los organismos gubernamentales involucrados en materia ambiental

Como ya se sabe, en México los aspectos relacionados con el ambiente son competencia directa de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca a partir del presente año. Esta se apoya en el Instituto Nacional de Ecología (INE) para el desarrollo de los instrumentos regulatorios y certificación de actividades para el control del ambiente, y en la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) para los estudios de impacto ambiental y auditorías ambientales. Una situación compleja que se está dando es que estas dos instituciones han establecido ciertas reglas sin que exista un marco jurídico claro. Desafortunadamente es cada vez mayor la cantidad de trabajo que deben atender dichos organismos y menor el presupuesto con el que deben realizarlo, requieren de especialistas que no pueden contratar y no pueden dar opciones de actualización a sus empleados. Lo anterior les ha generado ya una imagen muy politizada reforzada por algunas situaciones poco éticas.

Por lo que respecta a remediación de suelos contaminados, las instituciones citadas no han mostrado un amplio dominio del conocimiento, aunque hay que reconocer que sí se ha logrado mucho. Pero en este caso se deben redoblar esfuerzos ya que suelo y subsuelo no han sido suficientemente abordados. Dichas instituciones deberían apoyarse más en las universidades, sin embargo, el canal de comunicación no se ha dado abiertamente, sólo para algunos casos específicos. Además, el gobierno

federal debería dar un mayor apoyo, sabiendo el compromiso que se tiene a nivel nacional porque ya no es posible descuidar de esa manera nuestros suelos, ni es conveniente la imagen que se da hacia el exterior.

Hay varios aspectos que es necesario abordar de manera urgente, y para los cuales sería indispensable trabajar con grupos interdisciplinarios e interinstitucionales, los cuales se citan a continuación:

- la creación de un Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de Suelo y Subsuelo que responda a la Legislación Ambiental correspondiente que está en proceso de revisión;
- la preparación de especialistas en evaluación de riesgo en materia de contaminación de suelo y subsuelo, que puedan aportar elementos adecuados a nuestro medio durante la creación de las normas técnicas correspondientes;
- la generación de los instrumentos regulatorios (Normas Oficiales Mexicanas) fundamentales para las acciones de remediación de suelos, como son, los límites permisibles de contaminantes que se convertirán en los niveles de limpieza para sitios contaminados y la metodología oficial para el seguimiento de las actividades de remediación;
- revisión y adecuación de los formatos oficiales de auditorías ambientales donde se integre en un solo rubro toda aquella información correspondiente a contaminación de suelo y subsuelo incluyendo la existencia de cementerios y zonas fuera de las áreas de proceso (se pueden citar dos ejemplos, la investigación de tanques subterráneos está en el apartado de "Instalaciones" y debe ir en "Contaminación de Suelo", además, el apartado de "Contaminación del Suelo" debe incluir también el "Subsuelo");
- desarrollo de evaluaciones más objetivas donde se le de un peso específico a los aspectos correspondientes a una auditoría ambiental, para arrojar cifras que puedan interpretarse como "calificaciones", esto elimina la subjetividad, permite homogeneizar los diferentes criterios y ahorra muchas horas de interpretación y redacción (algo que podría servir de ejemplo, es una metodología desarrollada en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, para realizar estudios de impacto ambiental con ayuda de computadora, la cual ya ha sido probada en situaciones reales);

— desarrollo de metodologías objetivas para la evaluación de tecnologías para remediación de sitios contaminados (la desarrollada por el Instituto de Ingeniería, UNAM e Instituto Mexicano del Petróleo para PEMEX-Refinación podría servir de ejemplo y como base para ser enriquecida).

Por otro lado, los organismos gubernamentales deberán trabajar mucho en aclarar su interrelación, referida a los aspectos de contaminación de suelo y subsuelo, entre ellos: la Comisión Nacional del Agua, la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

3. El papel de las universidades

Preparación de personal capacitado. A pesar de la importancia de los problemas ambientales y de la necesidad de soluciones adecuadas a nuestro medio, no existen carreras a nivel licenciatura que permitan la formación de profesionales de buen nivel, con una visión muy dirigida al control de la contaminación ambiental, mucho menos en lo que se refiere al recurso suelo. Las áreas técnicas donde las universidades necesitan reforzar la formación de profesionistas con enfoque ambiental de muy alto nivel son: hidrogeología, geociencias, geotécnica, fisicoquímica, química analítica y biotecnología, entre otras.

A nivel posgrado existen más opciones para la preparación de personal más especializado, además los estudiantes cuentan ya con una base de licenciatura. Esto hace más fluida la enseñanza, sin embargo, hay poco personal académico a nivel posgrado con experiencia en control de la contaminación, éste generalmente se encuentra realizando trabajos en campo. Otra opción son los cursos de actualización, en donde se tiene la gran ventaja de contratar profesores por un cierto número de horas, las necesarias para impartir temas muy especializados. A este respecto, las universidades han estado realizando una labor importante.

Otra área que requiere de especialistas es la legislación, las universidades deberán preocuparse por generar "abogados ambientales" que adquieran esta visión durante su formación, no que se formen en el ejercicio de su profesión. Los países desarrollados tienen amplia experiencia en esta materia algunos esquemas podrían servir como base para su adecuación en México.

Desarrollo, adaptación e innovación de tecnologías. Esta actividad puede desarrollarse de manera institucional o como apoyo directo a empresas de consultoría. Para que la interacción entre las universidades y las empresas de consultoría ambiental se pueda dar fácilmente, se deben contemplar dos aspectos importantes: 1) que el investigador aborde el problema tratando de cumplir con el objetivo del proyecto por el camino más corto, sin desviarse por la curiosidad científica, y 2) que la empresa acepte que los gastos de investigación son altos, que ésta es necesaria y que toma su tiempo.

Con base en lo anterior y considerando que cualquier nuevo desarrollo podría tomar muchos años de trabajo antes de ser llevados a la práctica, lo más recomendable para nuestro país es recurrir a las tecnologías existentes que ya hayan sido probadas en otros sitios contaminados y realizar los ajustes necesarios, innovación o adaptación, para aplicarla en los sitios a remediar, dado que cada uno tiene sus características particulares.

Evaluación de proyectos de remediación. En este caso investigadores universitarios se pueden involucrar como evaluadores de tecnologías o desarrollando elementos necesarios para que PEMEX pueda cumplir mejor su función en el cuidado del ambiente. De esta forma, se tiene la ventaja de contar con una asesoría de muy alto nivel y muy versátil, tanto como sea necesario.

Dado que la llegada de tecnologías de remediación a nuestro país se está dando actualmente y se tiene ya la conciencia de remediar, a todas las empresas de PEMEX les convendría seleccionar las tecnologías adecuadas y a las empresas que se encargarán de llevarlas a la práctica, con otros elementos de mayor peso que los que se tienen en un concurso de licitación, donde el criterio más empleado es el presupuesto más bajo, las compañías que presentan presupuestos económicos, no necesariamente son las que tienen una mejor base tecnológica. Este aspecto es un motivo de amplia discusión.

4. Educación ambiental para la sociedad

En términos generales, la sociedad carece de muchos conocimientos que son necesarios para comprender la importancia de su participación en la vida diaria, ya sea como actores principales o bien como afectados por acciones tomadas equivocadamente. Los avances que se han logrado para "educar a la sociedad" en materia de aire podrían servir como ejemplo,

en general, la sociedad actualmente se preocupa un poco más por tener un aire limpio. Mucho se tendrá que trabajar en materia de agua todavía y más aún en materia de suelo, donde no está claro el papel de éste como un "recurso natural".

XI. LOS COMPROMISOS DE PEMEX

El desarrollo de tecnologías ambientales para el control de la contaminación ya permite en la actualidad atender derrames casi de inmediato, por lo que es posible detener el avance de los contaminantes, además de la posibilidad de recuperar el aceite perdido y retornarlo al proceso. En cambio, los derrames que ocurrieron en el pasado son tan antiguos como la industria petrolera, y por el grado de intemperización que tienen se hace muy difícil su tratamiento.

Como parte del marco jurídico de PEMEX en materia ambiental, el artículo 23 del Reglamento de Trabajos Petroleros indica que PEMEX tiene la obligación de mantener todas sus instalaciones en buen estado sanitario y de conservación. Por otro lado, en el artículo 37 se señala que corresponde al organismo permisionario la responsabilidad por los daños y perjuicios que se ocasionen al tránsito terrestre, al fluvial o al marítimo, al ambiente, la pesca, la agricultura, la ganadería o a terceras personas.

En su informe 93-94, PEMEX establece que como resultado de las contingencias ambientales por accidentes ocurridos durante el bienio y que produjeron impactos al ambiente, se llevaron a cabo trabajos de restauración y reforestación orientados a restituir a sus condiciones originales en 450 hectáreas en donde se emplean técnicas de biorremediación, químicas y físicas.

Lo anterior muestra que PEMEX como empresa está conciente de sus obligaciones y su responsabilidad hacia el ambiente, pero hace falta aún más. En algunos casos todavía impera el maquillaje sobre las verdaderas soluciones, y se han enterrado muchos derrames en lugar de tratarlos. Hace falta estimular más la ética y el respeto al medio ambiente a través de la educación que pueda brindarse a los empleados que realizan directamente las actividades en campo, quienes están muy involucrados

XII. CONCLUSIONES

En este documento se ha tratado de enfatizar la función tan importante del suelo como barrera de protección de los acuíferos que son la fuente de suministro de agua a las poblaciones y la imperante necesidad de limpiar los suelos contaminados, con la finalidad de proteger la calidad del agua que utilizarán las generaciones futuras.

La diversidad de los aspectos incluidos son una muestra de lo compleja que es la tarea de remediación de un sitio contaminado, no por los aspectos técnicos, ya que los grandes avances de investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras extranjeras han abierto una amplia gama de posibilidades para abordar los problemas de contaminación de suelos y acuíferos. El problema es que como país, aún no estamos preparados para enfrentar con herramientas propias las acciones de remediación, no tenemos el marco jurídico que sirva como el punto de partida, ni los instrumentos regulatorios auxiliares, sin embargo, tenemos que empezar a actuar. El hecho de que no podamos esperar más tiempo, nos puede llevar a tomar decisiones que tal vez no sean las más adecuadas, pero tendrán que modificarse sobre la marcha, como ha sucedido en numerosas acciones para el control de la contaminación ambiental.

Uno de los aspectos que conviene analizar y discutir ampliamente es el hecho de tomar como nuestros, las regulaciones y los procedimientos que han seguido otros países, específicamente Estados Unidos. Tal vez como punto de partida sí conviene hacerlo, porque no tenemos alguna base, pero tendremos que ir generando lo propio y dejar que se vaya retroalimentando de manera constante al poner en práctica algunas acciones. En varias situaciones hemos tomado como referencia, cualquier valor de las concentraciones permisibles de contaminantes que rigen en Estados Unidos, sin saber cómo fueron establecidas y sin entender por qué para un mismo parámetro indicador existe un amplio intervalo para escoger un valor. Para estar seguros que los valores elegidos fueron los adecuados tendremos que prepararnos para realizar los estudios de evaluación de riesgo aplicables específicamente a los sitios donde están los problemas de contaminación de suelos.

Otro aspecto en el que debemos generar herramientas modernas es en las auditorías ambientales, en la evaluación de tecnologías para remediación y en la selección de compañías de servicios ambientales. Aquí,

necesitamos crear esquemas más objetivos donde se puedan unificar los criterios de los diferentes especialistas y en los que las opiniones se emitan de una forma cuantitativa con base en los aspectos de mayor peso específico. Esto dará una mayor claridad a las evaluaciones y se podrán tener resultados precisos en un menor tiempo.

Finalmente, la complejidad de los trabajos de remediación de suelos contaminados con petróleo que PEMEX tendrá que dar inicio en un corto tiempo, sugiere la integración de grupos interdisciplinarios e interinstitucionales en los que especialistas de alto nivel en aspectos técnicos y legales aporten nuevas ideas para responder con más confianza a éste que es uno de sus grandes retos.

XIII. BIBLIOGRAFÍA

- AGUIAR, S. A., 1995. "Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI", *Terra* 13(1): 3-16.
- BENIDICKSON J., DOERN G.B., OLEWILER N., Getting the Green Light, Environmental Regulation and Investment in Canada. C.D. Howe Institute
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1995, 22a. edición, Ediciones Delma.
- EPA, 1991. *Understanding Bioremediation, A Guide for Citizens*, EPA/540/2-91/002
- KOSTECKI P.T., CALABRESE, E. J., and HORTON, H. M., 1989. "Review of present risk assessment models for petroleum contaminated soils. Chap. 21", in *Petroleum Contaminated Soils*, Vol. I, De. Kostecki P.T. and Calabrese E.J., Lewis Publishers, Inc. USA.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*, 1994, 3a. ed., Ediciones Delma.
- OLIVER T., KOSTECKI P., and CALABRESE E., 1993. *State Summary of Soil and Groundwater Cleanup Standards for Hydrocarbons*, Association for the Environmental Health of Soils, for EPA Office of Underground Storage Tanks
- PIEHETER T.H., NUNNO T. J., and WALTERS, J. S., 1990. EPAs Assessment of European Contaminated Soil Treatment Techniques. *Environ. Progress* 9(2): 79-86.

- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1994. Formato oficial para auditorías ambientales, Subdirección de Auditoría Ambiental.
- RUSSELL D.L., 1992. *Remediation Manual for Petroleum-Contaminated Sites*, Technomic Publishing Co., USA.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, *Tratado de Libre Comercio en América del Norte, Acuerdos de Cooperación Ambiental y Laboral*, 1993.
- Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología. 1993-1994. *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente* (Capítulo 7: Suelo y Capítulo 13: Industria Petrolera). México.
- United States Department of Energy, Office of Environmental Restoration and Waste Management, 1993. *Technology Development, A National Program of Demonstration, Testing and Evaluation*.
- United States Environmental Protection Agency, 1993. *Cleaning up the Nation's waste sites: Markets and Technology Trends*.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

La responsabilidad jurídica en el daño ambiental

**Dra. Susana Saval Bohórquez
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

LA RESPONSABILIDAD JURÍDICA EN EL DAÑO AMBIENTAL

Primera edición: 1998

DR. © 1998. Universidad Nacional Autónoma de México

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Circuito Maestro Mario de la Cueva s/n
Ciudad Universitaria, C.P. 04510, México, D. F.

PETRÓLEOS MEXICANOS
Av. Marina Nacional 329, Col. Huasteca, C. P. 11311, México, D. F.

Impreso y hecho en México

ISBN 968-36-6574-8

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES JURÍDICAS

Serie I. Varios, Núm. 87

Edición y formación en computadora al cuidado de Eddio Saucedo



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PETRÓLEOS MEXICANOS

México, 1998

LA REPARACIÓN DEL DAÑO. ASPECTOS TÉCNICOS: REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Susana SAVAL BOHÓRQUEZ

SUMARIO: I. *Introducción*. II. *Remediación y restauración*. III. *El suelo como recurso natural*. IV. *Materiales y residuos peligrosos*. V. *Impactos ambientales de la industria petrolera*. VI. *Evaluación del daño*. 1. *Análisis del sitio y sus alrededores*. 2. *Análisis geohidrológico*. 3. *Análisis químico del (los) contaminante (s)*. 4. *Análisis fisicoquímico*. VII. *Alternativas técnicas para la reparación del daño*. 1. *Medidas de mitigación*. 2. *Remediación*. 3. *Confinamiento*. 4. *Restauración*. VIII. *Procedimiento administrativo para la limpieza de sitios contaminados*. 1. *Acreditación de la tecnología*. 2. *Evaluación del plan de remediación*. 3. *Establecimiento de los niveles de limpieza*. IX. *Marco legal para la limpieza de sitios contaminados*. X. *Instrumentos legales de apoyo*. XI. *Conclusiones*. XII. *Bibliografía*.

I. INTRODUCCIÓN

La industria petrolera en México tiene un significado estratégico de primera magnitud, que se manifiesta por los niveles de contribución a la economía nacional. La necesidad de satisfacer, día con día, una mayor demanda de energéticos ha ocasionado el crecimiento de esta industria, y con ello el impacto sobre los recursos naturales, los ecosistemas y las zonas urbanas.

Ante las reformas de la Ley Federal del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, donde se camina hacia la responsabilidad por daño ambiental, se requieren elementos técnicos que faciliten la interpre-

tación de las causas que ocasionaron el daño y de las posibles formas para la reparación del mismo, que sirvan de apoyo en el campo jurídico.

El objetivo del presente capítulo es precisamente aportar los elementos técnicos que puedan servir como base para evaluar el daño que ha sufrido un sitio debido a la presencia de contaminantes de la industria petrolera y la manera como debe proceder la reparación del mismo. Entendiendo al daño, no solamente como lo que se aprecia a simple vista, sino también los efectos que ocurren en el subsuelo.

II. REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

En el artículo 3 fracción XXXIII de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), *restauración* se define como *el conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales*.

De acuerdo al *Diccionario de la Lengua Española* (1992) *restaurar* es *reparar, renovar o volver a poner algo en el estado que antes tenía; reparar una pintura, escultura o edificio del deterioro que ha sufrido*. Esta definición aplica perfectamente en la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas, cuando se refiere a la protección, conservación, restauración y recuperación de monumentos arqueológicos, artísticos e históricos.

En las reformas hechas a la LGEEPA,¹ no se aprovechó la oportunidad para dar más precisión a las definiciones, y desafortunadamente se corre el riesgo de interpretar la restauración de sitios contaminados, como una actividad meramente cosmética, más que de saneamiento o limpieza.

El término *remediación* no está registrado en los diccionarios de la lengua española, es por eso que en nuestro país no ha sido incluido en documentos oficiales. Se ha vuelto del dominio público como una traducción de *remediation* que en Estados Unidos, Canadá y otros países de lengua inglesa, se ha venido usando para referirse a todas aquellas actividades de limpieza de sitios contaminados.

Un término que sí aparece en los diccionarios de la lengua española es el verbo *remediar*, cuya definición es *poner remedio al daño, corregir o*

enmendar una cosa; socorrer una necesidad o urgencia; librar, apartar o separar de un riesgo; evitar que suceda algo de que pueda derivarse algún daño o molestia. Si nos ubicamos dentro del terreno ambiental, esta definición es precisamente lo que se busca una vez que se detecta un daño por contaminación.

En una propuesta de anteproyecto de norma,² se hizo un intento para definir *remediación* de la siguiente forma: *conjunto de acciones necesarias para llevar a cabo la limpieza de cualquier descarga o sospecha de descarga de contaminantes, incluyendo mas no limitado, a la realización de una evaluación preliminar, investigación del sitio, determinación del alcance del problema, estudio de factibilidad y acciones correctivas*. La definición es muy completa, pues contempla la limpieza de un sitio contaminado en todo su concepto.

Con base en lo anterior, se puede decir que los términos, *restaurar* y *remediar*, aplican en el terreno ambiental sólo si son empleados en el contexto de su definición. Para ilustrar lo anterior, se presentan tres casos:

1. Únicamente restaurar, es el hecho de hacer crecer plantas en un sitio dañado sin haber eliminado o destruido los contaminantes previamente. Esto suena extraño, sin embargo, se hace depositando una importante capa de desechos agroindustriales y de suelo limpio encima de derrames de petróleo o de descargas de lodos aceitosos, de tal forma que éstos quedan enterrados y encima se siembran pastos y especies vegetales de raíz corta. Cuando estas especies se desarrollan y crecen, se restablecen condiciones para la evolución de procesos naturales, a pesar de que no se haya limpiado el suelo. Otro ejemplo que no se relaciona con la industria petrolera se presenta en los rellenos sanitarios, donde todos los desechos sólidos quedan enterrados y en la superficie se construyen alamedas y lugares de recreación, sin importar el efecto de materiales contaminantes en la profundidad.
2. Únicamente remediar, es decir, limpiar el suelo sin devolverle su función biológica. Esto se practica principalmente dentro de instalaciones industriales en operación o que van a ser desmanteladas, que son sitios en donde no se observaba el desarrollo de especies vegetales o animales antes de ser contaminados.

¹ Diario Oficial de la Federación, 1997

² INE, 1996

- 3 Remediar y restaurar, esto es, limpiar y demostrar que el suelo recupera su actividad biológica. Un ejemplo de este caso es cuando se logra la eliminación de contaminantes o su transformación en compuestos menos dañinos, y posteriormente se permite el crecimiento y proliferación de especies vegetales y/o animales. Esto se aplica a suelos y cuerpos de agua que antes de ser contaminados cumplían con una función biológica.

Para ser congruentes con el título y el contenido del presente trabajo, así como con las definiciones correctas, se hará distinción entre los dos conceptos: *remediación y restauración*.

III. EL SUELO COMO RECURSO NATURAL

Un recurso natural es *un elemento natural que se presenta sin la inducción del hombre y es susceptible de ser aprovechado en beneficio de éste*. El suelo entra en esta definición de recurso natural, y además tiene la característica de ser no renovable. Tiene diversas funciones, como servir de filtro amortiguador al limpiar el agua de lluvia que recarga los acuíferos, es un medio productor de alimentos, es hábitat biológico y de reserva genética, es el medio físico para la construcción, además de fuente de materias primas y herencia cultural.³

En la LGEEPA, la importancia del suelo está más bien dirigida hacia actividades agrícolas y forestales, esto es, a la capa superficial del suelo. Para ser una ley federal, es muy poco el énfasis que se hace en relación al subsuelo y llama la atención que en ninguno de los artículos referidos a la Prevención y Control de la Contaminación del Suelo (título IV, capítulo III) se menciona el término subsuelo. En la Consulta Nacional sobre Legislación Ambiental que llevó a cabo la Comisión de Ecología de la Cámara de Diputados en julio de 1995, se presentó una propuesta de modificaciones al capítulo citado.⁴ Uno de los aspectos principales de dicha propuesta era dejar asentado "suelo y subsuelo" cada vez que en la redacción de la ley original se hablara de "suelo" en casos específicos de prevención y control de la contaminación, pero desafortunadamente ésta

³ Saval, 1995.

⁴ Saval, 1995.

no fue tomada en cuenta. La Ley Ambiental del Distrito Federal en cambio, sí refiere a los dos términos en conjunto, "suelo y subsuelo", incluso, en muchas ocasiones menciona también a los acuíferos, cuando se habla prevención y control de la contaminación.

Por otra parte, cuando se habla del uso que se le va a dar al suelo, comúnmente se cita el término de vocación natural. Este concepto, por definición, se refiere a *las condiciones que presenta un ecosistema para sostener una o varias actividades sin que se produzcan desequilibrios ecológicos*. La aplicación correcta de este término, debe enfocarse a suelos de uso agrícola y forestal, cuando se estudian las especies vegetales que pueden desarrollarse en sitios específicos, cuyo material geológico posee características fisicoquímicas particulares. En el caso de sitios contaminados, su aplicación se debe referir a las actividades que se van a desarrollar en el sitio después de la limpieza del sitio, como suelo recreativo, residencial, comercial, industrial o de conservación.

IV. MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS

De acuerdo a la LGEEPA, un *material o residuo peligroso por sus características representa un peligro para el ambiente, la salud o los recursos naturales*. Para calificar a un material o residuo como peligroso se debe aplicar el análisis conocido como CRETIB. El nombre de este análisis lo conforman las siglas que corresponden a cada una de las características del material como sigue: Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico-Infeccioso. Dicho análisis se debe practicar de acuerdo a la normatividad⁵ y se considera confiable únicamente cuando se realiza en los laboratorios reconocidos por el Sistema Nacional de Laboratorios de Prueba.⁶ Cualquier material o residuo cuyo resultado sea positivo para alguna de las características citadas, se considera peligroso.

Los suelos contaminados con hidrocarburos se consideran materiales peligrosos, por lo que anteriormente se solicitaba el análisis CRETIB. Sin embargo, el INE, a través de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, se ha dado a la tarea de rescatar al suelo como

⁵ NOM CRP-052-ECOL/1993 y NOM CRP-053-ECOL/1993.

⁶ SINALP, 1997.

recurso natural y establecer nuevos criterios basados en análisis químicos. En la actualidad, lo que procede es identificar el tipo y concentración de los contaminantes, lo cual constituye el punto de partida para estudiar las alternativas que permitan su tratamiento.⁷ Lo anterior también está fundamentado en que la información que aportan los análisis CRETIB en relación con los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, no es representativo en el caso de hidrocarburos intemperizados, porque éstos seguramente se volatilizaron durante la toma de muestra. Además, algunas de las características naturales de los suelos pueden dar reacciones positivas y generar interpretaciones equivocadas. Lo que sí se sigue aplicando para muestras de suelo y agua contaminados, es la cuantificación de metales pesados de acuerdo con la normatividad,⁸ el cual se debe practicar simultáneamente con una muestra de suelo limpio, para saber si se trata de una característica natural del suelo o de una contaminación. Los resultados que se obtengan formarán parte de la caracterización de los contaminantes, como se verá más adelante, y servirán para evaluar las alternativas de tratamiento.

V. IMPACTOS AMBIENTALES DE LA INDUSTRIA PETROLERA

El impacto ambiental ocasionado por la industria petrolera comprende los efectos de todas y cada una de las fases involucradas en las etapas que son: exploración, explotación, transformación, distribución y comercialización. Las actividades en cada una de ellas han afectado los recursos naturales, representados básicamente por agua, aire, suelo y biota.⁹

Durante la exploración terrestre, se habla de desmontes para la construcción de rutas de acceso y eliminación de la cubierta vegetal y edáfica para la instalación de campamentos, que trae como consecuencia el desplazamiento de especies animales. Se presentan problemas de contaminación por derrames y explosiones. En la exploración marina, además de la alteración de los ecosistemas marinos, existen mayores posibilidades de dispersión de contaminantes que en el medio terrestre.

En la explotación terrestre, la perturbación de los ecosistemas se da por los asentamientos irregulares que se instalan a las orillas de las vías de

acceso, deforestación por la construcción de caminos y cambios en la dinámica del flujo de las aguas superficiales. Se presenta una mayor acumulación de desechos industriales como recortes y lodos de perforación, lodos aceitosos, aditivos químicos y aceites gastados, las posibilidades de derrame de crudo son mayores y se observa también la emisión de contaminantes a la atmósfera. El establecimiento de asentamientos humanos genera aguas negras que también tienen impacto sobre los ecosistemas. Una situación similar se presenta en la exploración marina, además de la acumulación de los sedimentos de dragado.

Una gran parte de terrenos localizados cerca de las zonas de explotación, en el pasado albergaban abundante flora y fauna, cuyo desarrollo se veía favorecido por el clima cálido-húmedo. La destrucción de estos ambientes naturales se inició hace varias décadas, cuando tomó auge la actividad petrolera.

La industria de refinación requiere de grandes espacios para la instalación de tanques de almacenamiento. Su actividad es básicamente la separación de los productos del petróleo, en diferentes fracciones de acuerdo con sus características químicas y usos. Los principales productos que se procesan son: crudo pesado, ligero, superligero y reconstituido, gas seco y licuado, gasolinas, querosenos, diésel, gasóleos, combustóleo, asfaltos, grasas y lubricantes. Las actividades de proceso requieren líneas de distribución para fluidos, vapores y gases, se tiene un importante consumo de agua de enfriamiento y el vertimiento de aguas residuales conteniendo compuestos tóxicos. Aumentan las posibilidades de fugas, derrames y explosiones.

La actividad de la industria petroquímica requiere instalaciones de proceso más sofisticadas que la refinación, dado que es básicamente una industria de transformación. Produce una gran variedad de sustancias complejas entre las que destacan: anhídrido carbónico, amoníaco, metanol, etileno, dicloroetano, polietileno, acetaldehído, cloruro de vinilo, xilenos, tolueno, benceno, etilbenceno, estireno, acrilonitrilo, propileno, dodecibenceno y pentano. Dentro de las instalaciones se tienen también riesgos de fugas, derrames y explosiones, así como descarga de aguas residuales muy contaminadas, tal como ocurre en refinación, pero en petroquímica los compuestos que se manejan son aún más tóxicos. Por lo general, los residuos de la petroquímica están considerados peligrosos y en una importante mayoría no son susceptibles de ser sometidos a tratamiento. Se tienen además, emisiones gaseosas que afectan la calidad

⁷ Sánchez, 1997.

⁸ NOM-051-ECOL-1993.

⁹ SEDUE-INE, 1994.

del aire de los alrededores, e incluso, ocasionan corrosión de materiales metálicos empleados en la construcción de viviendas.

La distribución de productos a través de ductos y pipas, así como su almacenamiento en grandes tanques, presenta un alto riesgo por las posibilidades de fugas o derrames que afectan principalmente el suelo y los cuerpos de agua aledanos al sitio de trabajo.

VI. EVALUACIÓN DEL DAÑO

La evaluación del daño es realmente un diagnóstico que debe ser muy preciso, ya que de aquí se genera la información que será utilizada, tanto para la definición de responsabilidades, como para la planeación de las medidas de mitigación, limpieza y, en su caso, restauración. Es una actividad en la que necesariamente confluyen diversas disciplinas, las cuales deben interactuar para arrojar resultados completos.

Cuando ocurre un derrame en suelo o en cuerpos de agua, los contaminantes inmediatamente tienden a dispersarse hacia donde el medio físico lo permite. Las características fisicoquímicas del contaminante, así como las propias del sitio, determinan su permanencia o migración. Esta es la razón por la que derrames subterráneos que ocurrieron en el pasado, años después se detectan fuera del predio donde acontecieron, y alejados varios metros o incluso kilómetros, en dirección de la corriente de agua subterránea. Ejemplos de lo anterior se presentan comúnmente en zonas aledañas a poliductos, centros de almacenamiento y distribución de combustibles, así como en estaciones de servicio. En estos casos se pone en riesgo la salud de los habitantes de la zona, debido a que el agua de los pozos por estar contaminada con hidrocarburos deja de ser apta para consumo humano.

Todos los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua y por ser menos densos que ésta tienden a flotar, esta característica es importante porque marca la estrategia del diagnóstico en un sitio contaminado. Los combustibles no siempre se ven, pero tienen la ventaja de que huelen y de que su olor es fácilmente reconocido. Otros productos químicos no se ven, tampoco huelen, únicamente son detectados por análisis químicos. Los derrames de petróleo crudo y de residuos de perforación tienen la característica de ser completamente visibles por su color y aspecto. Tal

vez éstos son los que más daño han ocasionado a los ecosistemas, y el daño puede empezar a ser estimado por las claras evidencias.

PEMEX tiene bien identificados los sitios afectados en las zonas de exploración y explotación, de hecho, ha realizado muchos estudios para cuantificar los daños. Específicamente en Tabasco, se han reportado daños a los ecosistemas, que incluso han afectado otras actividades económicas de la región. Los daños han afectado zonas de cultivo, de caza y de pesca, se dice incluso que se han violado zonas decretadas como reserva ecológica y de amortiguamiento, donde se concentra la mayor parte de las especies de flora y fauna protegidas, por lo que es necesario redefinir dichas áreas. Desafortunadamente, la situación no ha podido ser controlada, y en la actualidad se manejan tantos intereses políticos que dejan poco espacio para la toma de decisiones bien fundamentadas.

La evaluación del daño constituye un estudio completo de caracterización que incluye: un análisis del sitio y sus alrededores, un análisis geohidrológico, un análisis químico de los contaminantes y un análisis fisicoquímico de suelo o agua contaminados.

1. Análisis del sitio y sus alrededores

Para esta actividad es indispensable visitar el lugar, una parte importante de la información se puede obtener cuando se entrevista a los trabajadores y a los pobladores del lugar, pero también es necesario recurrir a los acervos bibliográficos. A continuación se enlistan los conceptos que deben ser investigados:

- Ubicación geográfica del sitio afectado
- Tipo de instalación que dio origen a la contaminación (sitio de exploración o explotación, industria de proceso, centro de almacenamiento, terminal marítima, centro de abastecimiento, estación de transferencia o ducto de transporte, entre otros)
- Plano de las instalaciones superficiales y vías de acceso (terrestre, fluvial y marítimo)
- Plano de instalaciones subterráneas con identificación
- Ubicación de las zonas urbanas aledañas
- Resultados de estudios previos que se hayan realizado (auditorías ambientales, gasometrías, mediciones de la profundidad del nivel freático)

- Apariencia del material contaminante (materia prima, producto o residuo de proceso)
- Ubicación de la(s) fuente(s) de contaminación (obra subterránea o superficial)
- Antigüedad de la contaminación
- Precipitaciones pluviales (frecuencia y nivel)
- Escorrentías
- Ubicación de los cuerpos de agua aledaños
- Clima y temperatura ambiente del sitio
- Pozos de extracción de agua aledaños (en uso, clausurados y planeados)
- Uso del suelo afectado (agrícola, forestal, recreativo, residencial, comercial, industrial o de conservación)
- Topografía
- Tipo de vegetación

Como sucede en todo trabajo de investigación, las evidencias documentadas, como las fotografías con un mismo punto de referencia, o bien, fotografías aéreas o imágenes de satélite tomadas tiempo atrás, son de gran utilidad. En este último aspecto, el Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), así como Petróleos Mexicanos a través de su propio sistema de información geográfica (SICORI) constituyen un gran apoyo para conocer aspectos muy generales de las zonas en estudio.

2. Análisis geohidrológico

La importancia del análisis geohidrológico del sitio, es que aporta elementos para entender la forma en la que se han movido los contaminantes, del punto específico donde ocurrió un derrame y hacia dónde se tienen zonas afectadas. Esta investigación ayuda a conocer si la migración de los contaminantes ha sido producto de un proceso natural, o bien, ocasionado por la acción del hombre. Durante la caracterización geohidrológica se debe obtener la siguiente información:

- Profundidad del nivel freático
- Dirección y velocidad del flujo del agua subterránea
- Espesor de producto libre (cuando éste ha alcanzado el nivel freático)

- Definición tridimensional de la mancha de contaminación subterránea
- Perfiles estratigráficos

Cuando se trata de un derrame antiguo, esta información es útil para entender cómo se ha desplazado la mancha de contaminación hacia fuera del predio de las instalaciones, o bien, en el caso de derrame recientes, se puede predecir hacia dónde migrarán los contaminantes y el tiempo en que alcanzarán pozos de abastecimiento o zonas urbanas.

Durante la recopilación de la información se debe definir un sitio que servirá como control cuyas características físicas, químicas y biológicas, se considere sean similares a las del sitio, antes de que haya sido afectado. Este sitio control debe estar libre de contaminación, de ahí deberán tomarse muestras, las cuales serán procesadas simultáneamente a las muestras del sitio contaminado.

a. Diagnóstico de la contaminación in situ

El diagnóstico *in situ* permite obtener información de una manera relativamente rápida y simple. Se puede conocer la ubicación de la mancha de contaminación en el suelo, sobre un plano y a profundidad, con estas técnicas se pueden detectar varios niveles de concentración de contaminantes. Existen varios métodos para el diagnóstico *in situ*, dos de los más comunes son los geoelectrónicos y la gasometría, de ahí se derivan otros. Lo que es importante es saber cuál es el método más adecuado para cada caso.

Los métodos geoelectrónicos crean muy poco disturbio en el sitio, porque solamente se encajan los electrodos a una profundidad no mayor a 20 cm, mientras se toman las lecturas. A través de estos electrodos se hace pasar una señal eléctrica y en cada punto se toman lecturas para medir la conductividad o resistividad. Aparentemente, el método se puede aplicar con éxito a diversos tipos de derrames y tiene la ventaja de dar información sobre el tipo de material geológico que se encuentra en el subsuelo. La toma de lecturas en campo es relativamente sencilla, pero la interpretación de los resultados requiere de personal muy especializado.

Las gasometrías se aplican exitosamente cuando los contaminantes son compuestos volátiles y semivolátiles, básicamente combustibles. Para esta determinación es necesario hacer perforaciones someras, de un diámetro

reducido, que puede ser incluso de 2.5 cm, y pueden llegar hasta 3 m de profundidad. Las lecturas se toman con gasómetros portátiles que cuantifican la concentración de hidrocarburos volátiles. Simultáneamente, se pueden tomar lecturas de explosividad, con explosímetros también portátiles. En los puntos donde se presenta una alta concentración de hidrocarburos volátiles corresponde a un alto grado de explosividad. El trabajo en campo es un poco más laborioso que en el método geoelectrico, pero la interpretación es más sencilla, incluso en el momento de las lecturas se pueden ubicar las manchas de contaminación más importantes, en las que es conveniente tomar muestras para realizar los análisis pertinentes.

b. Muestreo directo

Las muestras de suelo y agua que se tomen deben ser inalteradas y representativas del problema que se está analizando. Una vez que éstas se toman, deben protegerse de la intemperie para conservar sus características originales, si es posible, se mantienen en refrigeración durante su traslado al laboratorio, y deben procesarse lo más pronto posible.

3. Análisis químico del (los) contaminante(s)

Los análisis químicos se practican en muestras de suelo y agua, para identificar el tipo de contaminantes y su concentración. Los resultados que se obtengan serán complementarios al diagnóstico *in situ*, así se podrá conocer la forma en cómo están distribuidos entre la zona no saturada y la saturada en el caso de suelo, así como la concentración de contaminantes disueltos cuando es agua. Para el análisis químico de los contaminantes se utilizan métodos que son del dominio público. Algunos de los más utilizados son

- Compuestos monoaromáticos volátiles: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTX), método EPA 8020 por cromatografía de gases o método EPA 8060 o EPA 8240 por espectrometría de masas
- Hidrocarburos totales de gasolina y diésel, método EPA 8015
- Hidrocarburos totales del petróleo (HTPs), método EPA 418 1 M
- Hidrocarburos polinucleoaromáticos: naftaleno, antraceno, fenantreno, benzopireno y otros, método EPA 8310
- Bifenilos policlorados, método EPA 8080

- Metales pesados: arsénico, bario, cadmio, cromo VI, níquel, mercurio, plata, plomo y selenio, de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993
- Plaguicidas de acuerdo con la NOM-052-ECOL/1993 y NOM-053-ECOL/1993

La decisión de los métodos a utilizar está en función de cada caso en particular, por ejemplo, el análisis de plaguicidas se realiza simultáneamente al análisis de hidrocarburos o de metales pesados, cuando se dice que un terreno cultivable ha dejado de serlo por la presencia de hidrocarburos contaminantes. En este caso en particular conviene probar si hay presencia de plaguicidas y si éstos han afectado la fertilidad del suelo.

4. Análisis fisicoquímico

El análisis fisicoquímico del suelo se realiza para conocer qué tan afectado se encuentra un suelo por la presencia de contaminantes. Este análisis se practica simultáneamente a una muestra de suelo no contaminado que sirva como control, con la finalidad de hacer comparaciones. La muestra control se toma de una zona no contaminada, cercana a la zona dañada para asegurar que comparta sus características. Las determinaciones que se realizan son:

- pH
- humedad
- capacidad de retención de agua
- concentración de materia y carbono orgánicos
- contenido de materia inorgánica (sólidos fijos)
- contenido de carbono inorgánico (carbonatos y bicarbonatos)
- porosidad
- permeabilidad
- tipo de suelo (tamaño de partículas)

Los tres últimos parámetros se practican únicamente en la muestra del suelo control, porque la presencia de algunos contaminantes, como el aceite crudo, no permiten la realización del análisis. Su utilidad es básicamente para evaluar las alternativas de limpieza del sitio.

Cuando se tienen muestras de agua las determinaciones a realizar son:

- pH
- demanda química de oxígeno
- demanda bioquímica de oxígeno
- alcalinidad
- concentración de sólidos (totales, fijos y volátiles)
- concentración de bacterias coliformes totales y fecales

La determinación del último parámetro se realiza para descartar una contaminación por aguas residuales, debida a descargas en cuerpos de agua o infiltraciones hacia los acuíferos

VII. ALTERNATIVAS TÉCNICAS PARA LA REPARACIÓN DEL DAÑO

Desde el punto de vista técnico, la estrategia para la reparación del daño es única para cada caso, y debe estar bien soportada en todos los resultados de caracterización. Se debe hacer una muy buena planeación para evitar que el tratamiento pueda afectar aún más el ambiente que ya se encuentra dañado. Se puede hablar de varios niveles de reparación del daño, que son mitigación, remediación y restauración. La reparación del daño se debe realizar de manera inmediata a su evaluación, de lo contrario la información obtenida puede ser poco confiable, dado que los mismos eventos naturales, como las lluvias, modifican las características del sitio contaminado.

1. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación son todas aquellas acciones inmediatas que se toman para evitar un daño mayor. Ejemplos de éstas son: la clausura de pozos de extracción de agua que estén contaminados, la extracción de combustibles en pozos de abastecimiento de agua, la colección de aceite crudo derramado en cuerpos de agua, o bien, la excavación de zanjas o introducción de cortinas para evitar la dispersión de los contaminantes.

Con estas acciones se puede retirar la mayor cantidad de contaminantes, pero queda una fracción asociada a la estructura del suelo, o bien, disuelta

en el agua, por lo que es necesario aplicar tratamientos de remediación más avanzados.

2. Remediación

En el mercado ambiental existen diversas tecnologías para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua. La opción tecnológica más conveniente, se define de acuerdo a criterios técnicos establecidos para cada caso particular. De las opciones tecnológicas de remediación que se ha comprobado su efectividad en sitios contaminados con hidrocarburos se pueden citar: biorremediación, extracción, fijación, incineración y filtración. En la literatura se han descrito gran cantidad de opciones tecnológicas, pero no han sido llevadas a gran escala en campo.

No todas las tecnologías son aplicables a todos los casos, por lo que siempre se recomienda la realización de estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio, con el fin de obtener información relacionada con su efectividad, su aplicación a gran escala en campo, la estrategia de operación, así como tiempo y costo de operación. Para ello, se requiere que la escala a la que se realizan los estudios de tratabilidad sea representativa de la superficie que se pretende tratar, y que los modelos experimentales representen el comportamiento físico del sitio. El costo de aplicación de una tecnología es un punto muy importante en la toma de decisiones, pero es conveniente hacer un balance, ya que por lo general, la mejor opción económica no corresponde a la mejor alternativa técnica.

La aplicación de cualquier tipo de tratamiento a un sitio contaminado implica un riesgo que debe ser evaluado de manera muy particular. Es muy importante llevar un registro periódico durante el tratamiento para confirmar su efectividad, es decir, que la superficie de la mancha de contaminación y las concentraciones de contaminantes se estén reduciendo. La aplicación de los métodos de diagnóstico *in situ* y los análisis químicos en el laboratorio son la herramienta principal.

Los aspectos referentes al establecimiento de los niveles de limpieza se discutirán en el inciso VIII, debido a que esta actividad se realiza en conjunto con las autoridades ambientales.

Cuando se tienen muestras de agua las determinaciones a realizar son:

- pH
- demanda química de oxígeno
- demanda bioquímica de oxígeno
- alcalinidad
- concentración de sólidos (totales, fijos y volátiles)
- concentración de bacterias coliformes totales y fecales

La determinación del último parámetro se realiza para descartar una contaminación por aguas residuales, debida a descargas en cuerpos de agua o infiltraciones hacia los acuíferos.

VII. ALTERNATIVAS TÉCNICAS PARA LA REPARACIÓN DEL DAÑO

Desde el punto de vista técnico, la estrategia para la reparación del daño es única para cada caso, y debe estar bien soportada en todos los resultados de caracterización. Se debe hacer una muy buena planeación para evitar que el tratamiento pueda afectar aún más el ambiente que ya se encuentra dañado. Se puede hablar de varios niveles de reparación del daño, que son: mitigación, remediación y restauración. La reparación del daño se debe realizar de manera inmediata a su evaluación, de lo contrario la información obtenida puede ser poco confiable, dado que los mismos eventos naturales, como las lluvias, modifican las características del sitio contaminado.

1. Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación son todas aquellas acciones inmediatas que se toman para evitar un daño mayor. Ejemplos de éstas son, la clausura de pozos de extracción de agua que estén contaminados, la extracción de combustibles en pozos de abastecimiento de agua, la colección de aceite crudo derramado en cuerpos de agua, o bien, la excavación de zanjas o introducción de cortinas para evitar la dispersión de los contaminantes.

Con estas acciones se puede retirar la mayor cantidad de contaminantes, pero queda una fracción asociada a la estructura del suelo, o bien, disuelta

en el agua, por lo que es necesario aplicar tratamientos de remediación más avanzados.

2. Remediación

En el mercado ambiental existen diversas tecnologías para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua. La opción tecnológica más conveniente, se define de acuerdo a criterios técnicos establecidos para cada caso particular. De las opciones tecnológicas de remediación que se ha comprobado su efectividad en sitios contaminados con hidrocarburos se pueden citar: biorremediación, extracción, fijación, incineración y filtración. En la literatura se han descrito gran cantidad de opciones tecnológicas, pero no han sido llevadas a gran escala en campo.

No todas las tecnologías son aplicables a todos los casos, por lo que siempre se recomienda la realización de estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio, con el fin de obtener información relacionada con su efectividad, su aplicación a gran escala en campo, la estrategia de operación, así como tiempo y costo de operación. Para ello, se requiere que la escala a la que se realizan los estudios de tratabilidad sea representativa de la superficie que se pretende tratar, y que los modelos experimentales representen el comportamiento físico del sitio. El costo de aplicación de una tecnología es un punto muy importante en la toma de decisiones, pero es conveniente hacer un balance, ya que por lo general, la mejor opción económica no corresponde a la mejor alternativa técnica.

La aplicación de cualquier tipo de tratamiento a un sitio contaminado implica un riesgo que debe ser evaluado de manera muy particular. Es muy importante llevar un registro periódico durante el tratamiento para confirmar su efectividad, es decir, que la superficie de la mancha de contaminación y las concentraciones de contaminantes se estén reduciendo. La aplicación de los métodos de diagnóstico *in situ* y los análisis químicos en el laboratorio son la herramienta principal.

Los aspectos referentes al establecimiento de los niveles de limpieza se discutirán en el inciso VIII, debido a que esta actividad se realiza en conjunto con las autoridades ambientales.

a. Biorremediación

La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de suelos, acuíferos y cuerpos de agua contaminados con hidrocarburos, ya que en su mayoría éstos son biodegradables. Los contaminantes son transformados en compuestos químicamente más simples, por ejemplo, en dióxido de carbono cuando hay una completa mineralización. Uno de los retos de las tecnologías de biorremediación es acelerar la actividad microbiana para reducir los tiempos de biodegradación de contaminantes en suelo y agua.

El éxito de la biorremediación obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos involucrados. La opción más segura es aprovechar la flora autóctona, y su actividad se estimula mediante la adición de nutrientes. A pesar de que la biorremediación toma tiempo, tiene la ventaja de que el suelo tratado puede recuperar su actividad biológica natural. Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados con hidrocarburos, la biorremediación es de las mejores desde los puntos de vista ambiental y económico, no obstante, las altas concentraciones de hidrocarburos o la presencia de otros contaminantes como metales pesados y compuestos clorados pueden limitar el tratamiento.

La biorremediación es muy versátil, existen opciones para tratar suelo y agua, subterránea o retenida en presas, lagos y lagunas. El tratamiento puede aplicarse *in situ* o fuera de él, y la adición de nutrientes y microorganismos exógenos está en función de las características del material geológico. En el caso de agua subterránea, la biorremediación se aplica mediante la técnica de bombeo-tratamiento-inyección, con ayuda de reactores en donde se proporciona a los microorganismos condiciones que estimulan su actividad. En otros cuerpos de agua se suministra oxigenación a través de aeradores, y concentraciones limitadas de nutrientes, también se aplica recirculación para favorecer la homogeneidad del sistema.

Una tecnología de biorremediación sería debe contar con un respaldo científico, sin embargo, en el mercado ambiental se comercializan productos microbianos y aditivos químicos de composición desconocida, que no son efectivos e incluso pueden aumentar el riesgo de un problema de contaminación, más que remediarlo.

b. Extracción

Se han desarrollado diversas tecnologías para la extracción de hidrocarburos pesados que se asocian a la estructura del suelo, como el aceite crudo. Mediante estas tecnologías se puede separar el producto para reciclarlo, si en el suelo queda hidrocarburo residual puede aplicarse otro tratamiento para alcanzar los niveles de limpieza.

c. Fijación

Los métodos de microencapsulación y solidificación son ejemplos de tecnologías para la fijación de los hidrocarburos a las partículas de suelo. Mediante éstas se pretende inmovilizar los contaminantes en la estructura del suelo, de tal forma que no puedan migrar. Algunas tecnologías de este tipo aseguran que después del tratamiento, se puede proceder a la siembra de especies vegetales.

Otra opción de fijación es la incorporación de asfalto a suelos contaminados con petróleo, y su utilización en la construcción de caminos.

En ambos casos es necesario hacer un seguimiento posterior al tratamiento para asegurarse de que los contaminantes permanecen retenidos a través del tiempo y que no están lixiviando.

d. Incineración

Se recomienda únicamente para suelos con muy altas concentraciones de contaminantes que no puedan ser sometidos a otro tipo de tratamiento, pero se tiene la desventaja de que junto con los contaminantes, el suelo también se destruye.

e. Filtración

Algunos hidrocarburos pueden solubilizarse en el agua, por lo que no pueden ser separados de ésta durante la extracción de la capa de producto libre. En el caso de aguas subterráneas se aplica el bombeo-tratamiento-inyección, el tratamiento consiste en filtrar a través de carbón activado, en el cual se quedan retenidos los hidrocarburos solubles y se obtiene agua libre de ellos. Los filtros tienen una cierta capacidad de retención, por lo que deben ser renovados periódicamente. El carbón activado con hidro-

carburos puede someterse a tratamiento biológico para transformar los contaminantes, o bien, llevarse a confinamiento.

Aspectos más detallados sobre tecnologías de remediación fueron descritos previamente.¹⁰

3. Confinamiento

Cuando los suelos están contaminados con altas concentraciones de metales pesados, bifenilos policlorados o compuestos altamente clorados, generalmente se recomienda su confinamiento. En estos casos, se requiere aplicar un pretratamiento para eliminar la fase líquida, en virtud de que no se permite el confinamiento de materiales peligrosos en estado líquido.

4. Restauración

Acordes con las definiciones establecidas en el primer inciso de este capítulo, la restauración de un suelo viene después de su remediación, cuando los niveles de contaminantes permiten el desarrollo de especies vegetales propias del lugar. En cuerpos de agua, se depositan especies acuáticas propias de la región, las cuales también cumplen la función de indicadores. Cuando se observa el restablecimiento de los procesos naturales, se puede comprobar la restauración de un sitio.

VIII. PROCEDIMIENTO ADMINISTRATIVO PARA LA LIMPIEZA DE SITIOS CONTAMINADOS

En los términos de la legislación vigente, el responsable de un derrame o fuga de materiales peligrosos, debe realizar las actividades enfocadas a la limpieza del sitio. Para ello, generalmente los contaminadores recurren a empresas prestadoras de servicios ambientales. Debido a las diversas alternativas que existen para la limpieza de sitios contaminados, es de vital importancia evaluar y analizar las diferentes tecnologías que pueden ser aplicadas a problemas específicos.

Con base en lo anterior, la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas del Instituto Nacional de Ecología, en febrero de

este año, dio a conocer formalmente la nueva política a seguir para la limpieza de sitios contaminados. En dicha reunión, a la que asistieron representantes de todos los sectores involucrados, se entregó un documento donde se describe de manera detallada cada uno de los pasos que deben seguir las empresas para cumplir con los requisitos técnico-administrativos (INE, 1997). Básicamente, se habla de dos trámites, que son los siguientes.

1. Acreditación de la tecnología

Para este trámite es necesario llenar los formatos correspondientes a la *Solicitud de acreditación para la empresa y la(s) tecnología(s) que ofrece servicios de restauración de sitios*, a la cual se debe anexar la información correspondiente a la tecnología y a la empresa, es decir, la descripción detallada de la tecnología propuesta, los documentos que avalen su certificación o aplicación satisfactoria en el extranjero, un listado de experiencias previas y los datos curriculares de la empresa prestadora de servicios y de su personal. Con esto se conforma un expediente que deberá ser evaluado por un órgano colegiado reconocido en la materia, el cual será designado por la dirección general citada. Cuando se ha cumplido con este trámite se pasa al siguiente.

2. Evaluación del plan de remediación

Para este trámite se debe integrar un documento que lleva el título de *Presentación del plan de restauración de sitios contaminados por materiales y residuos peligrosos*, el cual debe contener los estudios de caracterización del sitio, el programa de trabajo calendarizado, el protocolo de pruebas a nivel laboratorio y en campo, y el estudio de riesgo a partir del cual se definen los niveles de limpieza a alcanzar. En este caso, el protocolo de pruebas deberá estar avalado por un órgano colegiado reconocido en la materia.

Las empresas que con anterioridad iniciaron trabajos de remediación, deberán ajustarse a los nuevos procedimientos, de lo contrario, no se les permitirá continuar con la aplicación de las tecnologías en campo.

Con los dos procedimientos descritos, se abren las puertas para realizar la reparación del daño a la luz de las autoridades ambientales, quienes tendrán que realizar muchos ajustes no sólo con las empresas de servicios ambientales, sino también con las empresas contaminadoras. La práctica

condiana ha dejado ver que otros instrumentos administrativos, como la Ley de Adquisiciones y Obras Públicas, limitan el desarrollo de trabajos confiables y de buena calidad, que en general, no cumplen con los compromisos ambientales establecidos. Bajo el esquema de las licitaciones públicas, se debe tener claro que las mejores ofertas económicas, no siempre corresponden a las mejores alternativas técnicas, y una manera de abaratar costos es maquillar los problemas de contaminación. Otros dos ejemplos de lo que ocurre en las licitaciones públicas y que desde el punto de vista ambiental requiere algunos ajustes, son: cuando se establece que la empresa que realiza la caracterización del sitio, no puede encargarse de la restauración, o bien, cuando se solicitan ofertas de la aplicación de tecnologías de remediación específicas de las cuales no se tienen buenos antecedentes.

3. Establecimiento de los niveles de limpieza

El INE es quien fija los niveles de limpieza por alcanzar, en acuerdo con la empresa contaminadora y con la empresa de servicios ambientales.¹¹ Los elementos que sirven como referencia para establecer estos niveles de limpieza son estudios de riesgo, pero es necesario contar con la caracterización completa del sitio.

En los estudios de riesgo se consideran dos aspectos básicos que son: la peligrosidad de la contaminación y el tipo de exposición. Para ello es necesario conocer los componentes tóxicos del producto contaminante, el cual se considera un parámetro indicador. Por ejemplo, el benceno es el indicador de contaminación con gasolinas porque tiene características de persistencia, bioacumulabilidad y riesgos de cáncer, por lo que se recomienda reducir a un mínimo la exposición humana. De manera similar, el naptaleno se utiliza como parámetro indicador de contaminación con diesel. La base para la realización de los estudios de riesgo es un anteproyecto de norma,¹² el cual empieza a ser utilizado con el fin de realizar los ajustes pertinentes antes de hacerlo oficial.

En algunas ocasiones se manejan estándares oficiales extranjeros, pero es conveniente conocer la base de razonamiento que llevó a esas cifras con la finalidad de tener elementos que permitan definir su aplicabilidad

¹¹ Sánchez, 1997.

¹² INE, 1996.

a otro sitio. Por ejemplo, en los Estados Unidos de Norteamérica cada gobierno estatal tiene sus propios estándares, los cuales fueron definidos después de una evaluación de los riesgos específicos. Las cifras que se utilizan para el benceno están dentro de un intervalo que va de 0.005 a 50 mg/kg para suelo, y de 0.2 a 71 mg/l para agua subterránea.¹³ La amplitud de estos intervalos indica que cada región se maneja de manera particular en función de sus propias características.

Un instrumento que puede servir de apoyo para el caso de aguas son los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89). Estos criterios establecen el uso que se le puede dar al agua en función de su calidad, la cual está en función de los compuestos químicos que en ella se encuentren. Los usos del agua están clasificados como: agua potable, agua para actividades recreativas de contacto primario, agua para riego agrícola, agua para usos pecuarios y agua para la protección de la vida acuática en agua dulce y agua marina. Si se toma nuevamente el benceno como parámetro indicador, el límite permisible para agua potable es de 10 mg/l, de 50 mg/l para vida acuática en agua dulce y de 5 mg/l para especies de agua marina en áreas costeras. Algunas otras cifras de interés para este trabajo, se presentan en la tabla 1, en la que también se incluyen intervalos de límites permisibles que manejan gobiernos estatales en los Estados Unidos de Norteamérica.

Tabla 1. Límites permisibles de algunos compuestos tóxicos en agua

Parámetro indicador	Criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89			Intervalos permisibles
	Agua potable	Protección de la vida acuática		En Estados Unidos de Norteamérica
Concentración (mg/l)		agua dulce	áreas costeras	agua subterránea
BTEX ^a	—	—	—	5 - 50
Benceno	10	50	5	0.2 - 71
Tolueno	14 300	200	60	790 - 1000
Etilbenceno	1 400	—	500	74 - 700
HPNA ^b	0.03	—	100	—

¹³ Saval, 1995.

Nitradeno	—	20	20	100 - 143
Acenatreno	20	20	10	—
Fluoranteno	40	40	0.4	370
Bifenilos policlorados	0.0008	0.01	0.03	—

^a H H X: benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos en mezcla.

^b HPNA: mezcla de hidrocarburos polinucleoaromáticos de la familia del naltaleno

IV. MARCO LEGAL PARA LA LIMPIEZA DE SITIOS CONTAMINADOS

El marco legal dentro del cual se realizan las actividades de limpieza de sitios contaminados está conformado por: artículo 1 fracciones III y V; artículo 5 fracción II; artículo 98 fracción V; artículo 134 fracción V; artículo 136, fracciones I a IV; artículo 151 bis, fracciones I a III y artículo 152 bis, de la nueva Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.¹⁴ Adicionalmente, el artículo 10 y artículo 42 fracción VI del Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos.¹⁵

El artículo 134 fracción V de la LGEEPA dice que *en los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable*. La redacción del artículo 152 bis es similar, pero hace referencia a que los responsables de la contaminación del suelo ocasionada por el manejo de materiales o residuos peligrosos deben llevar a cabo las acciones de limpieza.

En el artículo 139 se involucra a la Comisión Nacional del Agua, mencionando que *toda descarga, depósito e infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta ley (LGEEPA), la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas*. Respecto a la Ley de Aguas Nacionales, título séptimo, capítulo único, Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas, en su contenido de 12 artículos, hace referencia principalmente a la descarga de aguas residuales que pueden

contaminar cuencas hidrológicas y acuíferos. Por lo que respecta a la contaminación por hidrocarburos, interpretados como materiales peligrosos, únicamente en el artículo 86, fracción VI, se menciona que *la Comisión Nacional del Agua tendrá a su cargo: promover y realizar las medidas necesarias para evitar que basura, desechos, materiales y sustancias tóxicas, y lodos producto de los tratamientos de aguas residuales, contaminen las aguas superficiales o del subsuelo*. De la misma forma el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, en su artículo 150 reafirma lo anterior diciendo que *en el caso de que el vertido o infiltración de materiales y residuos peligrosos que contaminen las aguas superficiales o del subsuelo, la Comisión Nacional del Agua determinará las medidas correctivas que deban llevar a cabo personas físicas o morales responsables o las que, con cargo a éstas, efectuará la comisión*. Cabe mencionar que estos dos documentos legales referidos a aguas nacionales, consideran que el vertimiento de aguas residuales es el factor más importante de la contaminación del subsuelo y acuíferos.

Finalmente, la participación del sector académico en las actividades de limpieza y restauración de sitios contaminados se enmarca en el artículo 59 fracción VIII, del Reglamento Interior de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), el cual cita que una de las atribuciones de la Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas es *promover la celebración de convenios con universidades y centros de investigación, para la realización de estudios sobre tecnologías y sistemas de manejo de residuos peligrosos*.

X. INSTRUMENTOS LEGALES DE APOYO

Existen otros instrumentos legales de apoyo para la limpieza de sitios contaminados, como son:

- el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias, que data de 1979.
- el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, de 1988.
- el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, de 1988.

¹⁴ D. F. Oficial de la Federación, 11 de diciembre de 1996.

¹⁵ ENL 1997.

No obstante, estos reglamentos requieren ser actualizados para estar acordes con la nueva legislación ambiental. Un aspecto que llama la atención es que prácticamente todos los documentos hablan de residuos y materiales peligrosos en términos generales; pero en especial el Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar, en su anexo I, inciso 5, sí es muy específico respecto a los derrames de la industria petrolera (petróleo crudo, *fuel-oil*, aceite pesado diésel, aceites lubricantes, fluidos hidráulicos y mezclas que contengan hidrocarburos). Sin embargo, no es muy común hacer referencia a este reglamento cuando se tratan aspectos ambientales.

Por otro lado, se ha venido insistiendo en la necesidad de contar con un Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Suelo, el cual no existe. Si éste se tuviera, se podría establecer un verdadero espíritu sobre la prevención y control de la contaminación. Además, se podrían instrumentar procedimientos para tener un control sobre su limpieza y restauración en términos muy específicos y reforzar la vinculación con otros instrumentos legales como la Ley de Aguas Nacionales y su respectivo reglamento, en los que hace falta un mayor énfasis en lo referente a la contaminación de acuíferos por derrame de hidrocarburos y compuestos químicos.

XI. CONCLUSIONES

La evaluación del daño causado por derrames de contaminantes es una actividad que debe realizarse con mucha seriedad y una muy buena planeación. La información que se integra con el análisis químico de los contaminantes, la dinámica del sitio afectado y las evidencias encontradas durante la caracterización, servirá como respaldo para la definición de responsabilidades. Dicha información será también útil para establecer la estrategia de limpieza del sitio, que es parte de la reparación del daño.

Con las reformas a la LGEEPA, donde se camina hacia el reconocimiento de la responsabilidad ambiental, es indispensable el establecimiento de una vinculación entre el campo jurídico y el técnico. Tal vez en un futuro cercano, los jueces que atiendan demandas ambientales soliciten opiniones de académicos expertos en la materia, las cuales serán determinantes en la resolución de responsabilidades y obligaciones. En este sentido, conviene resaltar que los contaminantes no son estáticos, migran

de acuerdo a lo que les permite el medio físico y cada día crece la zona afectada, por lo que la definición de responsabilidades se debe realizar en tiempos cortos.

Por otro lado, hay muchos sitios que han servido como escenario de actividades petroleras, y están tan afectados, que no es fácil establecer estrategias de recuperación en el corto plazo. Los estudios de impacto ambiental o auditorías ambientales tradicionales en las zonas donde a simple vista se observa una afectación, no son suficientes, se requieren estudios muy completos que sean útiles para la toma de decisiones.

Se sabe que la industria petrolera cuenta con tecnología de punta y personal especializado para la extracción de petróleo, sin embargo, no hay evidencias de una conciencia ecológica en los trabajos de campo. También se sabe que gran parte de los derrames accidentales son resultado de una falta de mantenimiento de instalaciones que tiene una relación muy directa con lo referente a seguridad industrial. Tal vez algo que ha fallado es una verdadera vinculación entre la toma de decisiones detrás de un escritorio ejecutivo y la supervisión de las actividades que se realizan en campo.

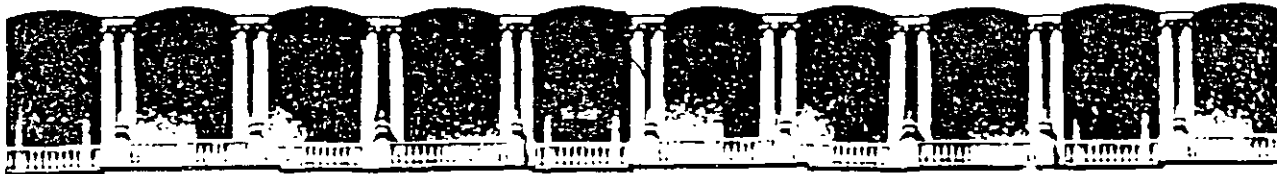
Para finalizar, conviene resaltar que la evaluación de un daño ambiental no es un requisito administrativo, es una verdadera necesidad técnica en la que no se deben escatimar recursos. La protección del ambiente y la salud deben ser compromisos éticos de todo ser humano.

XII. BIBLIOGRAFÍA

- Criterios Ecológicos de Calidad de Agua, CE-CCA-001/89, *Diario Oficial de la Federación*, 2 de diciembre de 1989.
- JNE, 1996. Propuesta de Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana "Restauración de suelos contaminados: metodología para la determinación de criterios de limpieza en base a riesgos", Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas.
- JNE, 1997. Requisitos técnico-administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contaminados por materiales y/o residuos peligrosos, Instituto Nacional de Ecología, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas. Febrero 1997.

- Ley de Aguas Nacionales, *Diario Oficial de la Federación*, 1 de diciembre de 1992.
- Ley de Adquisiciones y Obras Públicas, *Diario Oficial de la Federación*, 30 de diciembre de 1993.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- Norma Oficial Mexicana NOM-053-ECOL-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- Real Academia Española, 1992 *Diccionario de la Lengua Española*, Madrid.
- Reformas a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, *Diario Oficial de la Federación*, 1996, diciembre 13.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos, *Diario Oficial de la Federación*, noviembre 23 de 1988.
- Reglamento para Prevenir y Controlar la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y Otras Materias, *Diario Oficial de la Federación*, enero 11 de 1979.
- Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental, *Diario Oficial de la Federación*, junio 6 de 1988.
- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, *Diario Oficial de la Federación*, enero 12 de 1994.
- SANCHEZ GÓMEZ, J., 1997. Comunicación personal durante la reunión informativa sobre los Requisitos técnico-administrativos que deben cumplir los promoventes de servicios para la restauración de sitios contaminados por materiales y/o residuos peligrosos, Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, Instituto Nacional de Ecología, México.
- SAVAI BOHÓRQUEZ, S., 1995. "Remediación y restauración", en *PEMEX Ambiente y energía. Los retos del futuro*, México, UNAM-Petróleos Mexicanos.
- SAVAI BOHÓRQUEZ, S., 1995a. Propuesta de cambios a la Ley del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en lo referente al Título IV, Capítulo III. Prevención y Control de la Contaminación del Suelo

- Consulta Nacional sobre Legislación Ambiental, Comisión de Ecología, Cámara de Diputados, México, julio de 1995.
- SEDESOL-INE, 1994. "Industria Petrolera", en *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente*, Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología, México, capítulo 13.
- SINALP, 1997. Relación de laboratorios acreditados y en proceso de acreditamiento en caracterización de residuos peligrosos CRETIB, Sistema Nacional de Laboratorios de Pruebas, Departamento de Acreditamiento de Laboratorios de Pruebas Químicas, enero 21 de 1997.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS

Bioremediación de un suelo contaminado con diesel

**Dra. Susana Saval Bohórquez
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

Biorremediación de un suelo contaminado con diesel

Susana Saval

Coordinación de Bioprocesos Ambientales
Instituto de Ingeniería, UNAM,
AP 70472, CU, 04510, Mexico, DF

Resumen

Se presenta una experiencia de biorremediación en campo, la cual se realizó mediante bioestimulación de la flora microbiana autóctona. Con el muestreo inicial se evaluaron las características del suelo y el grado de contaminación. De manera simultánea, se iniciaron actividades en una superficie de 2,625 m² para remover el suelo manualmente y con maquinaria, con el fin de aflojar y homogeneizar la capa superior. Posteriormente, se aplicaron fertilizantes y riego constante. Después de dos meses, la concentración de diesel se redujo en 80 por ciento y a los seis meses alcanzó 98 por ciento de eliminación, quedando una concentración residual en el suelo de 10.24 mg/kg. Durante la temporada de lluvias, se observó crecimiento masivo de especies vegetales autóctonas, además de las que se habían sembrado. Con la bioestimulación se proporcionó al suelo una actividad biológica que no tenía, por lo cual se considera lograda la biorremediación del suelo y la restauración del sitio.

Palabras clave: biorremediación, bioestimulación, biorrestauración, saneamiento de suelos

Introducción

La industria petrolera contribuye de manera importante a la economía de México, razón por la cual las actividades de exploración, explotación, refinación, transporte y consumo de productos del petróleo se ven incrementadas cada día. Los malas prácticas de manejo de los hidrocarburos, los accidentes durante el transporte de combustibles y otros productos procesados, así como la toma clandestina de combustibles han traído como consecuencia problemas ambientales en los que se ha hecho evidente la contaminación de grandes extensiones de suelo superficial y la afectación de cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Como una alternativa de solución para el saneamiento de suelos y acuíferos contaminados, a nivel mundial se ha dado un gran impulso a las tecnologías de biorremediación, las cuales se basan en la utilización de microorganismos capaces de transformar contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos, e incluso lograr una completa mineralización llevándolos hasta bióxido de carbono. En los suelos existe una importante diversidad microbiana autóctona que se aclimata de manera natural a los contaminantes, dando como resultado una actividad biodegradadora que se ve estimulada cuando están presentes

otros nutrientes básicos para el metabolismo, como son las fuentes de nitrógeno y de fosfatos.

El objetivo de este trabajo es presentar una experiencia de biorremediación en campo, la cual se realizó mediante bioestimulación de la flora microbiana autóctona de un suelo contaminado con diesel.

Antecedentes

El suelo que fue sometido a bioestimulación, había sido contaminado como consecuencia de la ruptura accidental de ductos que pasaban debajo de una calle pavimentada. Como una medida de emergencia el suelo contaminado fue excavado y transportado a un predio ubicado a varios kilómetros de la población. Se extendió en una superficie aproximada de 2.625 m², con un espesor promedio de 23.5 cm, se mezcló con cal viva, y se dejó a la intemperie. Algunos meses después, se invitó al Instituto de Ingeniería a desarrollar este proyecto cuya meta fue sanear y regenerar el suelo afectado.

Metodología

Las características del suelo se evaluaron a través de la cuantificación de materia orgánica, nitrógeno total, fosfatos, carbonatos, bicarbonatos, capacidad de retención de agua, densidad y textura. Una muestra de suelo no contaminado obtenida de un sitio cercano a donde ocurrió la fuga, se utilizó como control. Los análisis se realizaron de acuerdo a Velázquez y León (1974), Jackson (1982), Kute y Lee (1986) y Carter (1993).

El grado de contaminación del suelo se evaluó mediante dos aná-

lisis diferentes, la determinación de hidrocarburos totales de gasolina y diesel a través del método EPA 8015 M por cromatografía de gases con detector de ionización de flama y la cuantificación de hidrocarburos totales del petróleo por el método EPA 418.1 M por espectrometría en infrarrojo (Baugh y Lovegreen, 1993; Potter, 1993).

De manera simultánea, se iniciaron actividades en campo para remover el suelo manualmente y con maquinaria, con el fin de aflojarlo y homogeneizarlo. Posteriormente, se aplicaron nutrientes, nitrógeno y fosfatos en forma de fertilizantes, además de agua para estimular la actividad microbiana. Estas actividades se realizaron siguiendo las recomendaciones de Autry y Ellis (1992), Riser-Roberts (1992) y Rogers *et al.*, (1993).

Para el seguimiento de la biorremediación se prepararon muestras compuestas de diferentes puntos, retirando material geológico de los primeros 24 cm a partir de la superficie. Las muestras fueron almacenadas en frascos de vidrio con tapa de sello hermético y cubierta de teflón hasta su transportación al laboratorio. Se tomaron muestras a mayor profundidad para comprobar que no había migración de los contaminantes hacia estratos más profundos. Adicionalmente, se tomaron muestras de agua de las norias aledañas al lugar.

Resultados y discusión

Características físicoquímicas del suelo

La determinación de textura del suelo indicó que se trataba de una mezcla de arcilla y arena (57 y 43 por ciento, respectivamente), con

una densidad real de 1.0526 kg/r densidad aparente de 1.2113 kg/r, y una porosidad del 15 por ciento. Las características del suelo y los parámetros determinados durante la biorremediación se resumen en la tabla 1.

El pH del suelo control fue de 7.53 y el pH del suelo afectado fue más alto, de 8.14. Esto fue consecuencia de la adición de cal viva durante la disposición del suelo contaminado en el lugar.

El contenido de materia orgánica fue similar en el suelo afectado y el control, alrededor de 2 por ciento, aquí no se reflejó la aportación de los contaminantes al contenido de materia orgánica, porque el suelo control había tenido un aporte natural de materia orgánica.

Las concentraciones de nitrógeno amoniacal y total, así como los fosfatos no fueron detectables en el suelo contaminado. Los bicarbonatos estuvieron presentes como componentes naturales del suelo, en una concentración ligeramente superior a 170 mg/kg.

La capacidad de retención de agua fue 393 y 358 ml/kg para los suelos control y contaminado, respectivamente. Esto indicó que en condiciones de saturación, el suelo contaminado podía alcanzar una humedad de 35 por ciento.

Caracterización microbiológica del suelo

A pesar de las malas prácticas a las que fue sometido el suelo, el conteo de bacterias heterótrofas no fue tan bajo como se esperaba, 2.5 x 10⁵ ufc (unidades formadoras de colonias)/g suelo, tres órdenes de magnitud por debajo de lo comúnmente encontrado para suelos típicos, que es del orden de 10⁸ ufc/g

Tabla 1. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL SUELO

Parámetro (resultados en base seca)	Suelo control	Suelo contaminado		
		Antes del tratamiento	Después de 2 meses de tratamiento	Después de 6 meses de tratamiento
pH	7.53	8.14	7.87	7.87
Materia orgánica (%)	2.17	1.96	1.44	1.39
Carbono orgánico (%)	1.25	1.14	0.84	0.81
Nitrógeno total (mg/kg)	ND	ND	1.420	650
Nitrógeno amoniacal (mg/kg)	ND	ND	146.2	11.07
Fosfatos (mg/kg)	0.42	ND	8.33	2.66
Carbonatos (mg/kg)	ND	ND	ND	ND
Bicarbonatos (mg/kg)	175.1	172.3	-	185.8
Capacidad de retención de agua (ml/kg)	393	358	-	-
Cuenta de bacterias heterótrofas aerobias (ufc/g suelo)	9.8 E6	2.5 E5	3.2 E6	5.6 E6
Cuenta de bacterias degradadoras de gasolina (ufc/g suelo)	ND	D	-	2.35 E4
Cuenta de bacterias degradadoras de diesel (ufc/g suelo)	ND	D	-	3.89 E4
Consumo de oxígeno (mg O ₂ /g suelo)	-	0.31	-	0.56
Generación de bióxido de carbono (g CO ₂ /g suelo)	-	80.33	166.32	596.64

ND: Significa que no fue detectado. D: Significa que fue detectable, pero difícil de cuantificar.

suelo. Aún en el suelo control, el contenido de bacterias fue bajo, seguramente debido a la ausencia de nutrientes y a la reducida humedad.

Las mediciones de consumo de oxígeno y generación de bióxido de carbono, los cuales son parámetros que reflejan la actividad biológica del suelo, indicaron una baja actividad, pero con posibilidad de ser incrementada por la adición de nutrientes.

La presencia de bacterias degradadoras de los hidrocarburos en el suelo antes de tratar fue detectable, pero difícil de cuantificar porque el crecimiento fue difuso. El desarrollo de un cultivo en medio líquido,

en presencia del contaminante, sugirió las posibilidades de aumentar la proporción de microorganismos degradadores.

Características de los hidrocarburos contaminantes

En el momento que ocurrió el derrame se habló de una fuga de gasolina. Los análisis realizados por cromatografía de gases indicaron la presencia de diesel, en gran proporción, mezclado con los hidrocarburos pesados de la gasolina. En las figuras 1A y 1B se presentan los cromatogramas obtenidos para es-

tándares de gasolina y diesel, respectivamente. En ellos se observa que los hidrocarburos contenidos en la gasolina son más ligeros y volátiles, por lo que presentan tiempos de retención cortos (figura 1A). Por el contrario, los hidrocarburos del diesel tienen mayor peso molecular y consecuentemente, presentan mayor tiempo de retención comparado con la gasolina. En el caso del diesel, estos tiempos de retención son muy cercanos entre sí, razón por la que la línea base presenta una forma de campana (figura 1B). La figura 1C corresponde al cromatograma obtenido para la muestra de suelo contaminado en la que se observa la presencia de los hidrocarburos pesados de la gasolina, además de los hidrocarburos del diesel. Seguramente, los hidrocarburos ligeros de la gasolina ya habían sido volatilizados de manera natural a causa del intemperismo.

La concentración de hidrocarburos de gasolina y diesel en el suelo contaminado fue: de 992.64 mg/kg, de los cuales 485.72 mg/kg correspondían a gasolina intemperizada, y 506.92 mg/kg a diesel (tabla 2).

La determinación de hidrocarburos totales del petróleo (HTPs) por espectrometría en infrarrojo es inespecífica, sin embargo, se realizó para tener un control adicional. La concentración de HTPs obtenida fue de 4,460.78 mg/kg (tabla 2).

Seguimiento de la biorremediación del suelo

Meses después de la adición de nutrientes se realizaron muestreos para el seguimiento de la biorremediación. El pH del suelo afectado, después del tratamiento se redujo a 7.87, y se mantuvo en esa cifra. A

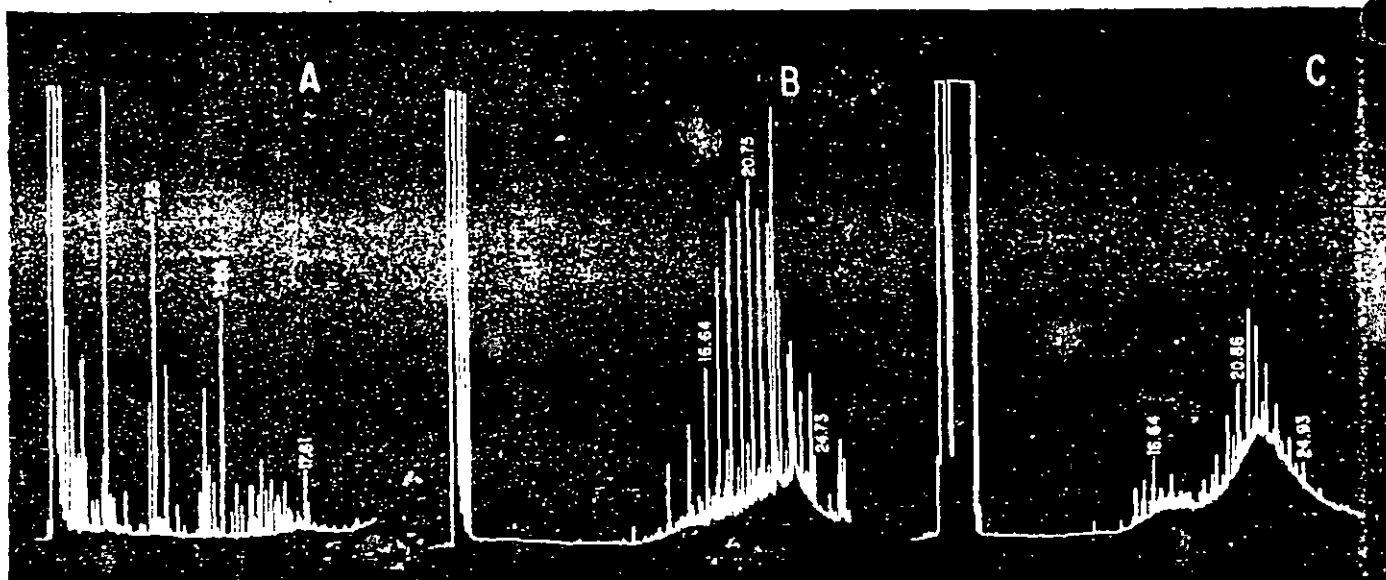


Figura 1. (A) Cromatograma de gasolina estándar. (B) Cromatograma de diesel estándar. (C) Cromatograma de la muestra de suelo contaminado antes del tratamiento.

los 2 meses, el contenido de materia orgánica disminuyó como un reflejo de la reducción de contaminantes, y más aún a los 6 meses.

La concentración de nitrógeno total al momento de la adición de nutrientes fue de 2,000 mg/kg y los fosfatos quedaron en 12 mg/kg. Estas concentraciones corresponden a suelos ricos en nutrientes. Después de 2 meses de tratamiento se había consumido el 29 por ciento del nitrógeno total y a los 6 meses 67.5 por ciento. En cuanto a los fosfatos, a los 2 meses se había consumido el 30 por ciento y a los 6 meses el 77 por ciento. Esta reducción fue producto de la actividad microbiana autóctona.

Por lo que respecta a la cuenta de bacterias heterótrofas, a los 2 meses de tratamiento se incrementó en un orden de magnitud como una respuesta a la estimulación de la actividad biológica del suelo. Después de la aplicación de nutrientes, la generación de bióxido de carbono y el consumo de oxígeno también aumentaron notablemente, con lo cual se confirmó que

la actividad biológica del suelo había sido estimulada.

Después de 2 meses de tratamiento, la concentración de hidrocarburos totales de gasolina y diesel en el suelo se redujo en 89.97 por ciento, que correspondía 99.6 por ciento a gasolina y 80.76 por ciento a diesel. A los seis meses la concentración de diesel se redujo en un 97.98 por ciento, quedando únicamente 10.24 mg/kg de hidrocarburos residuales. La presencia de hidrocarburos de gasolina ya no fue detectada.

En la figura 2A, se presenta el cromatograma obtenido para el suelo después de 2 meses de tratamiento. Aquí se observan picos con tiempos de retención cortos que corresponden a hidrocarburos de bajo peso molecular y de menor complejidad química, los cuales corresponden a los productos de biodegradación constituidos por menos de 10 átomos de carbono. En la figura 2B se presenta el cromatograma de diesel estándar para facilitar la comparación.

Tabla 2. ANÁLISIS DE HIDROCARBUROS

Método de análisis	Suelo contaminado					
	Antes del tratamiento		Después de 2 meses de tratamiento		Después de 6 meses de tratamiento	
	(Resultados en base seca)					
		(mg/kg)	(mg/kg)	% Eliminación	(mg/kg)	% Eliminación
Gasolina EPA 8015 M	485.72	2	99.60	ND	100	
Diesel EPA 8015 M	506.92	97.54	80.76	10.24	97.98	
Hidrocarburos totales de gasolina y diesel EPA 8015 M	992.64	99.54	89.97	10.24	98.97	
Hidrocarburos totales del petróleo EPA 418 1M	4,460.78	1,454.86	89.80	87.64	98.04	

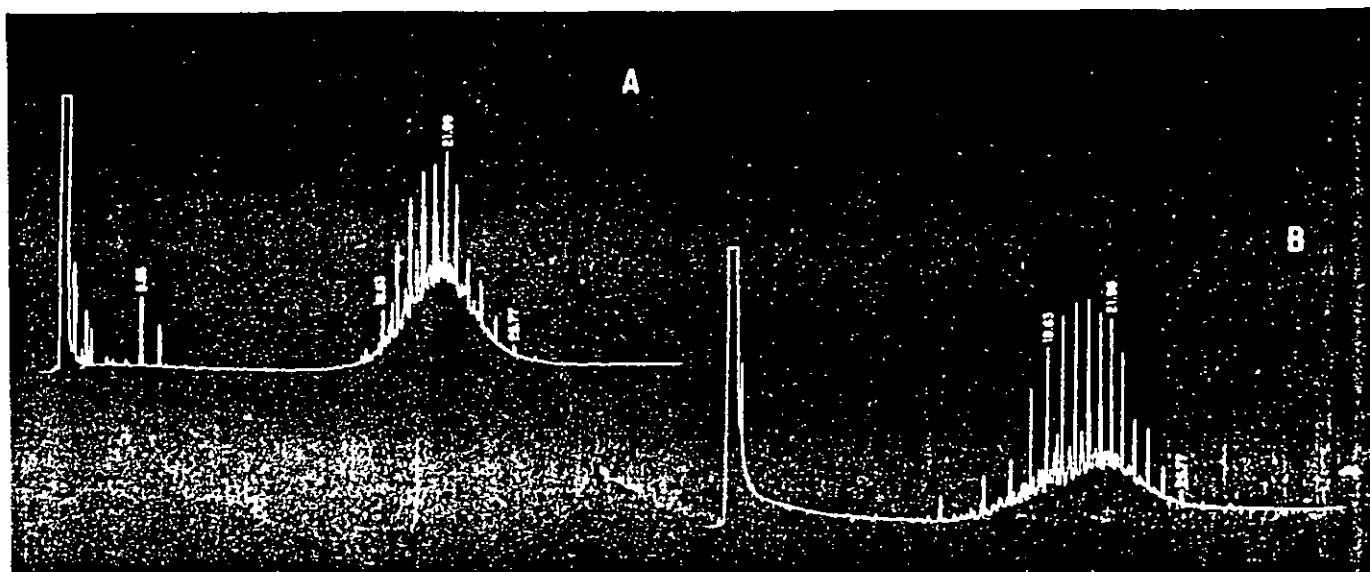


Figura 2. (A) Cromatograma de la muestra de suelo contaminado después de 2 meses de iniciado la bioestimulación. (B) Cromatograma de diesel estándar

En el cromatograma obtenido con la muestra de suelo a los 6 meses de tratamiento (figura 3A) se observa una notable reducción en la incidencia y tamaño de los picos, así como de la forma de campana que presentaba la línea base, esto se debe a una reducción en la concentración de los hidrocarburos de diesel. También se observa

un mayor número de picos con tiempos de retención cortos, que corresponden a los productos de la biodegradación con menor peso molecular. Nuevamente se hace la comparación con diesel estándar obtenido para la misma fecha del análisis, en la figura 3B.

Mediante el método EPA 418.1, la concentración de HTPs a los 2

meses de tratamiento se redujo en un 89.80 por ciento, y a los 6 meses en un 98 por ciento. Estas cifras coinciden con los porcentajes de reducción reportados para la concentración de diesel por el método EPA 8015 M.

A los 4 meses de tratamiento se empezó a observar el desarrollo natural de algunas especies vegetales

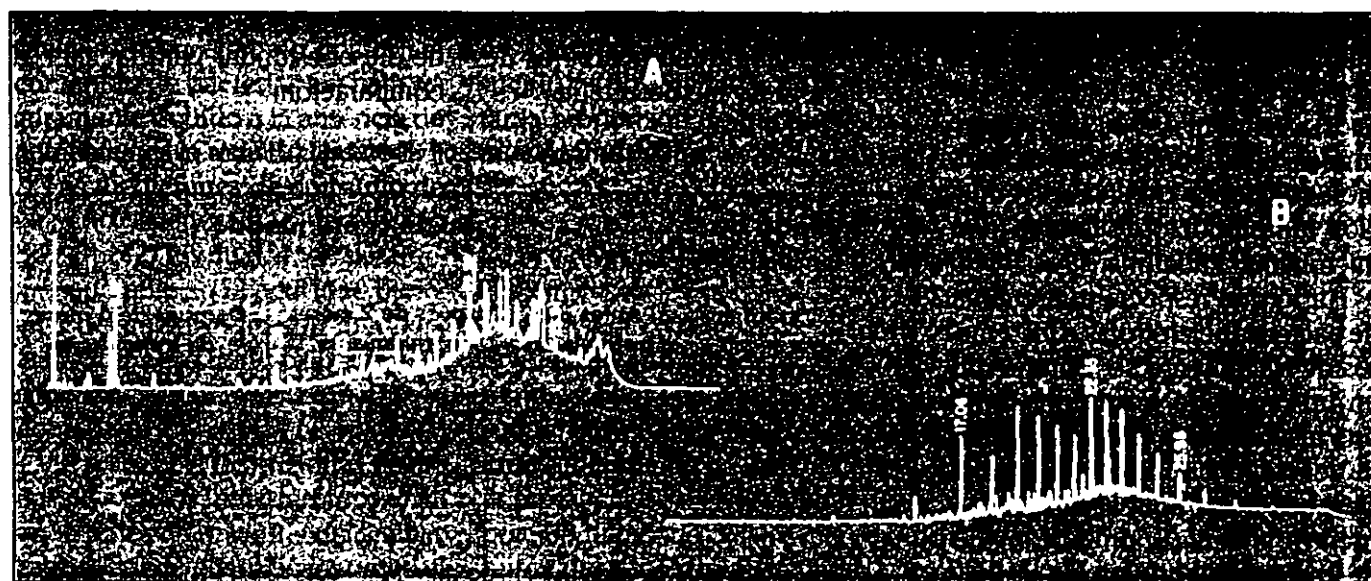


Figura 3. (A) Cromatograma de la muestra de suelo contaminado después de 6 meses de bioestimulación. (B) Cromatograma de diesel estándar

propias de la región, por lo que al siguiente mes, se sembraron otras especies más, las cuales empezaron a crecer y a desarrollarse rápidamente. Después de la temporada de lluvias, a 8 meses de la bioestimulación, se observó el crecimiento masivo de especies autóctonas, que incluso invadieron las que habían sido sembradas con anterioridad. En las figuras 1A y 1B se presentan fotografías del sitio antes y después de la biorremediación.

Después de un año de haber iniciado la bioestimulación con nutrientes se tomó otra muestra de suelo para realizar un análisis cromatográfico. El perfil obtenido se presenta en la figura 5A, donde se puede apreciar con mucha claridad la desaparición de los hidrocarburos del diesel y una mayor incidencia de productos de la biodegradación. La figura 5B corresponde al diesel estándar correspondiente al análisis de la misma fecha.

De los análisis realizados, se puede estar seguro que el método más confiable para el seguimiento de la concentración de hidrocarburos fue el EPA 8015 M, dado que se pudo determinar que se trataba de una mezcla, además, de que se pudo constatar la transformación de algunos hidrocarburos en otros de menor peso molecular.

Los resultados obtenidos demostraron que se alcanzó la limpieza del sitio, en virtud de que no solamente se eliminaron del suelo los hidrocarburos contaminantes, sino que además, la concentración residual es tan baja que podría incluso considerarse como insignificante. En virtud de que en México no existe una normatividad que establezca los límites de limpieza para suelos, en el caso particular de este trabajo se hizo referencia al límite inferior de lo establecido por las

normatividades de los estados de Arkansas, Delaware e Idaho, en los Estados Unidos de Norteamérica, que es de 100 mg/kg, en virtud de que se utilizó el mismo método analítico para la cuantificación de los hidrocarburos (Saval, 1995).

Si bien la concentración de contaminantes en el suelo contaminado no era muy alta, si representaba un problema de contaminación al cual había que darle una solución. Con el trabajo realizado se demostró el gran potencial de los microorganismos autóctonos para ser utilizados en la degradación de contaminan-

tes. La experiencia del trabajo en campo, combinada con el seguimiento analítico en el laboratorio, permitió demostrar claramente cómo fue ocurriendo la transformación de los hidrocarburos. La estrategia establecida podría servir como referencia para futuros proyectos de biorremediación.

El procedimiento realizado, sencillo y económico, permitió dar a un suelo una actividad biológica que no tenía antes de haber sido contaminado, por lo cual se considera haber logrado la remediación del suelo y la restauración del sitio.

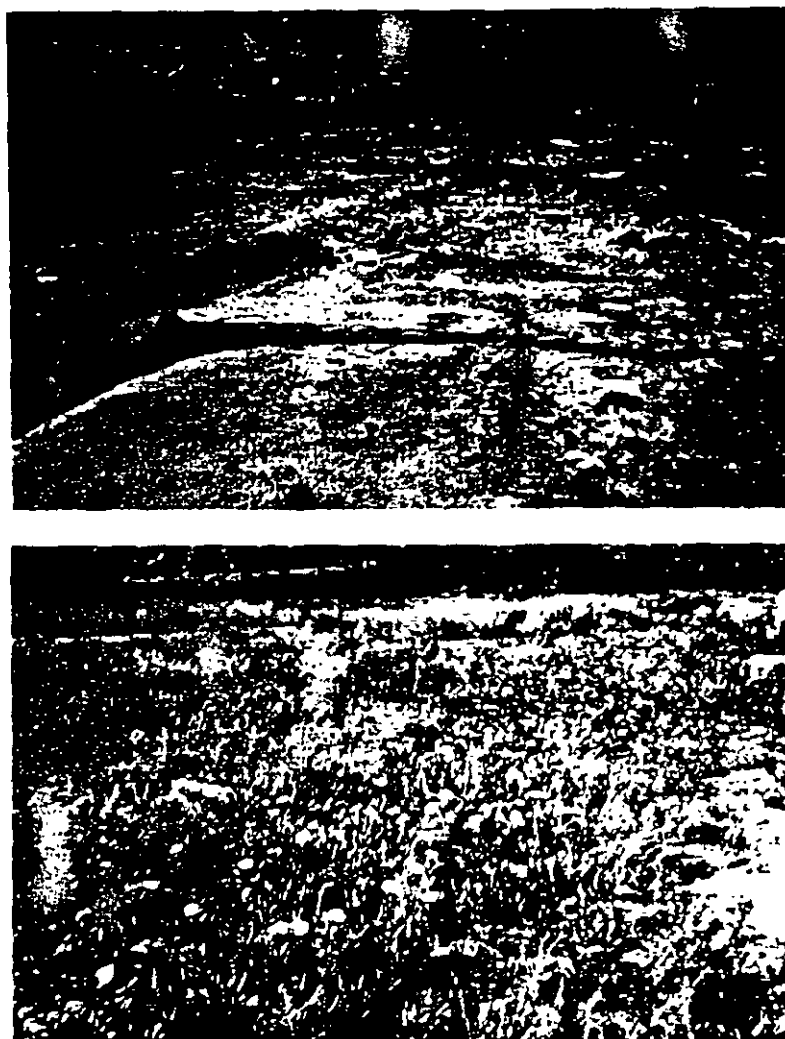


Figura 4. Visto del sitio donde se realizó el estudio antes del tratamiento (arriba), ocho meses después de la bioestimulación (abajo).

Conclusiones

Se demostró una reducción de hidrocarburos muy cercana al 100 por ciento, mediante los métodos de análisis EPA 8015 M y EPA 418.1 M.

Se demostró la transformación de hidrocarburos de diesel en unidades con peso molecular de menos de 10 átomos de carbono.

Los hidrocarburos residuales de gasolina con peso molecular más alto, fueron completamente eliminados.

El suelo tratado fue capaz de soportar el desarrollo y crecimiento de especies vegetales típicas de la zona.

Después de seis meses del tratamiento, en el suelo se confirmó la presencia de bacterias heterótrofas con características degradadoras de diesel y gasolina.

Se confirmó que el suelo tiene actividad biológica propia, la cual estimuló por la adición de nutrientes y el desarrollo de especies vegetales.

El procedimiento realizado, sencillo y económico, permitió dar a un suelo una actividad biológica que no tenía antes de haber sido

contaminado, por lo cual se considera haber logrado la remediación del suelo y restauración del sitio.

Reconocimientos

Este proyecto fue patrocinado por la Gerencia de Protección Ambiental y Seguridad Industrial, la Gerencia de Ductos y la Superintendencia de Ductos Pacífico de Pemex Refinación. Adriana Domínguez, Alma Guadalupe Guzmán y Martha Carrasco participaron en el trabajo de laboratorio en el Instituto de Ingeniería. Miguel Ángel Juárez y Eleazar Rojas realizaron los análisis de hidrocarburos.

Bibliografía

- Autry A.R. and Ellis G.M., 1992. *Bioremediation: an effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil*. Environ. Progress 11(4): 318-323.
- Baugh A.L. and Lovegreen J.R., 1993. "Differentiation of crude oil and refined petroleum products in soil", en *Principles and practices for petroleum contaminated soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. Eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 25-47.
- Carter M., 1993. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society of Soil Science, Lewis Publishers, Boca Raton, USA.
- Dragun J., 1989. "Recovery techniques and treatment technologies for petroleum and petroleum products in soil and groundwater", en *Petroleum contaminated soils*, vol. I. Calabrese E.J. & Kostecki P.T. eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 211-217.
- Jackson M. L., 1982. *Análisis químicos de suelos*. Ediciones Omega, 4a. edición, Barcelona, España.
- Kute A. and Lee A., 1986. "Methods of soil analysis", en *Agronomy*, No 9 Society of Agronomy, Soil Science Society of America, USA, 545-567.
- Potter T., 1993. "Analysis of petroleum contaminated soil and water", en *Principles and practices for petroleum contaminated soils*. Calabrese E.J. and Kostecki P.T. eds., Lewis Publishers, Boca Raton, USA., 1-14.
- Riser-Roberts E., 1992. *Bioremediation of petroleum contaminated sites*. C.K. Smoley, Boca Raton, FL, USA.
- Rogers J.A., Tedaldi D.J., and Kavanaugh M.C., 1993. "A screening protocol for bioremediation of contaminated soil", *Environ. Progress* 12(2), 146-156.
- Saval S., 1995. "Remediación y restauración en PEMEX: Ambiente y energía. Los retos del futuro", co-edición UNAM-Petróleos Mexicanos, Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM, México, 151-189.
- Velázquez A. y León R., 1974. "Comparación de métodos en la determinación de textura", VI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo, México.

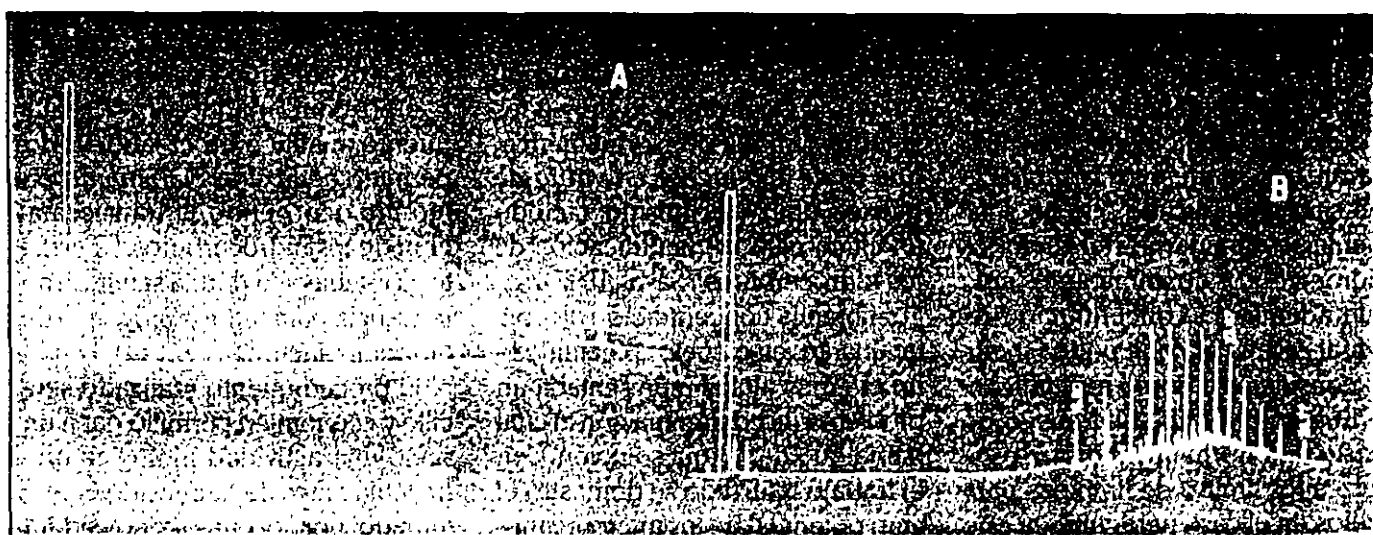
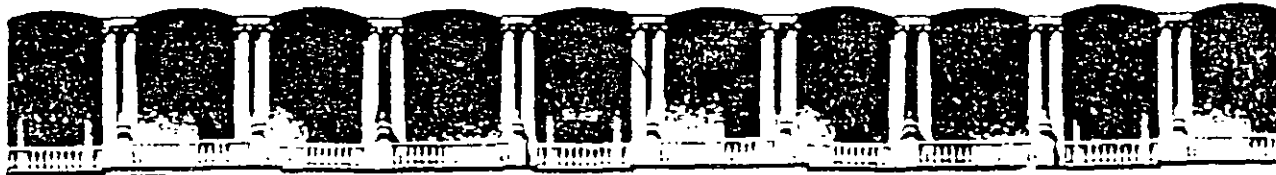


Figura 5. Cromatograma de hidrocarburos de la muestra de suelo contaminado (A) y cromatograma de la muestra de suelo después de la bioremediación (B). Cromatograma de diesel estándar.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

**MODELOS MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

*Delineación de áreas de protección de fuentes de abastecimiento de agua
subterránea*

**M. en C. Orlando García Rojas
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

**CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACIÓN DE
ACUÍFEROS**

**MÓDULO III. MODELOS EN GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN
DE ACUÍFEROS**

**Delineación de Áreas de Protección de Fuentes de
Abastecimiento de Agua Subterránea**

Instructor: M. en C. Orlando García Rojas
Comisión Nacional del Agua
Gerencia de Aguas Subterráneas

Octubre/98

Instructor: Orlando García Rojas

I. GENERALIDADES

El agua es uno de los recursos naturales más importantes con lo que cuenta el país, de su aprovechamiento depende la existencia y desarrollo de grandes núcleos de población.

Las sustancias tóxicas generadas por el crecimiento demográfico e industrial en muchos casos son inadecuadamente almacenadas, lo que propicia lixiviados que al infiltrarse en el suelo representan un factor de riesgo de contaminación del agua subterránea, así como el uso de agroquímicos y aguas residuales no tratadas. La contaminación de las aguas subterráneas pueden generar diversos efectos adversos como: daños a la salud, inutilización de fuentes de agua potable y deterioro del medio ambiente. De ahí la importancia de delinear áreas de protección alrededor de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea, lo cual consiste en definir los límites geográficos más críticos que protejan dichas fuentes de algún contaminante que eventualmente puede alcanzarlas. Para ello existen diversos métodos: manuales, analíticos, códigos analíticos y numéricos.

La zona de contribución es el área del acuífero que recarga al pozo. Esta zona está sujeta a alteraciones de forma y tamaño dependiendo de los valores de bombeo del pozo y de otros factores. Algunos contaminantes localizados en la zona de contribución podrían ser atraídos dentro del pozo junto con el agua; por lo que el área de protección de un pozo de abastecimiento debería de abarcar si es posible la zona de contribución, **Figura 1**.

El primer paso para cualquier técnica de delineación involucra reunir la mayor información posible acerca de la hidrología y geología natural del área por proteger el recurso agua. En esta etapa el objetivo del equipo de planeación es establecer un mapa base de la comunidad, dando información a detalle de las características naturales del área superficial y del subsuelo y mostrar la localización de todos los pozos de abastecimiento público y fuentes de abastecimiento de agua. La **Tabla 4.1**.

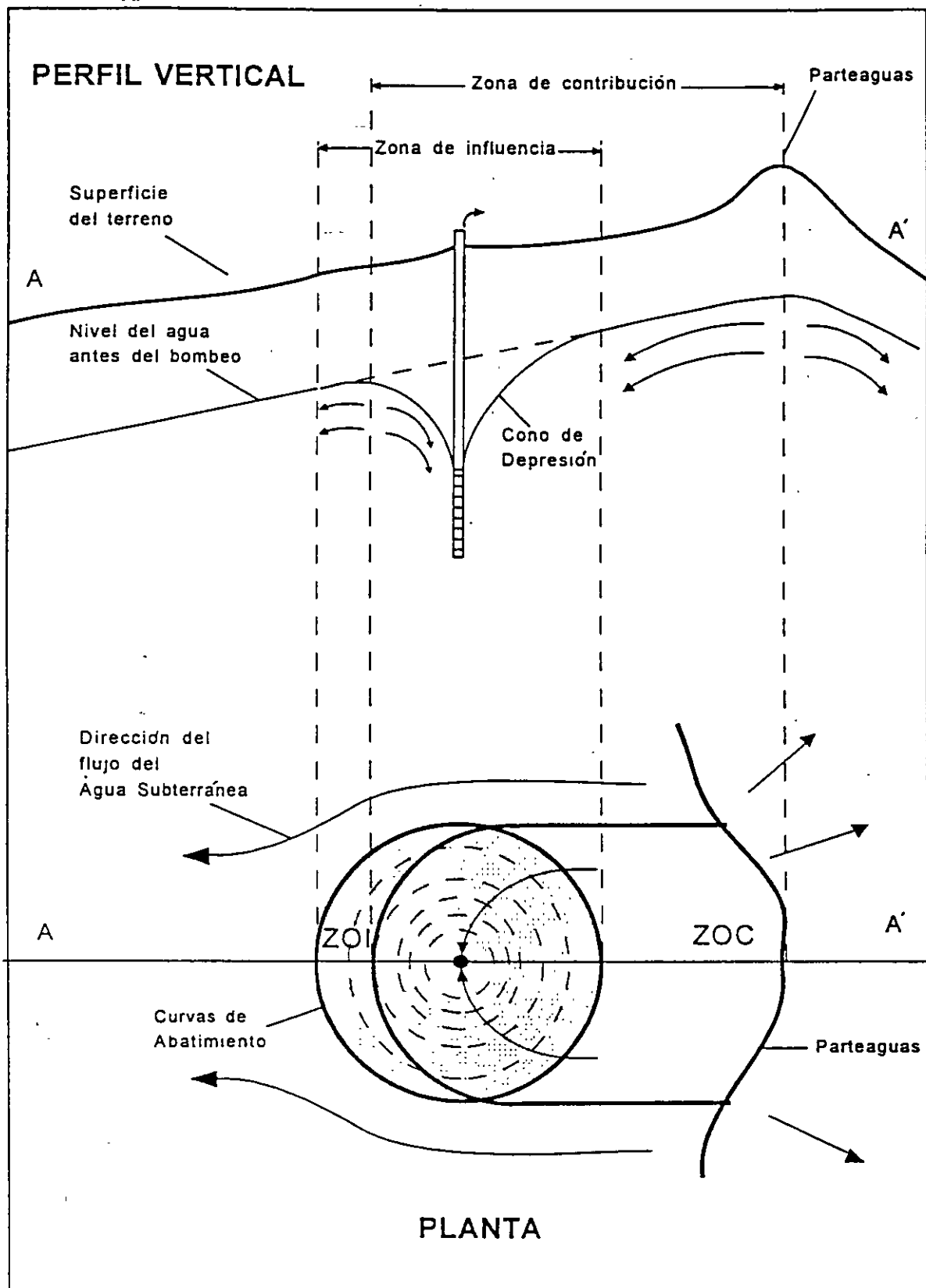
III. DELINEACIÓN DEL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FUENTES DE ABASTECIMIENTO.

III. 1. Consideraciones.

Es importante destacar que las áreas de protección no son tan apropiadas en acuíferos sobreexplotados, ya que estos tienden a interactuar y combinar, en este caso se necesita proteger toda el área de recarga del pozo, implantando controles estrictos en las actividades que se realicen dentro de dicha área. En este sentido cabe mencionar que el área de protección más amplia que se puede definir para un pozo o manantial es la de su captación y recarga.

Es común emplear la máxima de tasa de extracción permitida (no la vigente) conjuntamente con la tasa promedio de recarga a largo plazo al calcular las áreas de protección.

Para eliminar completamente el riesgo de contaminación, toda actividad potencialmente contaminante tendría que ser prohibida o controlada al nivel requerido dentro de toda la zona de captación. Esto será frecuentemente insostenible debido a presiones socioeconómicas



	Origen del agua subterránea		Localización de pozos	Información hidrogeológica							Pantanos	Zonas de inundación	Cuencas de drenaje	Áreas de servicio de alcantarillado	Zonas propuestas para el desarrollo	Local. de fuentes posibles de contaminantes
	Calidad del agua subterránea	Disponibilidad del agua subterránea		Transmisividad	Almacenamiento	Conductividad hidráulica	Perfiles de suelo y geología superficial	Reuso del agua superficial								
Mapa Topográfico			✓				✓	✓	✓			✓				✓
Mapa Geológico		✓		✓			✓	✓	✓							
Mapa de suelo						✓	✓	✓	✓							
Fotografías Aéreas			✓				✓	✓	✓			✓				✓
Imagen de Satélite							✓	✓	✓							✓
Mapeo del Sistema hidrológico			✓					✓	✓			✓				
Mapeo de zonas pantanosas								✓	✓							
Mapeo de zonas de inundación								✓	✓	✓						
Mapas de INEGI	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓			✓				
Registros de pozos	✓	✓	✓	✓	✓	✓										
Tiempo de perforación	✓	✓					✓									
Mapas de nivel de aguas freáticas		✓	✓													
Mapa de uso de suelo			✓					✓	✓						✓	✓
Mapeo de zonas			✓					✓	✓						✓	✓
Mapas de caminos y servicios													✓		✓	✓

- Los registros del tiempo de perforación pueden ser usados también para obtener información de la geología del subsuelo de un área

Tabla 3.1 Información disponible de mapas existentes

para el desarrollo, por lo que resulta conveniente efectuar alguna división de la zona de captación para aplicar restricciones más severas en aquellas áreas cercanas al pozo o manantial.

Esta subdivisión puede basarse en diversos criterios, dependiendo de la amenaza de contaminación percibida, que incluye: distancia horizontal, tiempo de flujo horizontal, proporción del área de recarga, dilución de la zona saturada y/o capacidad de atenuación. Sin embargo, en general se considera una combinación del tiempo de flujo horizontal y el criterio de distancia más apropiado.

En la práctica, es conveniente realizar de dos a tres subdivisiones de toda la zona de captación:

- Área operacional;
- una zona de protección interior, relacionada al control de la contaminación de patógenos y;
- quizás una zona de protección exterior que permita un control diferencial de las fuentes puntuales o difusas de contaminación en el área restante.

La zona operacional es el área interna de máxima protección, que comprende un área pequeña alrededor del mismo pozo o manantial. En esta área, no se deberán permitir actividades que no estén relacionadas propiamente con la extracción del agua, e incluso estas actividades deberán estar celosamente evaluadas y controladas para evitar la posibilidad de que algún contaminante alcance directamente al pozo. La especificación de la dimensión de esta área es un tanto arbitraria, dependerá hasta cierto punto del carácter de las formaciones geológicas presentes, pero siempre debe ser de mas de 30 m en radio

Es recomendable definir una zona de protección interna, para prevenir a las captaciones de agua subterránea de la contaminación patogénica, basada en la distancia equivalente a un tiempo de flujo horizontal específico. El tiempo empleado ha variado significativamente entre las agencias reguladoras en los diferentes países de 10 a 400 días.

Una revisión de todos los casos históricos publicados sobre contaminación de aguas subterráneas por patógenos (.....), ha concluido que la distancia del transporte horizontal de la bacteria y virus en la zona saturada está gobernada principalmente por la velocidad del flujo de las aguas subterráneas. En incidentes de contaminación reportados, la distancia horizontal entre el pozo o manantial y la fuente de contaminación comprobada era equivalente a no más que la distancia recorrida por el agua subterránea en 20 días, a pesar del hecho de que los patógenos son capaces de sobrevivir más de 400 días en el subsuelo. Es razonable, en consecuencia, utilizara 50 días para definir la zona de protección interna, que concuerda con la practica existente en muchos casos.

El criterio utilizado para la definición de la zona de protección externa será inevitablemente arbitrario. Puede ser un porcentaje fijo del área de la zona de captación o un tiempo fijo del flujo horizontal al pozo o manantial. Una posibilidad, teniendo en cuenta que las fuentes de contaminación puntual y difusa, y los contaminantes degradantes y persistentes necesitan diferentes tipos de medidas de control, seria usar el tiempo de flujo horizontal en un orden

de magnitud mayor que el usado para la zona de protección interna (500 días), pero establecer un límite mínimo de 25% como la proporción de la zona de captación protegida.

III.3 Criterios para delinear áreas de protección de fuentes de abastecimiento.

La Agencia Norteamericana de Protección Ambiental, EPA (1987) ha recomendado cinco criterios como las técnicas básicas para delinear las áreas de protección de fuentes de abastecimiento. Estos criterios son:

Distancia.

El criterio de distancia es usado para delinear áreas de protección en fuentes de abastecimiento mediante el cálculo de un radio fijo, medido desde el pozo a la frontera del área de protección de la fuente de abastecimiento. Esta técnica es la más simple, la menos cara, y el método más directo para delinear fuentes de abastecimiento. Este es sólo recomendado como un paso preliminar, debido a que no incluye los procesos de flujo de agua subterránea o transporte de contaminantes.

Abatimiento.

El abatimiento es el descenso de la elevación del nivel del agua inducido por un pozo de bombeo. El mayor abatimiento se presenta en el pozo y va disminuyendo conforme se aleja de este hasta alcanzar un límite externo donde el nivel del agua no es afectado por el bombeo. Este límite externo es la zona de influencia o la extensión del área del cono de depresión del pozo. Las velocidades del flujo de agua subterránea se incrementan alrededor del pozo de bombeo; por lo tanto, el abatimiento puede incrementar el flujo de contaminantes alrededor de un pozo. El criterio de abatimiento puede ser usado para delinear los límites de la zona de influencia y ésta puede ser usada como un área de protección de la fuente de abastecimiento.

Tiempo de viaje.

El criterio de tiempo de viaje es usado para representar el tiempo que le toma al agua subterránea o a un contaminante fluir desde un punto dentro de la zona de contribución de un pozo, hasta el pozo. Usando este criterio, las isocronas (curvas de igual tiempo) para períodos de tiempo seleccionados, se delinean en un mapa. El área contenida dentro de una isocrona es referida como la zona de transporte (ZOT) y ésta se usa, como al área de protección de una fuente de abastecimiento.

Fronteras de flujo.

El criterio de frontera de flujo se usa para determinar los lugares donde se divide el agua subterránea y/o otras características físico/hidrológicas que controlan el flujo, para con ello definir el área geográfica que contribuye con agua subterránea a un pozo de bombeo. Esta área es la zona de contribución (ZOC) del pozo y se utiliza como un área de protección de fuentes de abastecimiento. Este método asume que los contaminantes entran al ZOC alcanzando eventualmente un pozo de bombeo.

El criterio de fronteras de flujo es especialmente usado para pequeños sistemas acuíferos.

Capacidad asimilativa.

El criterio de capacidad asimilativa toma en cuenta el hecho de que la sección saturada y/o la no saturada de un acuífero pueden atenuar la toxicidad de contaminantes antes de que éstos alcancen un pozo de bombeo por medio de los procesos de dilución, dispersión, absorción y precipitación química o degradación biológica. Esta técnica, sin embargo, requiere conocimientos de modelación sofisticada de transporte de contaminantes y una extensa información sobre la hidrología, geología y geoquímica del área de estudio. Por lo tanto, ésta técnica no es realista para estudios limitados.

III.4. Métodos de delineación.

III.4.1 Métodos manuales

Radio arbitrario fijo.

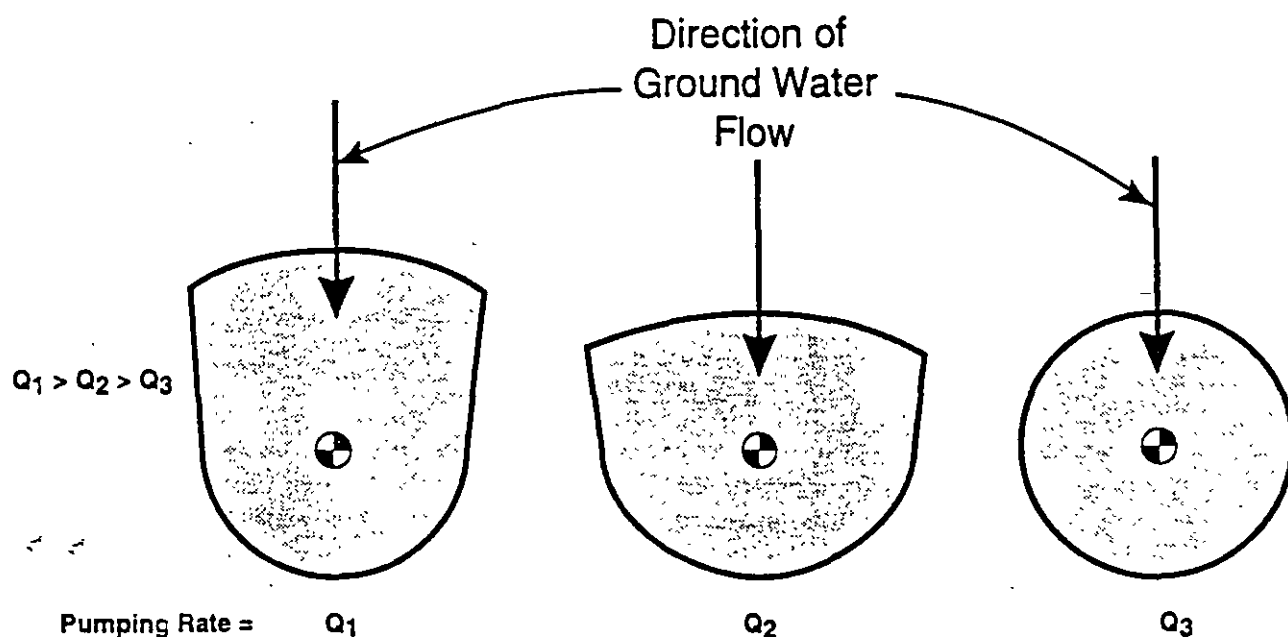
Este enfoque de protección de fuentes de abastecimiento involucra dibujar un círculo de radio específico alrededor de cada pozo para definir el área de protección. Por ejemplo, algunas comunidades en Georgia han seleccionado un radio de 1,500 ft (457.2 m) alrededor de cada pozo; el estado de Louisiana usa 1 milla (1,609 m) de radio para acuíferos confinados y 2 millas (3,218 m) para acuíferos no confinados.

Ventaja y desventajas.

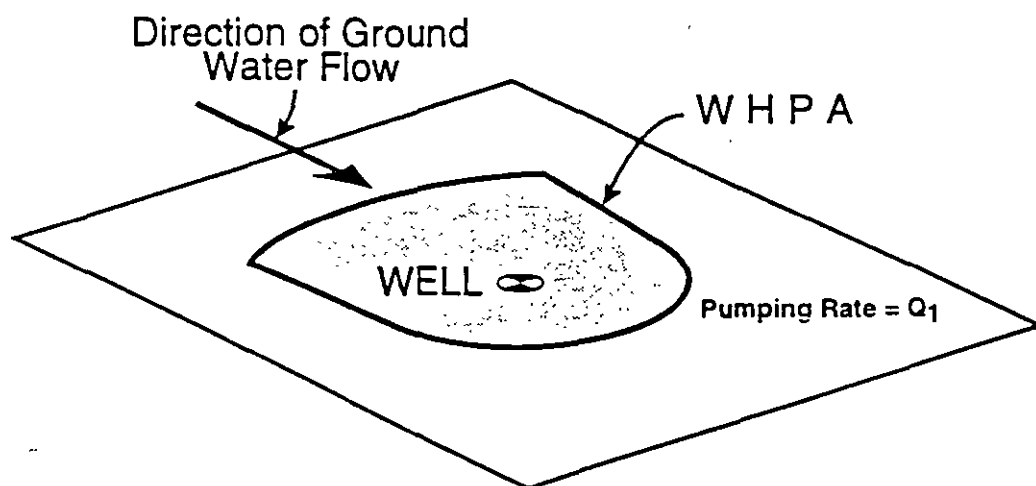
Este método es muy fácil, económico y requiere de técnicos con poca experiencia. Escogiendo un radio fijo grande se le puede contrarrestar un poco a este método la baja efectividad y compensar en algo sus limitaciones técnicas. Este método puede verse como una medida temporal hasta poder usar un método de delineación más sofisticado. El método puede ser especialmente útil si existe una amenaza de contaminación inminente que demande inmediata atención.

Formas variables.

Este método involucra el uso de modelos analíticos para producir formas estandarizadas de áreas de protección de pozos, usando criterios hidrogeológicos, tiempo de viaje y fronteras de flujo representativas (localización de características físicas o hidrológicas que controlen el flujo de agua subterránea). Se calculan varias formas estandarizadas para diferentes grupos de condiciones hidrogeológicas. Son posibles muchas formas para cada grupo de condiciones, sin embargo, esta metodología escoge pocas formas generalizadas. La forma más conveniente es escoger por determinación para cada pozo que tan fielmente aquellas formas igualan las condiciones hidrogeológicas y de bombeo exhibidas por el pozo a proteger. Una vez que la forma estandarizada apropiada se ha identificado, esta deberá estar correctamente alineada el rededor la base del pozo en dirección del flujo de agua subterránea (Fig. 4.12). La extensión del área de protección del pozo aguas arriba se

STEP 1***Delineate Standardized Forms for Certain Aquifer Type***

Various standardized forms are generated using analytical equations using sets of representative hydrogeologic parameters. Upgradient extent of WHPA is calculated with Time of Travel equation; downgradient with uniform flow equation.

STEP 2***Apply Standardized Form to Wellhead in Aquifer Type***

Standardized form is then applied to wells with similar pumping rate and hydrogeologic parameters.

Figure 4-12. Wellhead protection area delineation using the simplified variable shapes method (U.S. EPA, 1987).

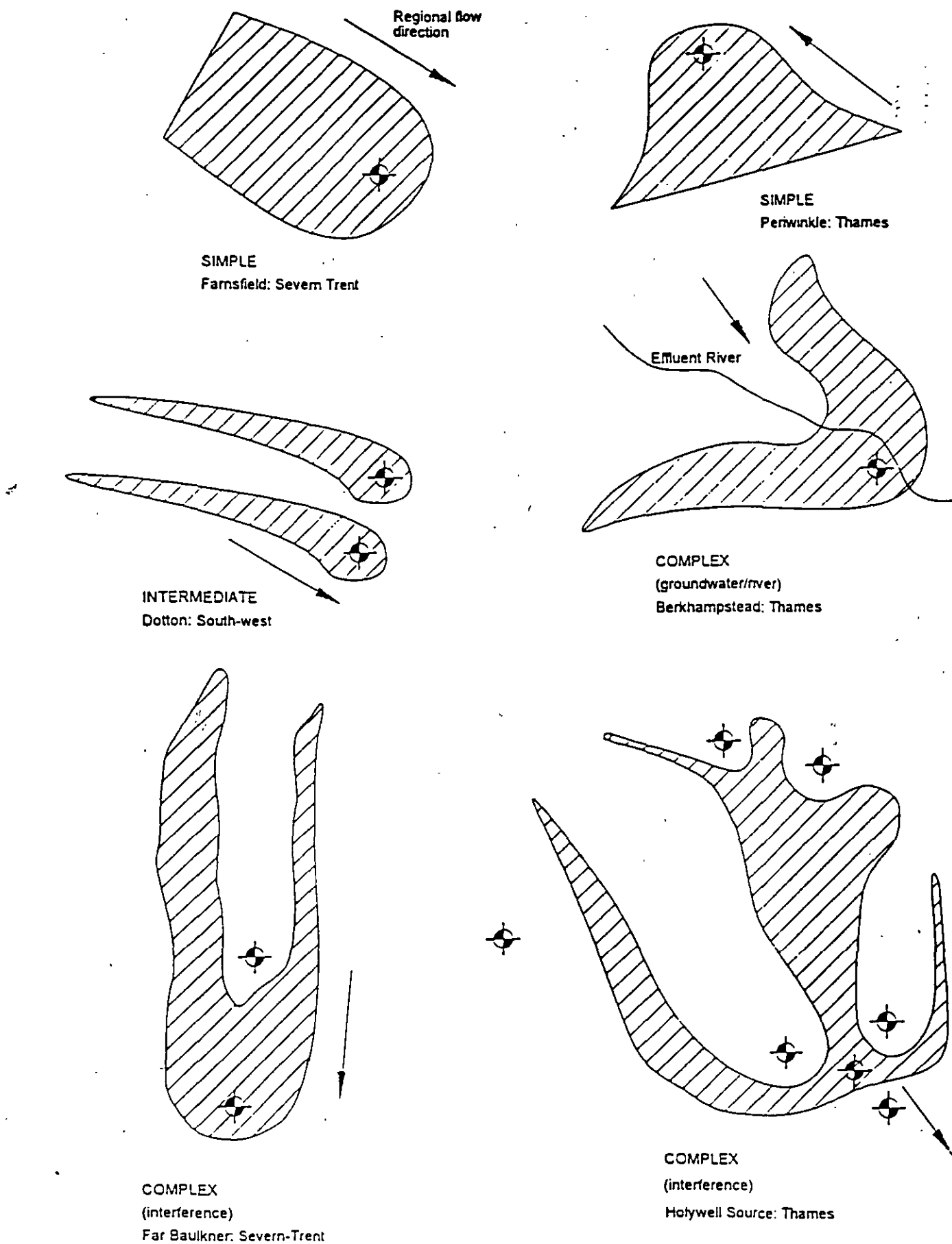


Figure 4.12 Examples of shapes of source catchment zones

determina usando una ecuación de tiempo de viaje y la zona de contribución del pozo (el área total que recarga o contribuye con agua al pozo), incluyendo la distancia aguas abajo. Las fronteras de flujo de agua subterránea aguas abajo son calculadas usando la ecuación de flujo uniforme (Fig.4-13).

La ventaja de usar formas variables, consiste en que este método requiere pocos datos de campo actuales y puede implementarse fácilmente una vez que las formas estandarizadas han sido calculadas. Esto ofrece una mayor comprensión técnica en la delineación que el método de radio fijo con solo un pequeño incremento de costo. Una vez que las formas estandarizadas están desarrolladas, la información necesaria requerida es solo el volumen de bombeo del pozo, tipo de material y la dirección del flujo de agua subterránea (U.S. EPA, 1987).

Las desventajas de esta metodología incluye el potencial de imprecisiones en áreas con muchos cambios geológicos y de fronteras hidrológicas. Además, es esencial recopilar una gran cantidad de datos para desarrollar las figuras de las formas estandarizadas y para caracterizar adecuadamente los patrones de flujo del agua subterránea en el sitio del pozo. A un nivel simple, este método es mas adecuado que los métodos de radio fijo arbitrario o calculado, pero sus resultados pueden ser inadecuados por pequeños errores en la información.

Radio fijo calculado

- Zona de captura de la fuente (Source Catchmen Zones).

El área de la zona de captura de una fuente en una región sujeta a recarga anual, puede calcularse con una relación de balance de agua como:

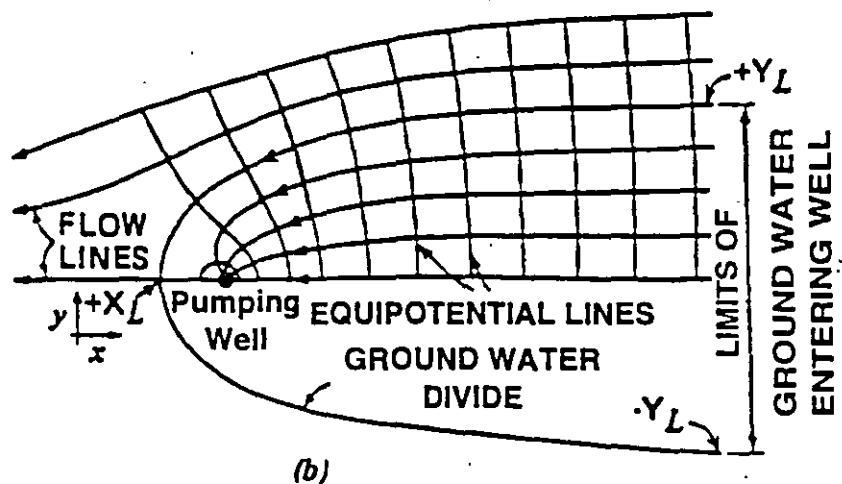
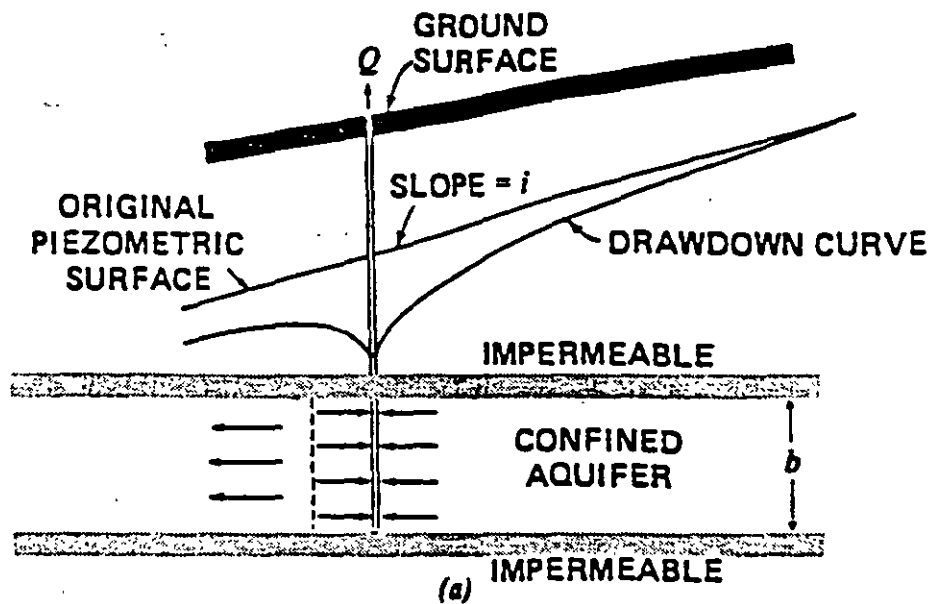
$$A_R = \frac{q_{aa}}{R_e}$$

Donde:

- A_R Área de la zona de captura (m^2)
 q_{aa} Volumen anual autorizado (m^3)
 R_e Recarga anual (m), calculado de un balance simple de aguas subterráneas.

Este cálculo puede ser usado solo como una guía, en vista de que la recarga en el área de captura puede variar por razones tales como la presencia depósitos en movimiento, variación en la cobertura vegetal, etc.

Si la superficie piezométrica es horizontal, la captura en una fuente de extracción puede suponerse circular, y por lo tanto, el radio de captura podrá ser fácilmente calculado (Fig.5.1). Aunque esta situación normalmente no ocurre en la práctica, es una aproximación útil donde no existen suficientes datos para determinar el gradiente hidráulico y la dirección del flujo subterráneo.



$$-\frac{Y}{X} = \tan \left(\frac{2\pi Kbi}{Q} Y \right)$$

UNIFORM-FLOW
EQUATION

$$X_L = -\frac{Q}{2\pi Kbi}$$

DISTANCE TO
DOWN-GRADIENT DIVIDE
OR STAGNATION POINT¹

$$Y_L = \pm \frac{Q}{2Kbi}$$

BOUNDARY LIMIT

Where:
Q = Well Pumping Rate
K = Hydraulic Conductivity
b = Saturated Thickness
i = Hydraulic Gradient
 $\pi = 3.1416$

¹ Place in ground water flow field at which ground water is not moving.

FIGURE 4-13. WHPA delineation using the uniform flow analytical model (Todd, 1980).

Las áreas de captura alrededor de las fuentes de abastecimiento se pueden delinear usando la ecuación anterior cuando no hay datos suficientes para justificar el uso de modelos numéricos, pero en general las zonas se pueden modificar manualmente considerando la geometría local y las fronteras topográficas.

Puede ser necesario tomar en cuenta la interferencia entre pozos de extracción cercanos o adyacentes, en tales casos, son más apropiados los modelos numéricos o semianalíticos. El uso de tales modelos han mostrado que la geometría de las zonas de captura pueden ser complejas y aquellas zonas dibujadas por métodos manuales pueden representar una sobre simplificación de la geometría verdadera

Las zonas de captura de los manantiales son también generalmente dibujadas usando métodos manuales porque los datos son generalmente escasos o no existen. Los manantiales son también algo complejos en detalle (particularmente estos consisten de fuentes separadas) y puede ser necesaria una visita del sitio para determinar como se colecta el agua en la fuente.

Ejemplo. Pozo: P-41. Localización: Col. San Primitivo, Tlahuelipan, Hgo.

Datos.

$Q_{\text{máx.}} = 30 \text{ lps}$

$Q_{\text{exp.}} = 25 \text{ lps}$

Tiempo de operación del pozo = 18 hrs/d

Balance (Anzaldo, 1995)

Período de balance: marzo/1982 a marzo/1992

Área de la zona II = $256 \text{ km}^2 = 256,000,000 \text{ m}^2$

Recarga total zona II = $1,683.819 \text{ Mm}^3$

Cálculo BGS

Volumen anual autorizado

$$q_{aa} = (0.025)(60)(60)(18)(365)$$

$$q_{aa} = 591300.0 \text{ m}^3 / a$$

Recarga anual:

$$\text{Recarga}_{\text{anual}} = (1,683.819)(1,000,000)/(10) = 168,381,900 \text{ m}^3/a$$

$$R_c = \frac{\text{Recarga}_{\text{total}}}{\text{Área}_{\text{balance}}} = \frac{168,381,900}{256,000,000} = 0.657 \text{ m}$$

Área de la zona de captura:

$$A_R = \frac{q_{\text{cat}}}{R_e} = \frac{591,300.0}{0.657} = 899,042.1 \text{ m}^2$$

Radio de la zona de captura:

$$A_R = (\pi)(r_R^2)$$

$$r_R = \sqrt{\frac{A_R}{\pi}} = \sqrt{\frac{899,042.1}{\pi}} = 534.95 \text{ m}$$

- Zonas de protección interna y externa relacionadas a un tiempo de viaje.

Una estimación del área A_d (m^2) relacionada a un tiempo de viaje de una zona t_d (en días), puede también calcularse usando un enfoque volumétrico como:

$$A_D = \frac{qt_d}{bn}$$

Donde:

- q** Volumen anual autorizado dividido entre 365 días ó el volumen día ó el volumen diario máximo autorizado, dependiendo si la zona de protección que se está delineando es la interna o la externa (m^3/d).
- b** Espesor del acuífero o longitud ranurada del pozo (m)
- c** Porosidad efectiva.

Esta ecuación no permite considerar la recarga, y asume que el espesor del acuífero es constante. Sin la dirección del flujo del agua subterránea, las zonas de protección pueden suponerse circulares con el radio calculado como se ilustra en la **Figura 5.1**. Este método es usado principalmente para acuíferos confinados.

Las ventajas de este método de delineación incluyen su facilidad de aplicación, bajo costo, y no necesita técnicos muy expertos, así también se pueden delinear un gran número de pozos en relativamente poco tiempo.

Ejemplo. Pozo P-41. Localización: Col. San Primitivo, Tlahuelipan, Hgo.

Datos.

Q máx = 30 lps (interior)

Q exp. = 25 lps (exterior)

Tiempo de operación del pozo = 18 hrs/d

t_d = 50 días (interior)

t_d = 400 días 8 exterior

$$b = 104 \text{ m}$$

$$n = 0.2$$

Calculo BGS

Radio de la zona de protección interior:

$$A_d = (\pi)(r_i^2)$$

$$r_i = \sqrt{\frac{A_d}{\pi}} = \sqrt{\frac{qt_d}{bn\pi}} = \sqrt{\frac{(1,947.89)(50)}{(104)(0.2)(\pi)}} = 38.61 \text{ m}$$

Este valor es menor que el radio mínimo recomendado para definir la zona de protección interna (50 m), por lo que deberá adoptarse el radio interno de 50 m.

Radio de la zona de protección exterior:

$$A_d = \frac{qt_d}{bn} = \frac{(1,947.89)(400)}{(104)(0.2)} = 37,459.4 \text{ m}^2$$

$$r_e = \sqrt{\frac{A_d}{\pi}} = \sqrt{\frac{(37,459.4)}{\pi}} = 109.2 \text{ m}$$

El área de la zona exterior para 400 días de tiempo de viaje es de 37,459.4 m² la cual es mucho menor al 25% de A_R , por lo tanto deberá incrementarse. Considerando una zona de protección circular, por geometría simple el radio r_e del área de la zona exterior igual al 25% de A_R , es:

$$r_e = (0.5)(r_R) = (0.5)(534.95) = 267.48 \text{ m}$$

Radio de la Zona captura:

$$r_R = 534.95$$

III.4.2 Métodos semianaliticos.

Cuando se puede conocer el gradiente hidráulico, existen métodos teóricos para describir el flujo en estado establecido alrededor de una fuente y por lo tanto delinear el tiempo de viaje.

La ecuación que describe la línea de frontera (**Figura 5.2**) de una zona de captura alrededor de un pozo en un acuífero confinado de extensión infinita bajo condiciones de estado establecido y un gradiente hidráulico uniforme es:

$$\frac{y}{x} + \tan \frac{[(2)(\pi)(k)(b)(i)(y)]}{q} = 0$$

Donde:

- q** Volumen de extracción (m³/d)
- k** Conductividad hidráulica (m/d)
- i** Gradiente hidráulico
- b** Espesor del acuífero (m)
- x, y** Coordenadas (m)

La ecuación anterior puede solucionarse para dar el ancho **Y_L** máximo de la zona de captura aguas arriba como:

$$Y_L = \frac{q}{(k)(b)(i)}$$

y **X_L**, la longitud máxima de la zona de captura aguas abajo como:

$$X_L = \frac{q}{(2)(\pi)(k)(b)(i)}$$

Las coordenadas de los puntos (x, y) a lo largo de la isocrona, o línea en el acuífero del tiempo de viaje (td) a la extracción del pozo son idénticas, pueden describirse por la siguiente ecuación:

$$e^{-t^*} = e^{-z} \left(\cos w + \frac{z \operatorname{sen} w}{w} \right)$$

Eq. 5.6

Donde **z**, **w**, y **t*** son cantidades adimensionales definidas por:

$$z = \frac{x}{X_L}$$

$$t^* = \frac{(k)(i)(t_d)}{(n)(X_L)}$$

$$w = \frac{y}{X_L}$$

que facilitan el uso.

Para puntos a lo largo del eje x, cuando este está en la dirección del flujo de agua subterránea, pasando a través del pozo, la ecuación (5.6) se reduce a:

Eq. 5.7

$$r^* = z - \log(1 + z)$$

El tiempo de viaje de cualquier punto a la fuente puede calcularse fácilmente usando las ecuaciones (5.6) y (5.7), pero el problema inverso de determinar (x y) dado t_d requiere el uso de métodos numéricos. Tales métodos están incluidos dentro del paquete de modelación semianalítico US EPA WHPA el cual se describe en el siguiente punto.

Ejemplo. Pozo P.41. Localización. Col. San Primitivo, Tlahuelipan, Hgo.

Datos.

$$q = 1,620 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$k = 5 \text{ m/d}$$

$$b = 104 \text{ m}$$

$$i = 0.0053$$

Cálculo BGS

Ancho máximo Y_L de la zona de captura aguas arriba del pozo:

$$Y_L = \frac{q}{(k)(b)(i)} = \frac{1,620}{(5)(104)(0.0053)} = 587.81 \text{ m}$$

Distancia X_L aguas abajo del pozo al punto nulo:

$$X_L = \frac{q}{(2)(\pi)(k)(b)(i)} = \frac{1,620}{(2)(\pi)(5)(104)(0.0053)} = 93.55 \text{ m}$$

III.4.3 Modelo semianálítico WHPA.

El programa WHPA es un modelo de flujo de agua subterránea semianalítico modular, desarrollado por US Environmental Protection Agency (USEPA) diseñado para asistir en la delineación de zonas de protección de fuentes de abastecimiento.

El modelo consiste de cuatro módulos de cálculo independientes que se pueden usar para delinear zonas de captura. Todos los módulos contienen soluciones semianalíticas de zonas de captura, éstas son aplicables a acuíferos homogéneos que exhiben dos dimensiones, flujo de agua subterránea en estado establecido en un área plana con la opción de calcular cargas hidráulicas. Pueden representarse pozos de bombeo múltiple y pozos de inyección, así como simularse barreras o corrientes como condiciones de frontera las cuales existen en todo el espesor del acuífero. Uno de los módulos está basado en el método Monte Carlo para determinar la incertidumbre en los resultados calculados. Otro de los módulos es una rutina general de trayectoria de partícula que puede usarse como un posprocesador para modelos de flujo de agua subterránea numéricos bidimensionales. Debido a que este módulo puede usar las cargas hidráulicas de salida de un modelo numérico para definir zonas de captura, los escenarios hidrogeológicos que pueden investigarse están únicamente limitados por la capacidad de modelo numérico.

Una zona de captura se define como la zona que circunda un pozo de bombeo que abastecerá la recarga de agua subterránea de dicho pozo. Para problemas de flujo de agua subterránea de área bidimensional, la zona de captura corresponde al área de contribución alrededor del pozo.

Descripción de módulos.

RESSQC.

Se delinearán zonas de captura relacionadas con el tiempo alrededor de pozos de bombeo, o frentes contaminantes alrededor de pozos de inyección, para pozos de bombeo múltiple y pozos de inyección en acuíferos homogéneos con área de extensión infinita con flujo de agua subterránea en ambiente establecido y uniforme. Se toman en cuenta efectos de interferencia de pozos.

MWCAP (Multiple Well Capture)

Se delinearán en estado establecido, zonas de captura relacionadas al tiempo o híbridas para pozos de bombeo en acuíferos homogéneos con flujo de agua subterránea en ambiente establecido y uniforme. El acuífero puede ser infinito en extensión de área, o se pueden estimar los efectos de fronteras por corrientes cercanas o barreras (no flujo). Si se examinan pozos múltiples, se ignoran los efectos de interferencia entre pozos.

GPTRAC (General Particle Tracking)

Opción semianalítica: Se delinearán zonas de captura relacionadas con el tiempo para pozos de bombeo en acuíferos homogéneos con flujo de agua subterránea en ambiente establecido

y uniforme. El acuífero puede ser con área de extensión infinita, o puede ser limitado por fronteras de una o dos corrientes (paralelas) y/o barreras (de no flujo). El acuífero puede ser confinado, semiconfinado o no confinado con área de recarga. Se toman en cuenta los efectos por interferencia de pozos.

Opción numérica: Se delinean zonas de captura relacionadas con el tiempo alrededor de campos de pozos de bombeo con flujo de agua subterránea establecido. En vista de que ésta opción representa trayectorias de partícula usando una carga obtenida en campo desde un código numérico de flujo de agua subterránea (diferencias finitas o elemento finito), se pueden considerar muchos tipos de condiciones de frontera así como acuíferos heterogéneos y anisotrópicos.

MONTEC (Monte Carlo) Se realizan análisis de incertidumbre para zonas de captura relacionadas con el tiempo para un pozo de bombeo individual en acuíferos homogéneos de área con extensión infinita. El acuífero puede ser confinado o semiconfinado.

Las suposiciones básicas implícitas en los módulos analíticos del WHPA son:

- El acuífero es isotrópico y homogéneo
- El acuífero es infinito en extensión de área
- El flujo de agua subterránea es uniforme en términos de dirección y gradiente
- Los pozos de extracción son totalmente penetrantes
- Las fronteras (corrientes o barreras) son lineales y totalmente penetrantes
- El flujo de agua subterránea es bidimensional.

En términos simples el proceso básico llevado a cabo por los módulos del WHPA son los siguientes:

- Cálculo de patrones de flujo regional del agua subterránea
- Cálculo de abatimiento radial al rededor de un pozo de extracción
- Resta los abatimientos calculados a las cargas hidráulicas regionales
- Calcula los campos de velocidad usando datos de cargas hidráulicas y permeabilidad.
- Determina como se mueven las partículas dentro de los campos de velocidad y así calcula la trayectoria que una partícula debería seguir en un tiempo dado.

Dentro de las ventajas del WHPA, podemos considerar que es que es una herramienta usada rápida y amigablemente en la delineación de zonas de protección. Se puede usar WHPA para delinear zonas de protección internas y externas, en aquellas situaciones en la que se dispone de datos hidrogeológicos limitados para describir el sistema.

Las principales desventajas con WHPA son:

Los módulos analíticos pueden ser aplicados únicamente en ambientes hidrogeológicos simples y condiciones de frontera totalmente penetrantes, los cuales son casos raros en la práctica.

Los módulos son de uso limitado en la delineación de zonas de captura de fuentes ya que los modelos requieren la especificación de un gradiente hidráulico uniforme y esto en realidad implica una fuente infinita de agua subterránea aguas arriba del pozo.

Ejemplo 1. Pozo P-41. Localización : Col. San Primitivo, Tlahuelipan, Hgo.

Datos.

Unidades: metros, días

Número de pozos de descarga: 1

$X_{m\acute{i}x}$ (m) = 77,000

$X_{m\acute{a}x}$ (m) = 78,600

$Y_{m\acute{i}x}$ (m) = 249,300

$Y_{m\acute{a}x}$ (m) = 250,900

T (m²/d) = 520

b (m) = 104

n = 0.2

i = 0.0053

Ángulo de la dirección del flujo = 285

Pozo de bombeo núm. 1

X (m) = 77,550

Y (m) = 250,450

Q (m³/d) = 1,947.89

r (m) = 0.13

Núm. de trayectorias = 25

Tiempo para la simulación (días) = 3,650

Núm. de frentes (isocronas) = 3

Valor del tiempo # 1 (días) = 50

Valor del tiempo # 1 (días) = 400

Valor del tiempo # 1 (días) = 500

Número de líneas de trayectoria inversa = 0

Ejemplo 2. Pozo: P-41 y P-42. Localización: Col. San. Primitivo, Tlahuelipan, Hgo.

Datos.

Unidades: metros y días

Número de pozos de descarga: 2

$X_{m\acute{i}x}$ (m) = 77,000

$X_{m\acute{a}x}$ (m) = 79,100

$Y_{m\acute{i}x}$ (m) = 249,300

$Y_{m\acute{a}x}$ (m) = 250,900

T (m²/d) = 520

$b(m) = 104$

$n = 0.2$

$i = 0.0053$

Angulo de la dirección del flujo = 285

Pozo de bombeo núm. 1

$X(m) = 77,550$

$Y(m) = 250,450$

$Q(m^3/d) = 1,947.89$

$r(m) = 0.13$

Núm. de trayectorias = 25

Pozo de bombeo núm. 2

$X(m) = 78,250$

$Y(m) = 250,800$

$Q(m^3/d) = 1,490.40$

$r(m) = 0.13$

Núm. de trayectorias = 25

Tiempo para la simulación (días) = 3,650

Núm. de frentes (isocronas) = 3

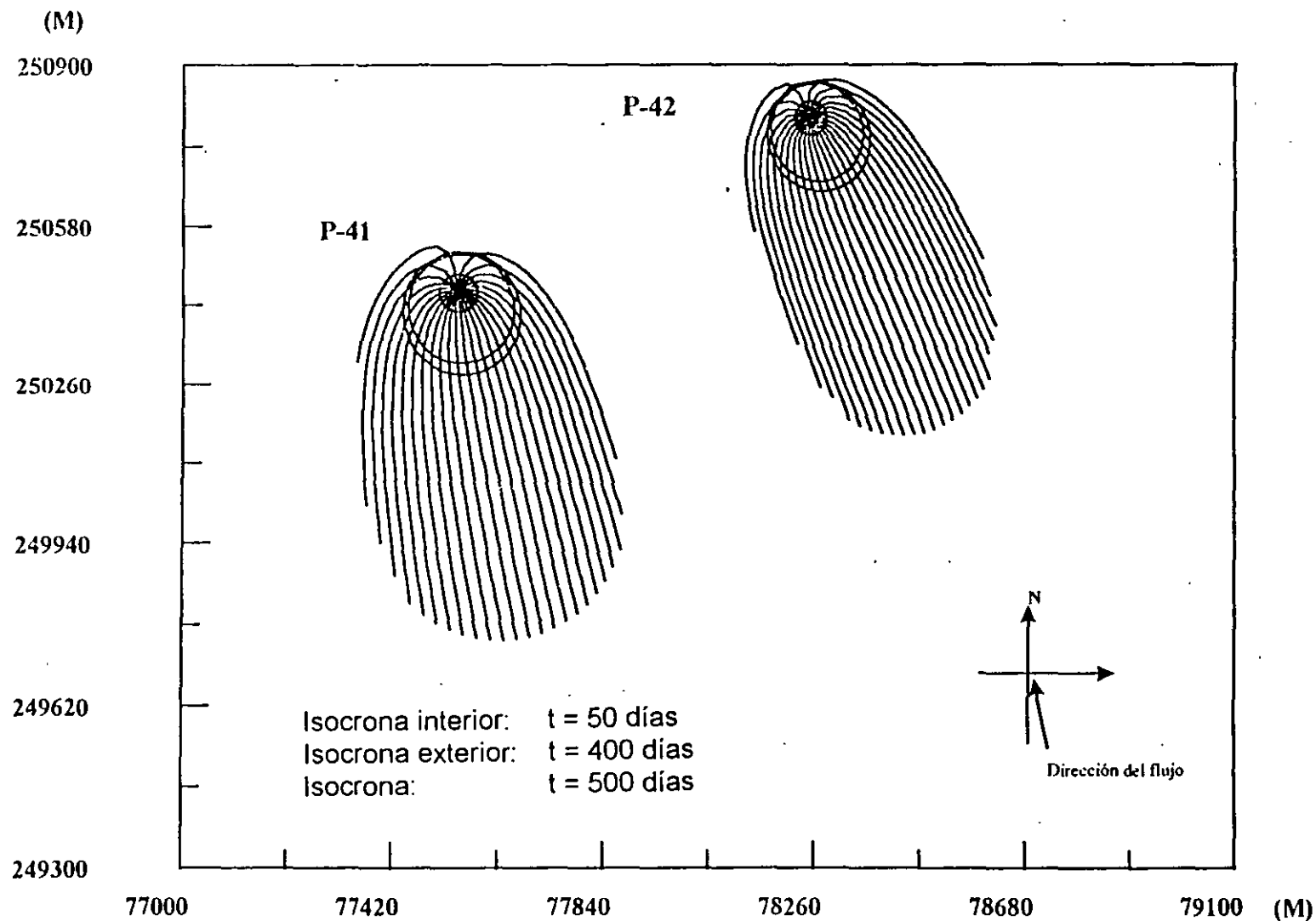
Valor del tiempo # 1 (días) = 50

Valor del tiempo # 1 (días) = 400

Valor del tiempo # 1 (días) = 500

Número de líneas de trayectoria inversa = 0

POZO: P-41 y P-42. LOCALIZACION.: COL. SAN PRIMITIVO, TLAHUELILPAN, HGO.



BIBLIOGRAFÍA

British Geological Survey, (1996), Groundwater Protection Zones. Manual of Standard Zones Delineation Methodologies, U. K.

United States Environmental Protection Agency, (1993), Wellhead Protection: A Guide for Small Communities, U S EPA, Washinton, D.C.

Blandford T.N., Huyakorn P.S., Yu-Shu-Wu, (1993), Well Head Protection Area Delineation Code, US EPA Office of Ground-Water, Washington, D.C.

National Rivers Authority, (1992), Policy and Practice for the Protection of Groundwater, NRA

United States Environmental Protection Agency, (1992), Final Comprehensive State Ground Water Protection Program Guidance, U S EPA, Office of The Administrator

Pettyjohn A. Wayne, Practical Approaches to the delination of Wellhead Protection Areas, Ground Water Protection Council, Oklahoma City, OK

Foster Stephen. Adams Brian, Morales Marisol, Tenjo Sigifredo, (1992), Estrategias para la Protección de Aguas Subterráneas, Overseas Devoloment Administration, UK

Barker J.A., Williams A.T., Coleby L.M., Wagstaff S.J. (1995). NRA National Groundwater protection Zone Programme: Comparison of Two Model Codes for Phase III, British Geological Survey, Technical Report WD/95/8R



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

**MODELOS MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

Protocolo de Modelación

M. en C. Orlando García Rojas
Guanajuato, Guanajuato
1998.



PROTOCOLO DE MODELACIÓN

- DEFINIR OBJETIVO DEL MODELO
- DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL
- BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
- DISEÑO DEL MODELO (Código, discretización, parámetros hidráulicos, periodos de esfuerzo, etc.)
- CALIBRACIÓN
- VERIFICACIÓN
- ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD
- SIMULACIÓN PREDICTIVA
- VALIDACIÓN A FUTURO



SOLUCIONES DE LAS ECUACIONES DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA (SEGÚN HUYAKORN Y PINDER, 1983)

I. MÉTODOS ANALÍTICOS

SEPARACIÓN DE VARIABLES

SOLUCIONES POR SIMILITUD

TECNICAS DE VARIABLE COMPLEJA

TRANSFORMACIONES DE FOURIER Y LAPLACE

FUNCIONES DE GREEN

MÉTODOS DE PERTUBACIONES REGULARES Y SINGULARES

SERIES DE POTENCIAS

II. MÉTODOS NUMÉRICOS

MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

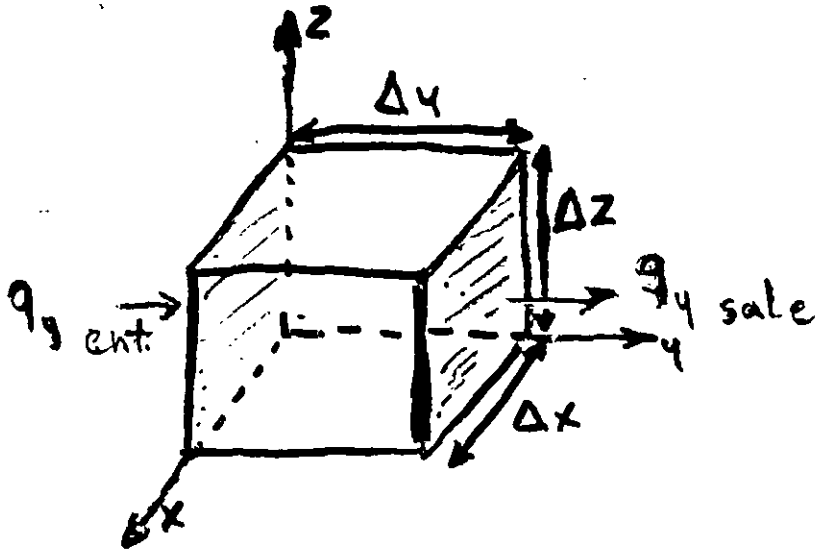
MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

MÉTODO DE COLOCACIÓN

MÉTODO DE LAS CARACTERÍSTICAS

**MÉTODO DE ELEMENTOS FRONTERIZO (BOUNDARY ELEMENT
METHOD)**

DERIVACION DE LA EC. DE CONTINUIDAD



$$\mathbf{q} = q_x \mathbf{i}_x + q_y \mathbf{i}_y + q_z \mathbf{i}_z$$

q - Flujo a través del cubo

q_x, q_y, q_z - componentes del flujo.

$\mathbf{i}_x, \mathbf{i}_y, \mathbf{i}_z$ - vectores unitarios en los ejes x, y, z .

LA ECUACION DE
BALANCE ESTABLECE

ENTRADAS - SALIDAS = CAMBIO DE ALMACENAMIENTO

Ahora, considerando las entradas y salidas en el eje y , en la cara $\Delta x \Delta z$ del cubo.

$$[q_{y \text{ sale}} - q_{y \text{ entra}}] \Delta x \Delta z$$

que también se puede escribir

$$\frac{q_{y \text{ sale}} - q_{y \text{ entra}}}{\Delta y} \Delta x \Delta y \Delta z$$

Así, el cambio de flujo a través del cubo en la dirección y . es

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z),$$

expresiones similares se pueden desarrollar para los ejes x y z .

$$\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \text{cambio en almacenamiento}$$

considerando una fuente o sumidero R^*

$$\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \text{cambio en almacenamiento}$$

El cambio de almacenamiento se representa por el almacenamiento específico, que se define como el agua (volumen) liberada del almacenamiento por unidad de cambio en la carga por unidad de volumen del acuífero.

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$$

cambio de volumen del almac. en el tiempo:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = - S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z$$

Combinando las ec. anteriores y dividiendo entre $\Delta x \Delta y \Delta z$, obtenemos la ec. de balance.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^x$$

Si sustituimos q_x, q_y y q_z por la ley de Darcy.

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$\frac{\partial [-K_x \frac{\partial h}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial [-K_y \frac{\partial h}{\partial y}]}{\partial y} + \frac{\partial [-K_z \frac{\partial h}{\partial z}]}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^x$$

FINALMENTE OBTENEMOS.

$$\frac{\partial [K_x \frac{\partial h}{\partial x}]}{\partial x} + \frac{\partial [K_y \frac{\partial h}{\partial y}]}{\partial y} + \frac{\partial [K_z \frac{\partial h}{\partial z}]}{\partial z} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^x$$

1. The Steady-State, Saturated Flow Equation:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (1.1)$$

2. The Steady-State, Unsaturated Flow Equation:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = 0 \quad (1.2)$$

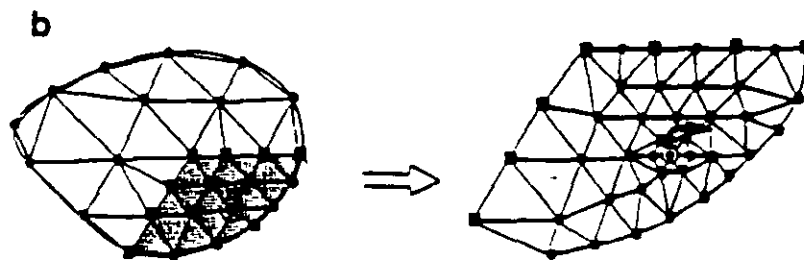
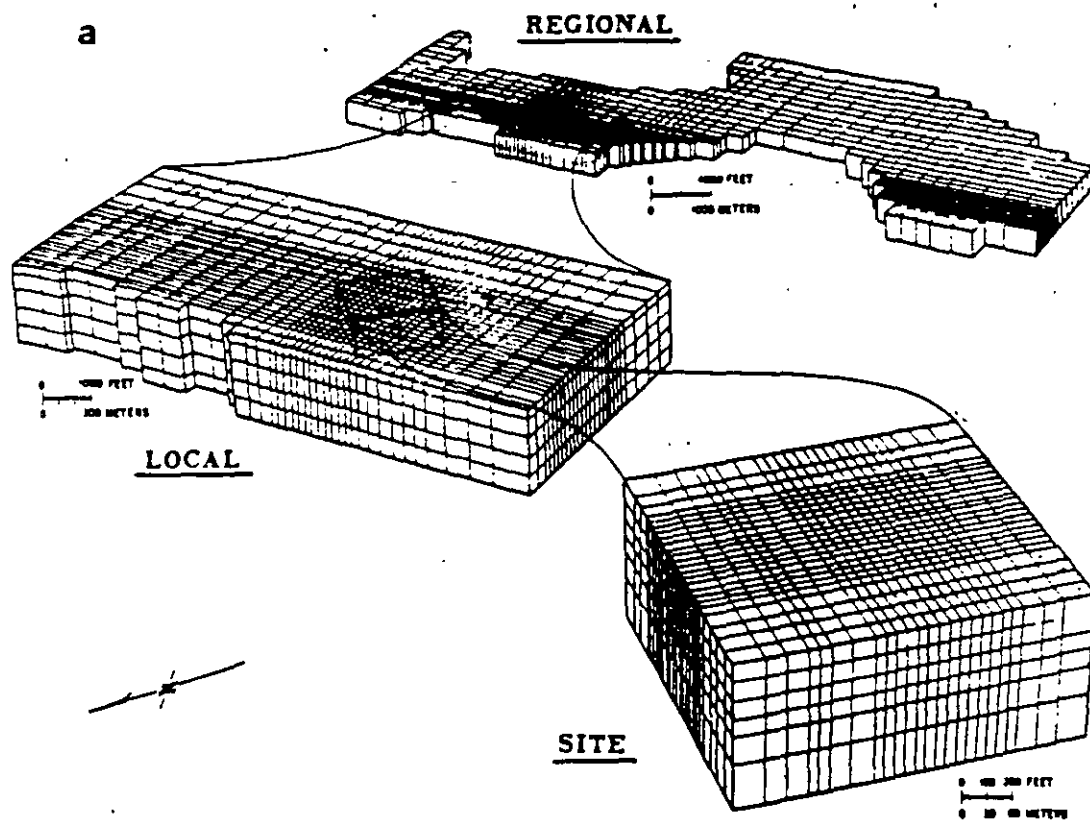
3. The Transient, Saturated Flow Equation:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1.3)$$

4. The Transient, Unsaturated Flow Equation:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right) = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1.4)$$

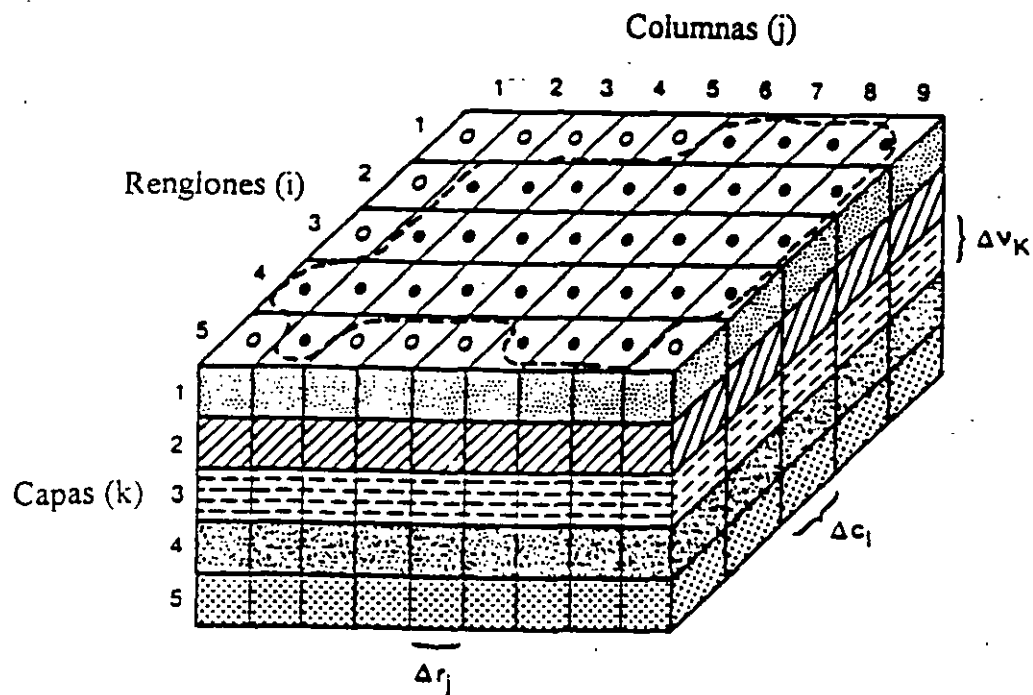
where h is hydraulic head, K_x , K_y , and K_z are the components of saturated hydraulic conductivity in the x , y , and z coordinate directions, t is time, ψ is pressure head, $K_x(\psi)$, $K_y(\psi)$, and $K_z(\psi)$ are the components of unsaturated hydraulic conductivity, S_s is specific storage, $C(\psi)$ is specific moisture capacity.



Telescopic mesh refinement.

(a) Boundaries for a regional finite difference grid are defined from information about the regional flow system. The local and site grids have hydraulic boundaries defined from simulation results (Ward, Buss, Mercer and Hughes, *Water Resources Research*, 23(4), pp. 603-617, 1987, copyright by the American Geophysical Union).

(b) Finite element grids for regional and local scale models. The grids match along the nodes shown by squares. Boundary conditions along these nodes are determined from the solution of the regional scale problem (Townley and Wilson, 1980).



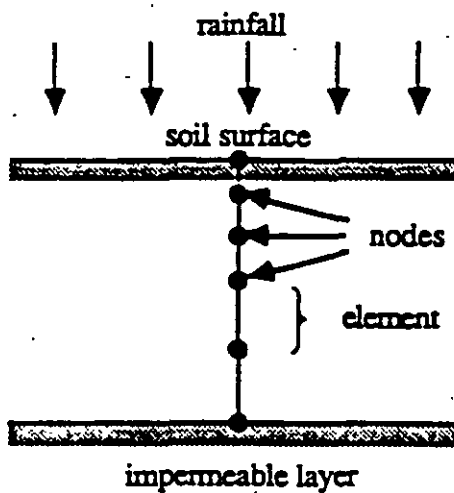
----- Fronteras del acuífero

- Celda activa
- Celda inactiva

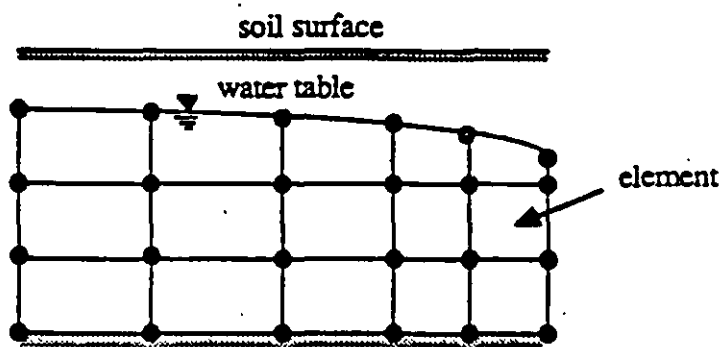
- Δr_j Dimensiones de la celda en la dirección del renglón
- Δc_j Dimensiones de la celda en la dirección de la columna
- Δv_k Dimensiones de la celda a lo largo de la dirección vertical

DISCRETIZACION DEL ACUIFERO

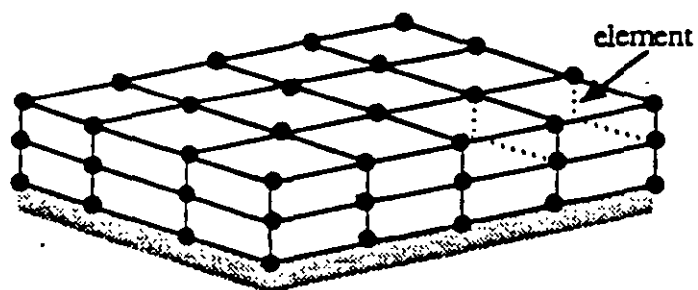
one-dimension



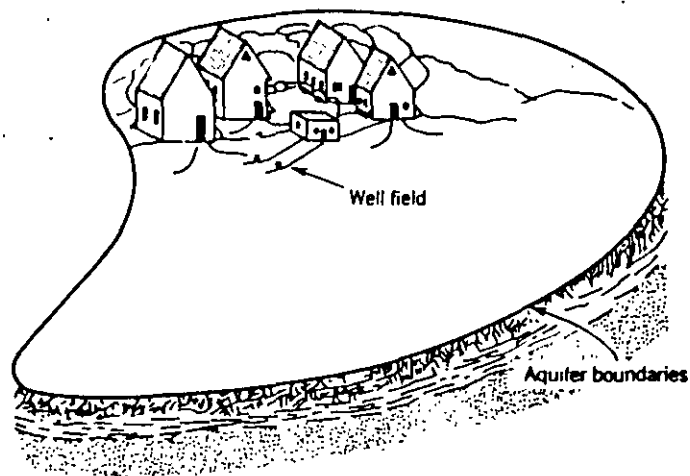
two-dimensions



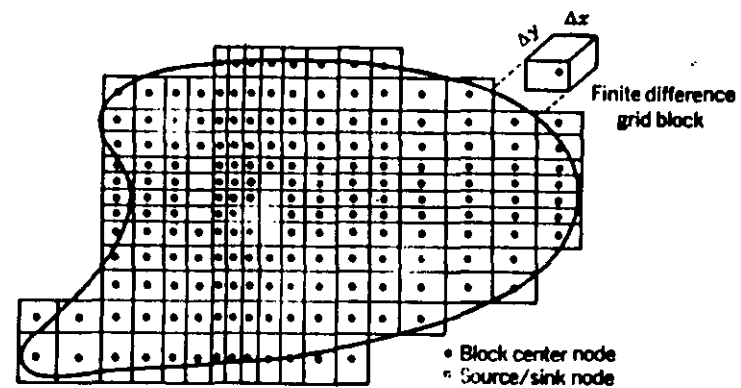
three-dimensions



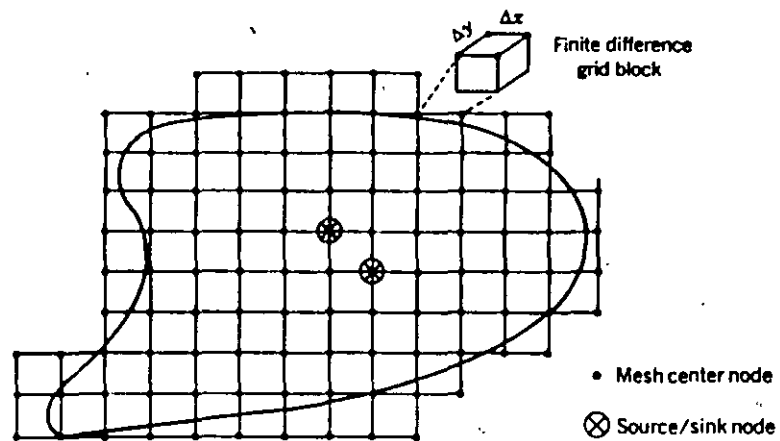
Discretization of one-, two-, and three-dimensional problem domains.



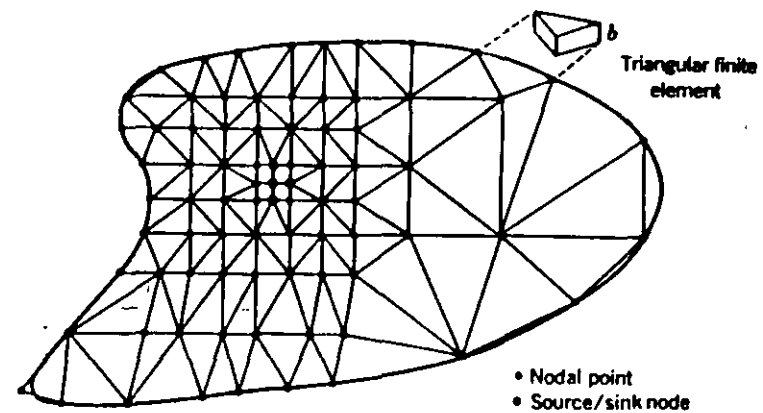
(a)



(c)

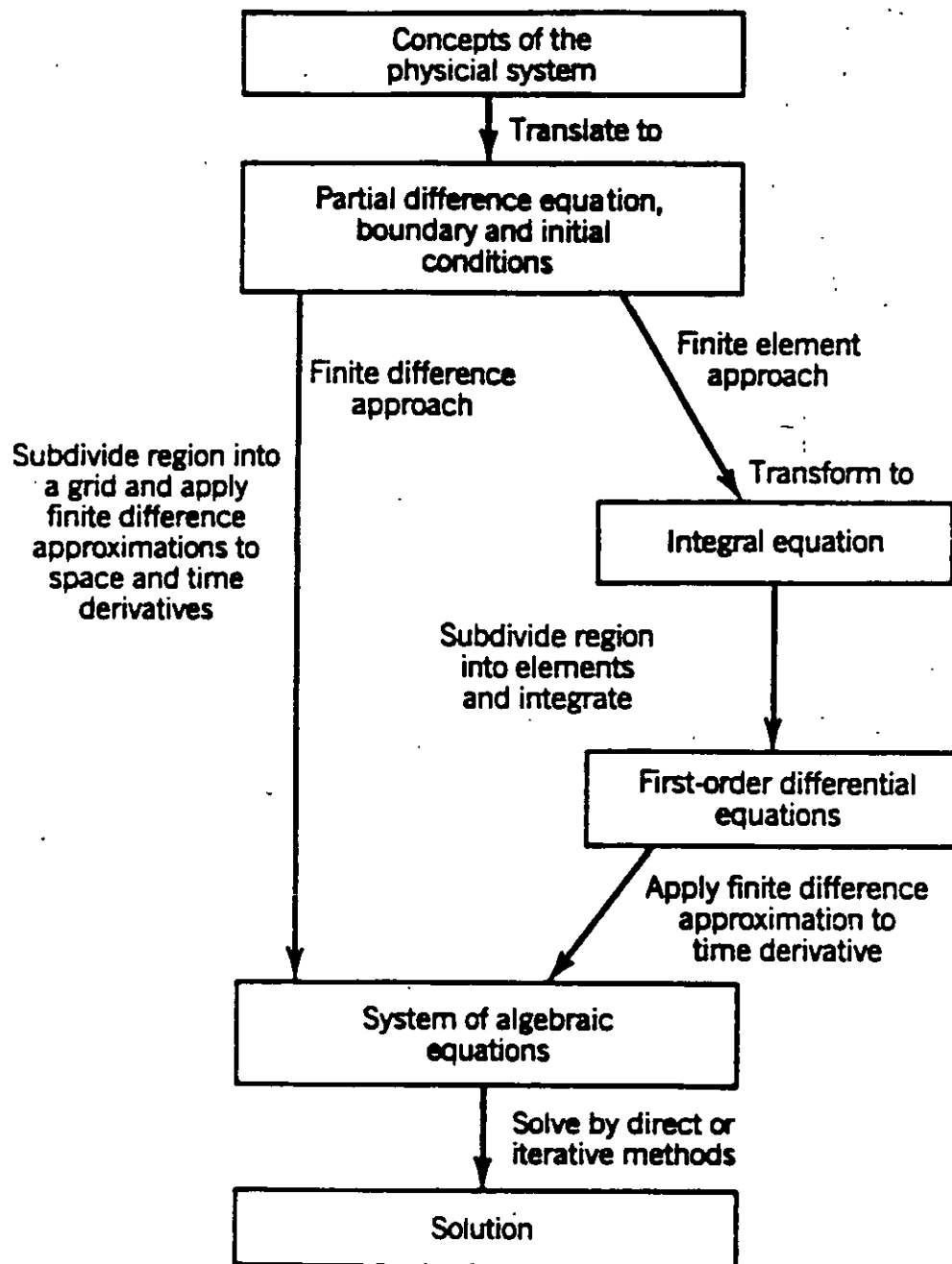


(b)

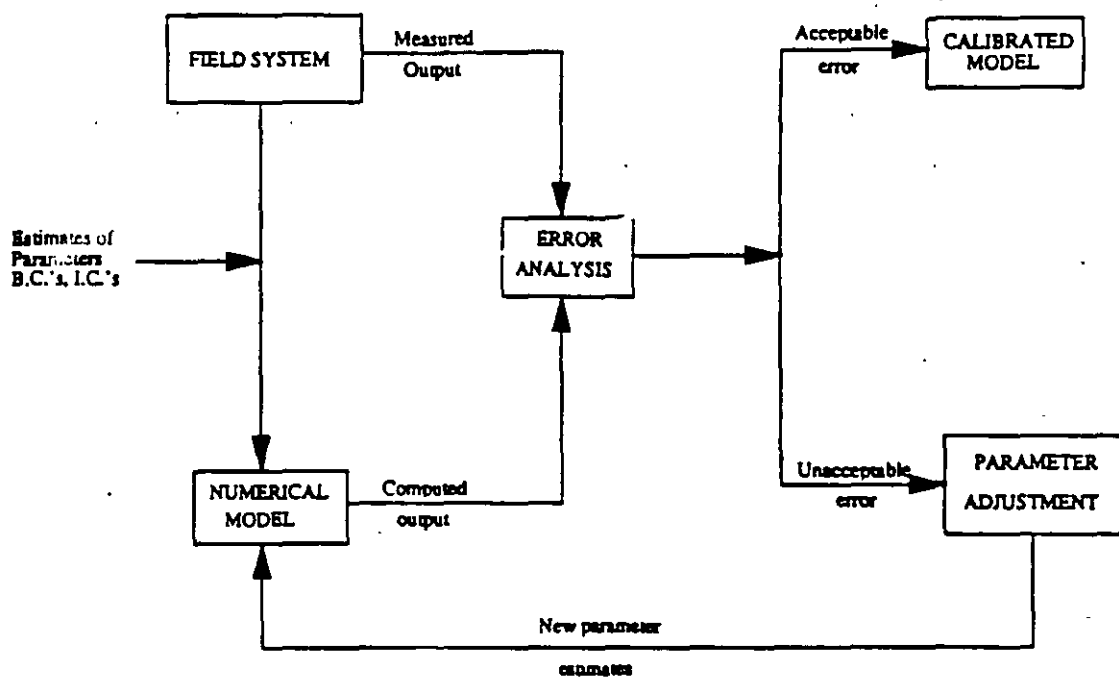


(d)

Finite difference and finite element grids (from Mercer and Faust, 1981). Reprinted by permission of Ground Water. © 1981. All rights reserved.

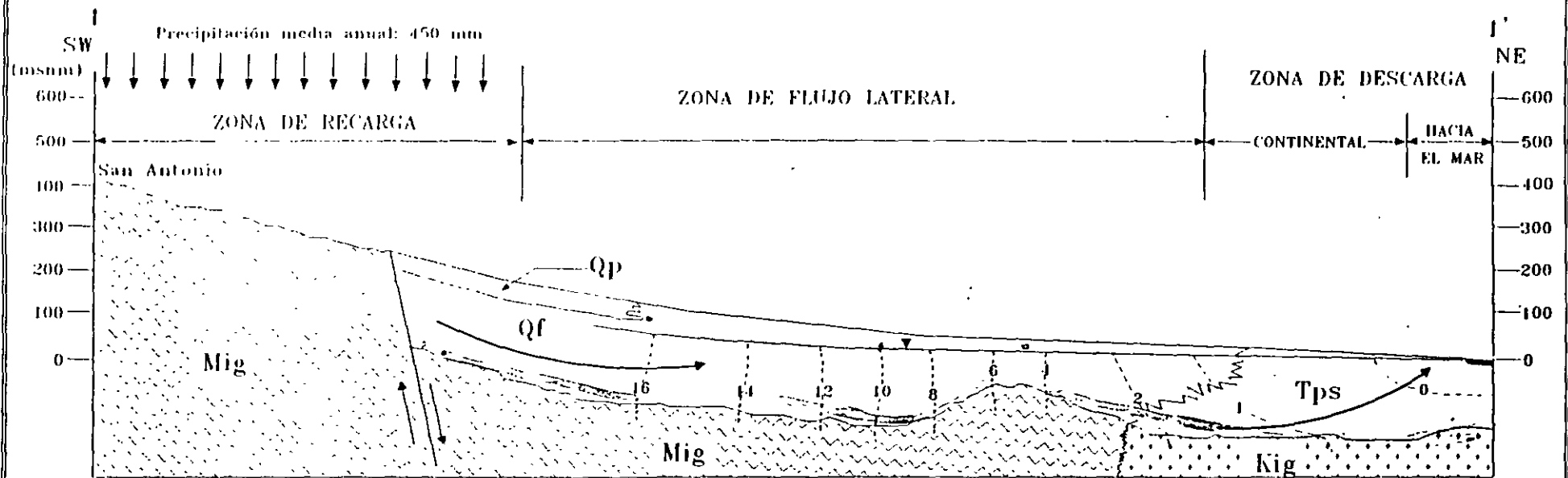


Generalized model development by finite difference and finite element methods (from Mercer and Faust, 1981). Reprinted by permission of Ground Water. Copyright © 1981. All rights reserved.



Trial-and-error calibration procedure (modified from Peters, 1987). The field system is converted to a numerical model and calibration targets are set. The model is executed and results are compared to the calibration targets. If the error in the simulated results is acceptable, the model is considered calibrated; if the level of error is unacceptable, parameter values are adjusted and the model is run again until acceptable results are achieved. B.C., boundary condition; I.C., initial condition.

FIGURA VI.1a
ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL DE
FUNCIONAMIENTO HIDRODINAMICO
(CONDICIONES ORIGINALES)



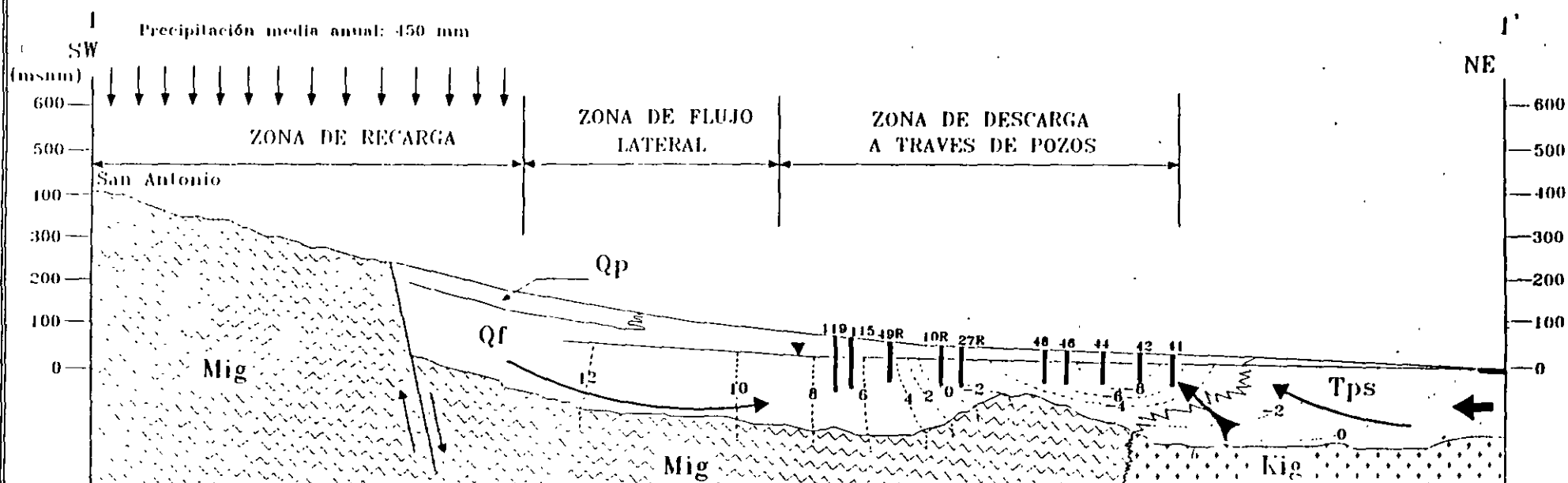
SIMBOLOGIA

- ▼— Superficie de saturacion (NE)
- 0- Equipotencial
- Flujo de agua subterranea

ESCALA HORIZONTAL
0 1 2 3 4 Km

FIGURA VI.1b

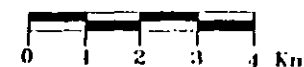
ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL DE
FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO
(CONDICIONES ACTUALES)



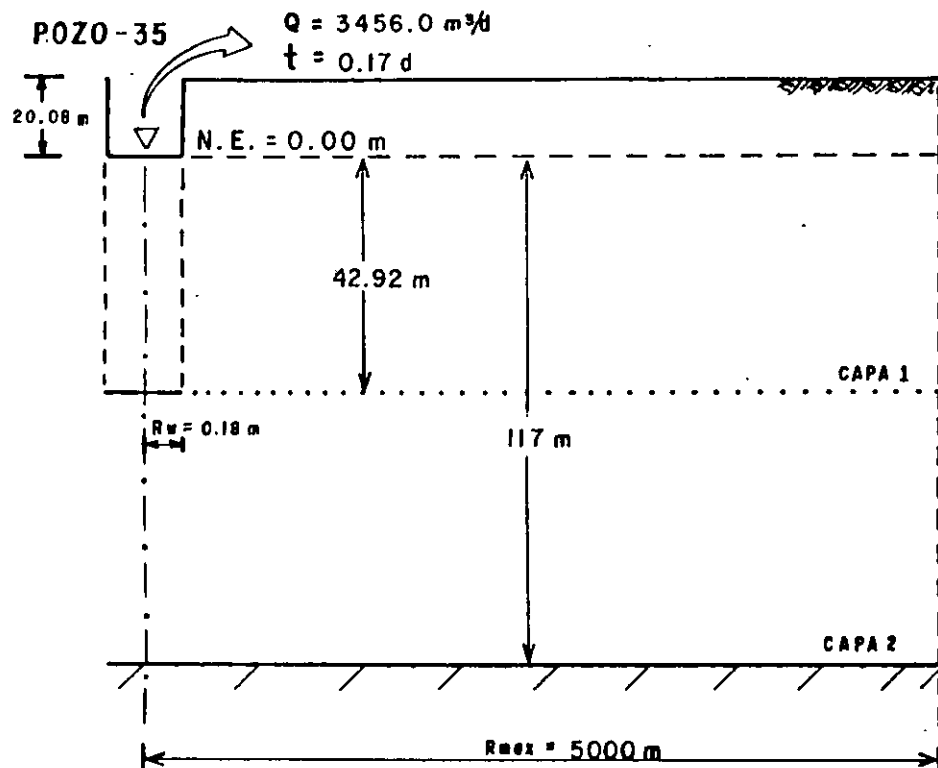
SIMBOLOGIA

- Superficie de saturación (NE)
- Fuente de agua salina antigua
- Equipotencial
- Entrada de agua marina moderna
- Flujo de agua subterránea

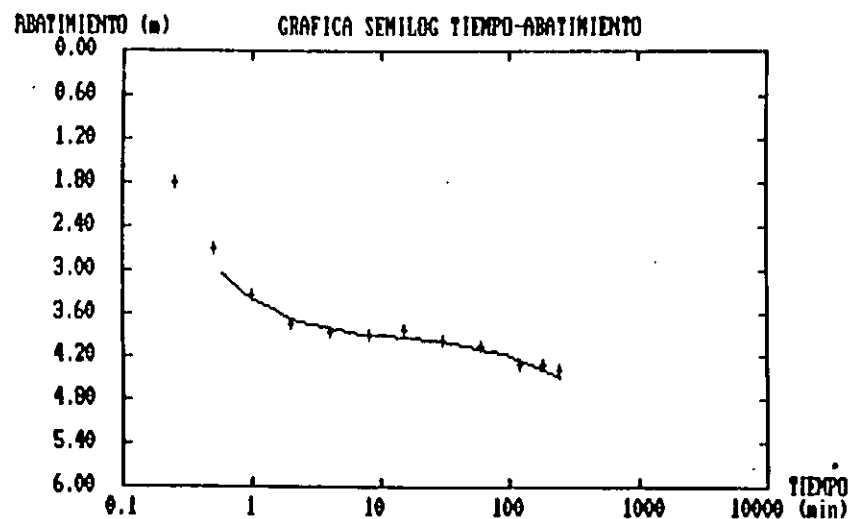
ESCALA HORIZONTAL



MODELO CONCEPTUAL DEL ACUIFERO DEL VSJP

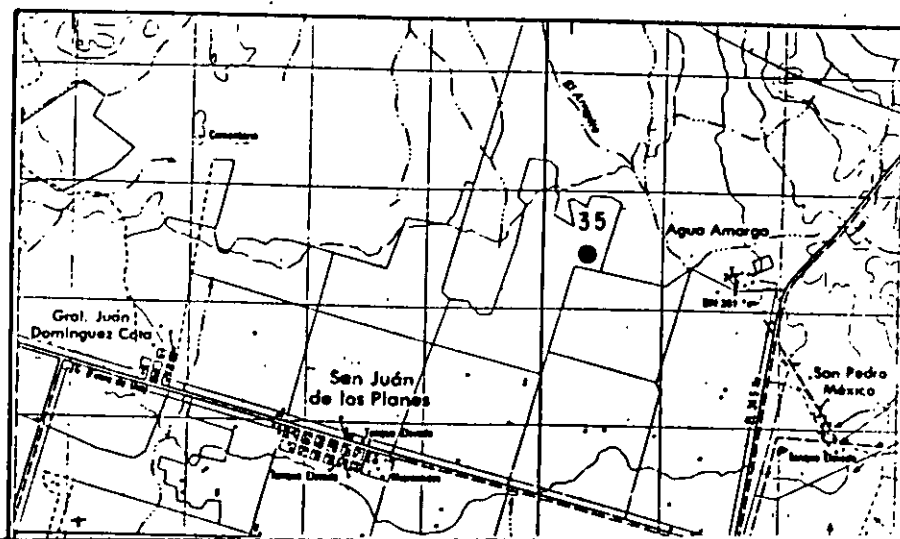


FUERA DE ESCALA



POZO No. 35

0.18	5000.0				
0.00	0.00	0.00	42.92	42.92	117.00
2					
0.000	0.000				
16.00	3.00	0.005	0.20		
0	10.00	10.00	0.005	0.10	
0.000					
0	0.000				
16.00	3.00	0.005			
0	1.00	1.00	0.005		
13.00	1.00	1.00			
2					
5					
10	20	30	40	50	
3					
1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
3456.0	0.17				
-3456.0	0.17				

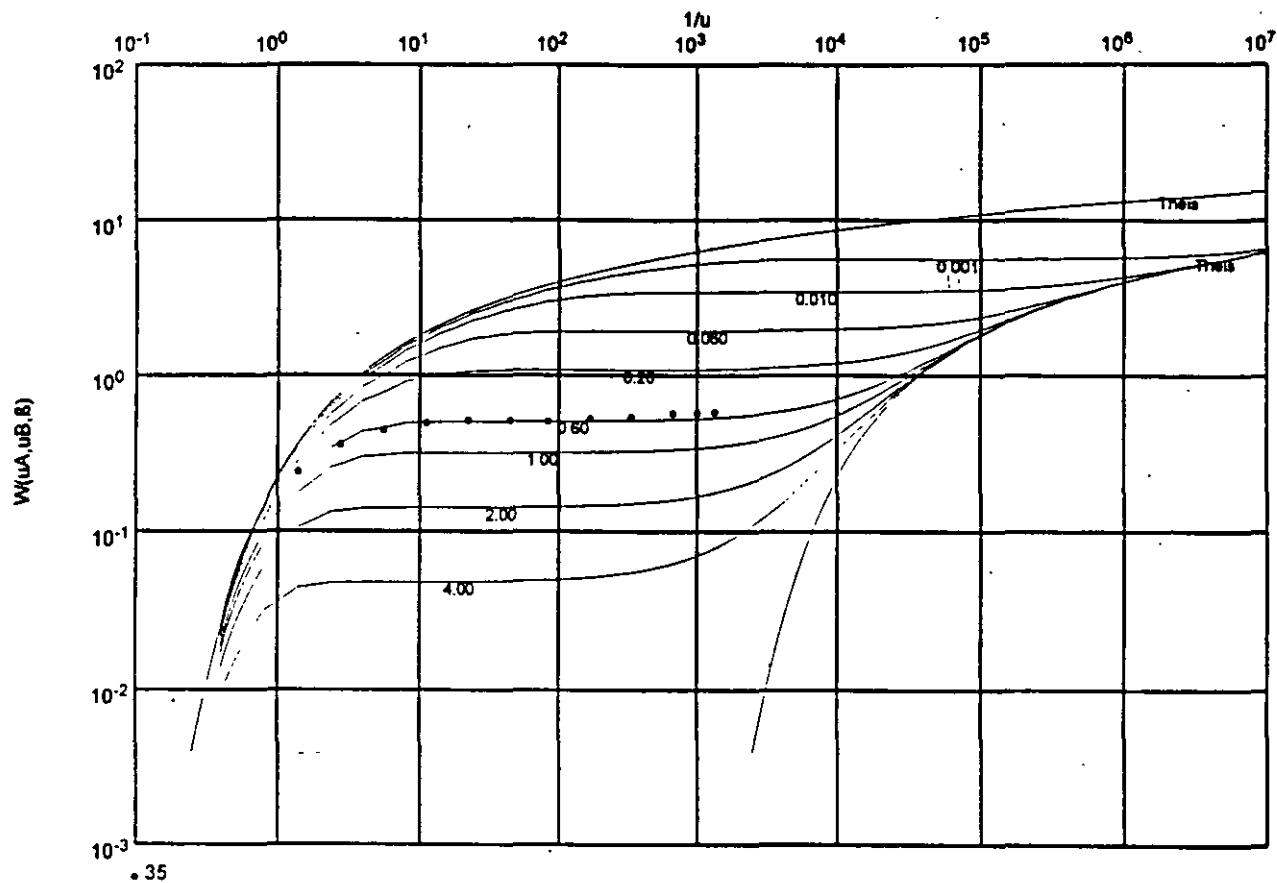


Prueba de Bombeo No.

Fecha de la Prueba: 05/07/77

35

Descarga 40.00 l/s



Transmissividad (m^2/min): 2.54×10^{-2}

BALANCE PARA 1996

VOLUMEN ANUAL AUTORIZADO = 8,199.6 Mil m³/año

USO MULTIPLE

106.4 Mil m³/año

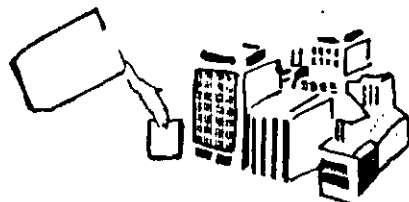
5 pozos



USO AGUA POTABLE

766.0 Mil m³/año

2 pozos



USO ABREVADERO

60 Mil m³/año

4 pozos

16 norias



USO AGRÍCOLA

6,969 Mil m³/año

40 pozos

2 norias



VOL. EXT. TOTAL = 7,901.4 Mil m³/año

57 POZOS

18 NORIAS



Volumen riego (volumen de riego) = 6,472 Mil m³/año

Requerimiento de riego (evapotranspiración) = 5,329.4 Mil m³/año³

Perdidas superficiales por escurrimiento = 64.7 Mil m³/año



Vol. de lluvia infiltrado = 589.0 Mil m³/año

N A E.

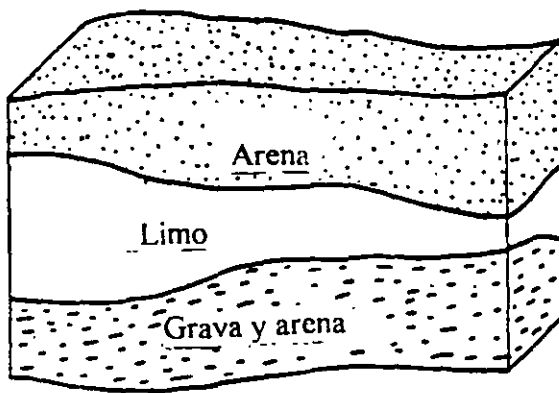
Volumen de percolación (retorno de riego) = 1,077.0 Mil m³/año

Cambio en el almacenamiento = - 43.4 Mil m³/año

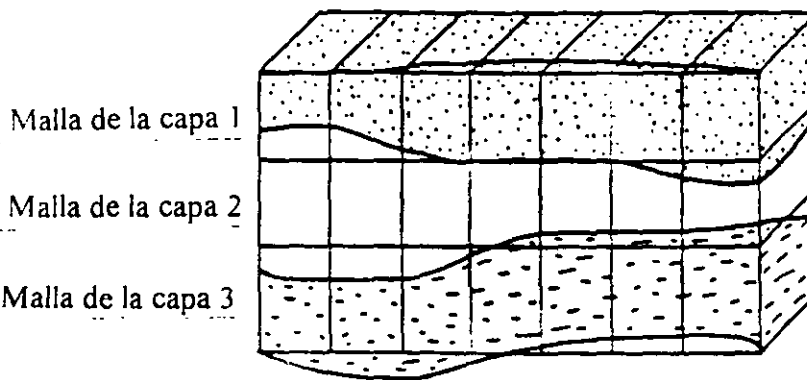
Salidas horizontales = 0

Entradas horizontales = 6,192.0 Mil m³/año

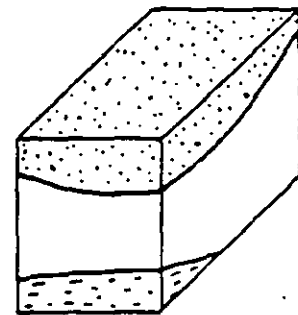




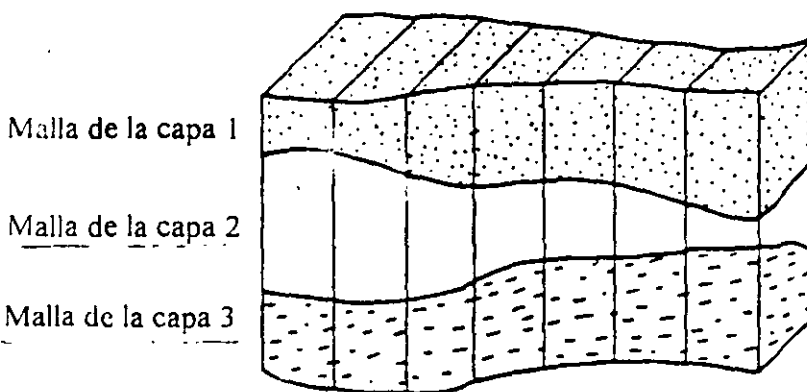
(a) Esquema tridimensional del acuífero



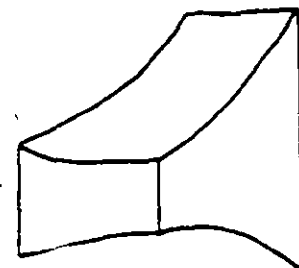
(b) Esquema del acuífero con una malla rectilínea sobrepuesta.



Celdas conteniendo material de las tres unidades estratigráficas.

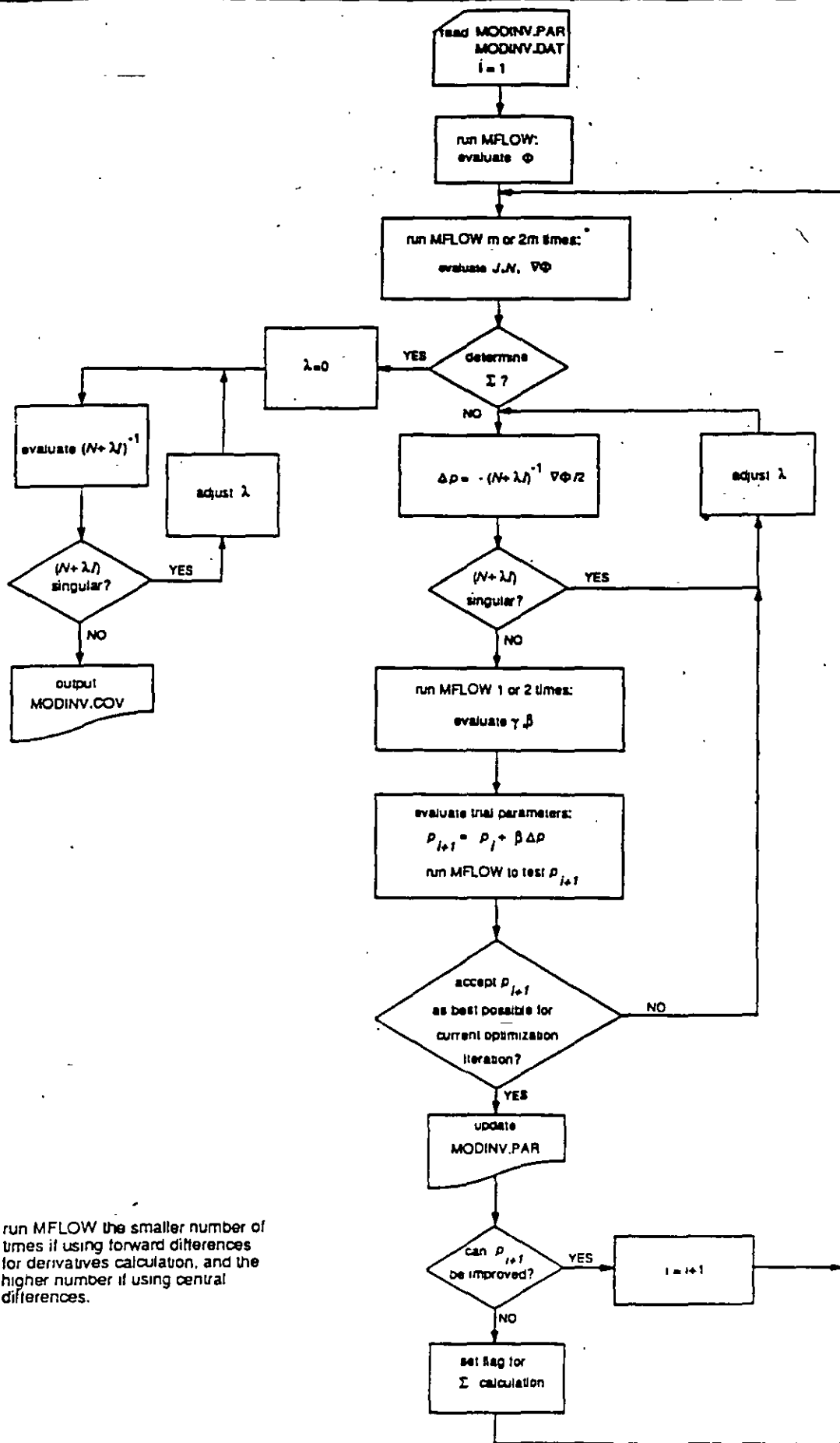


(c) Esquema del acuífero con una malla deformada sobrepuesta.



Celda conteniendo material de una sola unidad estratigráfica

ESQUEMAS DE DISCRETIZACION VERTICAL



Simplified flow chart of the MODINV algorithm:

FIG. VIII. 10 VOLUMEN DE EXTRACCION ANUAL DEL ACUÍFERO

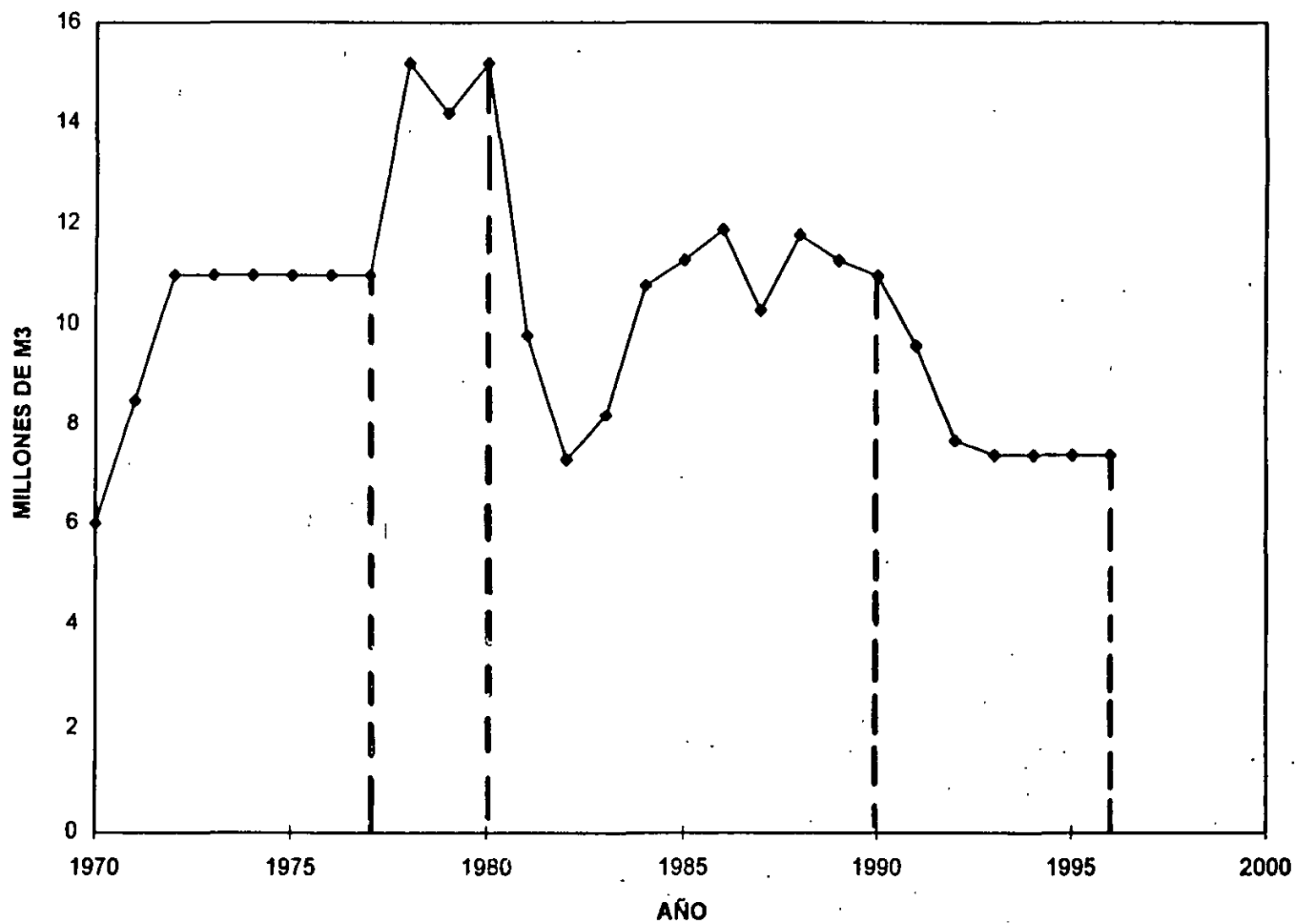
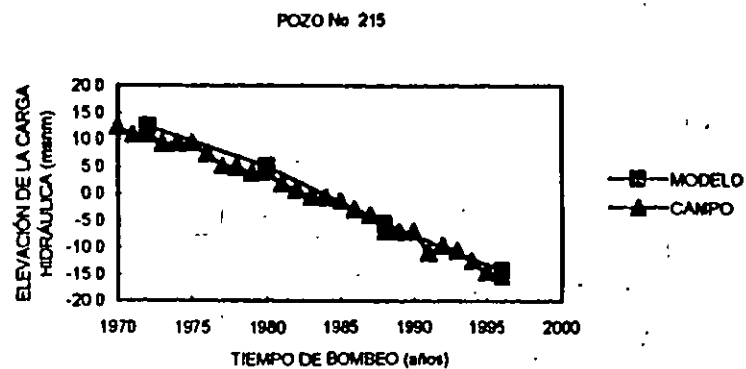
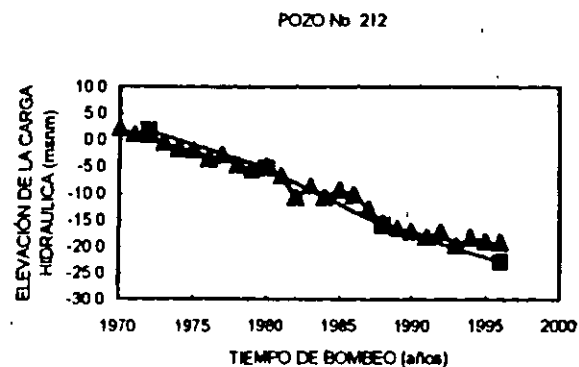
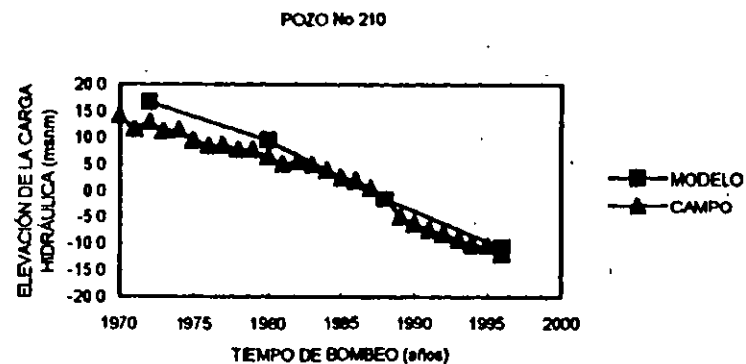
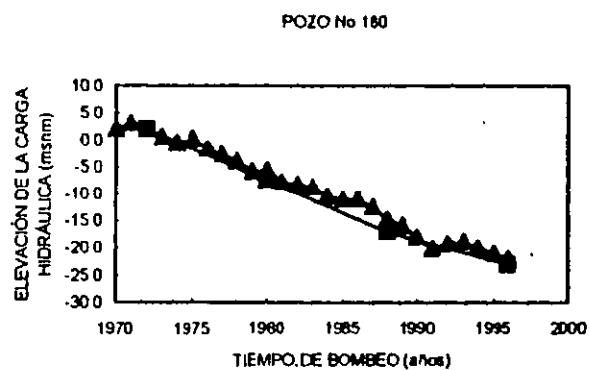
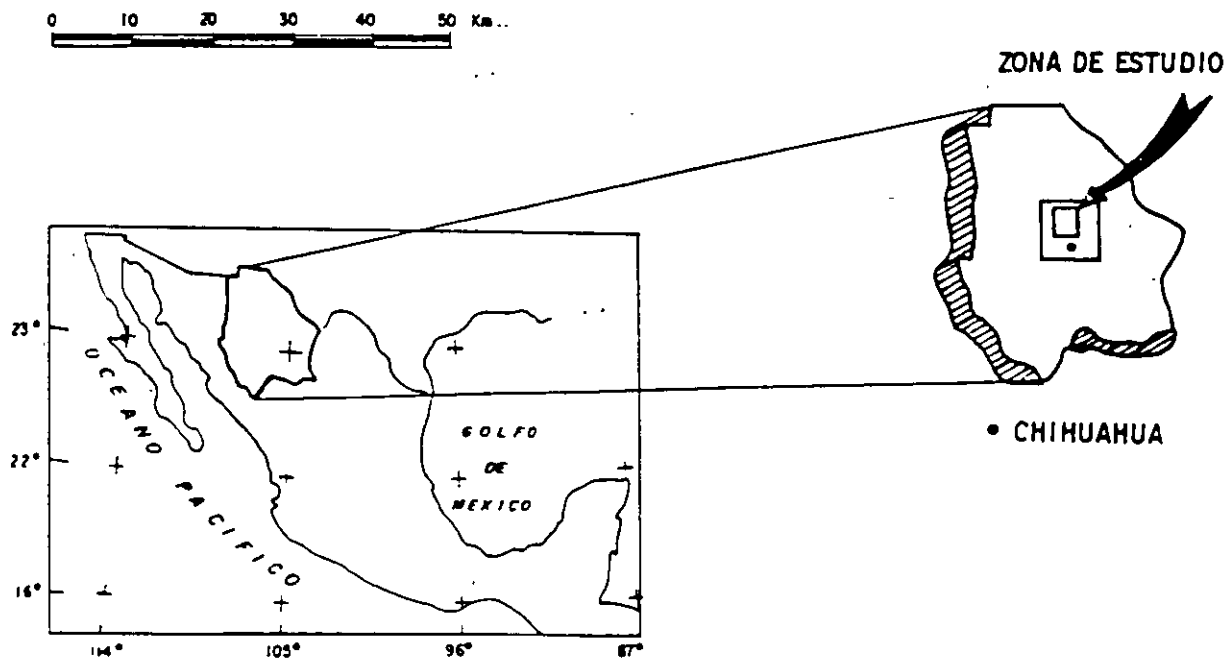
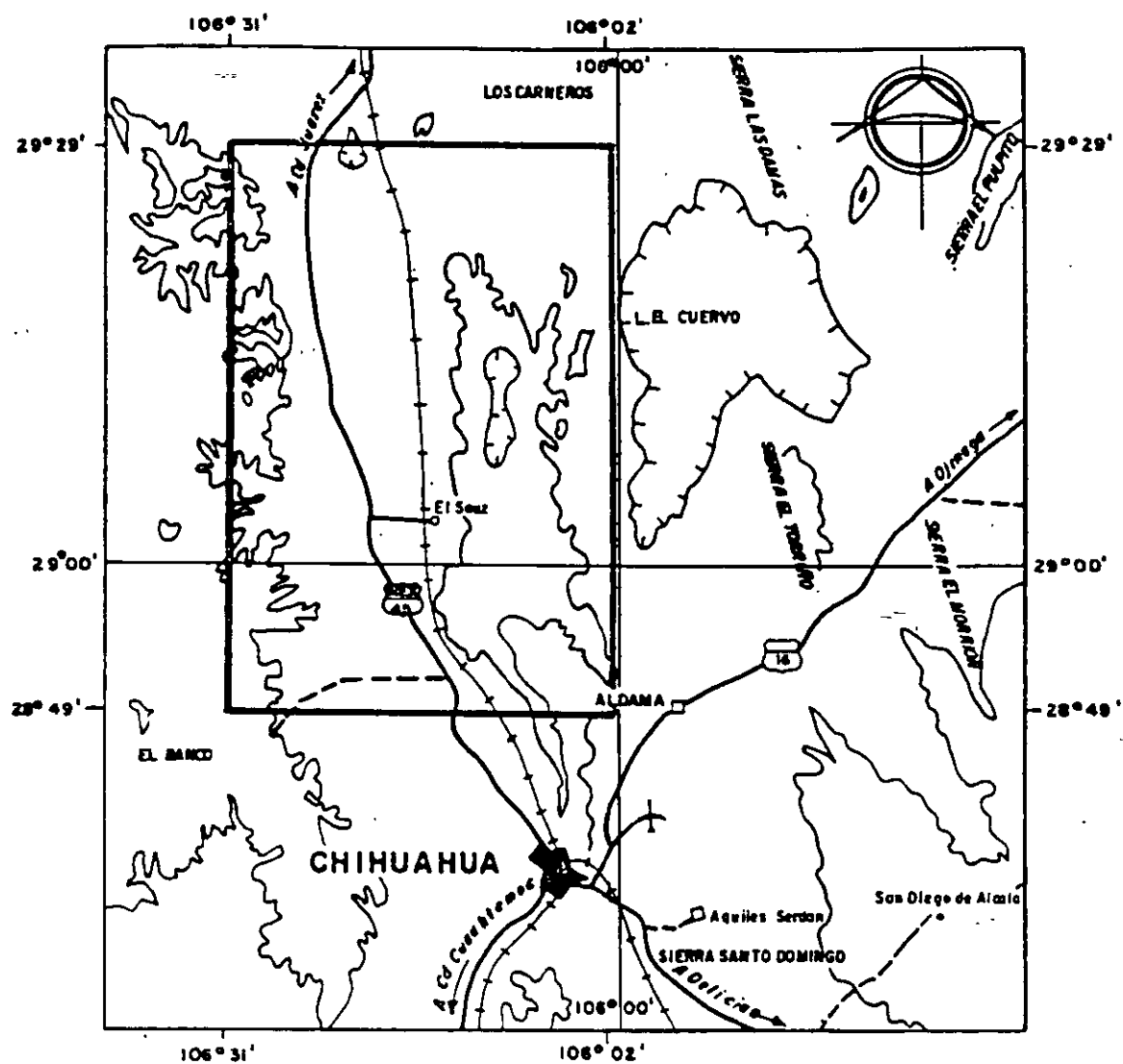


Figura 8.20
Comparación entre cargas hidráulicas observadas vs. calculadas para pozos seleccionados

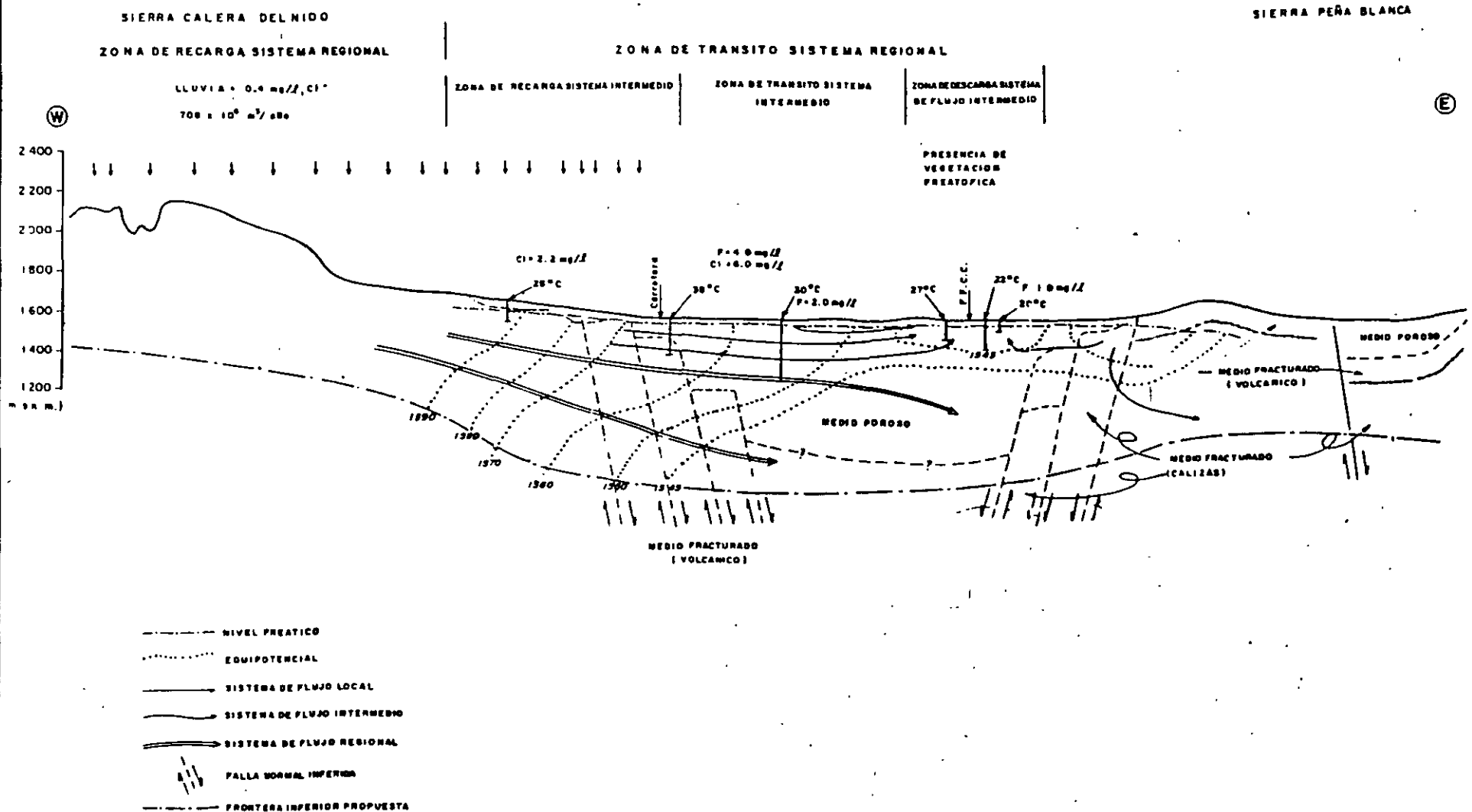


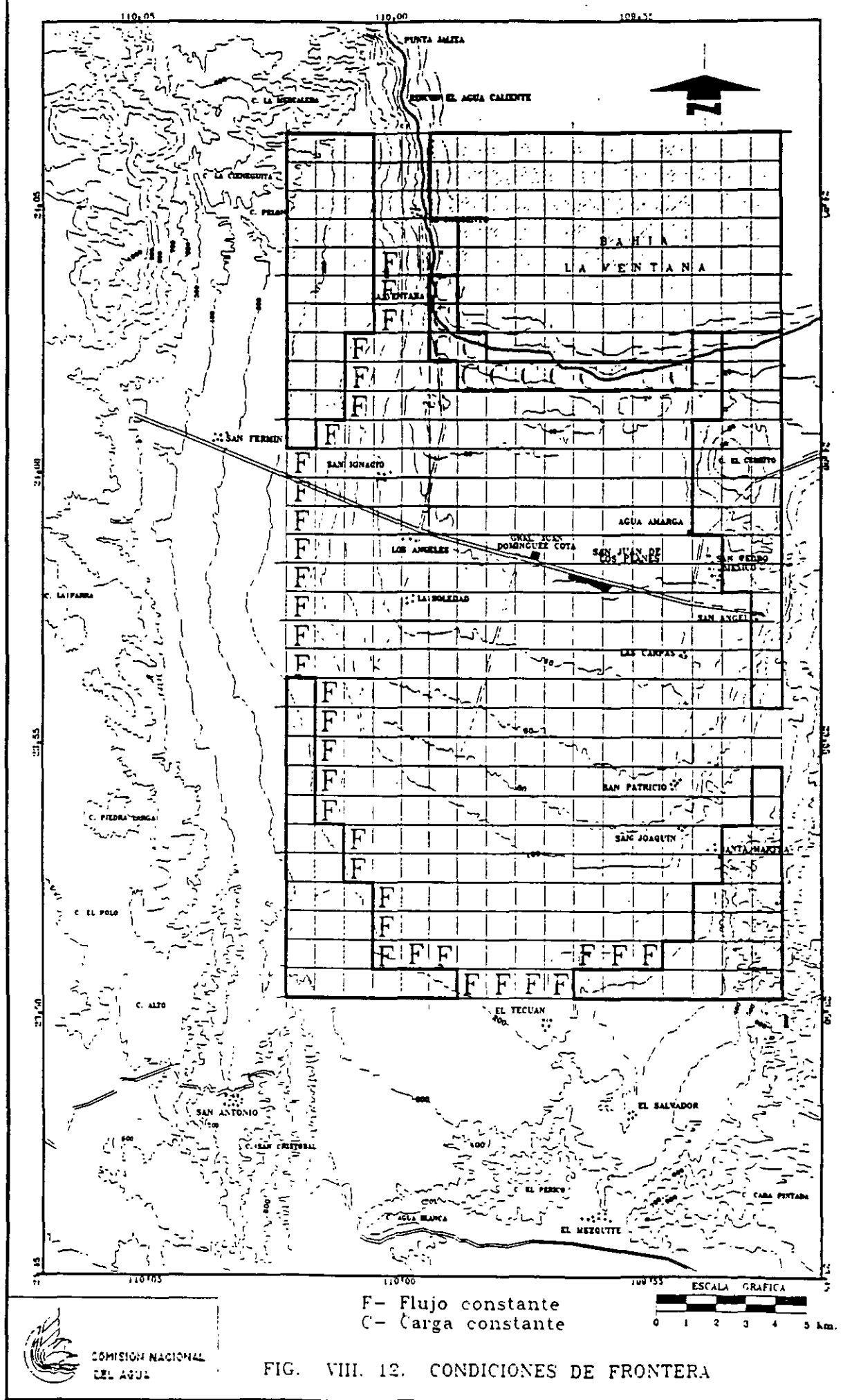


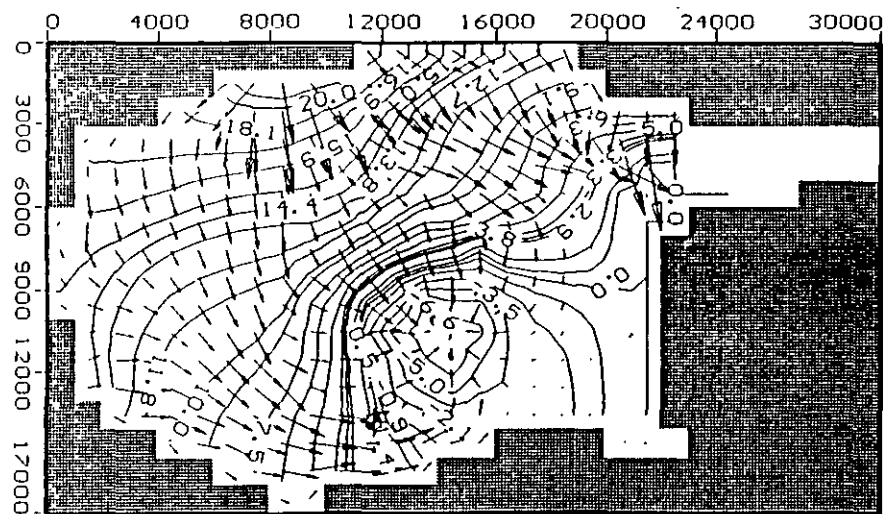
LOCALIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

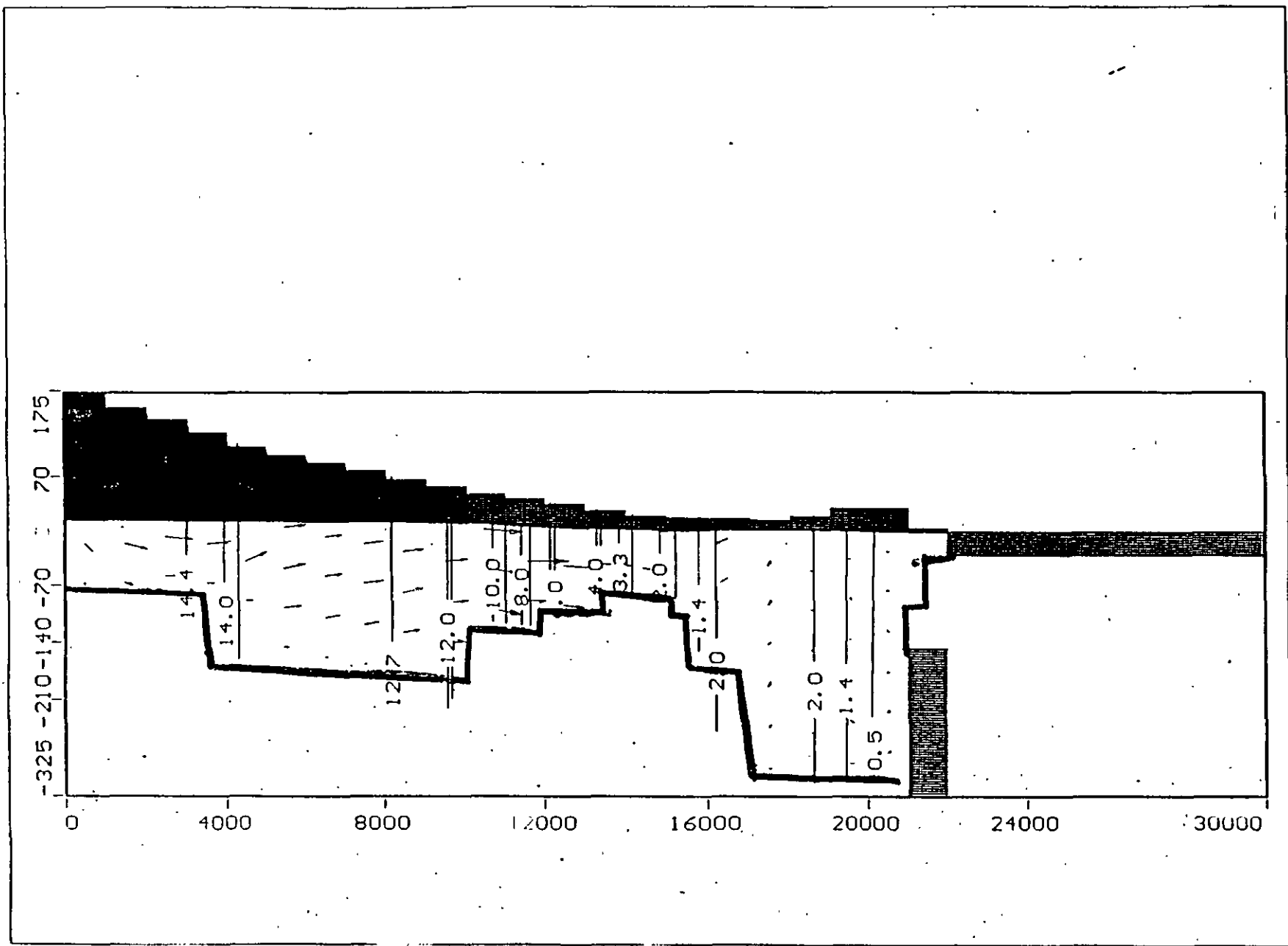
FIG. I.1.1

MODELO CONCEPTUAL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA









STEADY STATE WATER TABLE (1950)

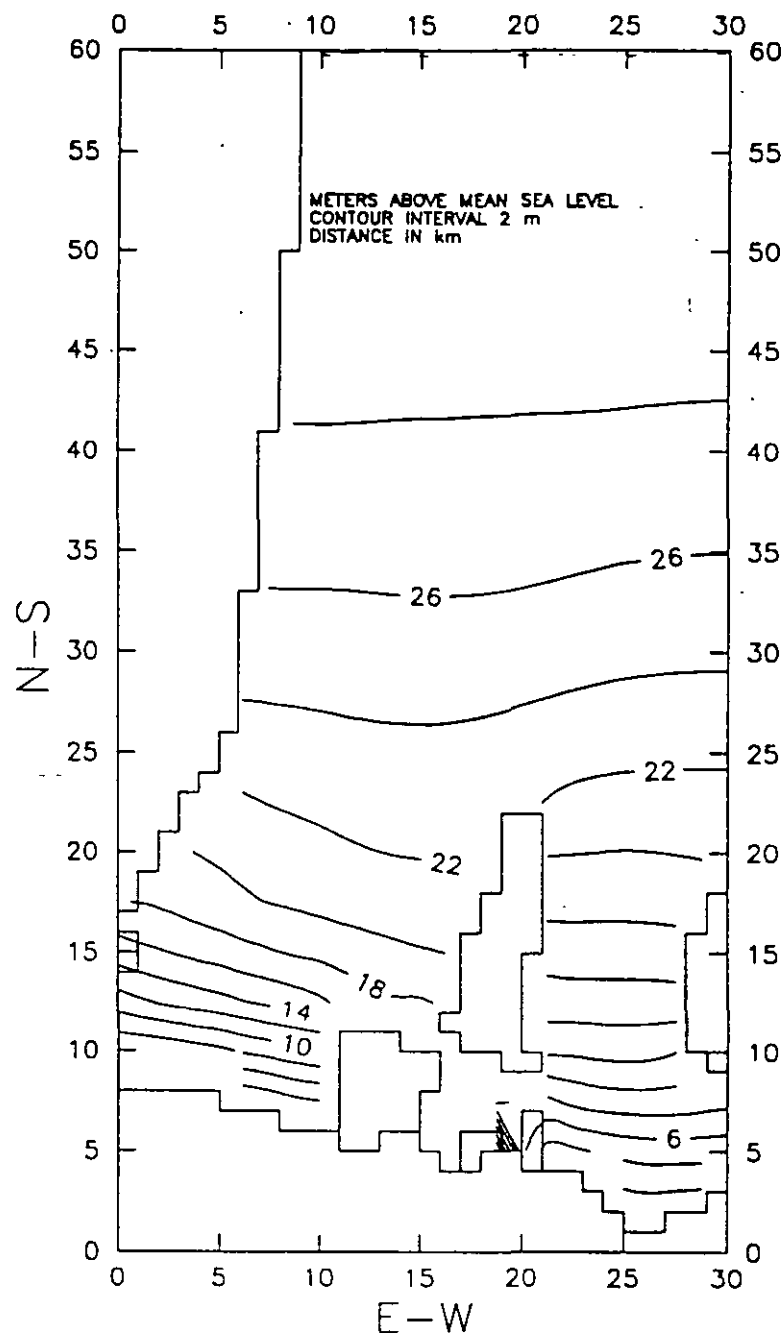


Fig. 18.

ESTIMATED WATER TABLE (1957):

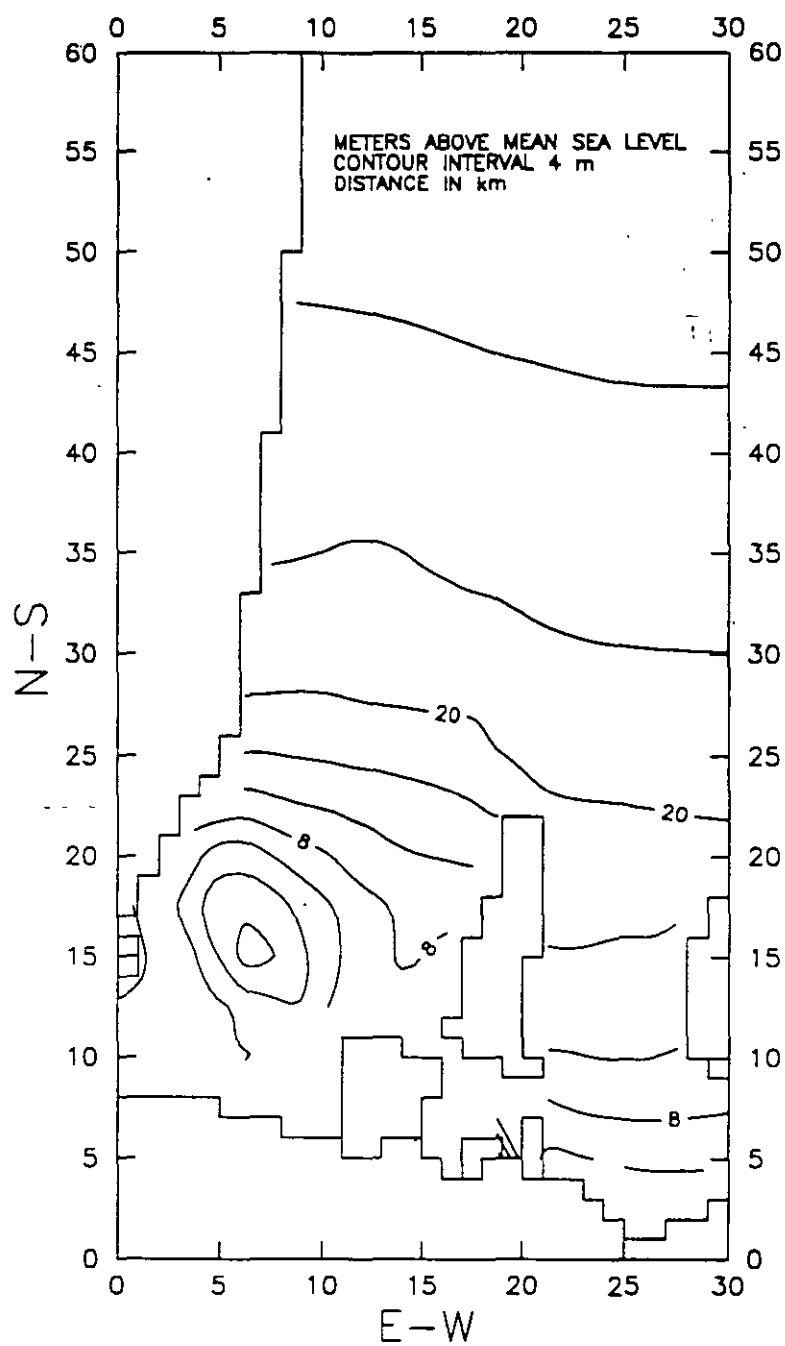


FIG. 24

ESTIMATED DRAWDOWN (1957)

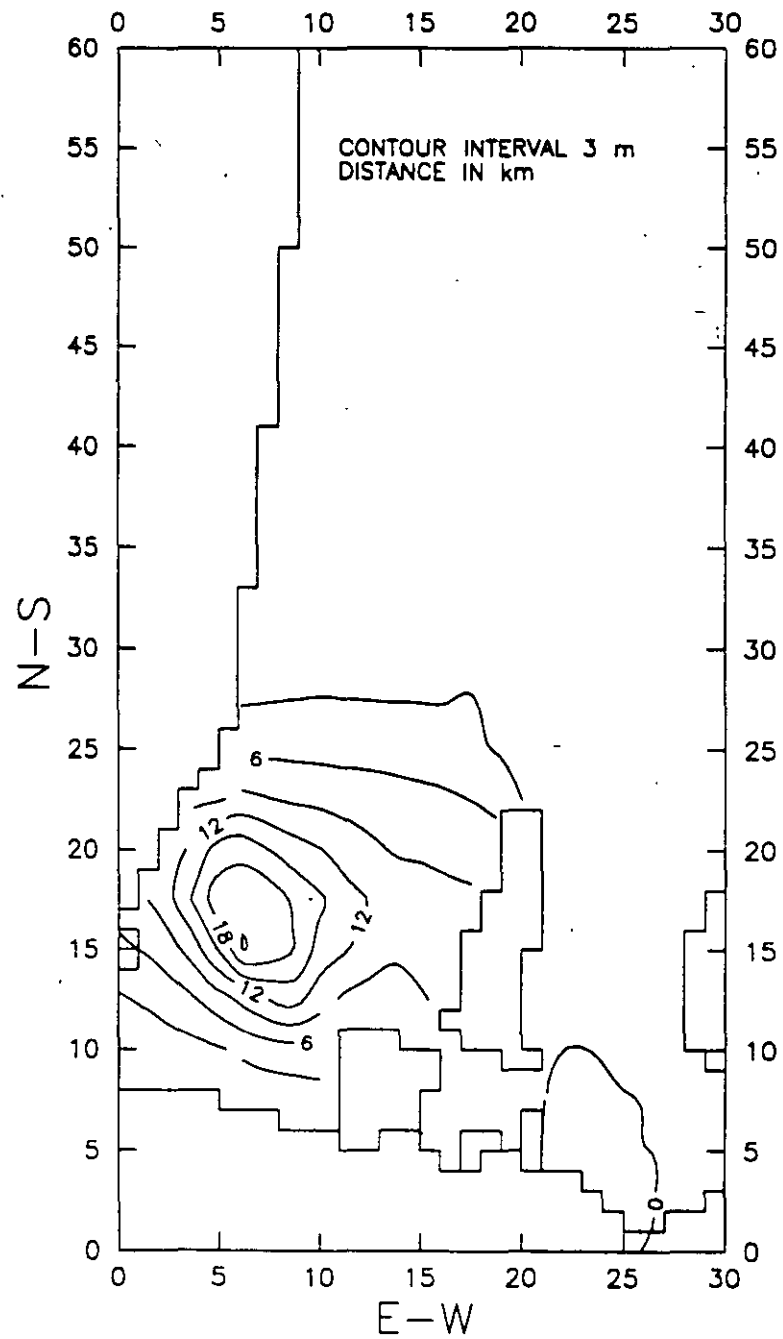


FIG. 30

ESTIMATED WATER TABLE (1993)

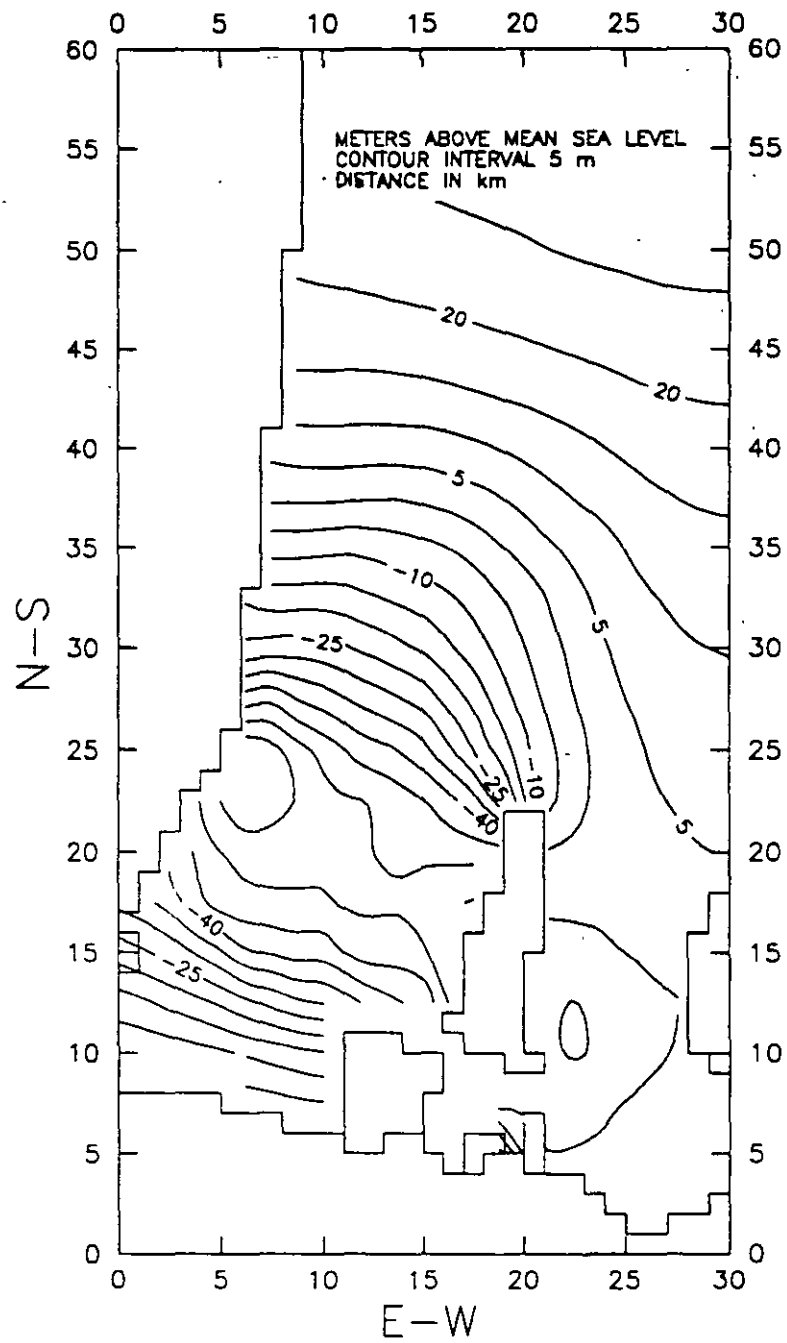


FIG. 29

ESTIMATED DRAWDOWN (1993)

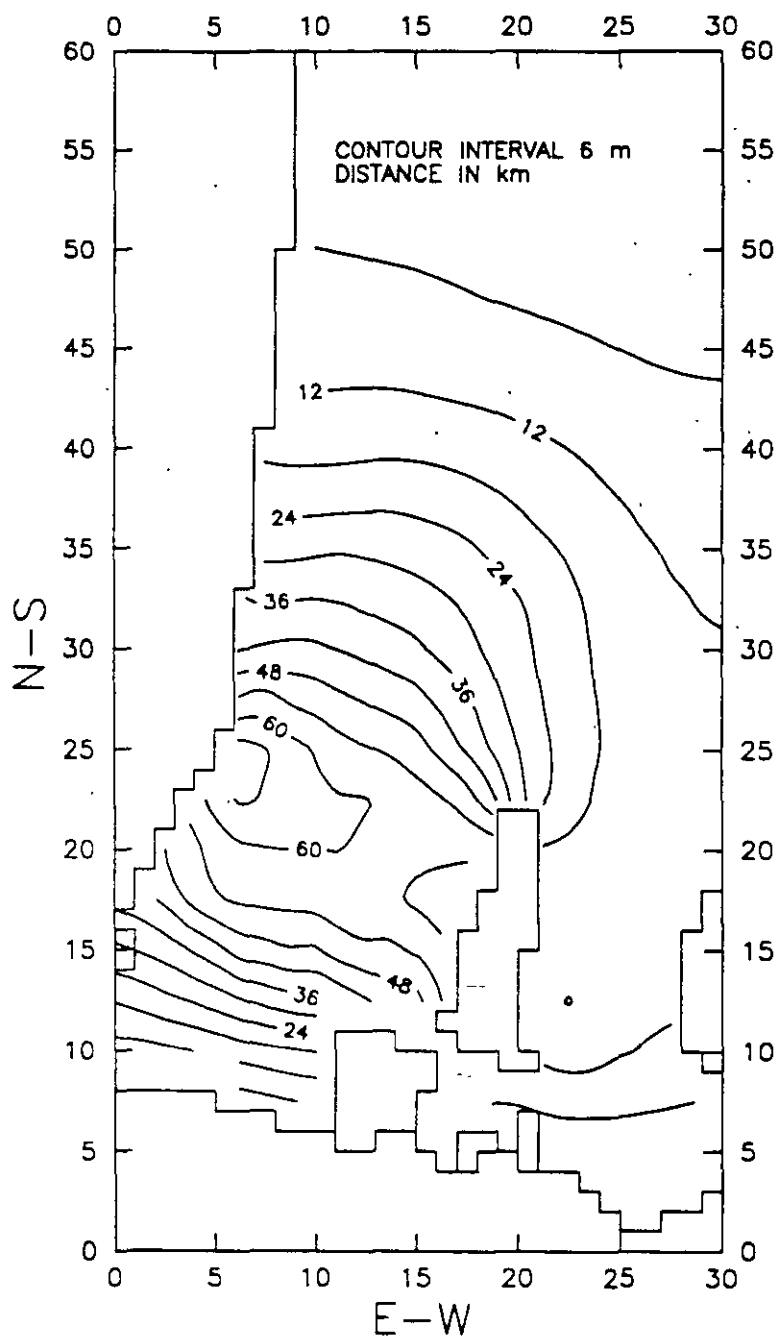


FIG. 35

FUNDAMENTALS OF THE TRANSPORT MODEL

2.1 GOVERNING EQUATIONS

The partial differential equation describing three-dimensional transport of contaminants in groundwater can be written as follows (e.g., Javandel, et al., 1984):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_i}{\theta} C + \sum_{k=1}^N R_k \quad (2.1)$$

where

- C is the concentration of contaminants dissolved in groundwater, ML^{-3} ;
- t is time, T ;
- x_i is the distance along the respective Cartesian coordinate axis, L ;
- D_{ij} is the hydrodynamic dispersion coefficient, $L^2 T^{-1}$;
- v_i is the seepage or linear pore water velocity, LT^{-1} ;
- q_i is the volumetric flux of water per unit volume of aquifer representing sources (positive) and sinks (negative), T^{-1} ;
- C_i is the concentration of the sources or sinks, ML^{-3} ;
- θ is the porosity of the porous medium, dimensionless;
- $\sum_{k=1}^N R_k$ is a chemical reaction term, $ML^{-3}T^{-1}$.

where

ρ_b is the bulk density of the porous medium, ML^{-3} ;

\bar{C} is the concentration of contaminants sorbed on the porous medium, MM^{-1} ;

λ is the rate constant of the first-order rate reactions, T^{-1} .

By rewriting the $\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$ term as:

$$\frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial C}{\partial t} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \quad (2.3)$$

and substituting equations (2.2) and (2.3) into equation (2.1), the following equation is obtained:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_i}{\theta} C + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial C}{\partial t} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \quad (2.4)$$

Moving the fourth term on the right-hand side of equation (2.4) to the left-hand side, equation (2.4) becomes:

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_i}{\theta} C - \lambda \left(C + \frac{\rho_b}{\theta} \bar{C} \right) \quad (2.5)$$

where R is called the retardation factor, defined as

$$R = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} \frac{\partial \bar{C}}{\partial C} \quad (2.6)$$

Equation (2.5) is the governing equation underlying in the transport model. The transport equation is linked to the flow equation through the relationship:

$$v_i = -\frac{K_u}{\theta} \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

where



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

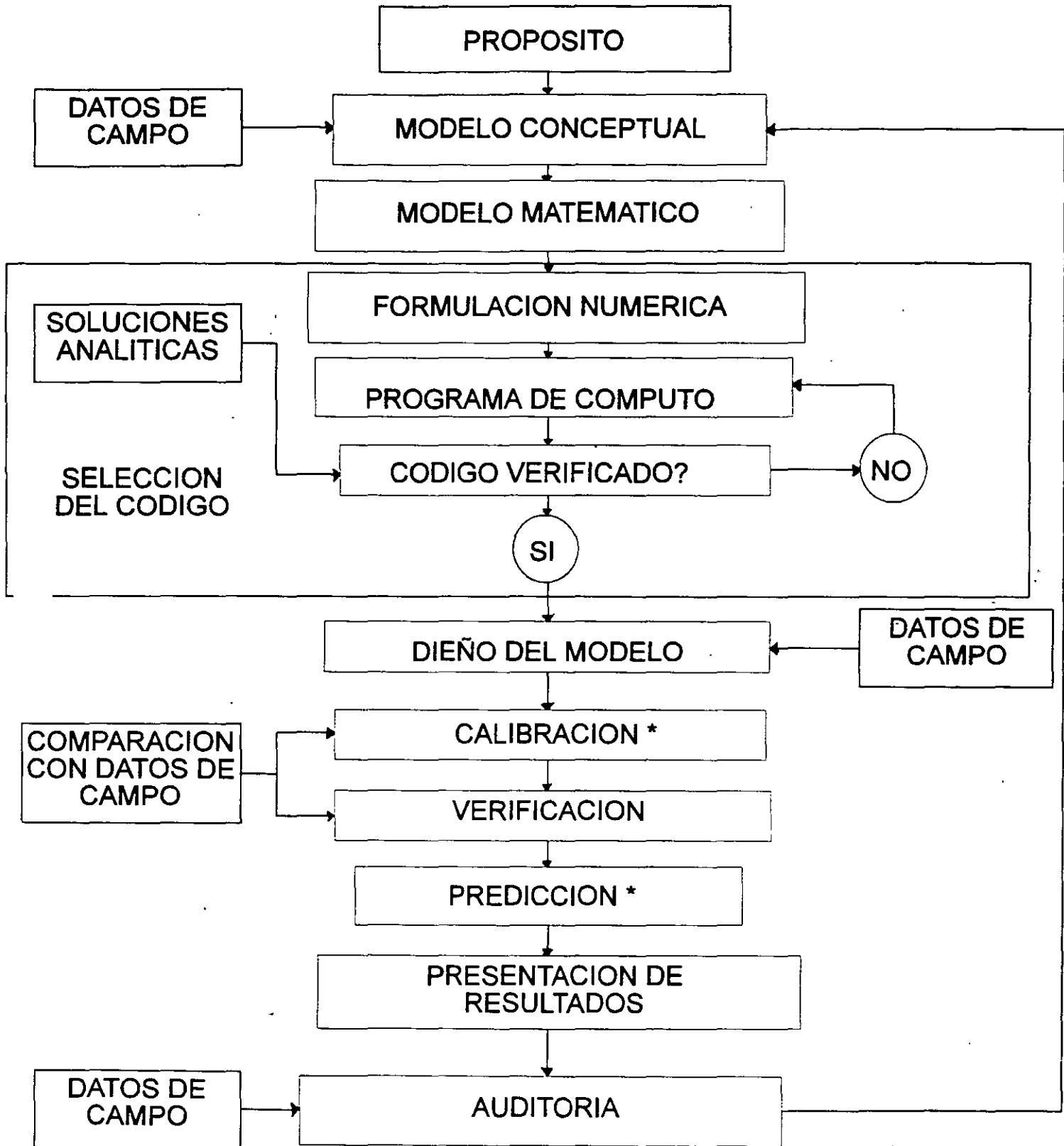
**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

**MODELOS MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

Protocolo de Modelación

**Dr. Adolfo Chávez Rodríguez
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

PROTOCOLO DE MODELACION



* INCLUYE ANALISIS DE SENSIBILIDAD

PROTOCOLO DE MODELACION

1. ESTABLECER EL PROPOSITO DEL MODELO.

- * EL MODELO SERA CONSTRUIDO PARA PREDICCION, INTERPRETACION O ANALISIS GENERICO?**
- * QUE SE APRENDERA DEL MODELO?, A QUE INTERROGANTES RESPONDERA EL MODELO?**
- * ES EL MODELO LA MEJOR MANERA DE OBTENER RESPUESTA A NUESTRA INTERROGANTES?**
- * PUEDE UN MODELO ANALITICO PROPORCIONAR LA RESPUESTA O SE TIENE QUE CONSTRUIR UN MODELO NUMERICO?**

DETERMINAR LA ECUACION GOBERNANTE

SELECCIONAR EL CODIGO DE COMPUTADORA

TIPOS DE MODELOS EN TERMINOS DE SU APLICACION

- * **PREDICTIVO:** SE USA PARA PREDECIR EL FUTURO. REQUIERE CALIBRACION.

- * **INTERPRETATIVO:** SE USA PARA ORGANIZAR Y SINTETIZAR LOS DATOS DE CAMPO, Y PARA ENTENDER MEJOR LA DINAMICA DE UN SISTEMA DE FLUJO. NO NECESARIAMENTE REQUIERE CALIBRACION.

- * **GENERICO:** SE USA PARA ANALIZAR EL FLUJO EN SISTEMAS HIDROGEOLOGICOS HIPOTETICOS. PUEDEN SER UTILES PARA FINES DE NORMATIVIDAD DE UNA REGION ESPECIFICA. NO NECESARIAMENTE REQUIERE CALIBRACION.

2. DESARROLLO DE UN MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA.

- * IDENTIFICACION DE LAS UNIDADES HIDROESTRATIGRAFICAS Y LAS FRONTERAS DEL SISTEMA.**
- * ORGANIZACION DE LOS DATOS DE CAMPO. BALANCE HIDRICO, PARAMETROS DE ACUIFERO, ESFUERZOS HIDROLOGICOS.**
- * VISITA AL SITIO. INFLUENCIA POSITIVA SOBRE LAS DECISIONES SUBJETIVAS QUE SE TOMARAN DURANTE LA CONSTRUCCION DEL MODELO.**

3. SELECCION DE LA ECUACION GOBERNANTE Y DE UN CODIGO DE COMPUTADORA.

- * LA ECUACION GOBERNANTE DEBE DESCRIBIR CON PRECISION LOS PROCESOS FISICOS ACTUANTES EN EL SISTEMA. SE VERIFICA APLICANDO EL MODELO A VARIOS SITIOS ESPECIFICOS.**
- * LA VERIFICACION DEL CODIGO SE REFIERE A LA COMPARACION DE LA SOLUCION NUMERICA CON UNA O MAS SOLUCIONES ANALITICAS O CON OTRAS SOLUCIONES NUMERICAS.**
- * LA VERIFICACION DEL CODIGO ASEGURA QUE EL PROGRAMA DE COMPUTADORA RESUELVA CON PRECISION LAS ECUACIONES QUE CONSTITUYEN EL MODELO MATEMATICO.**

4. DISEÑO DEL MODELO

EL MODELO CONCEPTUAL SE ACOMODA EN UNA FORMA ADECUADA PARA LA MODELACION.

INCLUYE:

- * DISEÑO DE LA MALLA.
- * SELECCION DE PERIODOS DE ESFUERZO.
- * ESPECIFICACION DE CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA.
- * ESTIMACION PREVIA DE PARAMETROS DE ACUIFERO Y ESFUERZOS HIDROLOGICOS.

5. CALIBRACION

- * SU PROPOSITO ES ESTABLECER QUE EL MODELO PUEDA REPRODUCIR LAS CARGAS Y LOS FLUJOS MEDIDOS EN CAMPO.**
- * SE OBTIENE UN CONJUNTO DE VALORES PARA LOS PARAMETROS DE ACUIFERO Y LOS ESFUERZOS HIDROLOGICOS QUE APROXIMA LAS CARGAS Y FLUJOS DE CAMPO.**
- * SE PUEDE EFECTUAR POR ENSAYOS Y ERROR O MEDIANTE CODIGOS AUTOMATIZADOS DE ESTIMACION DE PARAMETROS.**

6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD EN CALIBRACION

- * EL MODELO CALIBRADO ESTA INFLUENCIADO POR LA “INCERTIDUMBRE” QUE SE DERIVA DE LA IMPOSIBILIDAD DE DEFINIR CON EXACTITUD LA DISTRIBUCION ESPACIAL (Y TEMPORAL) DE LOS VALORES DE LOS PARAMETROS, ESFUERZOS, Y CONDICIONES DE FRONTERA.**
- * SU PROPOSITO ES ESTABLECER EL EFECTO DE ESTA INCERTIDUMBRE SOBRE EL MODELO CALIBRADO.**

7. VERIFICACION DEL MODELO

- * SU PROPOSITO ES EL DE INCREMENTAR LA CONFIANZA EN EL MODELO, UTILIZANDO EL CONJUNTO DE VALORES CALIBRADOS DE LOS PARAMETROS Y DE LOS ESFUERZOS PARA REPRODUCIR UN SEGUNDO CONJUNTO DE DATOS DE CAMPO.**

8. PREDICCION

- * CUANTIFICA LA RESPUESTA DEL SISTEMA HACIA EVENTOS FUTUROS.
- * SE CORRE EL MODELO CON VALORES CALIBRADOS DE LOS PARAMETROS Y LOS ESFUERZOS, CON EXCEPCION DE AQUELLOS QUE SE ESPERA QUE CAMBIEN EN EL FUTURO.
- * LA INCERTIDUMBRE EN LA PREDICCION SE DERIVA DE LA INCERTIDUMBRE EN EL MODELO CALIBRADO Y DE LA IMPOSIBILIDAD DE ESTIMAR CON PRECISION LA OCURRENCIA Y MAGNITUD DE ESFUERZOS FUTUROS.

9. ANALISIS DE SENSIBILIDAD EN PREDICCION

- * CUANTIFICA EL EFECTO DE LA INCERTIDUMBRE DE LOS VALORES DE LOS PARAMETROS SOBRE LA PREDICCION.**
- * SE SIMULAN LOS AMBITOS DE VARIACION DE ESFUERZOS FUTUROS ESTIMADOS PARA EXAMINAR SU IMPACTO EN LA PREDICCION.**

10. PRESENTACION DE RESULTADOS

- * LA PRESENTACION CLARA DEL DISEÑO DEL MODELO Y DE LOS RESULTADOS ES ESENCIAL PARA UNA COMUNICACION EFECTIVA DEL ESFUERZO DE MODELACION.**

11. AUDITORIA

- * LA AUDITORIA SE EFECTUA DESPUES DE VARIOS AÑOS DE CONCLUIDO EL ESTUDIO DE MODELACION.
- * SE RECABAN NUEVOS DATOS DE CAMPO PARA DETERMINAR SI LA PREDICCION FUE CORRECTA. SI ASI LO ES, EL MODELO ESTA "VALIDADO" PARA EL SITIO ESPECIFICO DE APLICACION.

12. REDISEÑO DEL MODELO

LA AUDITORIA, POR LO GENERAL, APORTARA NUEVOS ELEMENTOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA, QUE PUEDEN LLEVAR A CAMBIOS EN EL MODELO CONCEPTUAL O EN LOS PARAMETROS DEL MODELO.

ENFOQUES CONCEPTUALES

ENFOQUE DE ACUIFERO:

- * SE BASA EN EL CONCEPTO DE ACUIFEROS CONFINADOS Y LIBRES.
- * SUPONE FLUJO HORIZONTAL EN ACUIFEROS Y FLUJO VERTICAL DE ACUITARDOS
- * LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SE INTEGRA EN LA VERTICAL PARA OBTENER TRASMISIVIDAD.
- * SE USA PARA SIMULAR FLUJO BIDIMENSIONAL DEN PLANTA Y FLUJO CUASI-TRIDIMENSIONAL.
- * LAS CARGAS HIDRAULICAS SE CALCULAN EN LOS ACUIFEROS, PERO NO EN LOS ACUITARDOS.
- * SE INCORPORA EL ESPESOR Y LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE LOS ACUITARDOS PARA CONECTAR LOS ACUIFEROS.

ENFOQUE DE ACUIFERO

SI EL ACUIFERO ES LIBRE:

- * SE UTILIZAN LAS HIPOTESIS DE DUPUIT.
- * $T_x = K_x H$ y $T_y = K_y h$, DONDE K ES CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y h EL ESPESOR SATURADO DEL ACUIFERO.
- * S ES EL RENDIMIENTO ESPECIFICO.
- * L ES CERO, A MENOS QUE HAYA UNA FUENTE SUBYACIENDO AL ACUIFERO.

ENFOQUE DE SISTEMA DE FLUJO

- * NO ES IMPORTANTE IDENTIFICAR LOS ACUIFEROS Y LOS ACUITARDOS “PER SE”, SINO CONSTRUIR LA DISTRIBUCION TRIDIMENSIONAL DE LAS CARGAS, LAS CONDUCTIVIDADES HIDRAULICAS Y LAS PROPIEDADES DE ALMACENAMIENTO.**
- * SE INCORPORAN LAS COMPONENTES HORIZONTALES Y VERTICALES DE FLUJO A TRAVES DE TODO EL SISTEMA.**
- * APTO PARA MODELOS BIDIMENSIONALES EN PERFIL Y PARA MODELOS TRIDIMENSIONALES.**

ENFOQUE DE ACUIFERO

ECUACION GOBERNANTE:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[T_x \frac{\delta h}{\delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[T_y \frac{\delta h}{\delta y} \right] = S \frac{\delta h}{\delta t} - R + L$$

DONDE:

h: CARGA HIDRAULICA, [m]

T: TRASMISIVIDAD, [m²/día]

S: COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO, [---]

R: RECARGA (+) O DESCARGA (-), [m/día]

L: GOTEIO VERTICAL, [m/día], DADO POR:

$$L = -K_s' \frac{h_s - h}{b'}$$

DONDE:

K_s': CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA DE ACUITARDO,
[m²/día]

b': ESPESOR DEL ACUITARDO, [m]

h_s: CARGA HIDRAULICA DE LA FUENTE AL OTRO
LADO DEL ACUIFERO, [m]

ENFOQUE DE SISTEMA DE FLUJO

ECUACION GOBERNANTE:

$$\frac{\delta}{\delta x} \left[K_x \frac{\delta h}{\delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[K_y \frac{\delta h}{\delta y} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[K_z \frac{\delta h}{\delta z} \right] = S_s \frac{\delta h}{\delta t} - R^*$$

DONDE:

K: CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA, [m²/día]

S_s: ALMACENAMIENTO ESPECIFICO, [1/m]

R*: VOLUMEN DE INGRESO (+) O EGRESO (-) POR
UNIDAD DE VOLUMEN Y UNIDAD DE TIEMPO, [1/día]



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

**MODELOS EN GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN DE
ACUÍFEROS**

Modelación Matemática de Contaminación de Acuíferos

**Dr. Adolfo Chávez Rodríguez
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

**INTRODUCCION AL MODELO
MODULAR DE FLUJO DE
AGUA SUBTERRANEA DEL
U.S.G.S.**

VENTAJAS

- Las modificaciones se limitan a paquetes individuales .
- Los paquetes se pueden incluir o quitar sin dificultad .
- Corre en varios tipos de máquinas sin modificación.
- Modelo en 1, 2 ó 3 dimensiones .
- Relativamente fácil de entender .
- Muchas opciones.
- Los formatos se pueden especificar por el usuario.
- Calcula el flujo entre celda y celda .
- Completamente documentado.

VARIAS OPCIONES PARA :

- **Condiciones de flujo de agua subterranea.**
- **Términos fuente.**
- **Métodos de solución numérica.**
- **Entrada y salida de datos.**
- **Condiciones de contorno.**
- **Datos dependientes del tiempo.**

CONDICIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA

- **Problemas en 1, 2 ó 3 dimensiones.**
- **Condiciones artesianas.**
- **Condiciones freáticas.**
- **Condiciones parcialmente convertibles de artesianas a freáticas y viceversa.**
- **Condiciones totalmente convertibles de artesianas a freáticas y viceversa.**

TERMINOS FUENTE

- **POZOS DE BOMBEO O INYECCION.**
- **DRENES.**
- **INTERACCION CON RIOS.**
- **EVAPOTRANSPIRACION .**
- **RECARGA DISTRIBUIDA .**
- **FUENTES O SUMIDEROS EXTERNOS.**

METODOS NUMERICOS DE SOLUCION

- **Procedimiento altamente implícito (SIP).**
- **Sobrerrelajación sucesiva por secciones verticales. (SSOR).**

ENTRADA

- Grupos de datos separados se pueden manejar en archivos de datos distintos.
- Formatos especificados por el usuario.
- Sólo las opciones seleccionadas entran al modelo.

SALIDA

- Cargas hidráulicas.
- Abatimientos.
- Balance de masas.
- Datos de iteración.
- Datos de tiempo.
- Cálculos de flujo celda a celda.
- Opción de archivos en binario.
- Selección de salidas para impresión .

CONDICIONES DE CONTORNO

- **Carga prescrita .**
- **Flujo prescrito .**
- **Flujo nulo .**
- **Flujo dependiente de la carga .**

REQUERIMIENTO DE DATOS

- **Datos sobre la malla de diferencias finitas.**
- **Periodos de esfuerzo e intervalos de tiempo.**
- **Parámetros del método de resolución.**
- **Opciones .**
- **Parámetros hidráulicos .**
- **Condiciones de contorno.**
- **Términos fuente — sumidero .**

PAQUETE BASICO

- **Tamaño del modelo .**
- **Contornos .**
- **Longitud de los intervalos de tiempo .**
- **Condiciones iniciales .**
- **Salida .**
- **Opciones (Paquetes utilizados)**

REQUERIDO

PAQUETE DE FLUJO CENTRADO EN LA CELDA

- **Lee los parámetros de acuífero .**
- **Define los tipos de capas .**
- **Calcula los coeficientes de las ecuaciones de diferencias finitas .**

REQUERIDO

(Por ahora)

RESUMEN DE CONDICIONES DE FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA Y DATOS REQUERIDOS

CONDICION DE FLUJO	Tipo de Capa	DESCRIPCION	REQUERIMIENTO DE DATOS						
			S	Sy	T	K	BASE	TECHO	VCONT
Artesiano	0	Estrictamente confinado	tr	no	si	no	no	no	cd
Freático	1	Estrictamente libre (sólo la capa superior)	no	tr	no	si	si	no	cd
Parcialmente Convertible	2	T constante (acuífero grueso) conversión S - Sy	tr	tr	si	no	no	si	cd
Totalmente Convertible	3	Conversión T - K Conversión S - Sy	tr	tr	no	si	si	si	cd

X = Parámetro utilizado

no = Parámetro no utilizado

tr = Parámetro utilizado en simulaciones en transitorio

cd = Parámetro utilizado si existe una capa debajo

PAQUETE DE POZOS

- **Lee datos de pozos .**
- **Añade términos de pozo a las ecuaciones de diferencias finitas.**
- **Condición de flujo prescrito .**
- **Pozo en el centro de la celda .**
- **Conceptualmente solo un pozo por celda .**

∴ en la formulación las descargas se concentran .

PAQUETE DE RECARGA

- Lee los datos de recarga .
- Multiplica la tasa de recarga por el area de la celda.

$$L / T * L^2 = L^3 / T$$

- Añade términos de recarga a las ecuaciones de diferencias finitas.
- Condición de flujo prescrito .

PAQUETE DE DRENES

- Lee datos de drenes .
- Calcula la filtración del dren .
- Añade términos a las ecuaciones de diferencias finitas .
- Condición de flujo dependiente de la carga .
- Elevación del dren = carga en el dren .
- Flujo al dren proporcional a la diferencia de carga .
- Factor de proporcionalidad = conductancia
 L^2 / T
- Flujo al dren solamente .

PAQUETE DE RIOS

- Lee datos de río .
- Calcula los términos de filtración .
- Añade términos a las ecuaciones de diferencias finitas .
- Condición de flujo dependiente de la carga.
- Flujo vertical solamente .
- El río es una fuente infinita.

$$Q_{RIV} = \boxed{\frac{KLW}{M}} (H_{RIV} - H_{AQ})$$

↑
conductancia

PAQUETE DE EVAPOTRANSPIRACION .

- Lee datos de ET
- Calcula la tasa de ET
- Añade términos a las ecuaciones de diferencias finitas .
- Condición de flujo dependiente de la carga .
- Función lineal .
- $Q = 0$ si $h < \text{elevación especificada}$.
- $Q = ET_{\max} \frac{h - \text{elevación especificada}}{\text{profundidad de extinción}}$
- $Q = ET_{\max}$, para $h < \text{superficie}$.

PAQUETE DE CONTORNO GENERAL DE CARGA (GHB)

- Lee datos de contorno general de carga.
- Calcula los flujos .
- Añade términos a las ecuaciones de diferencias finitas.
- Condición de flujo dependiente de la carga .
- Función lineal .
- Similar al dren pero flujo puede ser + ó -

PAQUETE SIP

(PROCEDIMIENTO ALTAMENTE _ IMPLICITO)

- **Resuelve iterativamente el sistema de ecuaciones de diferencias finitas .**
- **Imprime datos de iteración .**

PAQUETE SSOR

**(SOBRERRELAJACION SUCESIVA _
POR SECCIONES VERTICALES) .**

- **Resuelve iterativamente el sistema de ecuaciones de diferencias finitas.**
- **Imprime datos de iteración .**

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS METODOS DE RESOLUCION

SSOR

+

más directo

**menor requerimiento
de memoria RAM**

**resolución directa
para sección vertical**

más fácil de entender

**mejor en sistemas
multicapas**

—

**sensible al parámetro
de aceleración**

más lento que el SIP

SIP

+

**más rápido que
el SSOR**

**menos sensible a
a los parámetros
de aceleración**

—

**muchos parámetros
para "sintonizar"**

**difícil de entender y
corregir**

**mayor requerimiento
de memoria RAM**

VCONT

- Se refiere a la conductancia entre nodos (vertical).
- Hay NLAY - 1 arreglos de VCONT.
- $$VCONT = \frac{C}{\Delta_x \Delta_y} \left[\frac{1}{T} \right]$$
- Incorpora tanto a K como a Δ_z .

$\therefore \Delta_z$ no se define explícitamente.

- Incorpora propiedades de capas adyacentes.
- Similar a la conductancia usada por el modelo en la horizontal, excepto :

Horizontal: Δ 's y K's se proporcionarán por separado.

Vertical : Δ 's y K's se combinan a priori .



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

**MODELOS MATEMÁTICOS EN GEOHIDROLOGÍA Y
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

Simulación de Acuíferos

**Dr. Adolfo Chávez Rodríguez
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

SIMULACION DE ACUIFEROS

- **LA SIMULACION DE UN SISTEMA ACUIFERO CONSISTE EN LA CONSTRUCCION Y OPERACION DE UN MODELO CUYO COMPORTAMIENTO SE APROXIMA AL DEL ACUIFERO REAL .**

- **EL USO DEL MODELO TIENE TRES OBJETIVOS PRINCIPALES :**
 - (1) ENTENDIMIENTO**

 - (2) PREDICCION**

 - (3) CONTROL**

MODELO DE SIMULACION

- **EL TERMINO MODELO SE REFIERE A:**
 - (1) **LA TEORIA QUE DESCRIBE AL PROCESO BAJO CONSIDERACION;**
 - (2) **EL CODIGO DE COMPUTADORA QUE SE USA PARA SIMULAR EL PROCESO;**
 - (3) **LA APLICACION DEL CODIGO A UN CASO PRACTICO ESPECIFICO.**
- **SE PUEDEN APLICAR CRITERIOS DE EJECUCION PARA LOS TRES CASOS.**

M O D E L O S

- **FISICOS**
- **ANALOGICOS ELECTRICOS**
- **MATEMATICOS**
 - **DETERMINISTICOS**
 - **ESTOCASTICOS**
 - **COMBINADOS**

MODELO CONCEPTUAL

MODELO MATEMATICO

MODELO ANALITICO

**ECUACION SIMPLIFICADA
CUYA SOLUCION SE PUEDE
OBTENER POR METODOS
ANALITICOS.**

MODELO NUMERICO

**ECUACIONES QUE SE APRO-
XIMAN NUMERICAMENTE
RESULTANDO EN UNA ECUA-
CION MATRICIAL QUE SE
PUEDE RESOLVER POR
COMPUTADORA .**

MODELOS MATEMATICOS

- CONSISTE EN

- ECUACION (ES) DIFERENCIAL (ES) PARCIAL (ES)
- CONDICIONES INICIALES
- CONDICIONES DE CONTORNO

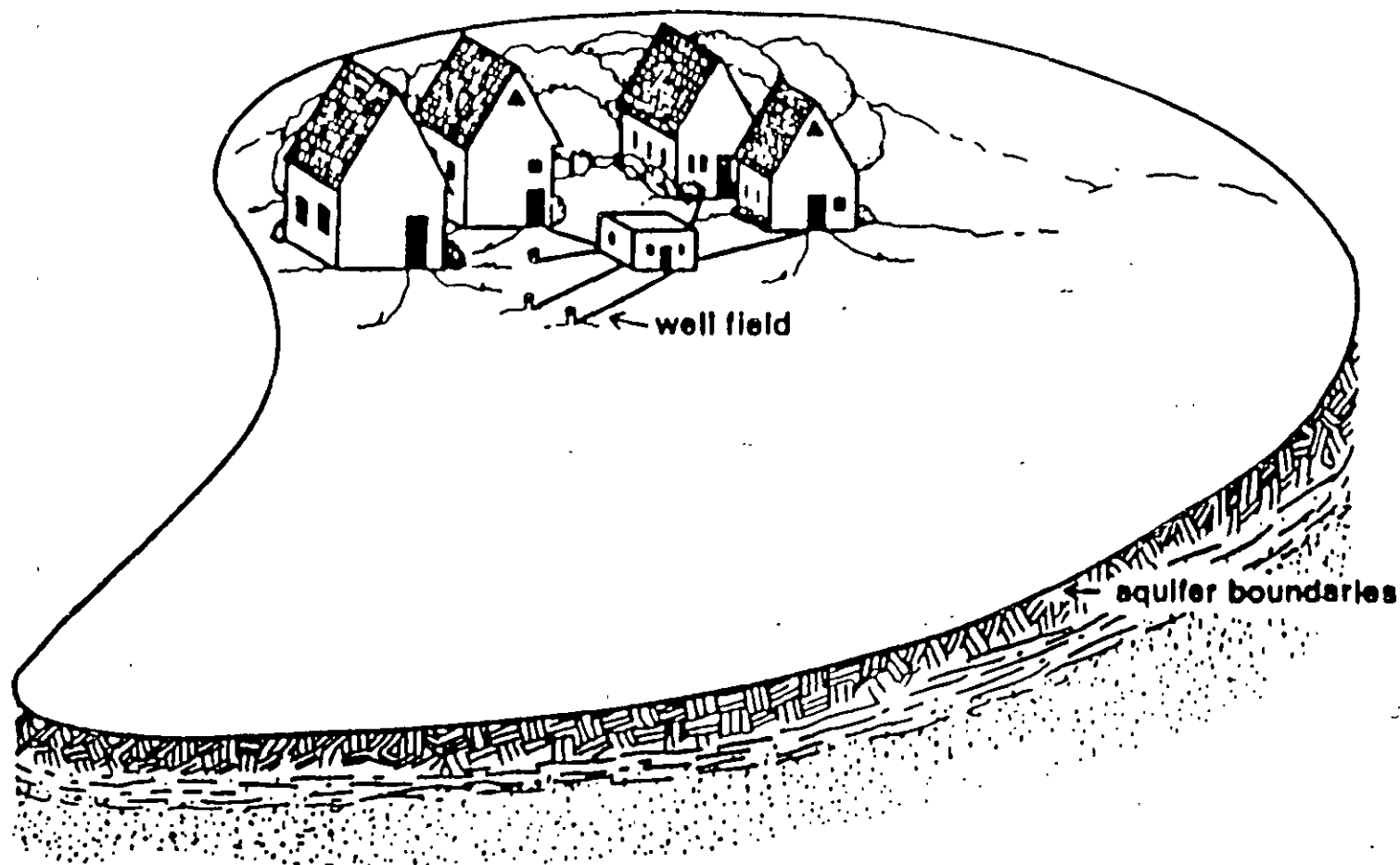
- SE BASA EN

- CONSERVACION DE LA MASA
- CONSERVACION DEL IMPULSO

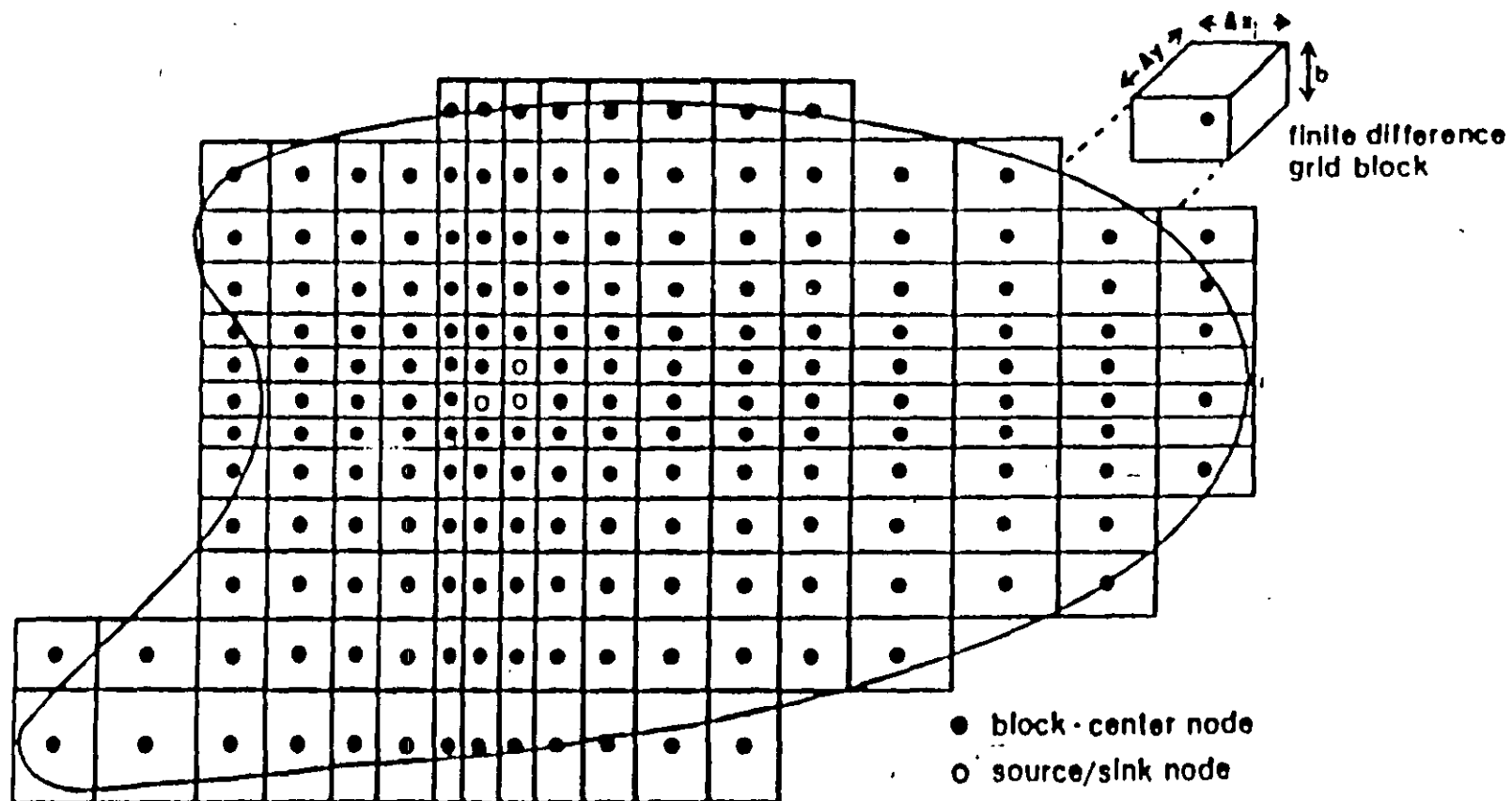
METODOS NUMERICOS

- **OFRECEN VENTAJAS PARA**
 - **AMBIENTES GEOLOGICOS COMPLEJOS**
 - **HETEROGENEIDAD**
 - **ANISOTROPIA**
 - **CONTORNOS IRREGULARES**
 - **PROCESOS NO LINEALES**
 - **PROCESOS ACOPLADOS**

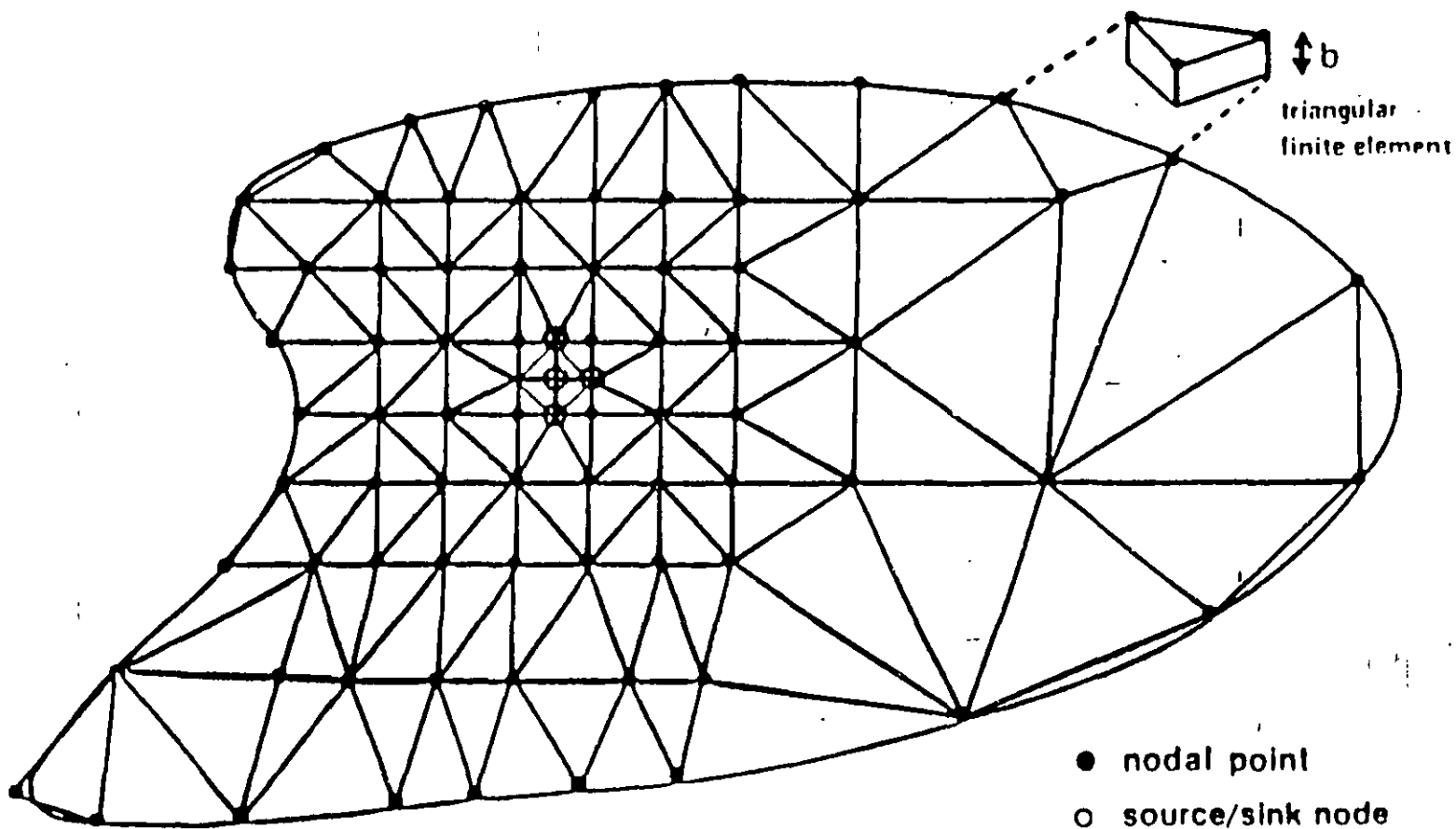
AREA TO BE MODELED



FINITE DIFFERENCE GRID



FINITE ELEMENT MESH



PROPOSITO DE LA MODELACION

- **ENTENDIMIENTO DEL SISTEMA Y DE LOS PROCESOS.**
 - **INVESTIGACIONES DEL AREA**
 - **CONDICIONES PASADAS**
- **PREDICION**
 - **CONDICIONES FUTURAS**
 - **ANALISIS DE DISEÑOS CORRECTIVOS**
 - **ANALISIS PARA CRITERIOS DE REGLAMENTACION**
- **CONTROL**
 - **IMPLEMENTACION DE PROGRAMAS DE APROVECHAMIENTO O CORRECTIVOS**
 - **OPCIONES DE OPERACION**
 - **EXPLOTACION OPTIMA**

IDENTIFICACION DEL MODELO

- **A LA DETERMINACION DEL MODELO TEORICO CORRECTO SE LE CONOCE COMO IDENTIFICACION DEL MODELO.**
- **DADA UNA CLASE DE MODELOS Y UN PROCESO, EL PROBLEMA DE IDENTIFICACION CONSISTE EN DETERMINAR EL MEJOR MODELO EN ALGUN SENTIDO MEDIANTE OBSERVACIONES DE ENTRADA-SALIDA DEL PROCESO.**
- **LA SELECCION DEL " MODELO MAS VERDADERO " ES UNA TAREA SUBJETIVA QUE DEBE REALIZAR EL MODELADOR .**

SELECCION DEL CODIGO

- **UNA VEZ QUE LA TEORIA SE IDENTIFICA, SE PROCEDE A LA SELECCION DEL CODIGO.**
- **EL CODIGO DE COMPUTADORA _ (PROGRAMA) ES UN CONJUNTO DE INSTRUCCIONES DISEÑADAS PARA RESOLVER EL MODELO TEORICO. LA MAYORIA DE LOS INDICES DE EJECUCION SE HAN DESARROLLADO PARA LOS CODIGOS DE COMPUTADORA, A LO QUE SE LLAMA VALIDACION DEL MODELO.**
- **LA VALIDACION ES UN PROCESO DE PRUEBA APLICADO AL CODIGO DE COMPUTADORA, DONDE LOS OBJE_ TIVOS SON :**
 - (1) VERIFICAR LA EXACTITUD DEL ALGORITMO COMPUTACIONAL EMPLEA_ DO PARA RESOLVER LAS ECUACIO_ NES QUE DESCRIBEN EL FENOMENO.**
 - (2) ASEGURAR QUE EL CODIGO DE COMPUTADORA SEA COMPLETAMENTE OPERACIONAL.**

SELECCION DEL CODIGO (CONTINUA)

- SE DICE QUE UN CODIGO DE COMPUTADORA ESTA 'VALIDADO' SI SE HAN EFECTUADO LAS PRUEBAS SUFICIENTES PARA DEMOSTRAR QUE REPRESENTA CON EXACTITUD AL MODELO TEORICO.
- LAS PRUEBAS PUEDEN CONSISTIR EN :
 - (1) COMPARACION CON SOLUCIONES ANALITICAS.
 - (2) COMPARACION CON OTROS CODIGOS

FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA

MARCO FISICO

- **PLANO HIDROGEOLOGICO MOSTRANDO LA EXTENSION, CONTORNOS, Y CONDICIONES DE CONTORNO DE TODOS LOS ACUIFEROS**
- **PLANO TOPOGRAFICO MOSTRANDO LOS CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES**
- **PLANOS DE CONFIGURACION DE LA SUPERFICIE FREATICA, DEL BASAMENTO, Y DEL ESPESOR SATURADO**
- **PLANO DE TRANSMISIVIDAD MOSTRANDO EL ACUIFERO Y SUS CONTORNOS**
- **PLANO DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA Y ALMACENAMIENTO ESPECIFICO DE LA CAPA CONFINANTE**
- **PLANO DE VARIACION DEL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO EN EL ACUIFERO**
- **CONEXION HIDRAULICA ENTRE EL ACUIFERO Y LOS CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES**

FLUJO DE AGUA SUBTERRANEA (CONT)

ESFUERZOS SOBRE EL SISTEMA

- TIPO Y EXTENSION DE LAS AREAS DE RECARGA (AREAS IRRIGADAS, CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES, POZOS DE RECARGA , ETC.
- BOMBEO DE AGUA SUBTERRANEA (DISTRIBUIDO EN TIEMPO Y ESPACIO)
- GASTO EN CAUCES SUPERFICIALES (DISTRIBUIDO EN TIEMPO Y ESPACIO)
- PRECIPITACION
- EVAPOTRANSPIRACION

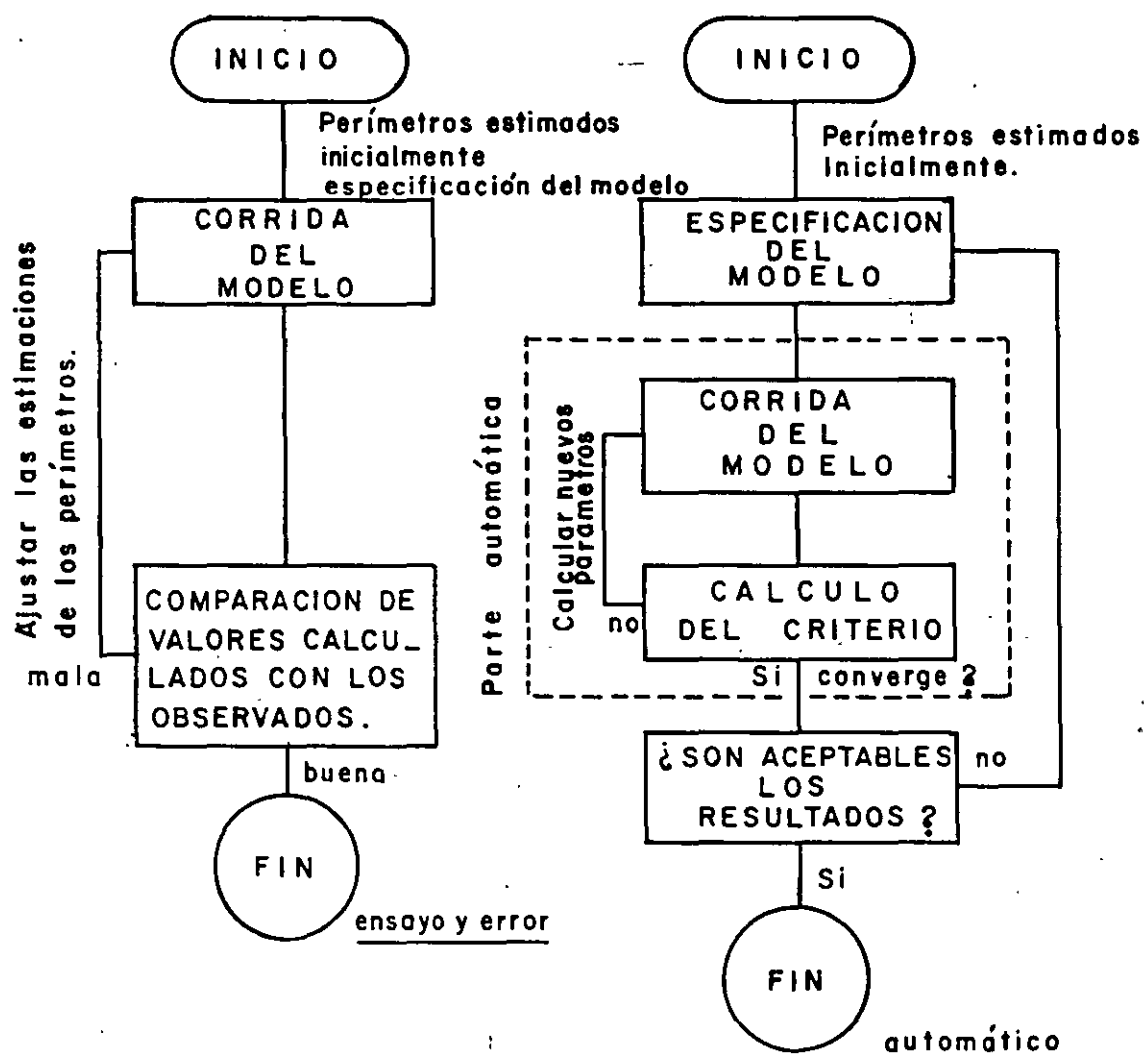
OTROS FACTORES

- CONDICIONES ECONOMICAS
- ASPECTOS LEGALES
- USO DEL SUELO

APLICACION DEL MODELO

- **LA APLICACION DEL MODELO TIENE TRES ETAPAS PRINCIPALES :**
 - (1) CONCEPTUALIZACION DEL SISTEMA**
 - (2) CALIBRACION DEL MODELO**
 - (3) PREDICCION**
- **LA MAYORIA DE LAS APLICACIONES INCLUYEN A LAS TRES ETAPAS, AUNQUE CON DIFERENTES GRADOS DE ESFUERZO.**

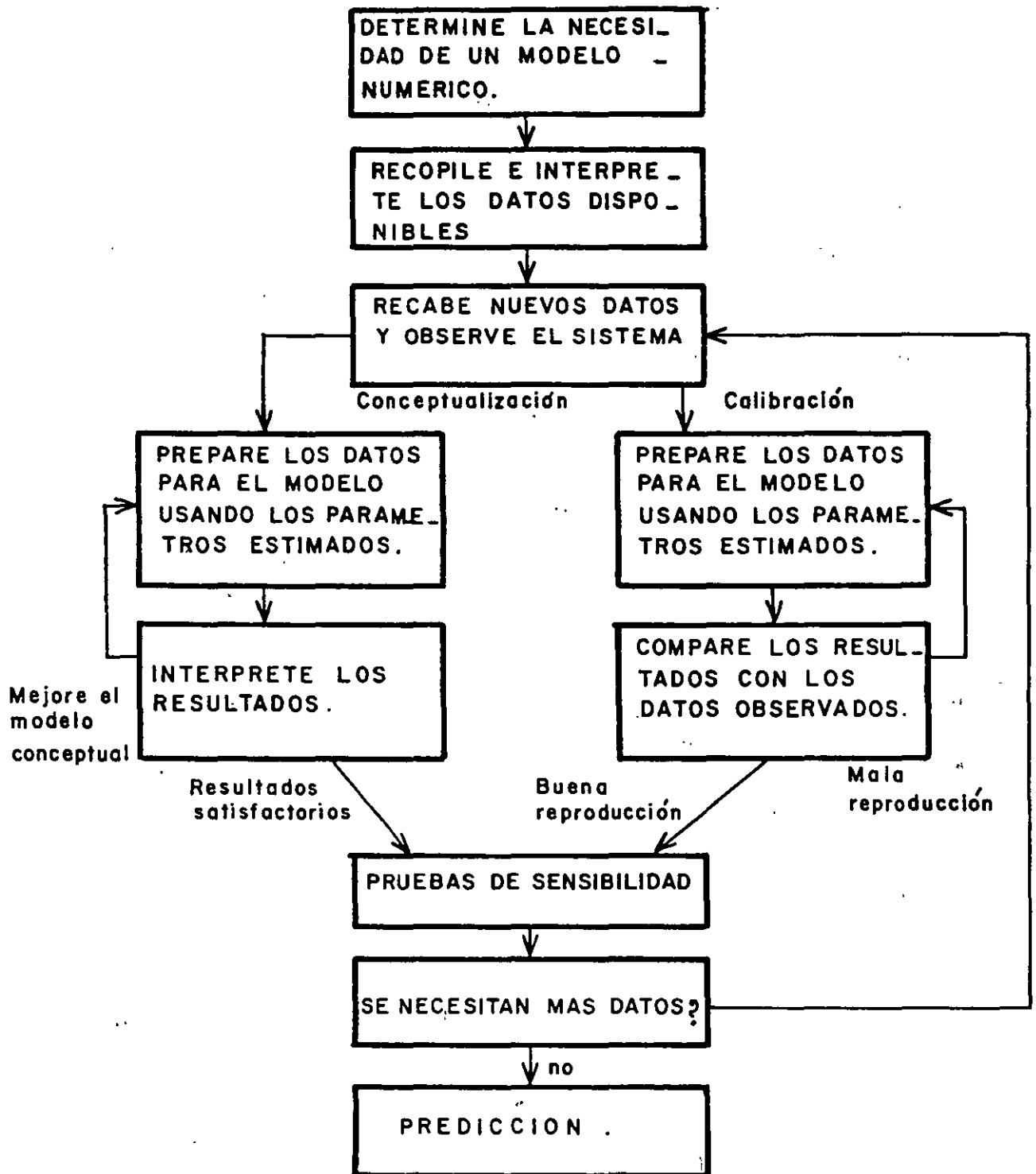
APLICACION DEL MODELO (CONT.)



PROCEDIMIENTOS PARA CALIBRACION DEL MODELO MEDIANTE ENSAYO Y ERROR Y AJUSTE AUTOMATICO.

APLICACION DEL MODELO (CONT.)

- **LA CONCEPTUALIZACION DEL SISTEMA INCLUYE LA ORGANIZACION DE LA INFORMACION SOBRE EL SISTEMA ACUIFERO DENTRO DE UN MARCO INTERNAMENTE CONSISTENTE. LA CONCEPTUALIZACION INCLUYE LOS FACTORES QUE CONTROLAN AL SISTEMA DE FLUJO TALES COMO GEOMETRIA Y ESTRATIGRAFIA, CONDICIONES INICIALES Y DE CONTORNO, Y PARAMETROS IDROLOGICOS.**
- **LA CONCEPTUALIZACION DEL SISTEMA ES UNA TAREA SUBJETIVA Y NO SE DISPONE EN GENERAL DE INDICES CUANTITATIVOS DE CORRECCION .**



APLICACION DEL MODELO (CONT.)

- **LA REPRODUCCION HISTORICA O CALIBRACION DEL MODELO SE EMPLEA PARA REFINAR LAS ESTIMACIONES DE LOS PARAMETROS HIDROLOGICOS Y CONDICIONES DE CONTORNO MEDIANTE LA COMPARACION DE LOS RESULTADOS CON LOS DATOS OBSERVADOS.**
- **LA CALIBRACION SE PUEDE EFECTUAR POR ENSAYO Y ERROR O POR REGRESION AUTOMATICA. PARA AMBOS, EL ANALISIS DE SENSIBILIDAD ES PARTE DEL PROCESO DE AJUSTE.**
- **EL GRADO DE AJUSTE ENTRE LAS VARIABLES CALCULADAS (P.E. CARGAS HIDRAULICAS) Y LOS VALORES MEDIDOS PERMITE JUZGAR EL PROCESO DE CALIBRACION.**

USO ERRONEO DEL MODELO

- **LA MAYORIA DE LOS ERRORES DE MODELACION OCURREN EN LA APLICACION DEL MODELO; ENTRE LOS EJEMPLOS MAS COMUNES DE MAL USO SE TIENEN :**
 - (1) SOBREMDELACION — HACER EL MODELO MAS COMPLEJO QUE LO PERMITIDO POR LOS DATOS, O QUE LO REQUERIDO POR LOS OBJETIVOS;**
 - (2) CONCEPTUALIZACION INCORRECTA — BASAR EL MODELO EN UNA CARAC _ TERIZACION POBRE O INCOMPLETA DEL ACUIFERO ;**
 - (3) SELECCION INCORRECTA DEL MODELO —SELECCIONAR UN MODELO SIN ENTENDER BIEN SUS LIMITACIONES;**
 - (4) CONDICIONES DE CONTORNO Y/O PARAMETROS DEL MODELO INCORRECTOS**
 - (5) PREDICCION INAPROPIADA — PRONOS _ TICAR BAJO CONDICIONES MUY DIFERENTES A LAS EMPLEADAS EN LA CALIBRACION;**

USO ERRONEO DEL MODELO (CONT.)

- (6) MALA INTERPRETACION — INTERPRETACION HIDROLOGICA POBRE DE LOS RESULTADOS CALCULADOS.**
- (7) APROXIMACION NUMERICA BURDA (IMPORTANCIA DEL BALANCE DE MASAS)**
- (8) ERRORES NO DETECTADOS EN EL CODIGO NUMERICO (IMPORTANCIA DE LA VALIDACION) .**



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

**MODELOS EN GEOHIDROLOGÍA Y CONTAMINACIÓN DE
ACUÍFEROS**

*Interpretación de sondeos eléctricos, resistividad media cuadrática y
sismología de refracción*

M. en C. Alfonso Álvarez Manilla Aceves
Guanajuato, Guanajuato
1998.

INTRODUCTION

Two Fortran computer programs described in this paper offer solutions to the "forward" and "inverse" problems of resistivity sounding. The "forward" problem consists of computing an apparent resistivity curve for some theoretical model. This is accomplished by program RESIST using linear filter theory (Ghosh, 1971a,b). The "inverse" problem consists of finding a theoretical model whose apparent resistivity curve matches a set of field data to reasonable accuracy. Program INVERSE accomplishes this by applying Marquardt's algorithm (Marquardt, 1963) to an initial model, modifying this model iteratively until it produces a match with the field curve. Both programs were written in Minnesota FORTRAN (MNF) for a Control Data Corporation Cyber 74 computer.

The basic model used in both programs is an infinite half-space divided into a total of E horizontal layers, each electrically homogeneous and isotropic (fig. 1). The model parameters include the resistivity (R) and the thickness (H) of each layer. The bottom layer is assumed infinite in extent, so there are a total of 2E-1 parameters. Real field situations will not normally match these ideal conditions. Deviations from the model will produce errors in the field data, although if these errors are relatively small, a layered model interpretation is still possible.

This paper does not address interpretation problems such as equivalence or suppression. For a discussion of these, see Davis (1979) or Mooney (1979) and references therein.

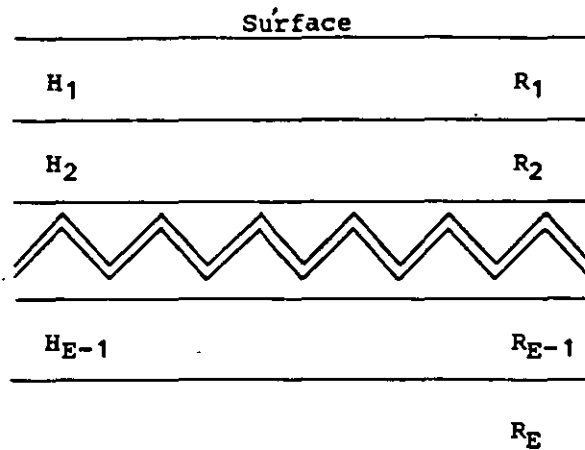
PROGRAM RESIST

Linear filter theory is used to solve the forward problem. Although digital filters have been published by Ghosh (1971a,b) and others, the present application suggested the derivation of two new filters (Davis, 1979). The derivation of the new filters followed the method of Ghosh, but a different sampling interval and more coefficients were used for better accuracy. The program computes apparent resistivity values for Schlumberger, Wenner, and axial bipole-bipole arrays (fig. 2). The axial bipole-bipole array is a general array, of which the Wenner beta (or Eltran), Wenner gamma, and axial dipole-dipole arrays are all special cases. Except for the dipole-dipole form, apparent resistivity values are computed for all arrays at spacings (either A or S) of six points per decade. Specifically, the spacings generated by the program are:

$$A = A_i 10^{(k/6)} \quad 0 \leq k \leq M$$

where A_i is the initial spacing input, k is an integer, and M is the total number of field spacings desired. The spacings A and A_i are replaced by S and S_i when using the Schlumberger array.

When using the bipole-bipole array there is an option of whether to fix N and vary A, or fix A and vary N. (Refer to Figure 2.) The first option



H_k = thickness of layer k
 R_k = resistivity of layer k
 E = total number of layers

Figure 1. Layered earth model used in programs RESIST and INVERSE.

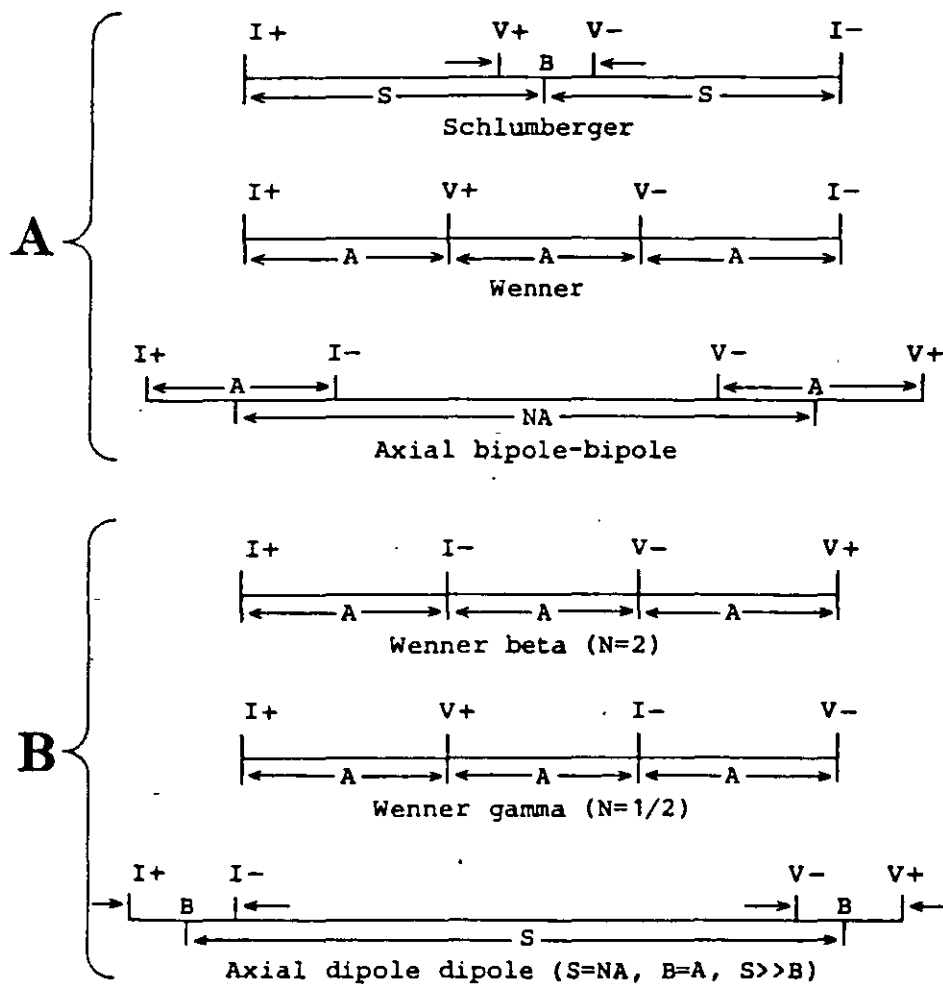


Figure 2. Resistivity field arrays. A, arrays used in computer programs. B, special cases of the axial bipole bipole array.

is used for computing Wenner beta and Wenner gamma apparent resistivity values, and the second is normally used for dipole-dipole computations. If N is varied, the minimum N-value must be greater than one. If N is between zero and one, the A spacing is taken to be the distance between an outer electrode and the adjacent one, as in the Wenner gamma array, rather than between the two current or two potential electrodes, as in the unaltered bipole-bipole configuration. This eliminates the need of scale conversion between the Wenner gamma and bipole-bipole arrays. In other words, an N-value of 1/2 is interpreted as the Wenner gamma array.

The procedure for computing apparent resistivity curves is best described by outlining the data input format. The order of data cards and the proper format are summarized as comments in the program listing.

Data card #1:

This card identifies the desired array. Enter 1 for the Schlumberger array, 2 for the Wenner alpha array, or 3 for the axial bipole-bipole array.

Data card #2: (SPAC,E,M)

Three numbers are entered on this card. The READ statement is format-free, so either a space or a comma must separate the numbers. This applies to all subsequent data cards in both programs. The first number (SPAC) specifies the smallest A- or S-spacing; the second (E) specifies the number of layers in the chosen model; the third (M) indicates the total number of apparent resistivity values desired. The variables E and M are both integers, while SPAC is real. The program computes six values per decade of field spacing, so a range of two decades (e.g., 1 to 100) would require 13 values to include both end spacings. For dipole-dipole calculations the spacings are input, so the above does not apply.

Data cards #2A and #2B:

These cards are included only for the bipole-bipole array. Enter 0 on card #2A if the A-spacings are to be varied (N is held constant); enter 1 if the N-spacings are to be varied (A is held constant). If 1 is entered, the initial field spacing (SPAC) entered on card #2 is used as the A-value. Enter the N-values on card #2B. If A-spacings are varied, enter only one value; if N-spacings are varied, enter a total of M N-values. The N-values are real variables.

For the special case of the Wenner beta array, set N equal to 2. For the Wenner gamma array set N equal to 0.5. The axial dipole-dipole spacing S is equivalent to N times SPAC. To justify the dipole approximation, the A-spacing (SPAC) should be less than 1/4 of the closest N-spacing. For example, given an initial dipole S-spacing of 4, SPAC could be set equal to 1 and the initial N-value set equal to 4. If possible, setting N at 1 implies $N=S$, making calculations easier.

Data card #3:

This card specifies the model parameters. The first E-1 numbers are the layer thicknesses and the last E numbers are layer resistivities, both in order from top to bottom. Additional cards can be added if necessary.

As an example, to compute apparent resistivity values for a Schlumberger configuration from S=1 to S=100 for the model:

<u>layer</u>	<u>thickness</u>	<u>resistivity</u>
1	1.0	20
2	3.0	100
3	1.0	60
4	--	500

the data cards would be:

card #1: 1

card #2: 1.,4.,13

card #3: 1.,3.,1.,20.,100.,60.,500.

Program RESIST has been tested against published curves for Wenner, Schlumberger, Eltran, and dipole-dipole arrays and has been found accurate to much better than one percent for all test models.

PROGRAM INVERSE

Resistivity inversion is accomplished by program INVERSE using Marquardt's algorithm (Marquardt, 1963), which is an optimized combination of the Newton-Gauss and gradient inversion methods. A set of field apparent resistivities and initial model parameters are input. Theoretical apparent resistivity values are computed for the trial model using the method of program RESIST and compared with the field values. In addition, derivatives of apparent resistivity with respect to each layer parameter are computed. Corrections to each parameter are determined from a generalized inversion of the derivative matrix. These corrections are then applied to the old model to give a new model, which is used to compute a new set of apparent resistivity values. The process is repeated until the root-mean-square error falls below a chosen cutoff value.

In principle, only one model will perfectly reproduce a set of field data. Real field data, however, contain significant errors, making unique resolution impossible. Any inversion solution which reproduces the field sounding to within data accuracy must be considered as a possible model. It must be stressed that a particular inversion solution does not necessarily represent the most geologically realistic model. The range of possible solutions can be constrained, however, by the use of independent geologic control.

The particular inversion method used here was developed by Merrick (1977a,b), although some modifications have been included to increase the flexibility of the program. The main differences between this program and

Merrick's are the addition of Wenner and axial bipole-bipole arrays and the incorporation of a cubic spline interpolation subroutine by Greville (1967). Interpolation is necessary to convert irregular field spacings to the logarithmic spacings generated by the linear filter process. The data input format is summarized in the program listing.

Data card #1:

Identical to RESIST card #1.

Data card #2: (SPAC,E,M,NN,RMSC)

The first three values are identical to RESIST card #2. A fourth variable (NN) specifies the total number of fixed layer parameters. If, for example, one layer thickness is known and need not be changed, enter 1. The variable RMSC is the percent RMS error cutoff. For typical field data, a preliminary cutoff of 3-4 percent is adequate. If a 3 percent cutoff is desired, enter 3. RMSC is a real variable, NN an integer.

Data cards #2A and 2B:

Identical to RESIST cards #2A and #2B.

Data card #3:

This card specifies the use of the spline interpolation subroutine. If the field data are at perfectly logarithmic spacings of six to a decade, enter 1. Usually the data spacings are irregular and interpolation is necessary. In this case enter 0. Delete this card if 1 was entered on card #2A.

Data card #3A:

Enter the field spacings in increasing order (a total of M values). Use as many cards as necessary. Delete this card if 1 was entered on card #3.

Data card #4:

Enter the field apparent resistivity values corresponding to the spacings of card #3A. If the spacings are logarithmic, enter values in order of increasing spacing (a total of M values).

Data card #5:

Identical to RESIST card #3.

Data card #6:

Enter the fixed parameter numbers. There should be a total of NN numbers (see card #2). The numbers correspond to the order of card #5. For example, the parameter numbers for a three-layer model are given by:

Parameter:	H ₁	H ₂	R ₁	R ₂	R ₃
Parameter number:	1	2	3	4	5

where H_n is the thickness of layer n and R_n is the resistivity of layer n . If the middle layer resistivity is fixed, enter 4. Delete this card if NN is zero.

As an example, suppose we are given a set of dipole-dipole apparent resistivity values from $S=5$ to $S=50$ at increments of five. We choose the structure on page 4 as our initial model, and we know the first layer thickness accurately. Setting a cutoff of 3 percent, the data cards should be:

card #1: 3
card #2: 1.,4.,10.,1.,3.
card #2A: 1
card #2B: 5.,10.,15.,20.,25.,30.,35.,40.,45.,50.
card #4: (field apparent resistivity values)
card #5: 1.,3.,1.,20.,100.,60.,500.
card #6: 1

Cards #3 and #3A have been deleted because the field spacings are specified when N is varied.

The program will stop when:

- the percent RMS error drops below the cutoff (RMSC);
- the program completes fifteen iterations;
- epsilon is increased fifteen times without reducing the sum of squares (see Davis, 1979, Section IV-D.2). In this case the note "J1=JMAX...TRIAL MODEL WILL NOT CONVERGE" is printed before the final output. This indicates that the program has converged to a minimum of some sort.

The second and third conditions can be changed by changing the constants $I1MAX$ and $JMAX$. Additional inversions can be performed by adding another set of data cards beginning with card #1.

Output consists of the current model, the equivalence parameters t and s for each layer, field and model apparent resistivities, and the RMS percent error for the model. These parameters are given for the initial and final models, the final model being determined by the conditions above.

Experience is the best guide to choosing an initial model. If published master curves are available, a model which roughly matches the field curve can be used. In lieu of this, resistivities of the top and bottom layers can be determined from the asymptotic behavior of the curve, with intermediate resistivities judged from stationary or inflection points. As a rough guide, spacings at inflection points in the curve can be used as initial depth estimates, with thicknesses determined from depth differences.

An initial model of two or three layers is more likely to converge to a reasonable minimum than one of four or five layers. Often the data are not of sufficient quality to justify a many-layered model. For these reasons it is suggested that a two- or three-layer model be used first, with additional layers added subsequently if a good fit is not achieved.

Known spurious points are best modified or removed prior to inversion. While a single bad data point will not affect the final model to a large extent, the percent error will be greater than is desirable. If an unusual point may or may not be erroneous, it might be wise to perform the inversion twice, once with and once without the point, and choose the more geologically likely fit.

At times a model will be found which matches the data but makes little sense geologically. Under these circumstances it is best to repeat the inversion with more plausible parameters and hold those parameters constant. This will help determine equivalent cases and allow the choice of the best equivalent model.

The most efficient use of program INVERSE depends largely on the particular problem at hand. Experience will be the best guide to a good approach for resistivity sounding interpretation. A fuller discussion of inversion theory and the theoretical basis for this program can be found in Davis (1979) or Merrick (1977b).

ACKNOWLEDGMENTS

I wish to thank Dr. Harold Mooney for his aid in all phases of this project. Val Chandler and Gil Gabanski provided many helpful comments on the manuscript. Richard Holtzman provided valuable assistance in editing the computer program listings for publication. The writing and testing of the programs were sponsored by a grant from the University of Minnesota Computer Center. Subroutine SPLINE in Appendix B is reproduced with permission from John Wiley & Sons, Inc., from page 166 of Greville (1967).

REFERENCES CITED

- Davis, P.A., 1979, Development and application of resistivity sounding inversion for several field arrays: Unpublished M.S. thesis, University of Minnesota, Minneapolis.
- Ghosh, D., 1971a, Application of linear filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements: Geophysical Prospecting, v. 19, p. 192-217.
- 1971b, Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for horizontally layered earth: Geophysical Prospecting, v. 19, p. 769-217.
- Greville, T.N.E., 1967, Spline functions, interpolation, and numerical quadrature, in Ralston, A., and Wilf, H.S., Mathematical methods for digital computers, v. 2, John Wiley & Sons, p. 156-168.

Marquardt, D.D., 1963, An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters: Journal of the Society for Industrial & Applied Mathematics, v. 11, p. 431-441.

Merrick, N.P., 1977a, Resistivity sounding for groundwater: Unpublished M.S. thesis, University of Sydney, Australia.

-----1977b, A computer program for the inversion of Schlumberger sounding curves in the apparent resistivity domain: Water Resources Commission, New South Wales, Australia, Hydrogeological Report no. 1977/5.

Mooney, H.M., 1979, Handbook of engineering geophysics, v. 2--Electrical resistivity: Bison Instruments, Inc., 5706 West 36th St., Minneapolis MN 55416 (in press).

1.0 GENERALIDADES

La reducción de datos geoelectrónicos es de suma importancia, de ellos es obtenida la curva de resistividad aparente de donde será interpretado el corte geoelectrónico; de acuerdo a la distribución del potencial, las anomalías detectadas con los sondeos eléctricos verticales (SEV) con cualquiera de sus arreglos electródicos -Schlumberger, Wenner, Bipolo-Bipolo- no ubican correctamente en el subsuelo a los eventos geológicos que las producen ocasionando " pifias ".

En el programa que fue desarrollado por J. Cuauhtémoc Orendain Munguía con algoritmo de A.A. Manilla (1983), se presenta la reducción de datos de geoelectricidad basado en el artículo de G. Hernández Moedano (1983) de nombre: CALCULO DE LA RESISTIVIDAD MEDIA PARTIENDO DE LAS MEDICIONES DE CAMPO DE SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES PARA INTERPRETACION GEOLOGICA CUALITATIVA CERCANA A LA REAL, en el es descompuesta la resistividad aparente de un volumen de masa en sus componentes: serie, paralelo y media cuadrática, obteniendo de igual manera los valores de anisotropía y profundidad real de investigación.

El programa está compuesto de cuatro archivos, dos corresponden al sistema operativo y son:

COMMAND.COM
GWBASIC.EXE

en tanto que los programas que se refieren a la reducción de datos son:

SCHLUMB.BAS
DIPDIP.BAS

El primero reduce los datos del arreglo electródico Schlumberger y el segundo al arreglo Bipolo-Bipolo. Con la misma secuencia y de manera amistosa en la comunicación entre la computadora y usuario.

2.0 USO DEL PROGRAMA

Con el programa en la unidad de disco correspondiente, se tecléa

GWBASIC RETURN

la pantalla mostrada es típica de basic, se oprime la tecla F3, y pide el nombre del programa a cargar

LOAD" SCHLUMB RETURN

aparece

OK, la tecla F2 debe ser oprimida y el programa ha dado inicio mostrando la pantalla de presentación y segundos después da inicio a:

CALCULO DE RESISTIVIDADES APARENTES

VALOR DE LA CORRIENTE: _

el valor de la corriente del transmisor debe ser introducida y ser consistente con la unidades del receptor, esto es: voltios-amperios, milivoltios-amperios, etc....

10 RETURN

pide

VALOR DE 'A': _

que es la distancia entre los electrodos de potencial MN,

5 RETURN

pide inmediatamente los valores de las L's o espaciamentos de AB/2 referentes a las estaciones de medida hechas en campo y los valores del voltaje.

LECTURA

L's

DV/I

1 10 RETURN 10 RETURN

2 21 RETURN 2 RETURN

3 32 RETURN 0.8 RETURN

4 46 RETURN 0.2 RETURN

5 si no se tienen mas datos debe ser tecleado RETURN apareciendo

REPORTE EN PANTALLA O IMPRESORA (P/I)_

si se desea visualizar exclusivamente los datos debe ser tecleado una P, si es imprimir solo se oprime I seguido de un RETURN.

En la presentación de datos aparece

A= 5 que es la distancia entre los electrodos de potencial MN

L	Espaciamiento electródico AB/2
K	Factor geométrico
DV	Diferencia de potencial observada en M,N
RHOA	Resistividad aparente
RMCN	Resistividad media cuadratica natural
RSN	Resistividad serie natural
RPN	Resistividad paralelo natural
AAN	Coefficiente de anisotropía
IRR	Intervalo y profundidad real investigada

QUIERES OTROS CALCULOS (S/N)

en el caso de no tener mas datos que procesar oprimir N, situación contraria volver a empezar.

Para el Arreglo Bipolo-Bipolo, que aparece en la figura 1b, n corresponden a las distancias x que separa al dipolo de potencial del de corriente, x es la distancia entre los electrodos de potencial y los de corriente, son siempre números enteros.

BIBLIOGRAFIA

Barnes Layer Method Technical Memo No. 6 Instruction for use whit Bison Earth Resistivity Meter.

Orellana E., Prospección Geoelectrica en corriente continua, 1972.

Hernández Moedano G., 1983. Calculo de la Resistividad Media partiendo de las mediciones de campo de sondeos eléctricos verticales para una interpretación geológica cualitativa cercana a la real. XV Aniversario de la Creación de la Carrera de Ingeniero Geofísico, Palacio de Minería de la UNAM.

$A = 5$ que es la distancia entre los electrodos de potencial MN

L	Espaciamiento electródico $AB/2$
K	Factor geométrico
DV	Diferencia de potencial observada en M,N
RHOA	Resistividad aparente
RMCN	Resistividad media cuadratica natural
RSN	Resistividad serie natural
RPN	Resistividad paralelo natural
AAN	Coefficiente de anisotropía
IRR	Intervalo y profundidad real investigada

QUIERES OTROS CALCULOS (S/N)

en el caso de no tener mas datos que procesar oprimir N, situación contraria volver a empezar.

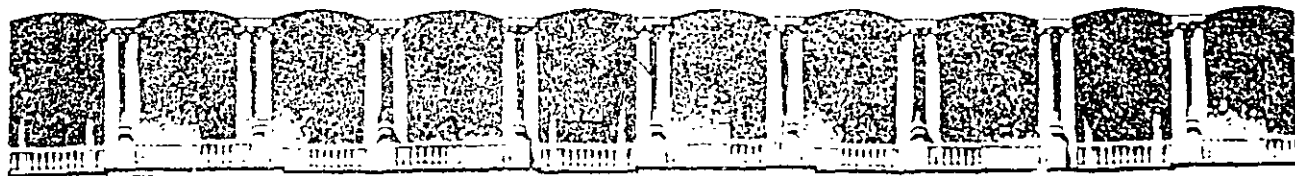
Para el Arreglo Bipolo-Bipolo, que aparece en la figura 1b, n corresponden a las distancias x que separa al dipolo de potencial del de corriente, x es la distancia entre los electrodos de potencial y los de corriente, son siempre números enteros.

BIBLIOGRAFIA

Barnes Layer Method Technical Memo No. 6 Instruction for use whit Bison Earth Resistivity Meter.

Orellana E., Prospección Geoelectrica en corriente continua, 1972.

Hernández Moedano G., 1983. Calculo de la Resistividad Media partiendo de las mediciones de campo de sondeos eléctricos verticales para una interpretación geológica cualitativa cercana a la real. XV Aniversario de la Creación de la Carrera de Ingeniero Geofísico, Palacio de Minería de la UNAM.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS INSTITUCIONALES
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS
Del 16 de octubre al 28 de noviembre de 1998.**

GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA

**Ing. Héctor L. Macías González.
Guanajuato, Guanajuato
1998.**

GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA

POR: ING. HECTOR L. MACIAS GONZALEZ

1.1.- GENERALIDADES

A la GEOLOGIA DEL AGUA SUBTERRANEA, también se le conoce como Hidrogeología. Este término fué introducido por Lucas en 1789 para designar el estudio geológico del agua subterránea. Mead, en su tratado sobre hidrogeología, publicado en 1919, acentuó el carácter especial del "estudio del agua subterránea considerada como un elemento geológico cuyo conocimiento contribuye a lograr la comprensión del origen y evolución de los cursos superficiales de agua y los sistemas de drenaje".

Con el tiempo, diversos autores han concebido otras definiciones sobre hidrogeología, pero en esencia todas coinciden con remarcar la importancia del conocimiento geológico, no sólo en la exploración del agua subterránea, sino en la cuantificación del recurso.

En efecto, si se acepta como la definición más simple para la hidrogeología al referirse a la relación agua-roca, se desprende de esto, que la infiltración del agua al suelo, su movimiento vertical descendente hasta llegar a la zona de saturación y el movimiento preponderantemente horizontal en el acuífero desde las zonas de recarga a las de descarga, esté controlado por el patrón geológico (litológico y estructural) en que se almacena y circula el agua subterránea. El manejo de estos controles quedaría incompleto, sin el conocimiento de la historia geológica de la región por estudiar, ya que el análisis de la secuencia de acontecimientos geológicos que la conformaron, permiten conocer de manera general la naturaleza y distribución espacial de las rocas y por tanto, que tipos de acuíferos

Prof. de Geología y Geohidrología de la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Nacional Autónoma de México.

pueden esperarse encontrar, sus espesores, límites laterales y de manera cualitativa la relación hidráulica con los estratos o capas adyacentes, suprayacentes y laterales (límites geológicos naturales,

Naturalmente, esta primera concepción del marco geológico de la región, se va ampliando progresivamente por medio de exploraciones directas e indirectas, con cuya información se precisan la profundidad y dimensiones de las rocas en el subsuelo. A su vez, los datos obtenidos de las captaciones de agua subterránea sobre profundidades al nivel del agua, caudales, calidad química, temperatura, etc. propician ampliar el conocimiento del MARCO HIDROGEOLOGICO.

La determinación del marco hidrogeológico de una cuenca, es indispensable en regiones donde únicamente se dispone de la información que pueda derivarse de las rocas que afloran; sumamente útil en cuencas abiertas a la explotación y en donde se requieren nuevos alumbramientos de agua subterránea y por último, es de gran utilidad en estudios de cuantificación y modelado hidráulico e hidrogeoquímico donde se precisa conocer con bastante aproximación a ~~geometría de los sistemas acuíferos y en consecuencia la delimitación~~ de las fronteras naturales de los mismos.

1.2.- ROCAS PERMEABLES

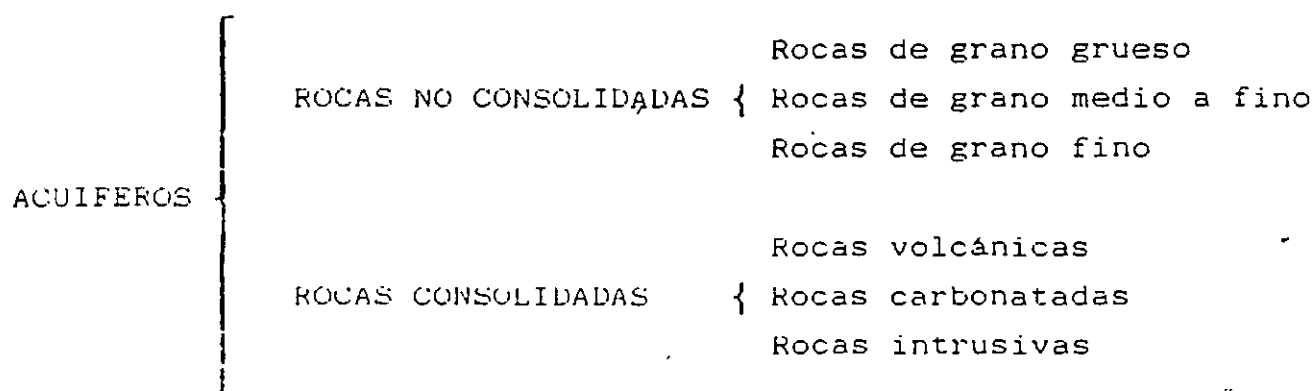
Los acuíferos están formados por rocas con capacidad para almacenar agua; permitir su circulación desde las zonas de recarga a las de descarga y ceder caudales significativos hacia las zonas de descarga natural o hacia las captaciones artificiales.

El término SIGNIFICATIVO de esta definición se usa para connotar el hecho de que los caudales extraídos o cedidos por un acuífero están en estrecha relación con la región geográfica e hidrogeológica de que se trate. Así por ejemplo, en algunas de las regiones más áridas de Baja California, un pozo con un caudal de 1 lps y agua de buena calidad, caracteriza un acuífero, ya que su explotación cubriría

holgadamente las necesidades de una población de 500 habitantes. En ntraste, ese mismo caudal en la Cuenca del Bajío, donde el agua subterránea es aún abundante y se encuentran gran cantidad de pozos que extraen caudales mínimos de 30 lps, no tendría mayor significado.

De la definición anterior se desprende que los acuíferos están formados por rocas permeables, es decir, rocas que permiten el paso del agua a través de ellas.

Las rocas permeables que constituyen acuíferos se dividen en dos grandes grupos:



1.2.1.- ACUIFEROS FORMADOS POR ROCAS NO CONSOLIDADAS

Este tipo de rocas está formado por materiales sueltos derivados del intemperismo y erosión de rocas preexistentes. Al tiempo de su depósito, los fragmentos no están consolidados y se puede decir que están sueltos. En ese estado, el espacio abierto o poro que dejan entre sí las partículas, depende de su tamaño, forma, distribución, modo de transporte, heterogeneidad y ambiente de depósito. Conforme se suceden otros depósitos sobre una acumulación de fragmentos, ocurren alteraciones que modifican el tamaño y volumen de los espacios abiertos ya sea por consolidación debido al peso de los nuevos estratos o por cementación derivada de los procesos de diagénesis y otros externos.

La mayoría de las rocas clásticas son mezclas de fragmentos de diversos tamaños; no obstante, pueden clasificarse de acuerdo con predominio de un cierto tamaño del grano en:

- Rocas clásticas de grano grueso
 - Rocas clásticas de grano medio a fino
 - Rocas clásticas de grano muy fino
- Rocas clásticas de grano grueso.

En este tipo de rocas predominan los fragmentos del tamaño de bloques (32-512 mm) y guijones (64-256 mm), mezclados con otros angulosos de menor tamaño, arenas y fragmentos de minerales como feldespatos y micas entre otros. Algunos de estos depósitos como los de talud, están ubicados al pie de los macizos rocosos, de tal manera, que los fragmentos son angulares y tienen poca distribución debido al escaso acarreo.

Otros depósitos similares de grano grueso son los constituidos ~~por los abanicos aluviales que se forman al pie de las sierras, donde~~ se acumula el acarreo de las corrientes fluviales al desembocar en las laderas y planicies. En este caso tienen mayores distancias y tiempos de transporte y por tanto, suele formarse una mezcla de bloques y guijones con gravas y otros fragmentos redondeados y arenas de todos los tamaños. En las zonas áridas, estos depósitos, aunque tienen heterogeneidad por la rapidez del depósito (lluvias torrenciales), tienen muy buena permeabilidad. En las brechas de talud, abanicos aluviales y gravas de lechos de cauces fluviales antiguos y meandros, a pesar que la distribución es mala, el promedio del tamaño de los fragmentos es grande y la permeabilidad es alta.

Dentro de estos depósitos se cuentan también los de coquinas, formados por conchas de animales marinos. Cuando estas acumulaciones de conchas no se encuentran cementadas o embebidas en una matriz arcillosa, son de muy alta permeabilidad.

- Rocas clásticas de grano medio a fino.

Este tipo de depósitos de grano medio a fino, acusan obviamente mayores distancias de acarreo y, en consecuencia, de tiempo de transporte. Esto origina que los fragmentos de roca vayan disminuyendo de tamaño progresivamente con el acarreo, hasta llegar a la fragmentación de los minerales que constituyen las rocas. De esta manera, los feldespatos, las micas y algunos minerales ferromagnesianos son desintegrados durante un acarreo largo, preservándose casi solamente los granos redondeados de cuarzo, que es el mineral más resistente a la erosión. En este caso pueden encontrarse depósitos potentes de arenas formadas casi totalmente de cuarzo. En aquellos casos en que el acarreo o transporte no haya sido demasiado largo en tiempo y espacio, suelen encontrarse con las arenas de cuarzo fragmentos de feldespatos y micas.

El tamaño, forma y distribución de los granos de cuarzo, feldespatos y micas, estará controlado por la historia del transporte, así como si fueron transportados por agua o por el viento y por la influencia del ambiente de depósito.

Las arenas transportadas por el viento formarán depósitos homogéneos de permeabilidad elevada, las transportadas por agua, constituirán depósitos más heterogéneos y la porosidad disminuye por la presencia de materiales finos que ocupan los espacios dejados por las arenas.

- Rocas clásticas de grano muy fino.

Estas rocas están formadas por arcillas y limos que son el producto final de la descomposición química de los minerales destructibles de la roca madre.

Estos materiales constituyen importantes depósitos en las planicies de inundación; en cuencas endorreicas donde llegan a acumular espesores muy grandes de sedimentos lacustres y en cuencas ubicadas en las franjas costeras con episodios de invasiones marinas.

Los depósitos arcillosos después de su sedimentación pueden pasar por una compactación debido al peso del estrato depositado sobre ellos. Como resultado de esta compactación, asumen una condición más o menos masiva, llamándosele a estas rocas "lodolitas", las cuales con un posterior endurecimiento se vuelven rocas duras llamadas "lutitas".

La porosidad de estas rocas, como se verá más adelante es muy elevada, pero tienen en cambio una permeabilidad muy baja. Por esta razón constituyen acuíferos de muy bajo rendimiento y generalmente se les clasifica como acuitardos.

Los tres tipos de depósitos enunciados en los párrafos anteriores de acuerdo al tamaño de su granulometría, suelen encontrarse frecuentemente mezclados, alternados e interdigitados en capas, constituyendo los rellenos de valles fluviales y tectónicos así como la cobertura aluvial de los mismos.

En estas rocas clásticas, independientemente del tamaño de los granos, el agua subterránea se almacena y circula en y por los poros ~~espacios e intersticios que dejan entre sí las gravas, arenas,~~ arcillas y otros fragmentos mayores al acomodarse durante su depositación. Es por ello que a este tipo de depósitos se les clasifica como rocas de permeabilidad primaria, ya que adquirieron sus características de porosidad y permeabilidad durante el tiempo de su formación. También se les conoce como rocas con permeabilidad de intersticios o de medios porosos.

La porosidad y permeabilidad de este tipo de rocas depende de los siguientes factores:

- a) Tamaño, forma y textura de los granos
- b) Arreglo y acomodo de los granos
- c) Homogeneidad o heterogeneidad del depósito
- d) Comunicación entre los poros

Todos estos factores se combinan entre sí para formar rocas de diferentes grados de porosidad y rangos de permeabilidad. En las figuras 1 y 2, se muestran distintos tipos de intersticios, así como la relación entre la textura y la porosidad de las rocas.

Es conveniente hacer notar, que el tamaño del grano no es suficiente para caracterizar la porosidad de una roca, ya que a iguales diámetros, la porosidad puede variar significativamente con arreglos o acomodos diferentes. De igual manera es interesante resaltar que la heterogeneidad del depósito disminuye la porosidad y que la homogeneidad la aumenta.

Dado que la porosidad de una roca está definida como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la roca, si una formación se encuentra totalmente saturada, la porosidad es por tanto una medida de la cantidad de agua que la roca contiene por unidad de volumen.

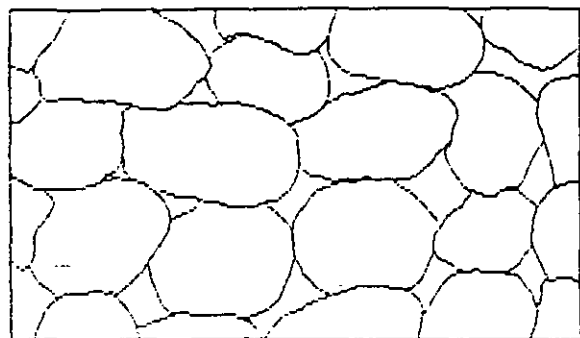
$$\phi = \frac{V_{\text{huecos}}}{V_{\text{total de la roca}}}$$

Ahora bien, una roca muy porosa y que por ello contiene mucha agua en sus espacios vacíos, no necesariamente tiene una elevada permeabilidad. Para algunas rocas como las arcillas, mientras más grande es la porosidad menor es la permeabilidad.

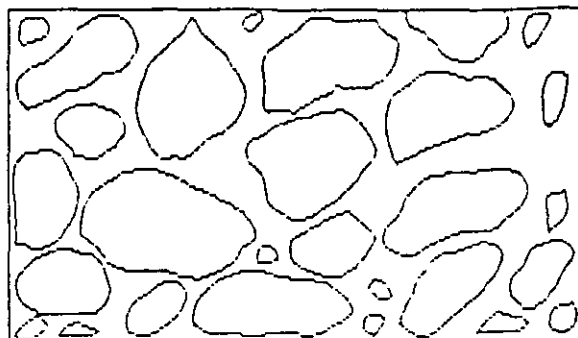
Si se recuerda que la permeabilidad, de manera simple y general, es la capacidad de una roca para permitir la circulación del agua a través de ella, es fácil comprender, que además de los factores como tamaño, forma, acomodo y heterogeneidad de las partículas, la permeabilidad dependerá también de la conexión o intercomunicación de los poros que contienen agua.

La arcilla por ejemplo, como se dijo antes, es una roca muy porosa, pero tiene una permeabilidad muy baja. Esto se debe a que sus partículas son microscópicas y se encuentran densamente empaquetadas.

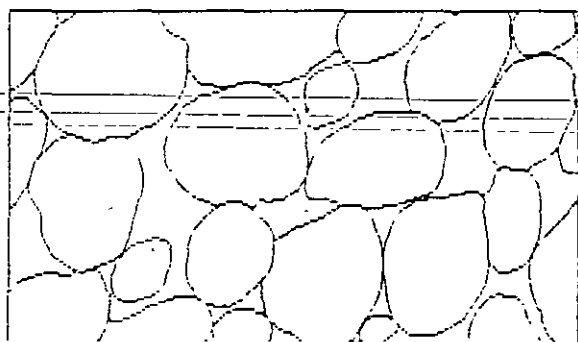
DISTINTOS TIPOS DE INTERSTICIOS Y RELACION ENTRE LA TEXTURA Y LA POROSIDAD DE LAS ROCAS



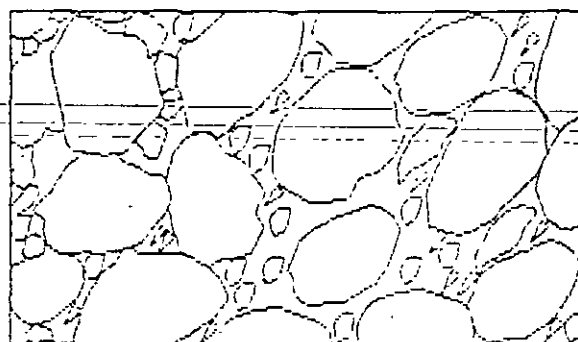
Depósito sedimentario de granulometría homogénea y gran porosidad



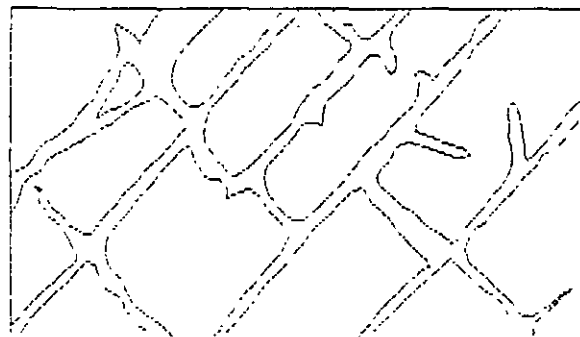
Depósito sedimentario de granulometría homogénea cuya porosidad ha disminuido por cementación de sus intersticios con materias minerales



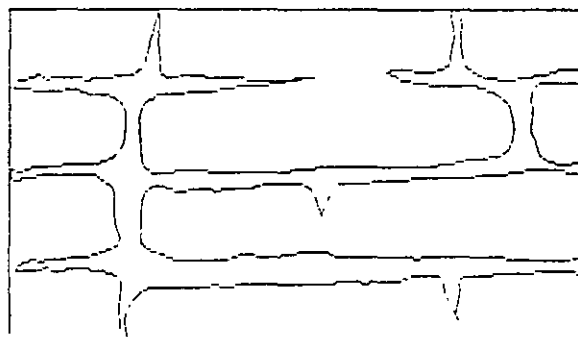
Depósito sedimentario de granulometría homogénea formado por elementos que a su vez son porosos; por tanto porosidad muy elevada



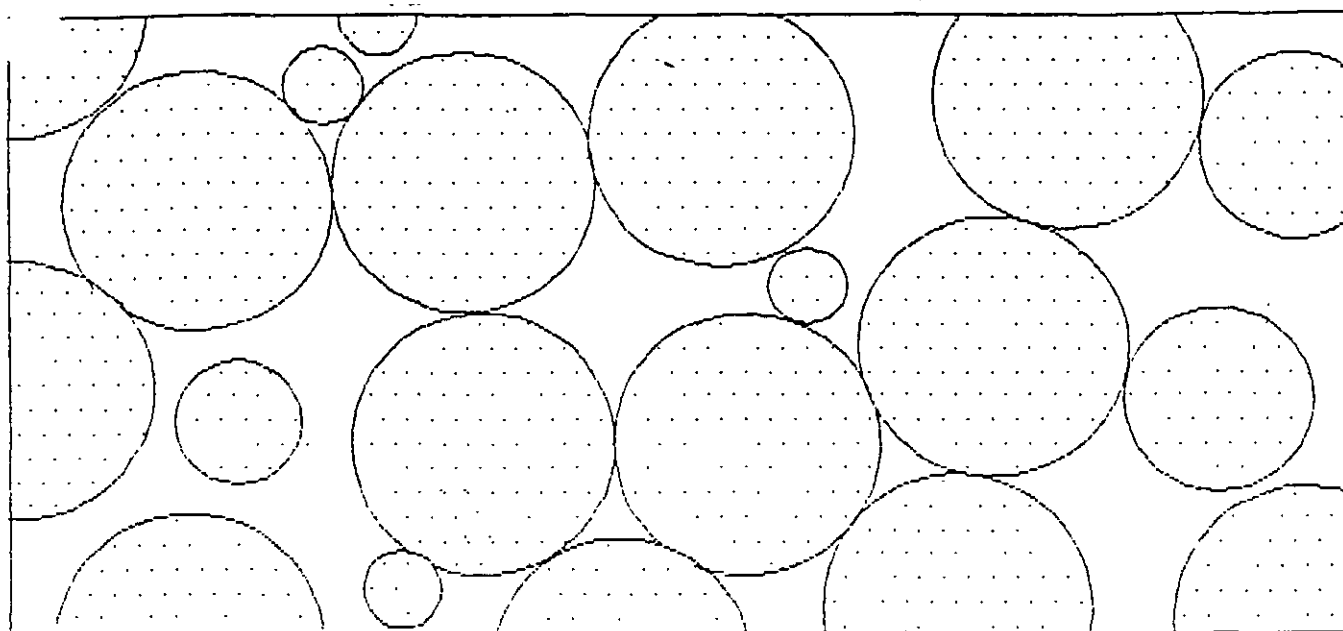
Depósito sedimentario de granulometría heterogénea y escasa porosidad



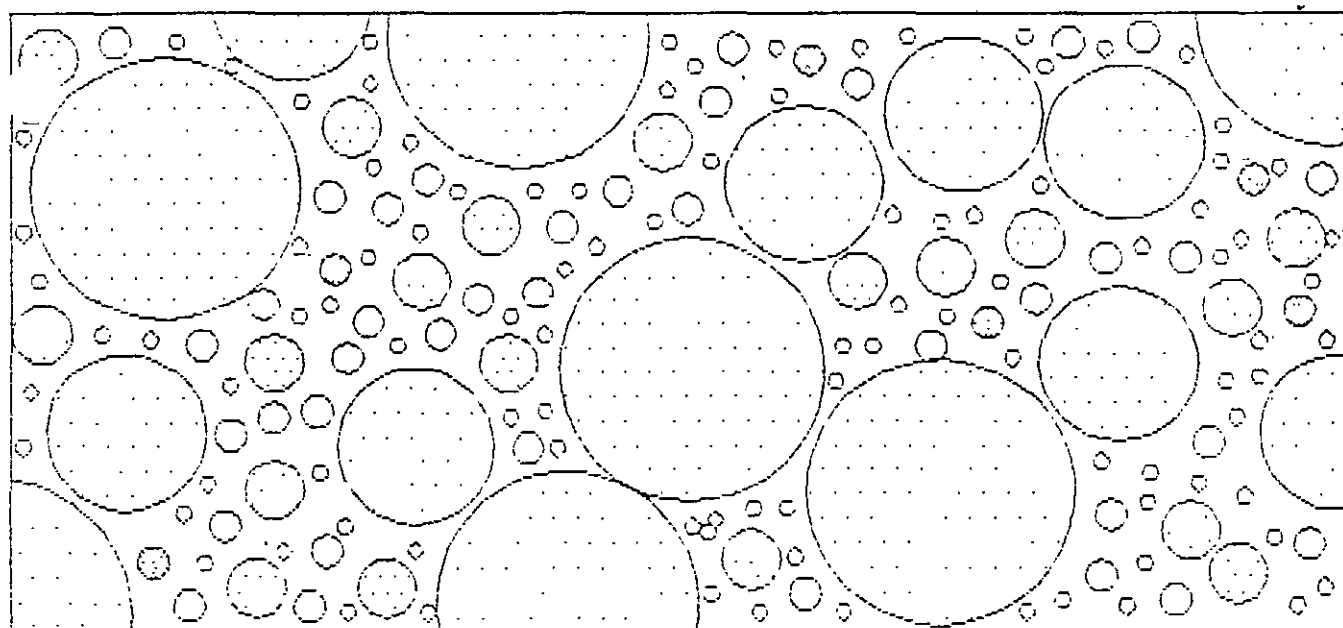
Roca porosa por fragmentación



Roca porosa por solución



POROSIDAD 32%



POROSIDAD 17%

Variación de la porosidad debida al grado de homogeneidad del tamaño de los granos. Los números que figuran al pie de cada dibujo indican el porcentaje de porosidad de la muestra.

FIG. 2

Las fuerzas de atracción molecular, adhesión y cohesión se combinan para que el agua contenida entre sus poros sea cedida muy lentamente en forma natural o hacia las captaciones artificiales (Tabla 1).

TABLA 1

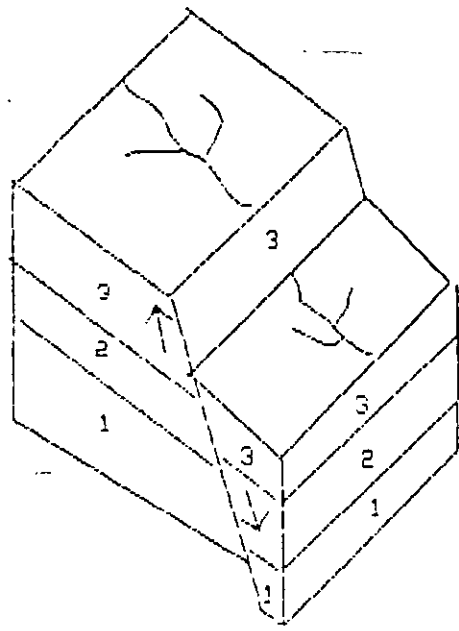
ROCA	POROSIDAD%	RENDIMIENTO ESPECIFICO	PERMEABILIDAD
Arcilla	40 - 55	1 - 10	10^{-10} - 2×10^{-7}
Arena	30 - 40	10 - 30	10^{-5} - 3×10^{-4}
Grava	30 - 40	15 - 30	10^{-5} - 1.3×10^{-3}
Grava y arena	20 - 35	15 - 25	10^{-5} - 5×10^{-4}
Areniscas	10 - 20	5 - 15	10^{-8} - 5×10^{-6}
Calizas	1 - 20	9.5 - 5	muy variable

1.2.2.- ACUIFEROS FORMADOS POR FRACTURAMIENTO DE ROCAS VOLCANICAS

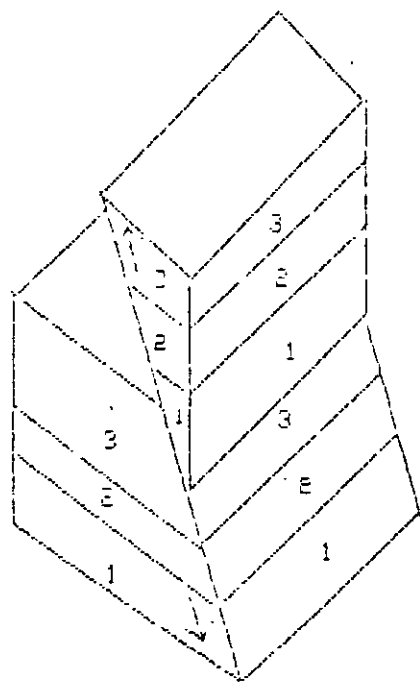
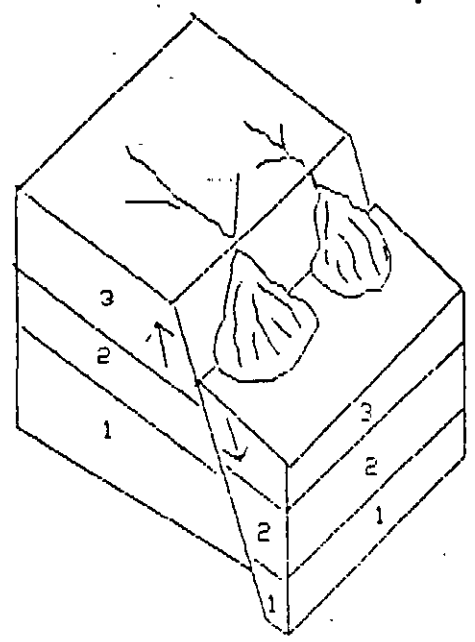
En este grupo de rocas se encuentran las rocas densas o compactas como el basalto, la andesita, riolita, riodacita, ignimbrita y dacita entre otras.

Los procesos que causan que estas rocas de origen impermeables se vuelvan permeables, pueden ser de origen tanto mecánico como químico. En la mayoría de los casos, este cambio es propiciado por la combinación de los dos procesos, pero para ello entra en juego el clima y la naturaleza de la roca. En condiciones áridas extremas, sólo tienen significancia los procesos mecánicos. Las aberturas secundarias en las rocas se inician con una falla de la masa de la roca para resistir la presión sufriendo una deformación. Cuando esta deformación es expresada en una pequeña abertura se llama junta. Cuando ocurre una fractura con desplazamiento horizontal o vertical se le conoce como falla. En la figura 3 se esquematizan los principales tipos de fallas.

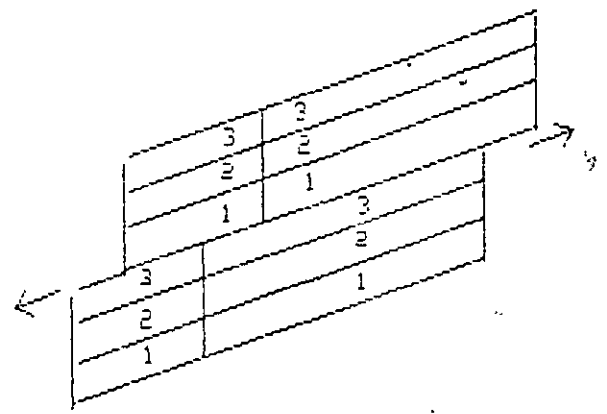
TIPOS DE FALLAS



Falla normal



Falla inverso



Falla de rumbo

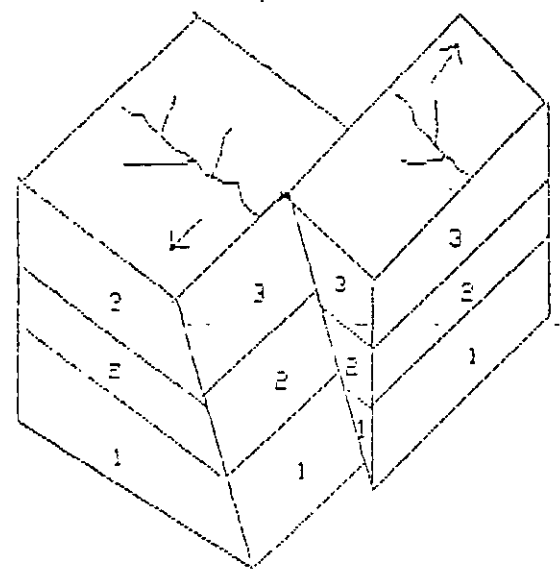


FIG. 3

Las juntas (fig. 3) se desarrollan en las rocas ígneas debido a esfuerzos de tensión desarrollados dentro de las rocas cuando se van solidificando y enfriando. En la mayoría de los casos, tales juntas se abren cuando la roca es aliviada de la presión que le rodea. En la estructura columnar de algunos flujos de basalto, el enfriamiento produce columnas hexagonales. En estas estructuras, las juntas pueden abrirse a lo largo de las columnas por esfuerzos tectónicos, lo que aumenta la densidad de discontinuidades en la roca y la infiltración.

De acuerdo a la naturaleza de las juntas, su distribución espacial puede ser inferida en el subsuelo; así, las juntas por alivio de la presión en las rocas ígneas generalmente están restringidas a profundidades someras; alrededor de 30m, pero pueden extenderse horizontalmente sobre amplias áreas, lo que propicia una buena infiltración del agua de lluvia.

Por otro lado, las fracturas y juntas relacionadas con fallas regionales, están restringidas en superficie, pero llegan hacia abajo a profundidades de unos cuantos cientos de metros (fig 4).

La permeabilidad de estas rocas volcánicas depende del grado de fracturación. En rocas ígneas de grano grueso, en lo general ésta es reducida debido a la caolinización de los minerales feldespáticos a lo largo de los planos de fracturación o de las juntas interiores como es el caso de las andesitas porfídicas. En las rocas ígneas de grano fino como los basaltos, y vetas de cuarzo de grandes juntas, pueden ser obtenidas altas permeabilidades.

- Basaltos

En México, en toda la Franja del Eje Volcánico Mexicano, los acuíferos en rocas basálticas son abundantes y muy productores. Como ejemplos pueden citarse entre muchos, los pozos del Sur y Sudeste de la Cd. de México, emplazados en basalto y con caudales muy apreciables. Los del área de Chiconautla en la parte media del Valle de México, los manantiales de Xochimilco ya agotados por la extracción

Pozo productor y seco en rocas
volcánicas fracturadas.

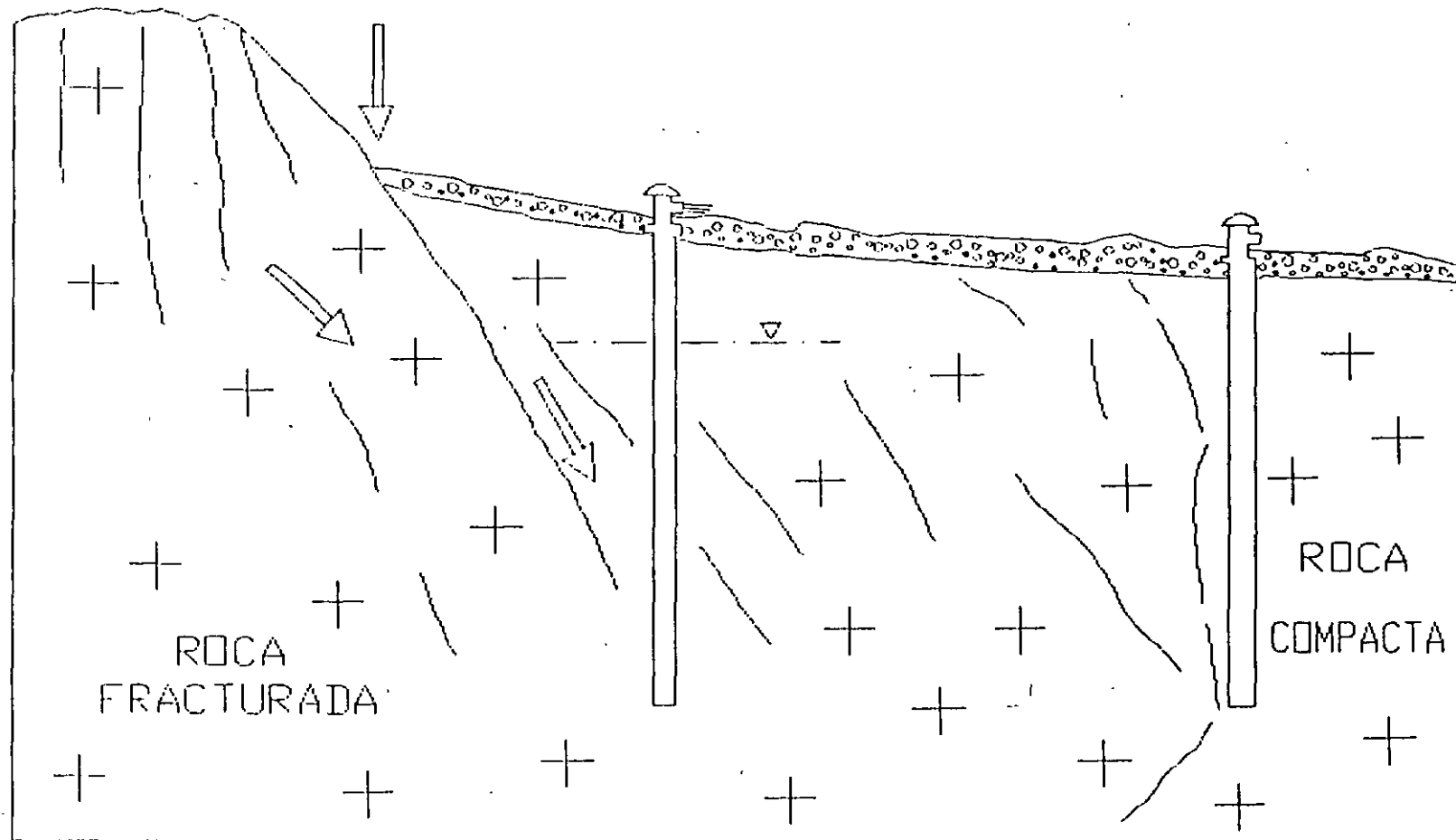


FIG. 4

Héctor L. Macías González, 1986.

de pozos en el área de la planicie, los manantiales de Chapultepec; de Cuernavaca y los pozos termales de Apaseo el Alto en Guanajuato. Lo mismo puede decirse por el material escoráceo del basalto conocido como "tezontle" que produce pozos de gran rendimiento en la misma Faja Volcánica.

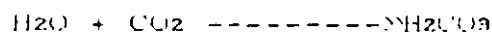
- Riolitas e ignimbritas

El fracturamiento en las rocas riolíticas y las tobas conocidas como ignimbritas, se traduce también pródigamente en excelentes acuíferos en estas rocas. En ciertas porciones del territorio son abundantes las mesas de ignimbritas con fracturamiento vertical que funcionan como zona de recarga y los fracturamientos regionales en estructuras de altos y bajos tectónicos por donde se infiltra el agua de lluvia a profundidades de cientos de metros. Los ejemplos más conocidos son el Valle de Villa de Reyes en San Luis Potosí y el Valle de León en Guanajuato. (Fig.5)

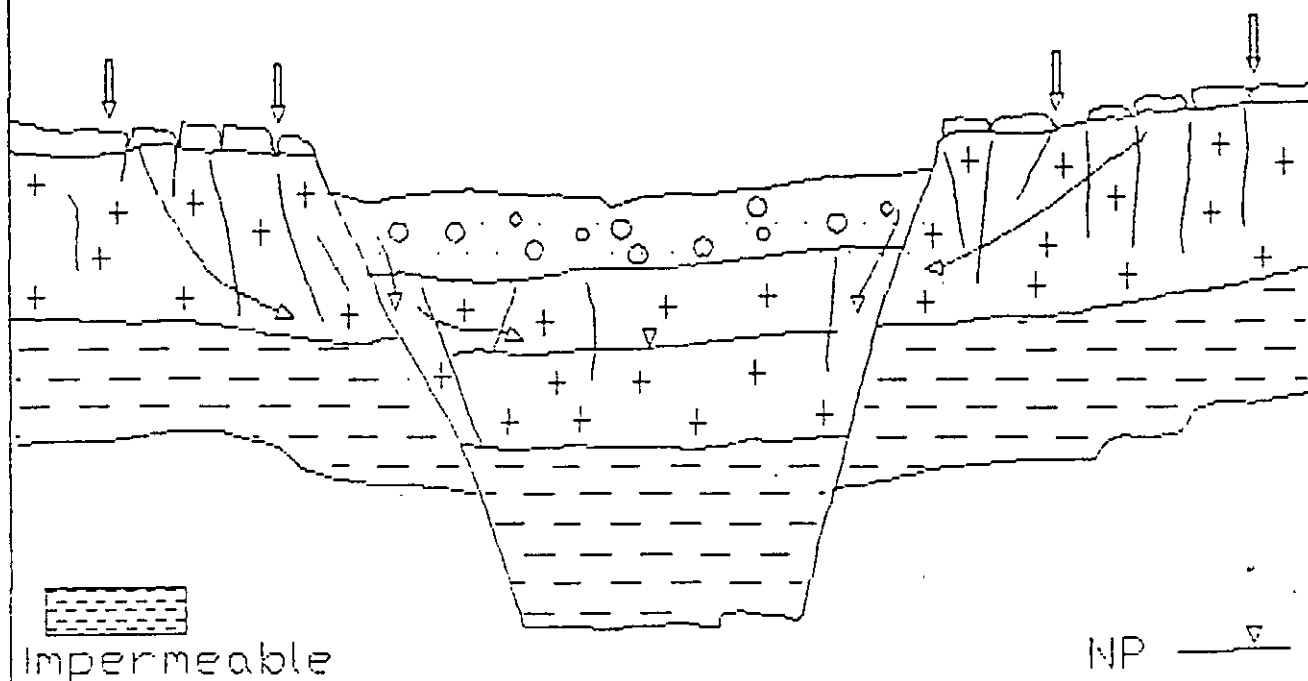
1.2.3. ACUIFEROS FORMADOS POR FRACTURAMIENTO Y DISOLUCION EN ROCAS CARBONATADAS

~~Algunas rocas carbonatadas como aquellas que se forman en~~
ambientes de plataforma como arrecifes o colonias coralinas, pueden iniciarse con una permeabilidad primaria bastante alta. Sin embargo, la mayoría de los acuíferos más productores de calizas en México se deben a procesos de fracturamiento y disolución en rocas calcáreas densas. La disolución es causada por una sobresaturación agresiva del agua al entrar en las fracturas. La agresividad del agua está determinada por el contenido de CO₂ en ella, el cual toma directamente del aire y de la materia orgánica de la cubierta de suelo.

El proceso de disolución se inicia cuando el agua que contiene CO₂ se transforma en un ácido carbónico débil.



Comunicación a través de fracturas desde la superficie



Alimentación descendente por medio del estrato y capa sobreyacente

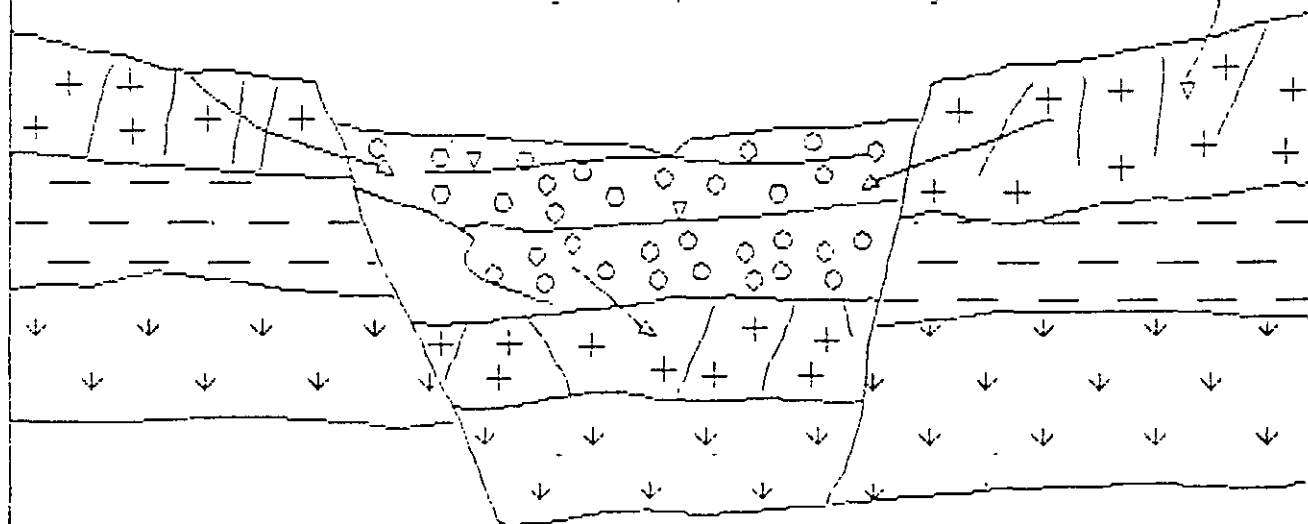
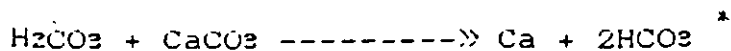


FIG. 5

Héctor L. Macías González. 1986.

El modo de acidificación del agua dependerá de la cantidad de CO_2 disponible en la atmósfera y en el suelo, de la temperatura, la presión atmosférica y el pH del agua. El ácido carbónico ataca a la roca carbonatada disolviéndola en Ca^{++} y en 2HCO_3^- :



La cantidad total de roca soluble depende de la cantidad total del agua y CO_2 que pasen a través de la roca. Por tanto, el fenómeno de disolución es más intenso y extremo en las regiones de temperatura y humedad tropical. En estas regiones la espesa vegetación y el delgado humus que contiene el subsuelo producen un alto contenido de CO_2 en el agua.

El tiempo a través del cual ha estado en circulación este tipo de agua, es también un factor decisivo y en regiones en donde las rocas han estado sujetas a la disolución durante largos períodos geológicos, puede ser totalmente denudada.

~~Una región donde el fenómeno de disolución está altamente~~
desarrollada es la región de Karst en la Dinarides, Yugoslavia, de donde se tomó el nombre para marcar en general a éste fenómeno.

La petrografía y la química de la roca tienen una importante influencia en el desarrollo del fenómeno de disolución. Las observaciones han demostrado que las rocas carbonatadas formadas por cristales grandes de calcita, tienden a desarrollar permeabilidades más altas que las rocas litográficas. Las cretas pueden ser de impermeables a semipermeables; en presencia de margas, se reduce aún más su permeabilidad. La dolomita, que es $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)$ es alrededor de 4 veces menos soluble que la caliza (CaCO_3) y sin embargo, existen acuíferos dolomíticos altamente permeables.

* El H_2CO_3 que es inestable se descompone espontáneamente en forma de $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ por lo que también suele expresarse así.

La grutas de Cacahuamilpa en el Estado de Guerrero son un típico ejemplo del poder de disolución del ácido carbónico sobre las rocas calcáreas. en los Estados de Nuevo León y Coahuila existen también grutas y manantiles de este tipo y pozos de gran producción.

1.3 - ROCAS IMPERMEABLES

Aunque el título de este subtema es el de rocas impermeables, es importante hacer notar que en la naturaleza no existen las rocas impermeables. Tanto las rocas plutónicas como las rocas metamórficas tienen permeabilidades de muy bajas a extremadamente bajas. Por esta razón, para fines prácticos se les considera como impermeables.

Las rocas que fueron formadas debido a la cristalización y consolidación de un magma y que no han pasado por la fase secundaria de fracturación y descomposición son muy impermeables. Dentro de estas, quedan comprendidas las rocas intrusivas como el granito, diorita, tonalita, granodiorita y gabro entre las principales.

En contraste con este grupo, existe el de aquellas que han estado sujetas a diversos episodios de tectonismo y que han sufrido tantas alteraciones y cambios que es difícil reconocer a la roca madre. Este tipo de rocas llamadas metamórficas, incluyen a rocas tales como el mármol, pizarras, esquistos, gneisses y cuarcitas en donde los espacios abiertos son muy reducidos. Los esfuerzos a que fueron sometidas y su prolongada edad, han producido una fuerte compactación, y en los casos de zonas de fracturamiento, estas están casi siempre rellenas por vetas de mineralización, de sílice o de relleno estéril.

Estos dos grandes grupos de rocas intrusivas y metamórficas cuando no presentan un alto grado de intemperismo tienen una porosidad total inferior al 3%, y por lo general casi siempre inferior al 1%. Esto se debe a que los escasos poros existentes en estas rocas son muy pequeños y por lo general sin conexión entre sí.

Estas consideraciones pueden ser válidas para la generalidad de las rocas plutónicas y metamórficas. sin embargo, algunos casos particulares se alejan de la generalidad como son algunos granitos y cuarcitas que en obras de tuneleo y otras llevadas a cabo en México, han aportado apreciables caudales de agua subterránea.

La permeabilidad que puede desarrollarse en estas rocas tiene lugar en las zonas de intemperismo y decomposición. Las rocas graníticas paleozoicas y mesozoicas que bordean a la Cd. de Nogales, Son., por ejemplo, exhiben una cubierta de intemperismo formada de arena gruesa llamada "tucuruguay". Esta cubierta que en algunas localidades alcanza espesores de hasta 150m es muy permeable y en ella se han emplazado pozos con caudales de hasta 15 lps (Fig. 6). En estas rocas, los diques funcionan como barreras laterales al flujo. Por debajo de esta cubierta la roca sana muestra un sistema de fracturas escasamente desarrollado que se cierra a poca profundidad.

En un tipo de rocas metamórficas denominadas cuarcitas, el Ing. Mario Veytia (comunicación verbal), encontró durante uno de sus ~~trabajos de asesoría, agua subterránea en el túnel Río Colorado~~ Tijuana, proveniente de las cuarcitas y con una carga de columna de agua de unos cien metros.

Como puede esperarse, estos casos son excepcionales y lo más frecuente en los trabajos de exploración o cuantificación, es el de considerar a estas rocas como barreras al flujo de agua subterránea.

1.4.- ESTRATIGRAFIA REGIONAL

En el estudio de la estratigrafía regional, se investiga la secuencia del carácter litológico y la distribución espacial de las capas en una cierta región. En el estudio geohidroológico, el hidrogeólogo se interesa en la distribución espacial de las rocas que forman acuíferos, acuícludos y acuitardos. El estudio de esta secuencia se lleva a cabo investigando la sección geológica de la región.

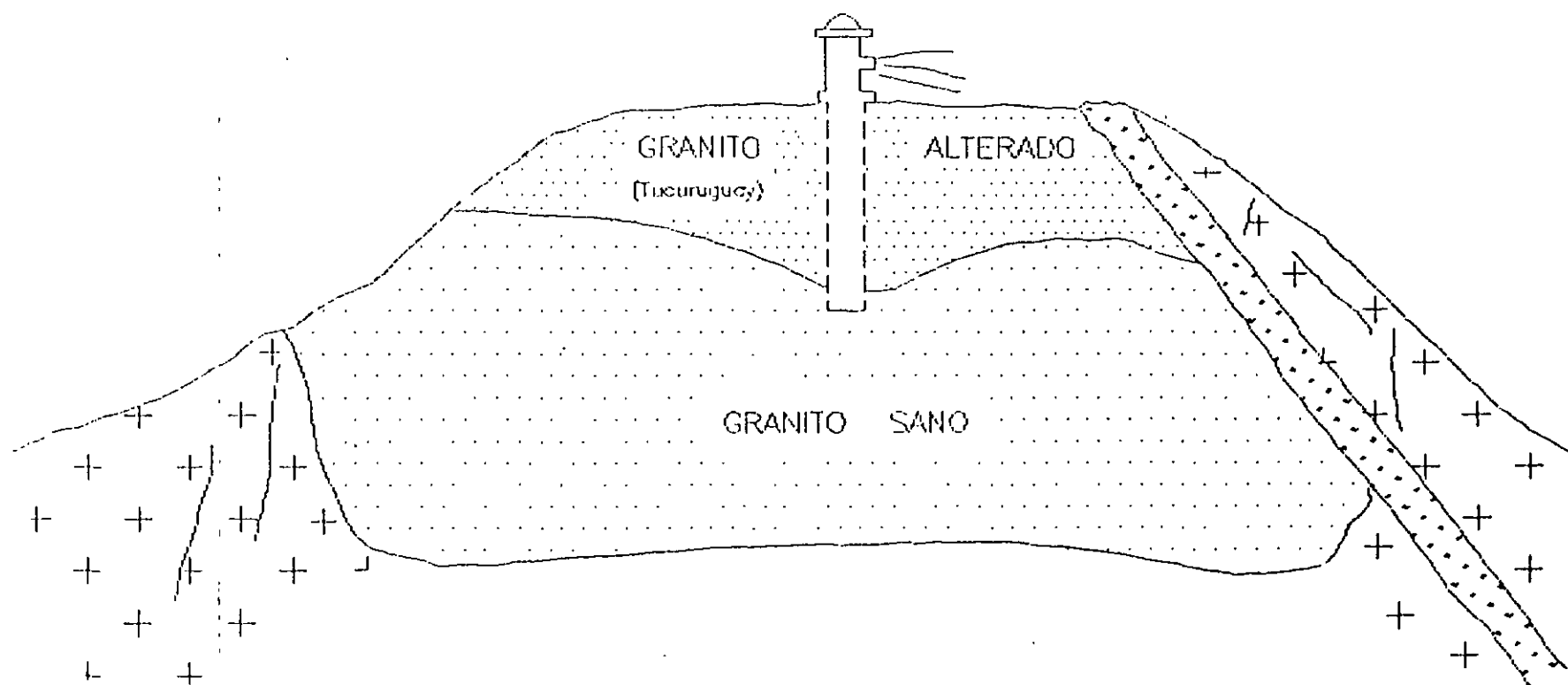


FIG. 6

La secuencia es subdividida de acuerdo con sus unidades litológicas y de acuerdo con las unidades de tiempo.

Se debe tener cuidado de no mezclarlas, ya que esto traerá malas interpretaciones y fallas en la construcción del modelo geológico.

Las unidades litoestratigráficas son aquellas distinguibles de acuerdo a su carácter litológico.

Las unidades cronoestratigráficas son aquellas distinguibles de acuerdo a sus diferentes edades absolutas o relativas.

La unidad litoestratigráfica básica es la Formación

Una Formación es una unidad cartografiable

Varias formaciones forman un Grupo

Las unidades de tiempo se fijan de acuerdo con las divisiones de tiempo de la columna geológica, la cual, a su vez, ha sido construida auxiliándose de los fósiles y elementos radioactivos.

La división dentro de las formaciones es significativa desde el punto de vista hidrogeológico y con este propósito, las formaciones pueden ser agrupadas o subdivididas en unidades hidroestratigráficas.

Una unidad hidroestratigráfica es una unidad cartografiable con propiedades hidrogeológicas específicas.

Como en la litoestratigrafía, también en la hidroestratigrafía se pueden tener cambios de facies debido a los cambios laterales en el ambiente de depósito. Estos cambios de facies tienen una importancia muy grande desde el punto de vista hidrogeológico.

Después de definir las formaciones geológicas se procede con la lectura de la estratigrafía, a construir la sección o columna de la región estudiada auxiliándose en los afloramientos y en la información proporcionada por pozos y exploraciones geofísicas.

Esta información permite construir secciones transversales al flujo del agua y el diagrama de bloques tridimensionales o bloque diagramático.

Al construirse el modelo tridimensional, se puede encontrar no solo la correlación estratigráfica local sino la secuencia regional y ocasionalmente la presencia de discordancias en las secciones geológicas.

Una discordancia se refiere a una alteración en la historia geológica de una región y son como sigue:

DISCORDANCIA
ANGULAR

DISCORDANCIA
ESTRATIGRAFICA

DISCORDANCIA
EROSIONAL

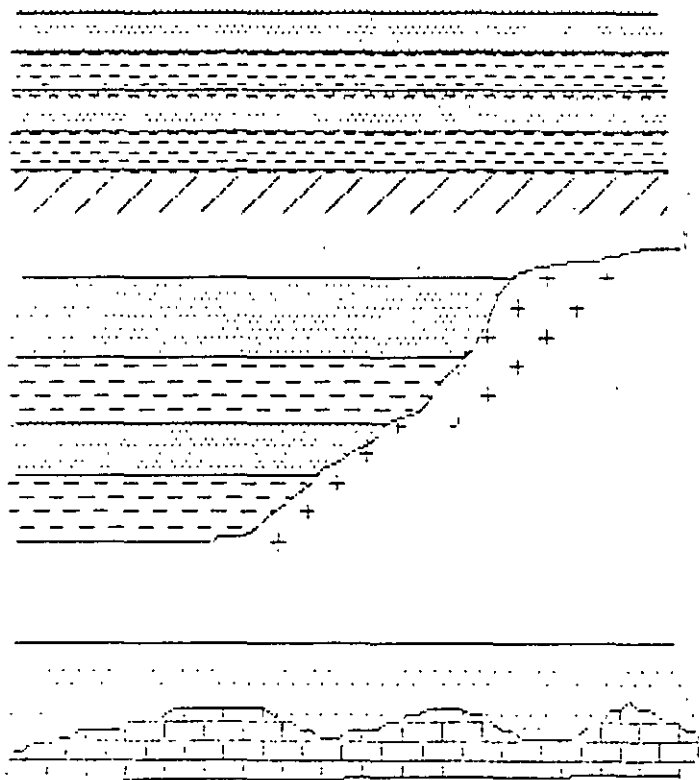


FIG. 7

Es muy importante el conocimiento de estas discordancias desde el punto de vista hidrogeológico, ya que pueden dar lugar a cambios de permeabilidad, de la superficie freática o piezométrica, o bien identificar barreras de flujo subterráneo.

1.5 - DISTRIBUCION DEL AGUA EN EL SUBSUELO

El agua que se infiltra en el subsuelo inicia un recorrido a través de él, con un movimiento preferentemente vertical causado por el efecto de la gravedad hasta alcanzar el acuífero o roca almacenante caracterizada por la saturación de agua en sus intersticios. En el trayecto del agua, antes de alcanzar su destino en el subsuelo, pueden reconocerse tres subzonas que se citan en orden descendente desde la superficie del terreno: subzona de agua del suelo, subzona intermedia y subzona capilar. Estas subzonas se agrupan y conforman la llamada zona de aereación (fig. 8).

El agua contenida en la zona de aereación se designa como agua suspendida o vadosa.

La subzona del agua del suelo tiene una extensión variable, su espesor quedará definido por el tipo de suelo y la vegetación del lugar, pero para fijar límites se puede decir que esta subzona tiene una dimensión que va desde la superficie del terreno hasta la profundidad de las raíces de las plantas.

Parte del agua contenida en la primera subzona, será capaz de drenar por acción de la gravedad, a esta agua se le conoce como agua gravitacional; la parte restante queda retenida en la superficie de las partículas del suelo, en forma de una película fina alrededor de ellas por acción de la tensión superficial. Esta agua denominada agua pelicular es utilizada en gran medida por las plantas y es precisamente en agricultura donde se define como "capacidad de campo" a la máxima cantidad de agua pelicular que es capaz de retener un suelo por unidad de volumen.

La subzona intermedia ocupa un terreno comprendido entre el límite inferior de la subzona de agua y el límite superior de la subzona capilar (fig. 8). Aunque muchos autores se empeñan en hacer intervenir a esta subzona, en opinión del autor se puede decir que es una extensión a profundidad de la subzona del agua del subsuelo, ya que también está constituida por el agua pelicular y el agua gravitacional; la única diferencia estriba en que en la subzona intermedia por definición, no debe existir la influencia de las plantas.

La subzona más profunda de la zona de aereación se le denomina subzona capilar. Esta se extiende por encima de la zona de saturación en donde el agua se eleva a causa de la atracción capilar; así, el espesor de la subzona por encima del nivel freático está definido por el límite de la elevación capilar del agua. Este límite es función de la granulometría de esta zona. A menor diámetro de las partículas mayor será la altura de la zona capilar y viceversa.

En la zona de saturación, el agua llena completamente los intersticios (poros, fisuras y fracturas) de la roca y acusa un movimiento fundamental en dirección horizontal diferenciándose del movimiento vertical que se establece en la zona de aereación.

Los límites superiores de esta zona son variables, es decir, las subzonas anteriores bien pueden no existir si el nivel freático se encuentra situado muy cerca de la superficie del terreno. Así, es en las rocas que constituyen esta zona donde se almacenan cantidades de agua, tan grandes según la porosidad existente en ellas y las características geológicas generales propias de la zona.

1.6 TIPOS DE ACUIFEROS

Como se vio en la primera parte, las rocas capaces de almacenar y transmitir agua reciben el nombre de acuíferos (del latín *acua* = agua y *fero* = llevar).

Se vió también en el inicio de 1.2 que los acuíferos funcionan como cuerpos transmisores de agua, desde las zonas de recarga a las de descarga o hacia los embalses subterráneos de almacenamiento.

En estrecha relación con los acuíferos hay otros tipos de rocas que se clasifican de acuerdo a su funcionamiento y capacidad para almacenar agua y cederla a las zonas de drenado natural, a las captaciones artificiales o a los mismos acuíferos. Estas rocas o formaciones geológicas que sobreyacen, subyacen o limitan lateralmente a los acuíferos se conocen como acuicludos, acuitardos y acuífugos.

Aunque algunos autores se oponen al uso de estos términos, se hace la descripción de los mismos en estas notas por considerarse de interés. Los acuicludos o acuícierres (del latín *claudere* = cerrar) son las formaciones geológicas que contienen agua, pero que no la transmiten, por lo que su explotación no puede efectuarse. El ejemplo clásico que se cita en todos los libros son las arcillas, que a pesar de su alta porosidad (40-50%) no permiten que el agua sea drenada pues a ello se opone la atracción molecular, la cohesión y la tensión superficial.

Los acuitardos, como su nombre lo indica, son formaciones geológicas semipermeables que transmiten muy lentamente el agua que contienen. Por esta circunstancia, localmente los acuitardos no son aprovechables, sin embargo, a nivel regional, pueden ceder agua en cantidades significativas en un balance de aguas subterráneas. Existen numerosos ejemplos de acuitardos que limitan superiormente a acuíferos y que por diferencia de presiones hidráulicas entre ambos, se establece una recarga descendente o ascendente del acuitardo hacia el acuífero, o del acuífero hacia el acuitardo.

Ejemplos de acuitardos son algunas formaciones arcillosas mezcladas con arenas y limos, con horizontes de arenas o fragmentos de coquinas, o de arenas, cenizas y fragmentos mayores de origen volcánico.

Los acuifugos (del latín *fugere* = huir), son las formaciones impermeables que no contienen agua como son las rocas ígneas extrusivas e intrusivas que no se encuentran fracturadas o alteradas y rocas carbonatadas en las mismas condiciones.

Desde el punto de vista de funcionamiento hidráulico y según el grado de confinamiento de las aguas que contiene, los acuíferos se clasifican en tres tipos:

- acuíferos libres o freáticos
- acuíferos confinados
- acuíferos semiconfinados

Los acuíferos libres son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre sujeta a la presión atmosférica. Esta superficie libre es el límite superior de la zona de saturación y se le conoce como superficie freática (fig. 9).

Un acuífero limitado superior e inferiormente por formaciones impermeables y que contiene agua a mayor presión que la atmosférica se le clasifica como acuífero confinado. Cabe aquí hacer mención que en la naturaleza, raramente se encuentran formaciones completamente impermeables, por lo que algunos autores mencionan de manera muy atinada al referirse a estos acuíferos que las capas que los limitan son "relativamente impermeables" (fig. 10).

La compresión del agua en estos acuíferos confinados se debe a la transmisión de la presión de la carga hidráulica a altura de la columna de agua al seno del acuífero y al peso de la columna litostática que éste soporta. Por ello, cuando se perfora un pozo en estos acuíferos, el agua asciende dentro del pozo por encima del techo del acuífero, y si la presión de confinamiento es mayor, el agua puede brotar como en los pozos surgentes o artesianos.

DISTRIBUCION DE AGUA EN EL SUBSUELO

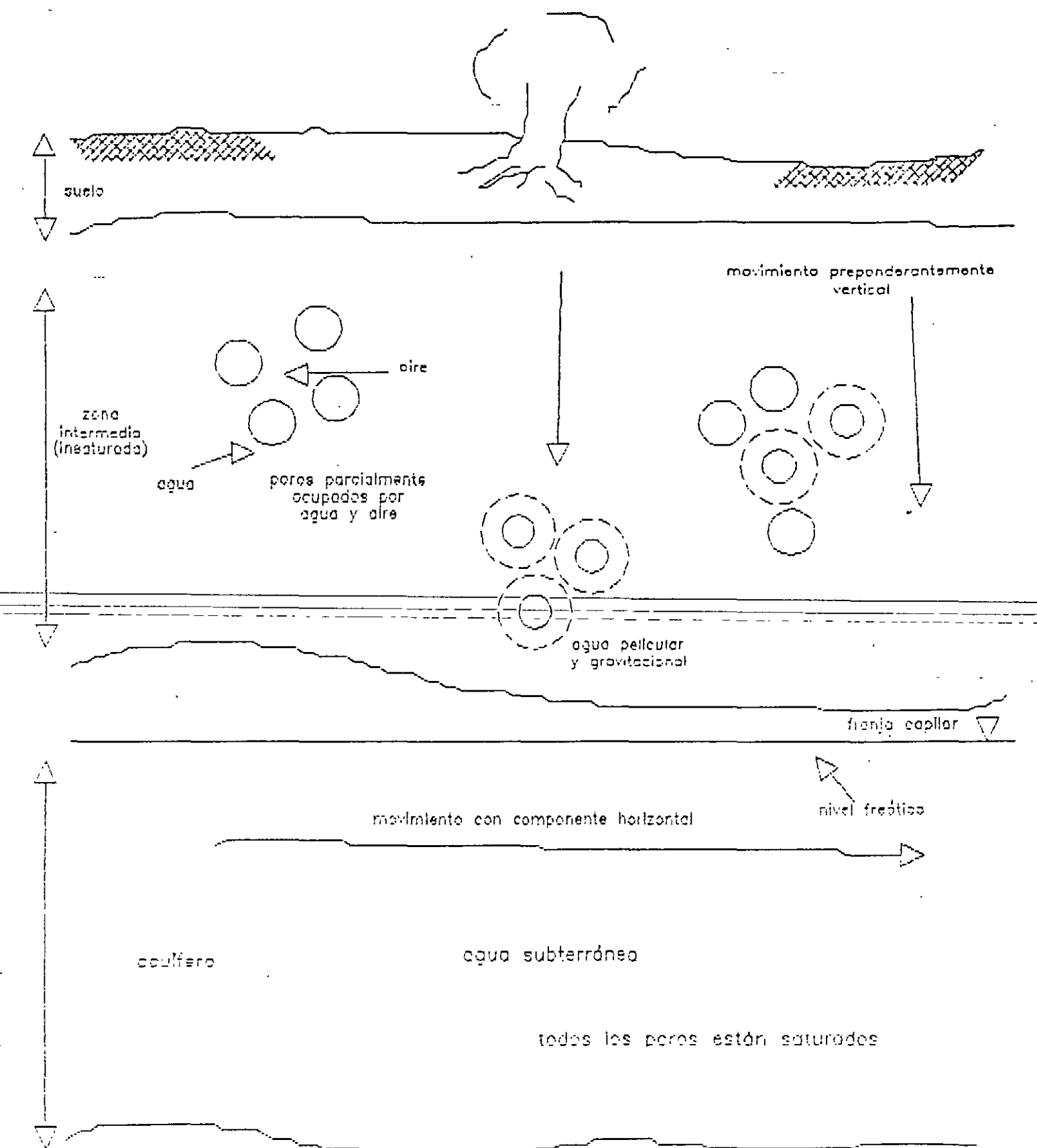


FIG. 8

DIFERENTES TIPOS DE ACUIFEROS

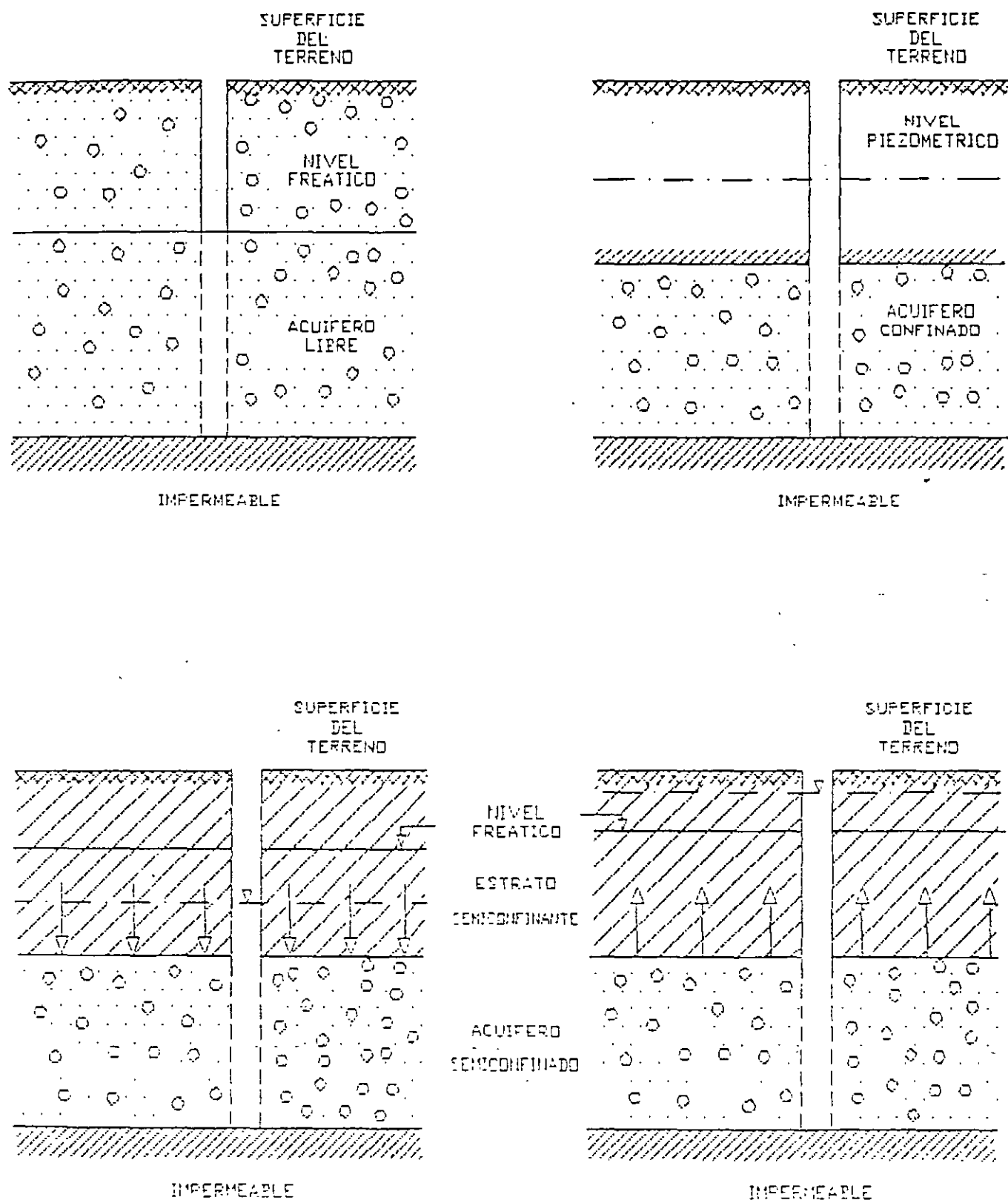


FIG. 9

Los acuíferos semiconfinados son también estratos completamente saturados y sometidos a presión, limitados en su parte superior por un estrato menos permeable a través del cual puede recibir o ceder u recarga vertical.

En las siguientes figuras se esquematizan los tipos de acuíferos descritos. En la primera (fig. 11) se idealiza un estrato de rocas calcáreas confinado entre dos capas de lutita. También se puede ver que el acuífero confinado funciona como una tubería a presión, y el acuífero libre como un canal.

Otra analogía para los acuíferos confinados además de las obras hidráulicas, es la de un vaso comunicante en donde se igualan las presiones de un líquido (fig. 12).

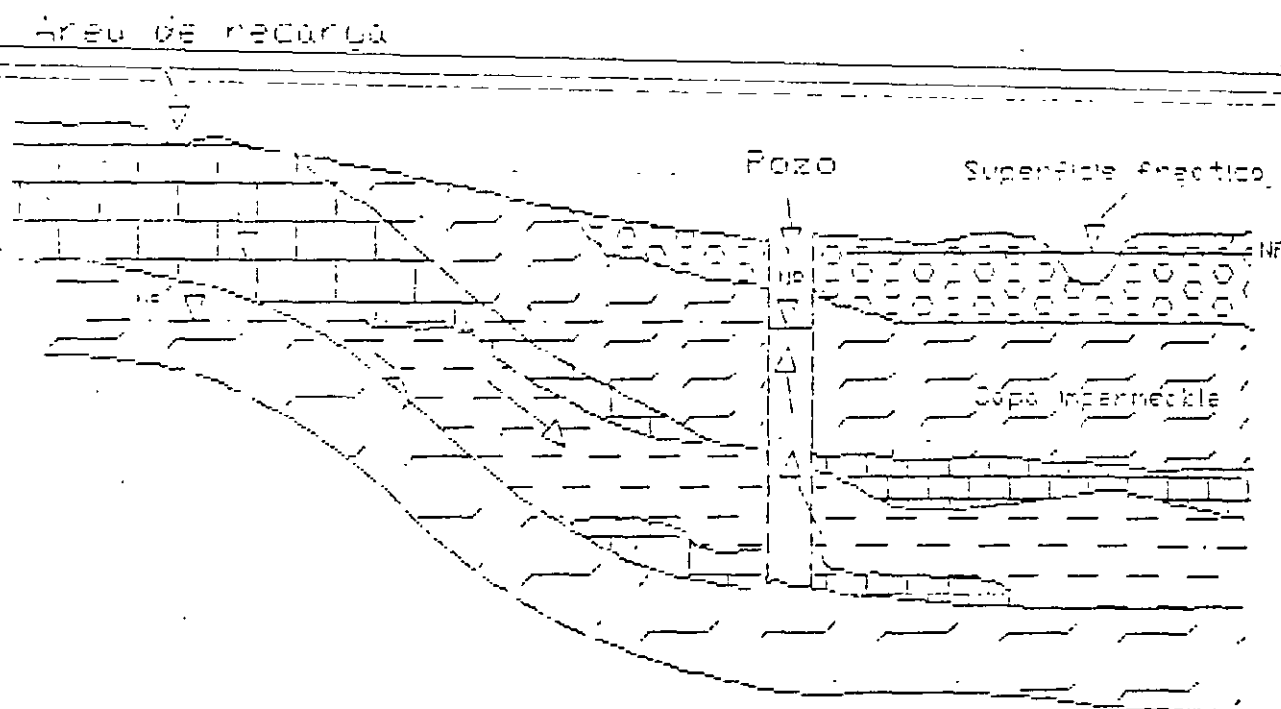
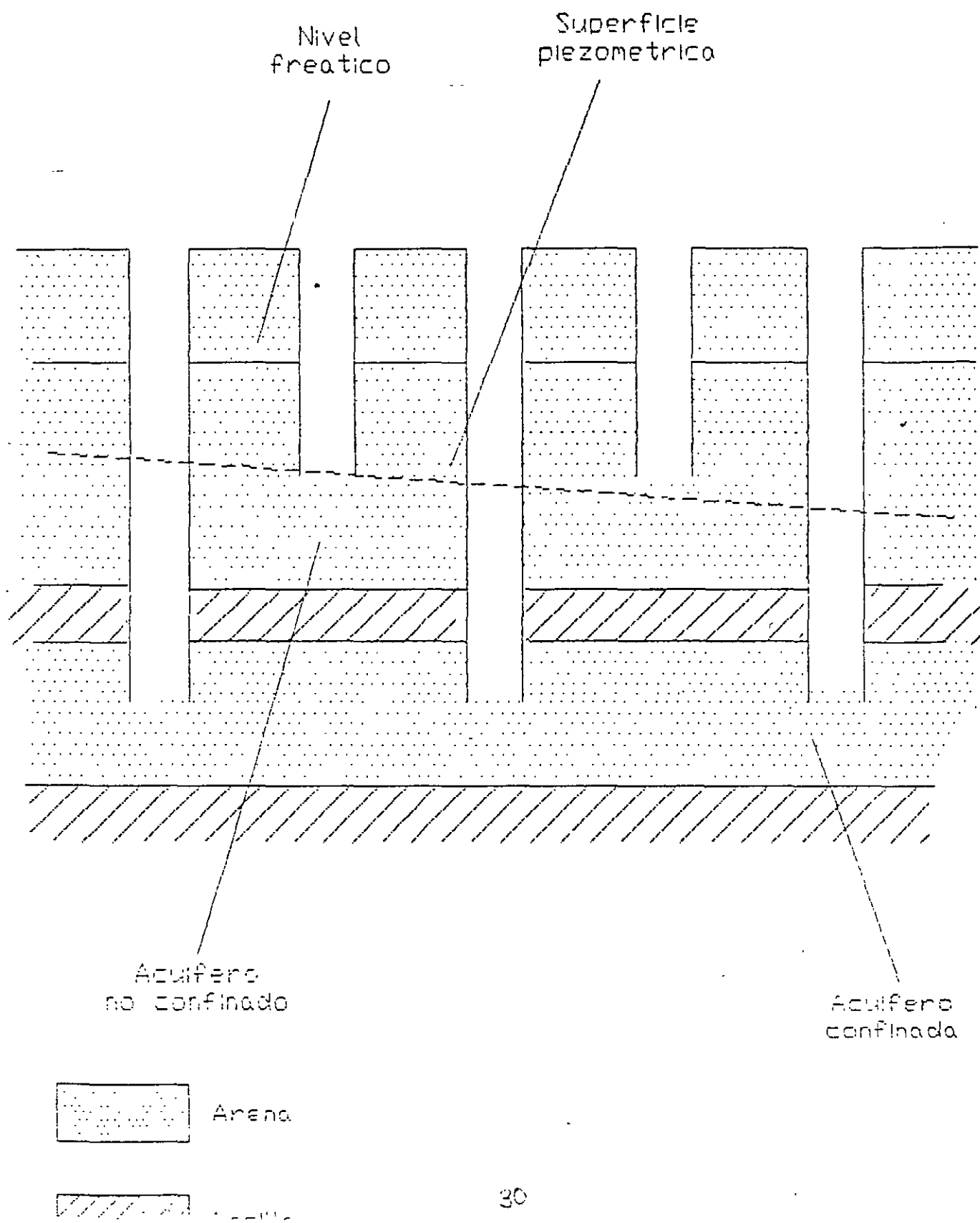


FIG. 11

Héctor L. Muñoz González, 1982.
Héctor L. Muñoz González, 1982.

ACUIFERO CONFINADOS Y NO CONFINADOS



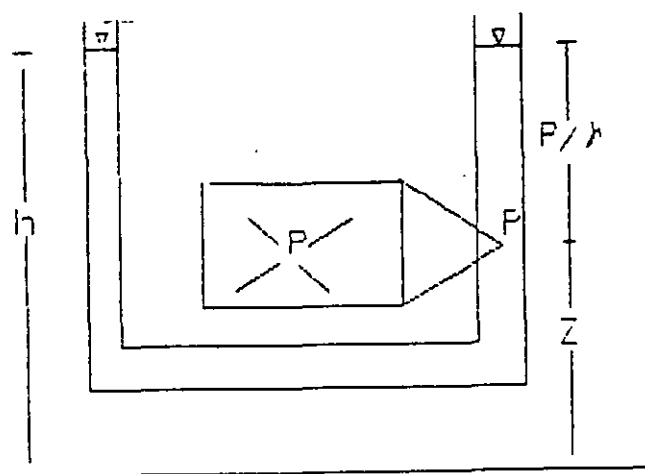


FIG. 12

Nivel de
referencia
arbitrario

La siguiente figura (fig. 13) muestra la esquematización de un acuífero semiconfinado:

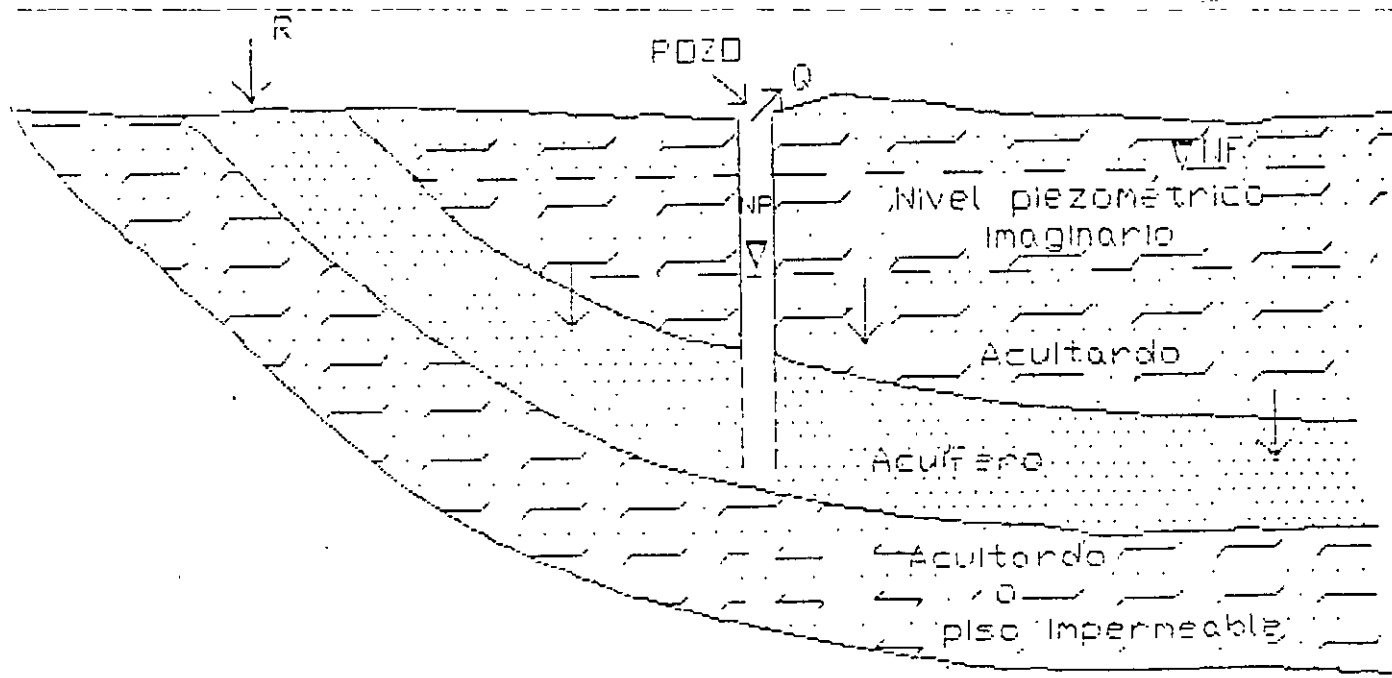
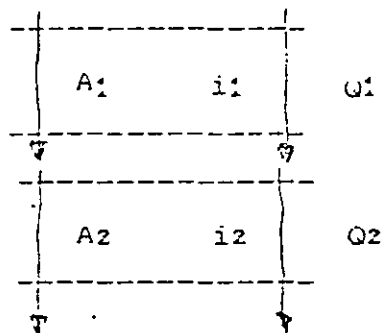


FIG. 13

1. / INFLUENCIA DE LAS ESTRUCTURAS SOBRE LA SUPERFICIE FREÁTICA O PIEZOMETRICA

La representación gráfica de los niveles del agua subterránea (profundidad al nivel o elevación con respecto a un nivel de referencia), son sumamente útiles para conocer de manera aproximada el grado de explotación de un acuífero, la dirección preferencial de flujo y la posición de las zonas de recarga y descarga. La dirección del flujo está determinada, en condiciones naturales o de equilibrio, por la relación geográfica entre el área de recarga y descarga. Cuando una cuenca se encuentra sobreexplotada, la red de flujo es deformada en la medida en que se tome agua del almacenamiento.

El gradiente en la red de flujo a un mismo caudal, es función inversa de la permeabilidad, por lo que si en una cierta sección se observa un cambio significativo del gradiente, esto puede deberse a un cambio en la litología y por tanto de la permeabilidad o a un cambio en el caudal de flujo.



Por hipótesis los caudales Q_1 y Q_2 son iguales

$$Q_1 = A_1 v_1$$

$$Q_2 = A_2 v_2$$

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$Q = A_1 K_1 v_1 = A_2 K_2 i_2 \quad \therefore \quad \frac{K_1}{K_2} = \frac{A_2 i_2}{A_1 i_1}$$

Como las áreas son consistentes, entonces:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{i_2}{i_1}$$

Entre más húmeda sea el área, habrá más cambios para un nivel de agua somero. Otro caso es por la ocurrencia de fuentes de recarga como flujos de entrada o por el contrario, flujos de salida del agua subterránea. Como ejemplo ríos efluentes o influentes (fig. 15).

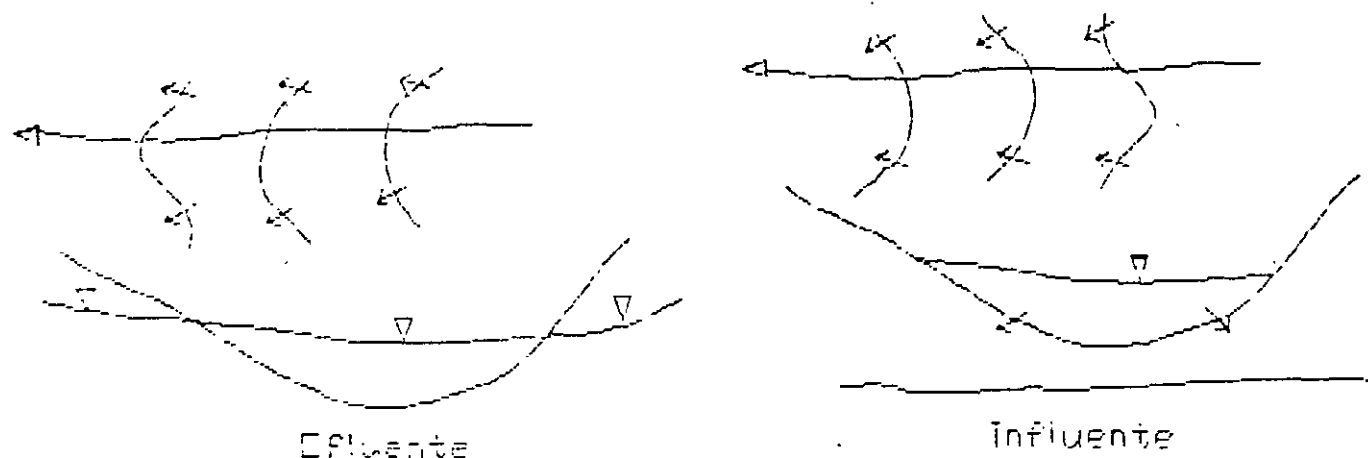


FIG. 15

Ademas del cambio en la forma del nivel de agua debido a un cambio en la permeabilidad del acuífero y sus espesores, se puede tener una influencia en el nivel del agua por la estructura geológica (fig. 16).

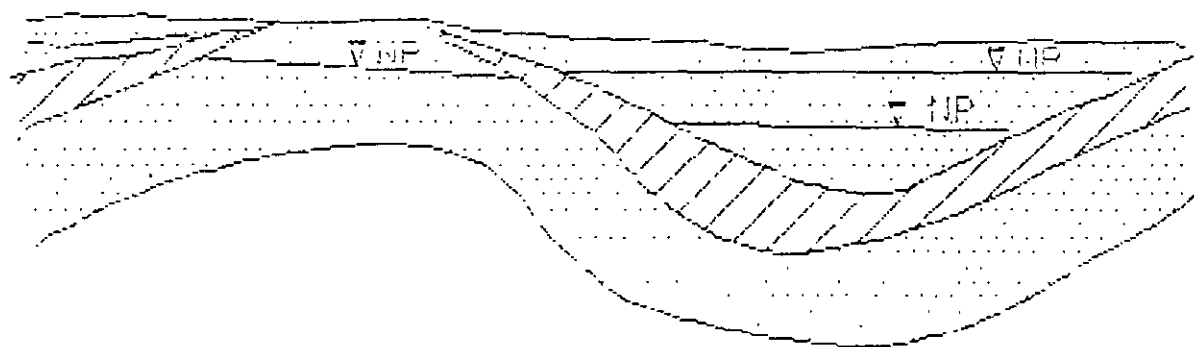


FIG. 16

Page 1 Page 1000 155

En un anticlinorio, pueden tenerse diferencias locales y regionales en el nivel de agua subterránea (fig. 17).

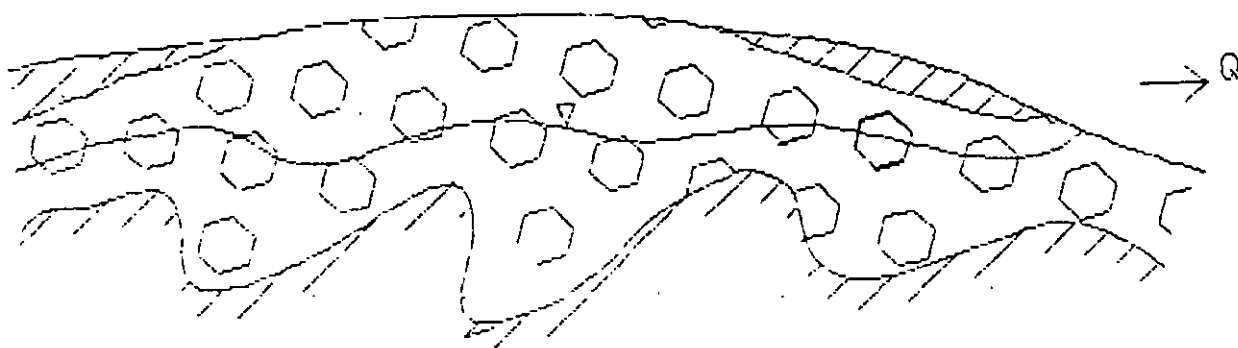


FIG. 17

En los pliegues monoclinales puede originarse una pendiente pronunciada del nivel de agua subterránea (fig. 18).

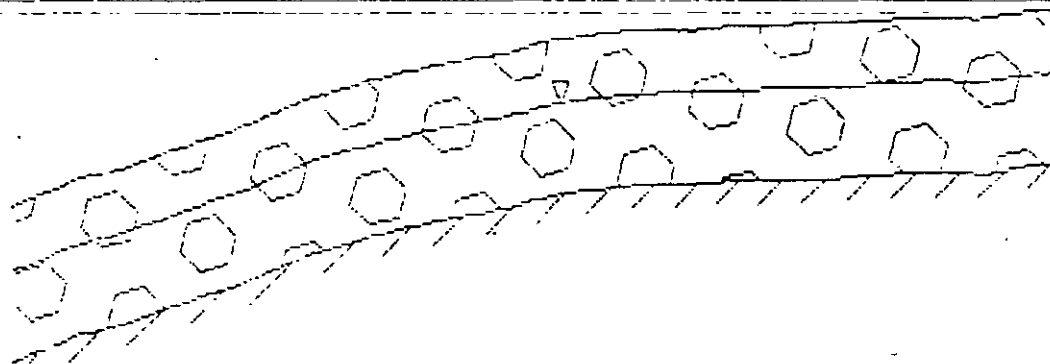


FIG. 18

En las zonas de falla se origina un cambio en el gradiente del nivel del agua debido al cambio de permeabilidad de un acuífero a otro (fig. 19).

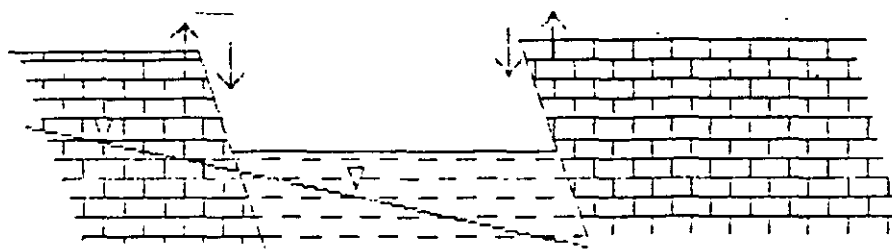


FIG. 19

Si las zonas de falla son de una alta permeabilidad, el gradiente del agua subterránea se atenuará en esta zona y viceversa. Recuérdese que el gradiente es inversamente proporcional a la permeabilidad (fig.20).

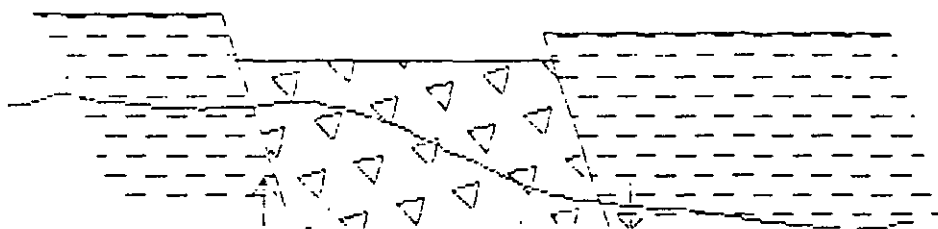


FIG. 20

Una falla puede causar un ascenso del nivel del agua debido a una alimentación proveniente de un manto de agua confinada, producir el caso contrario o un manantial (fig. 21).

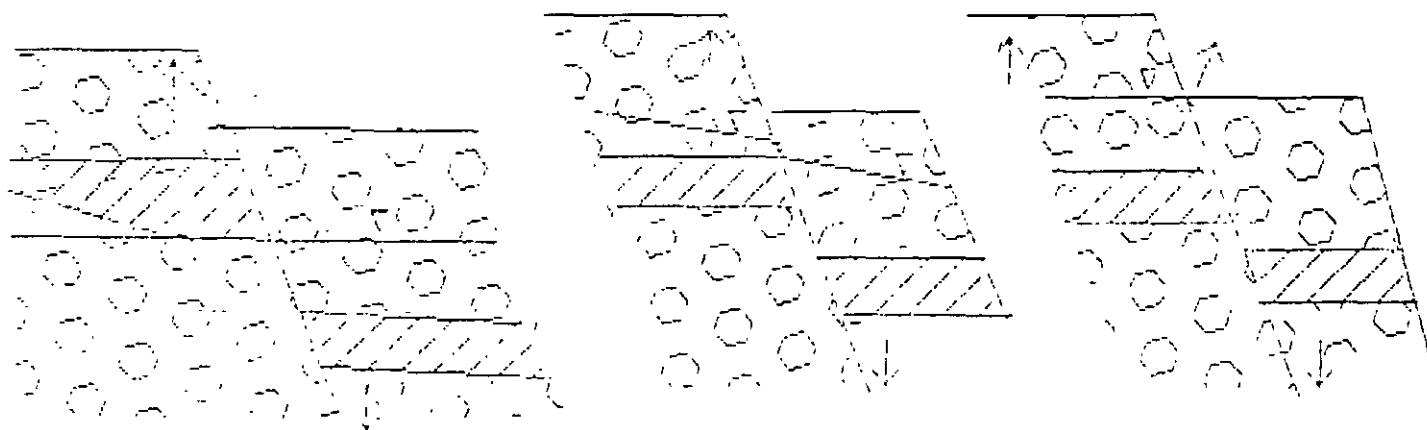


FIG. 21

Dentro de un graben, el nivel del agua puede mostrar una tendencia a bajar (fig. 22).

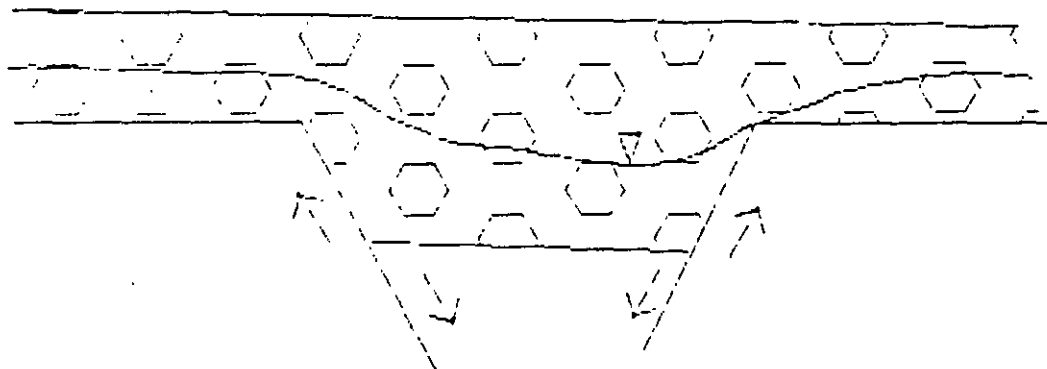


FIG. 22

En un horst al contrario, puede establecerse un nivel de agua colgado independiente (fig. 23).

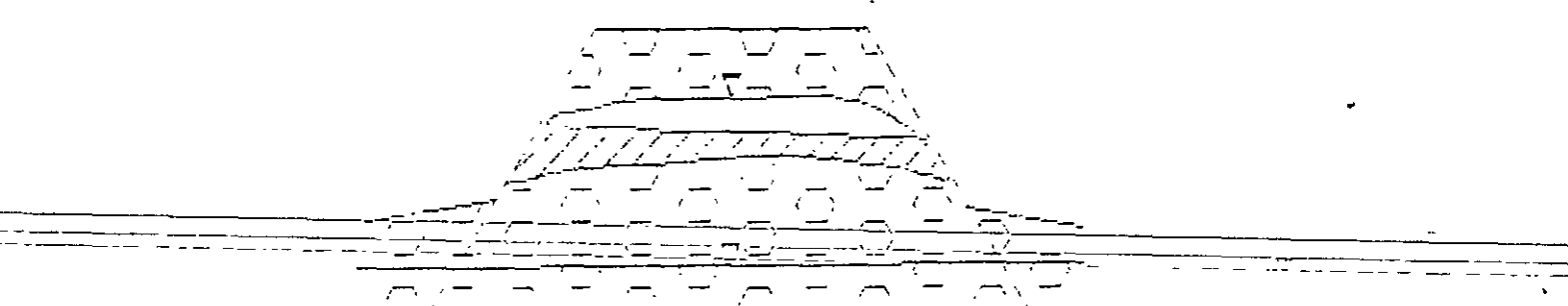


FIG. 23

1.8 - ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA DE ACUIFEROS

Las zonas de recarga natural a los acuíferos están estrechamente ligadas a la latitud, relieve, litología y los rasgos geológicos estructurales.

Una zona templada de relieve moderado formada por rocas permeables es una zona de recarga, debido a que el escurrimiento superficial será relativamente lento y en consecuencia se tendrá un mayor tiempo de contacto entre el agua y las rocas permeables lo que se traducirá en una infiltración significativa.

En una zona árida de relieve accidentado donde la lluvia ocurre e brádicamente en régimen torrencial, aún si las rocas son permeables, el agua escurrirá rápidamente sin que se genere una recarga apreciable.

En los casos precedentes es obvio que la temperatura ambiente, el tipo de suelos y la vegetación son factores que complementan el criterio para definir a una zona como área de recarga.

En algunas cuencas hidrográficas las zonas de recarga se localizan en los bordes perimetrales compuestos de rocas permeables y en los límites interiores (fig. 24).

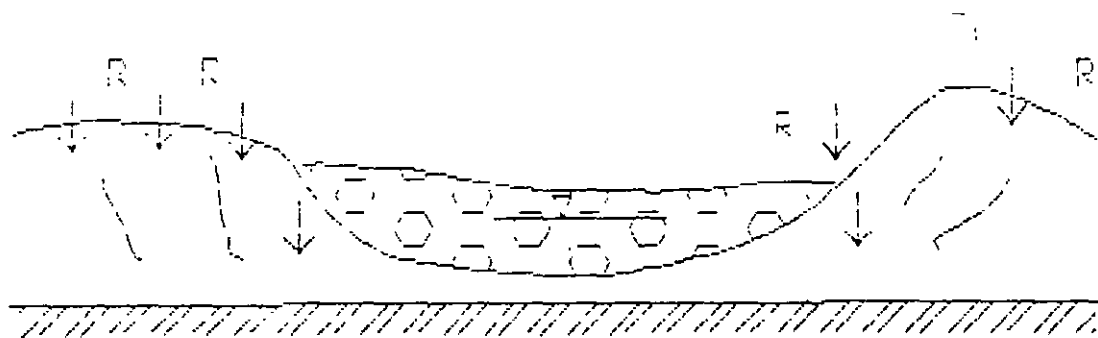


FIG. 24

Según el patrón estructural, la recarga puede incorporarse a un flujo local somero o a otro más profundo (fig. 25).

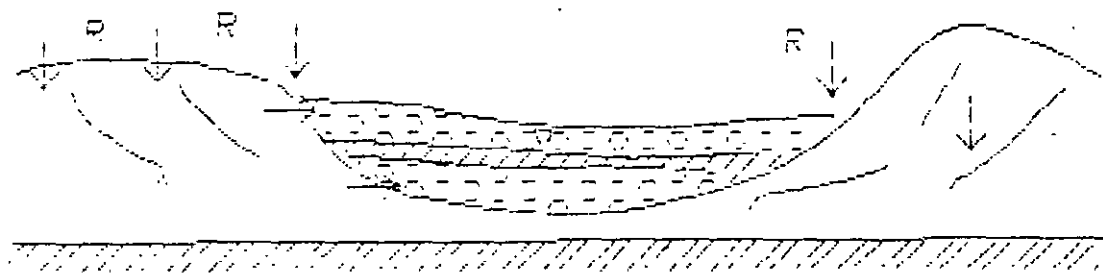


FIG. 25

La recarga natural en los valles fluviales tiene lugar por la infiltración del escurrimiento del colector principal y los arroyos tributarios que escurren sobre la planicie (fig. 26).

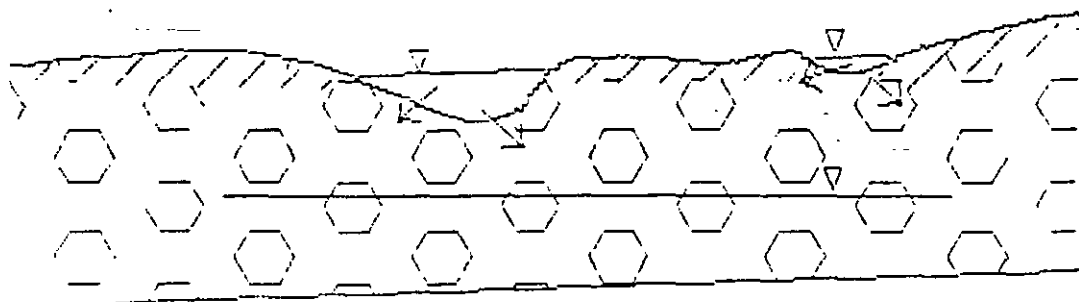


FIG. 26

Cuencas de este tipo son muy comunes en México. Algunos ejemplos son la Cuenca de Río Aguanaval en Zacatecas y Durango. Hace unos 40 años, la recarga mas importante de la zona de la laguna de Coahuila, era inducida por el Río Nazas, antes de que se construyera sobre él la Presa Francisco Zarco.

En las cuencas de origen tectónico la recarga se establece a través de los grandes sistemas de fallas y fracturas (fig. 27), para alimentar tanto al relleno como a las rocas permeables más profundas. Uno de los casos más representativos de este mecanismo de recarga son los valles de León y del Río-Turbio que son alimentados a través de extensos afloramientos de ignimbritas y riolitas.

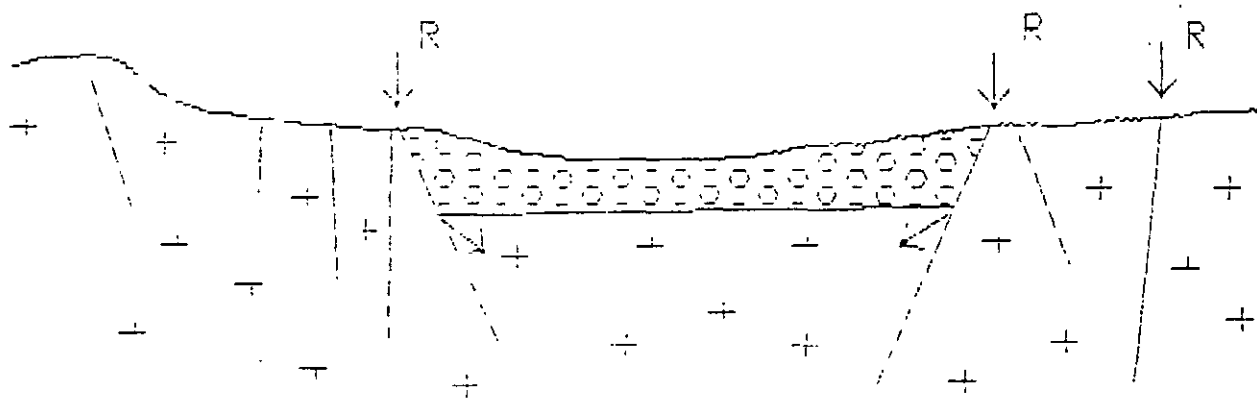


FIG. 27

Extensas planicies como la de Ojuelos en Guanajuato funciona como na de recarga a la Fosa de Villa de Reyes en San Luis Potosi (fig. 28).

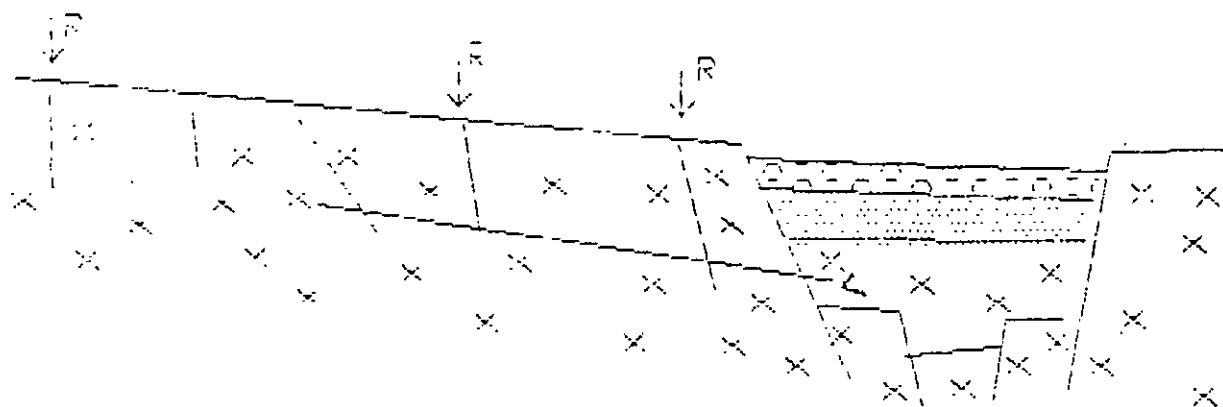


FIG. 28

En algunas cuencas tectónicas como la de Guaymas y San Ignacio en Sonora y la de Valle de Banderas en Jalisco, tienen como zonas de recarga los bordes de falla y la que ocurre por infiltración del currimiento del Arroyo Santa Cruz, San Ignacio y Ameca, sobre la planicie permeable (fig. 29).

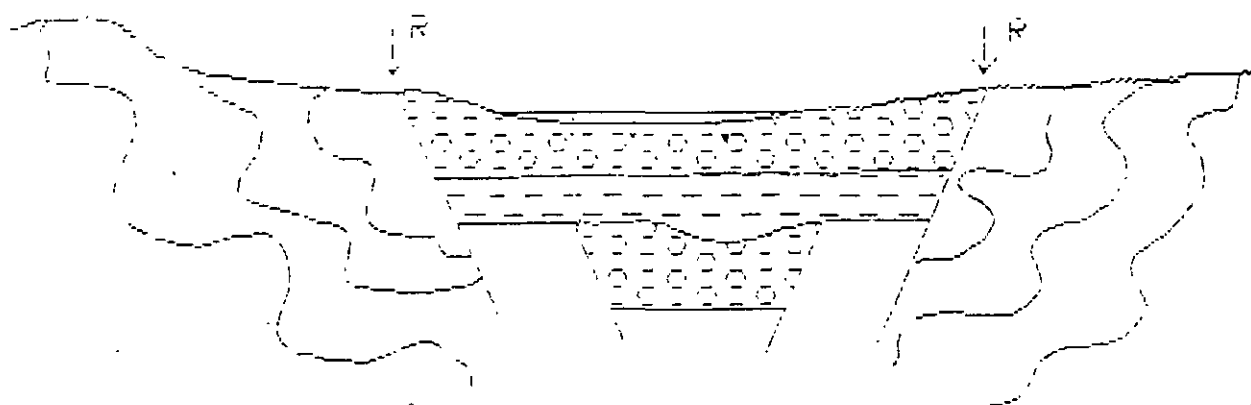


FIG. 29

En otros valles de origen tectónico otra zona de recarga se ubica en las terrazas altas de la cabecera (fig. 30).

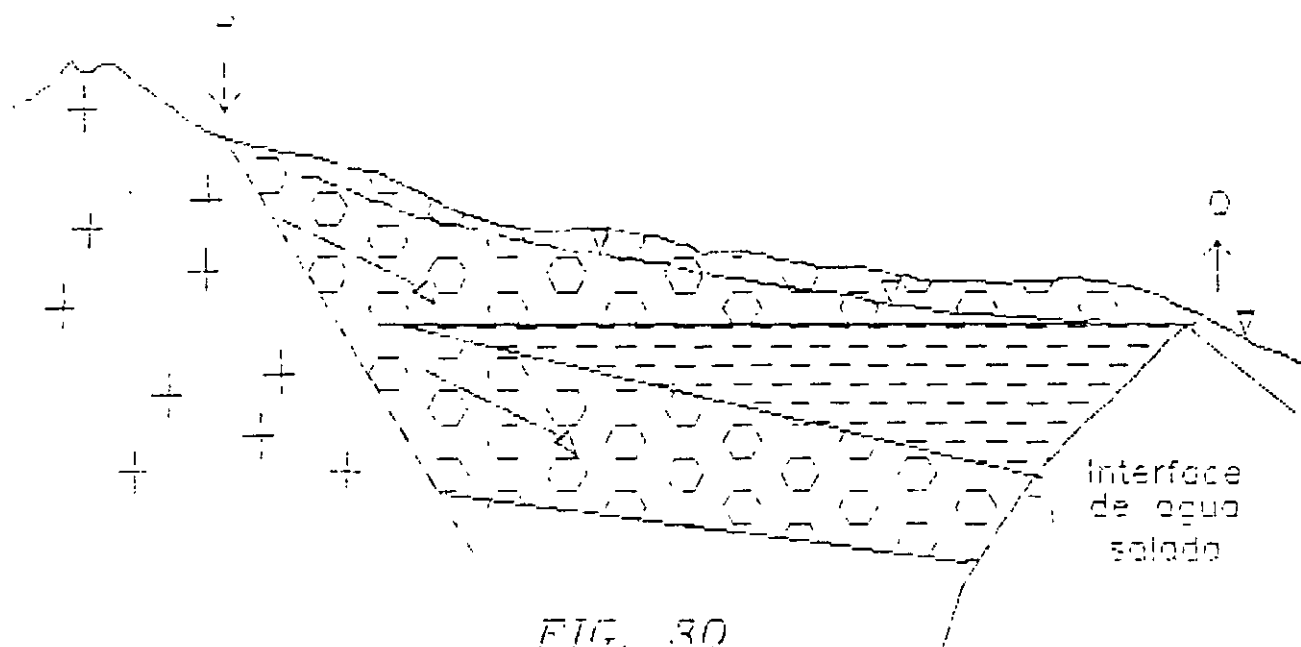


FIG. 30

Los conos volcánicos estratificados de grandes dimensiones, son también zonas de recarga, debido a la alta permeabilidad de los productos piroclásticos (fig. 31).

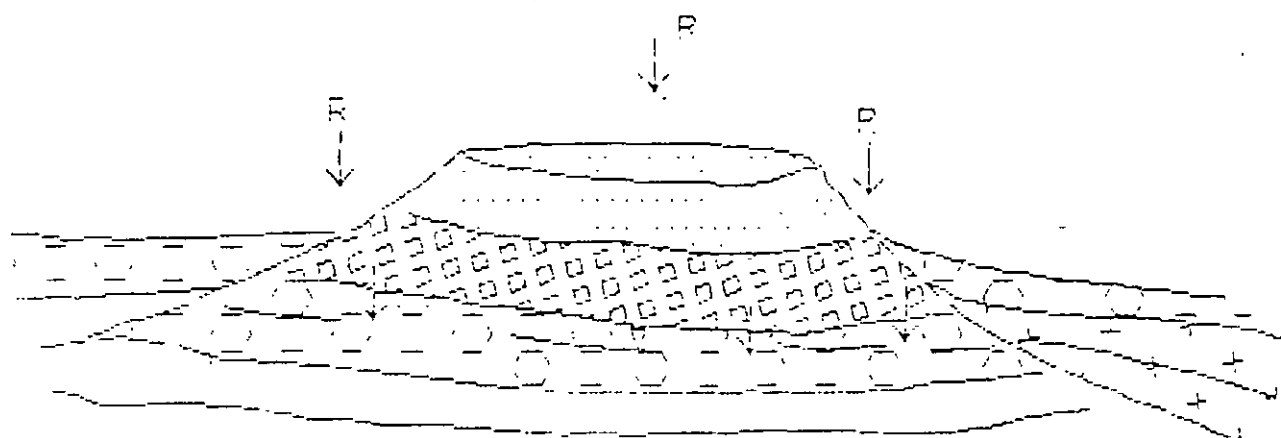


FIG. 31

Muchas de estas estructuras de estrato-volcanes se ubican a lo largo del Eje Neovolcánico Mexicano en rocas basálticas y andesíticas y sus piroclastos asociados. También dentro del Eje Neovolcánico se encuentran numerosas calderas, donde se acumula el agua de lluvia para drenarse hacia el subsuelo posteriormente (fig. 32). Los ejemplos más conocidos son los de la Caldera en Valle de Santiago, Gto., La Alberca en Zacapu, Mich. y la Laguna de Achichica, Pue.

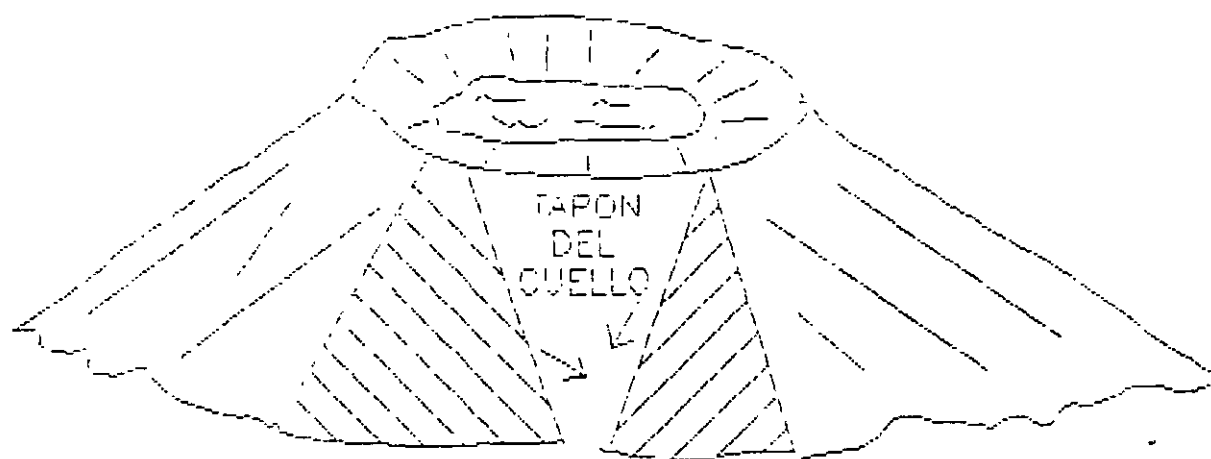


FIG. 32

Las barrancas y cañones rellenos por coladas de lava basáltica son también excelentes zonas de recarga y almacenamiento (fig. 33).

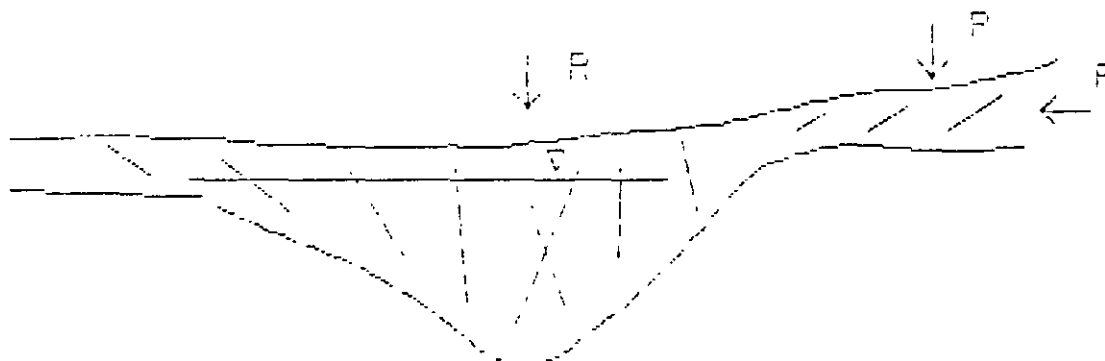


FIG. 33

En las rocas carbonatadas la zona de recarga puede ubicarse a distancias considerables del área de descarga. Un ejemplo es el Manantial de la Media Luna en Rio Verde, S.L.P. que descarga aproximadamente $6m^3/s$ (fig. 34).

La recarga artificial en superficie puede realizarse de diversas maneras; en los arroyos de la vertiente del Océano Pacífico en la Península de Baja California se han construido bordos convenientemente espaciados con el mismo material de acarreo, con el fin de disminuir la velocidad de escurrimiento del agua y extenderla sobre zonas permeables y extensas. Con estas barreras de bajo costo, se logra mayor tiempo de permanencia del agua en contacto con los acarreos fluviales y se aumentan las posibilidades de inducir una mayor infiltración.

Este mismo artificio puede aplicarse a llanuras de inundación, construyendo terrazas a modo de embalses. El agua así retenida, puede canalizarse posteriormente a zanjias o canales de infiltración. Una generalización esquemática de este último sistema es como sigue (fig. 36):

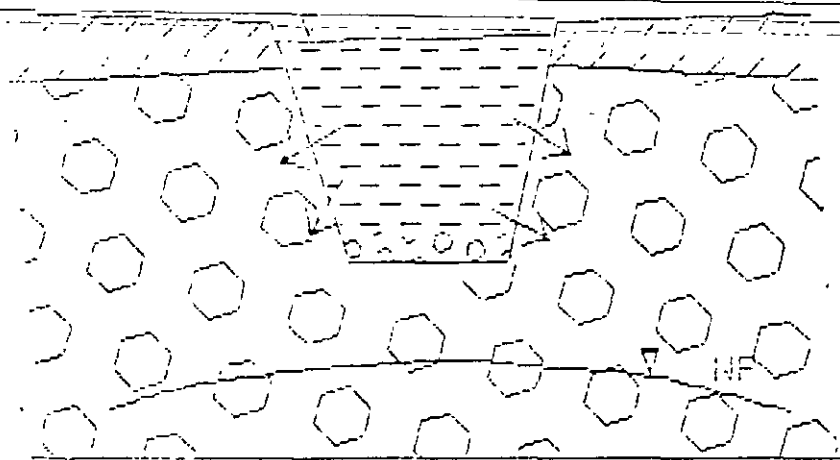


FIG. 36

La recarga artificial por pozos de absorción, además de ser evidentemente más costosa, presenta más problemas en el manejo previo del agua a infiltrar. Como en este caso el agua llegará directamente al acuífero, esta deberá ser previamente tratada. El tratamiento

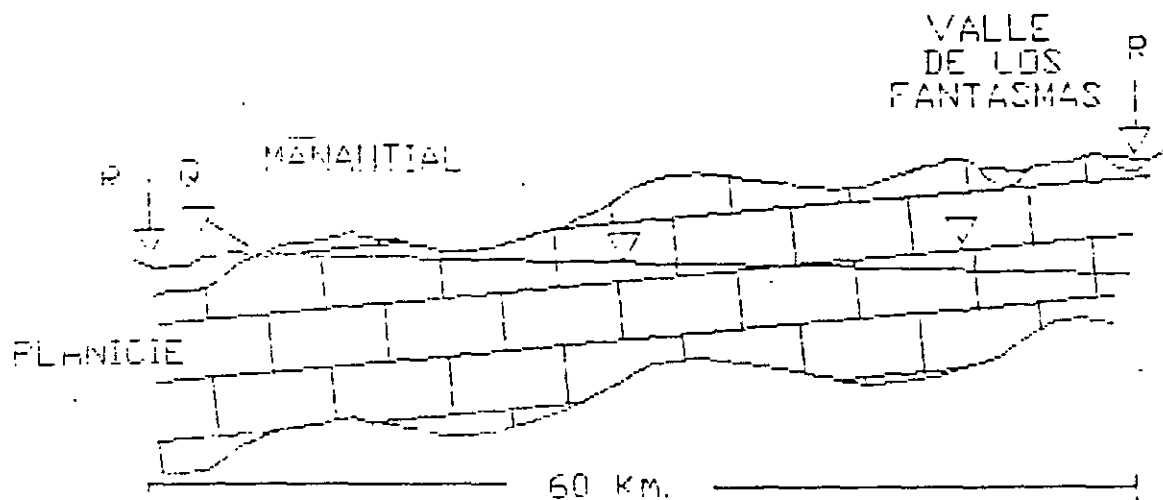


FIG. 34

1.8.1. ZONAS DE RECARGA INDUCIDA

En áreas de irrigación extensas se induce una recarga vertical por reinfiltración de la lámina de agua aplicada al riego del cultivos y por la infiltración de la red de canales sin revestimiento (fig.35). Un ejemplo ocurre en el Valle del Mezquital.

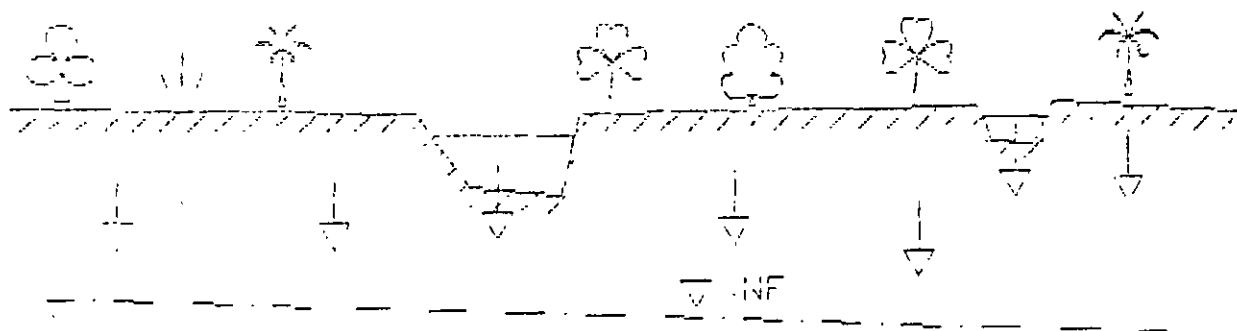


FIG. 35

Existe otro tipo de recarga inducida de acuíferos, llamada Recarga Artificial. En esta caso el hombre controla y maneja el agua de escurrimientos para introducirla en el acuífero. La elección del sitio o zonas de recarga artificial se basa en dos factores fundamentales que son las características físicas e hidrodinámicas del acuífero que se pretende alimentar y del tipo de agua que se va a introducir. Otros factores complementarios cuando la recarga se realizara sobre la superficie y que condicionaran también la recarga son la topografía, la cubierta de suelo, la naturaleza de las rocas en superficie, la pendiente del terreno y la profundidad del nivel de saturación.

consiste esencialmente en eliminar en lo posible los sólidos en suspensión y someterla a un proceso de eliminación de bacterias. En los casos en que la depuración bacteriológica no se haya hecho eficientemente, en poco tiempo la proliferación de colonias bacterianas es suficiente para formar una costra que sella las ranuras de la tubería de ademe. El control de la temperatura del agua que se inyectará también tiene relevancia, ya que a diferentes temperaturas entre el agua del acuífero y de recarga, provoca la precipitación de sales en la vecindad del pozo con los mismos resultados de obstrucción de las ranuras.

Otro aspecto muy importante es la profundidad al nivel del agua. mientras mas grande sea esta longitud, la columna de agua dentro del pozo tendrá mayor presión de entrada hacia el acuífero. Los siguientes esquemas ilustran pozos libres y confinados (fig. 37).

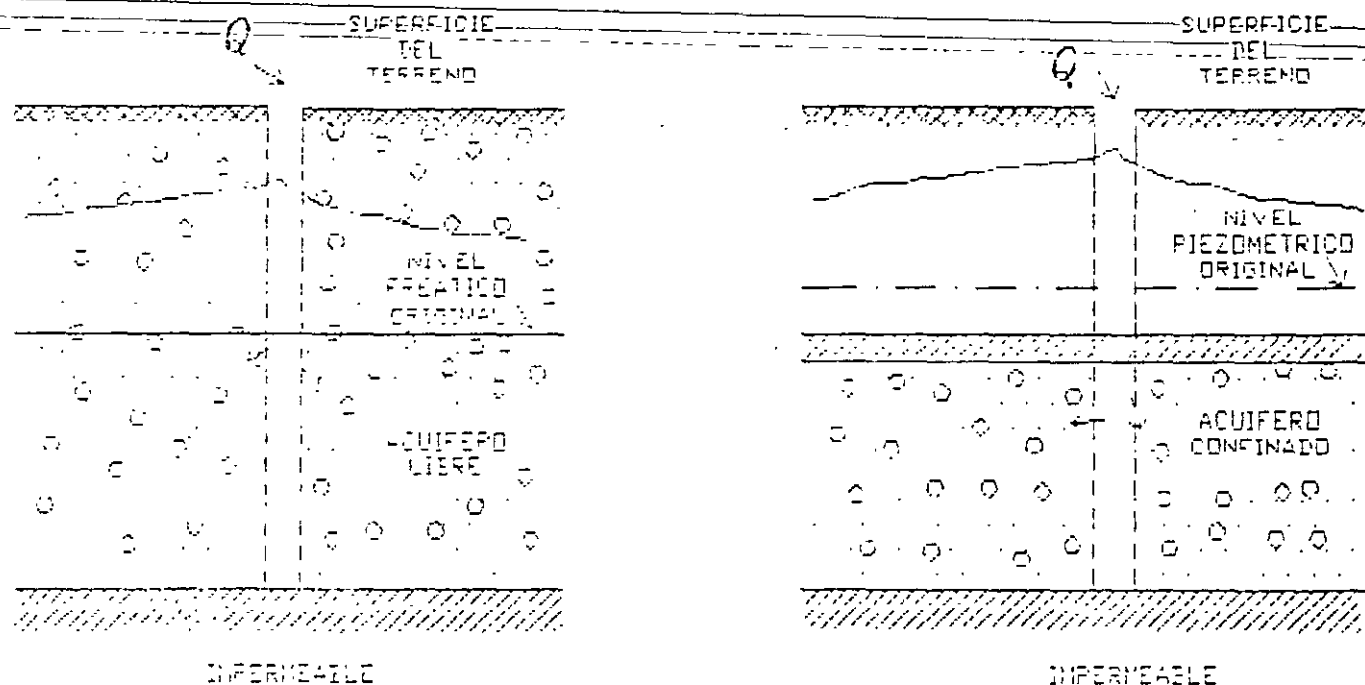


FIG. 37

Experiencias de este tipo se empezaron a tener en México en la década de los sesenta por la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México de la Secretaría de Recursos Hidráulicos. En esa época se construyeron dos pozos de absorción cerca de la Presa Tarango en la parte alta de Mixcoac. La profundidad al nivel estático era en ese entonces de 90m, lo que representaba una presión muy significativa para introducir agua al acuífero.

Actualmente se están reiniciando este tipo de trabajos con el fin de optimizar nuestros recursos hidráulicos subterráneos.

1.8.2. ZONAS DE DESCARGA

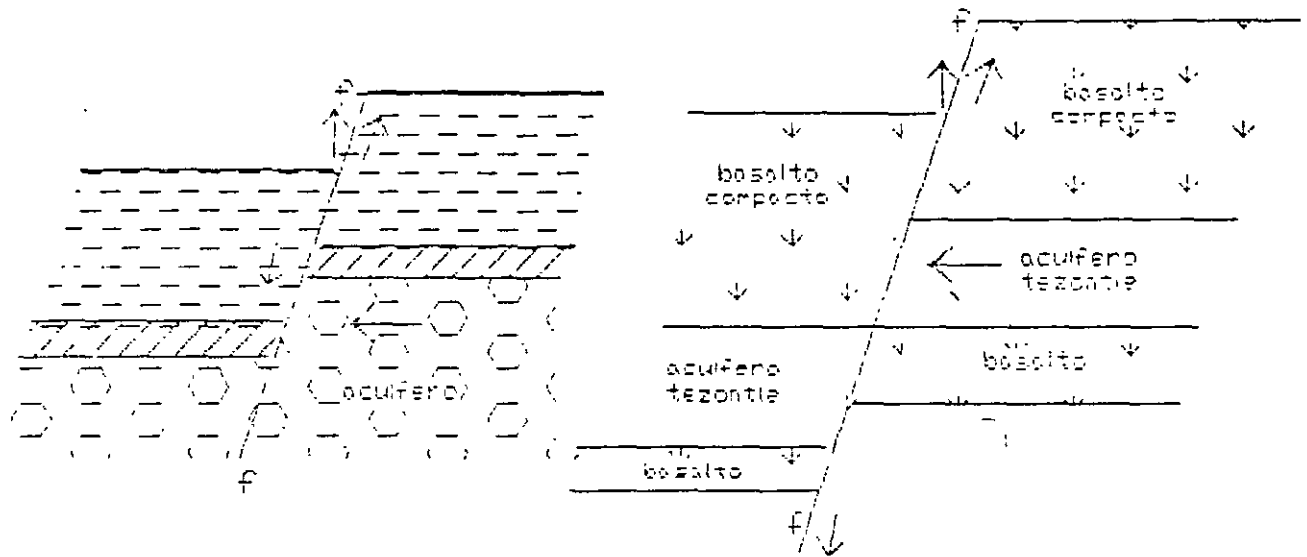
Las zonas de recarga y descarga guardan una estrecha relación con la topografía, ya que el agua subterránea se desplaza desde los niveles energéticos más altos a los más bajos, por lo que su energía procede fundamentalmente de las diferencias de nivel y de presión.

La descarga de los acuíferos ocurre de tres maneras posibles: descarga natural por manantiales, evapotranspiración y tectónicos. De entre las diversas clasificaciones de manantiales, se toman para estas notas, algunas figuras de Dr. Issar, que correlacionan la descarga por manantiales con los aspectos topográficos y geológicos mencionados.

En las Fig. 38 y 39 se esquematizan diversos tipos de manantiales.

MANANTIALES ORIGINADOS POR FALLAS

MANANTIALES ASCENDENTES



MANANTIAL EN PLIEGUES FALLADOS

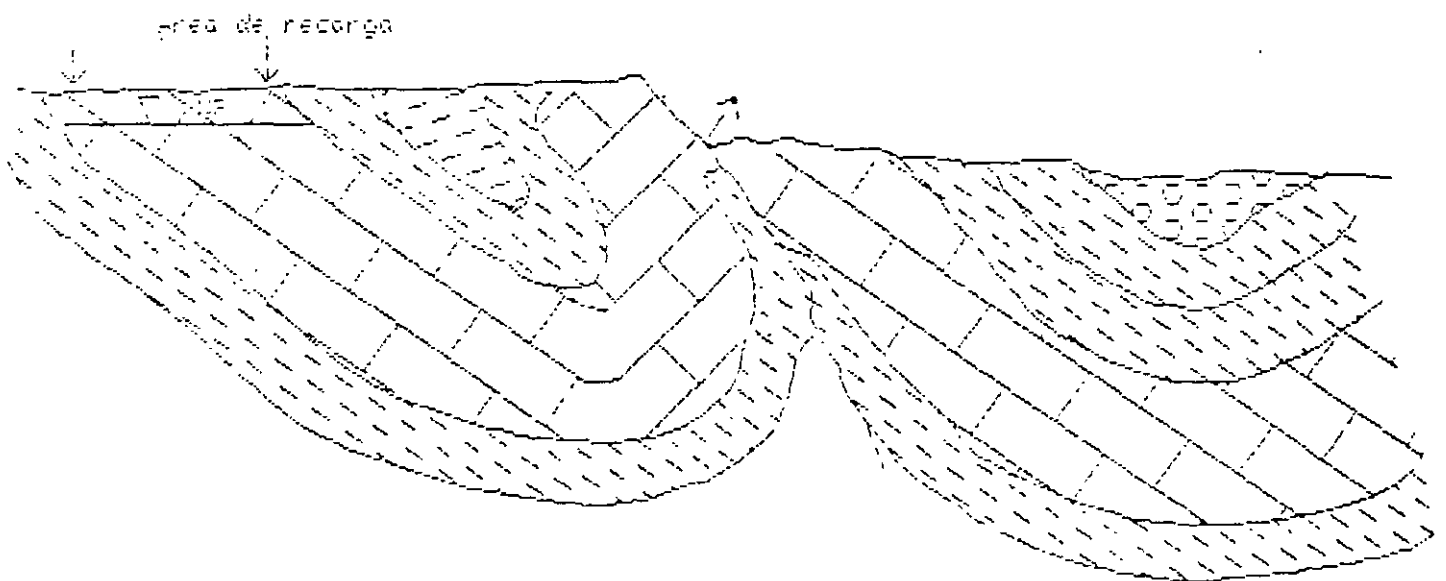
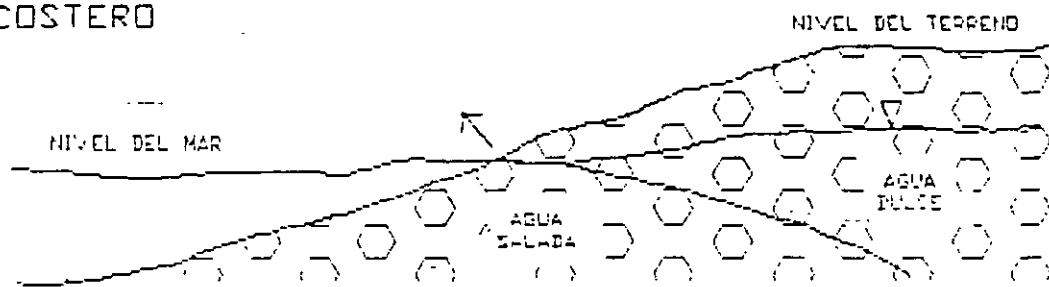


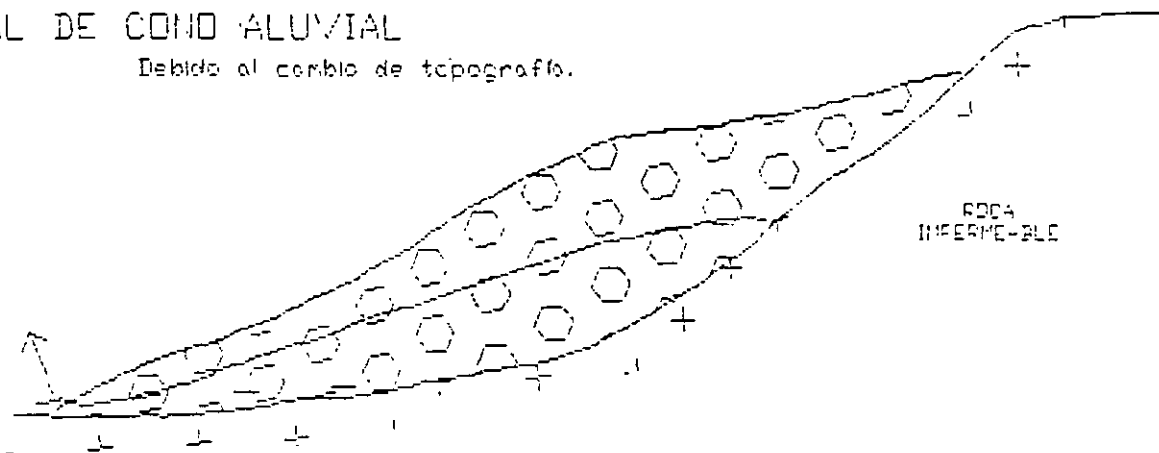
FIG. 32

MANANTIAL COSTERO



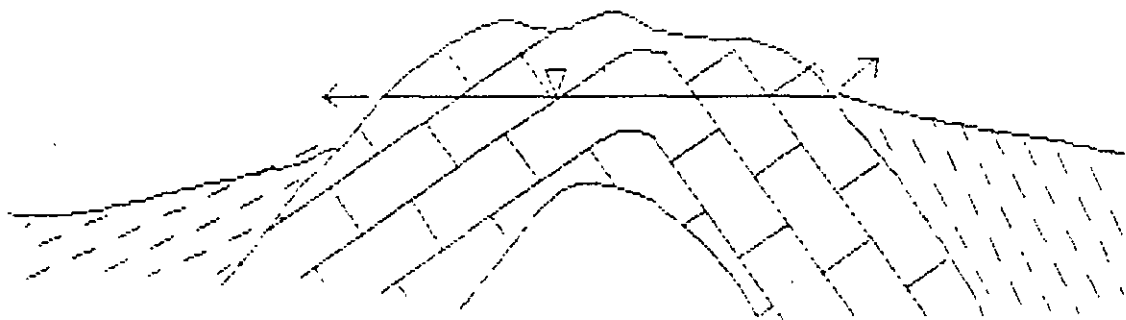
MANANTIAL DE CONDO ALUVIAL

Debido al cambio de topografía.



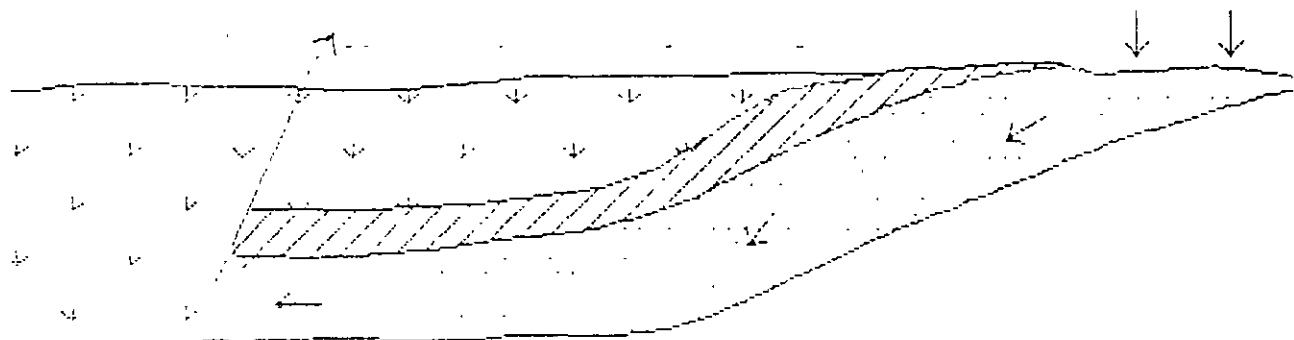
MANANTIALES EN ANTICLINALES

Se forma en algunos puntos de los flancos de la estructura en contacto con rocas impermeables.



MANANTIALES TERMOMINERALES DE LINEA DE FALLA

La fuente de agua de tales manantiales es la precipitación de agua de lluvia ocurrida en las áreas de captación e infiltración, los cuales pueden encontrarse alejados o cercanos al área de afloramiento.



1.9. CARACTERISTICAS DEL AGUA SUBTERRANEA

1.9.1. CICLO HIDROLOGICO

El agua en la naturaleza se mantiene en un constante proceso de movimiento ciclico. La energia solar y la gravedad terrestre son los principales factores que originan los fenomenos de precipitación, evaporación, escurrimiento e infiltración, que en conjunto constituyen lo que se conoce como *CICLO HIDROLOGICO* (fig. 40).

El ciclo hidrológico es la descripción simplificada de los mecanismos que sigue el agua para desplazarse de un lugar a otro del planeta, en un continuo movimiento que involucra prácticamente a la totalidad del agua de la Tierra.

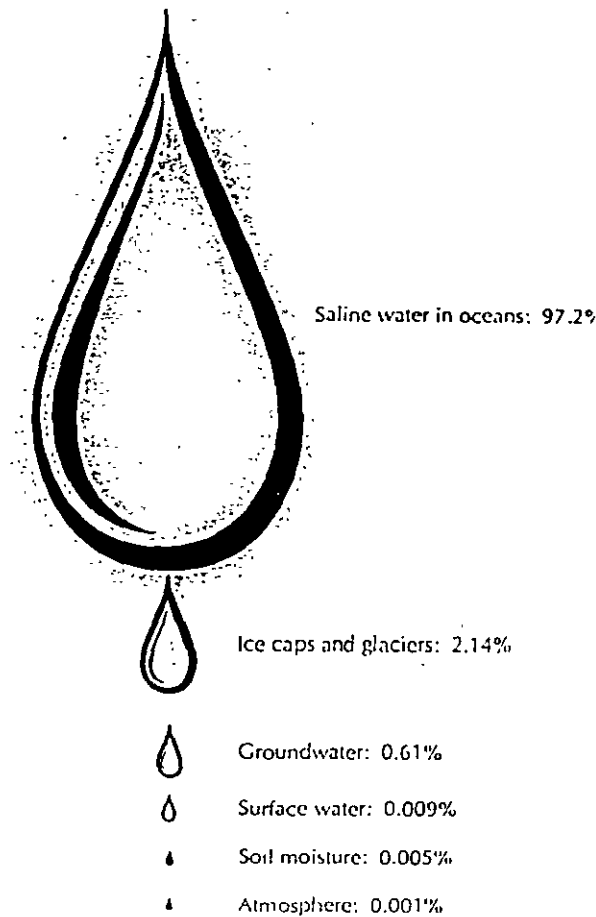
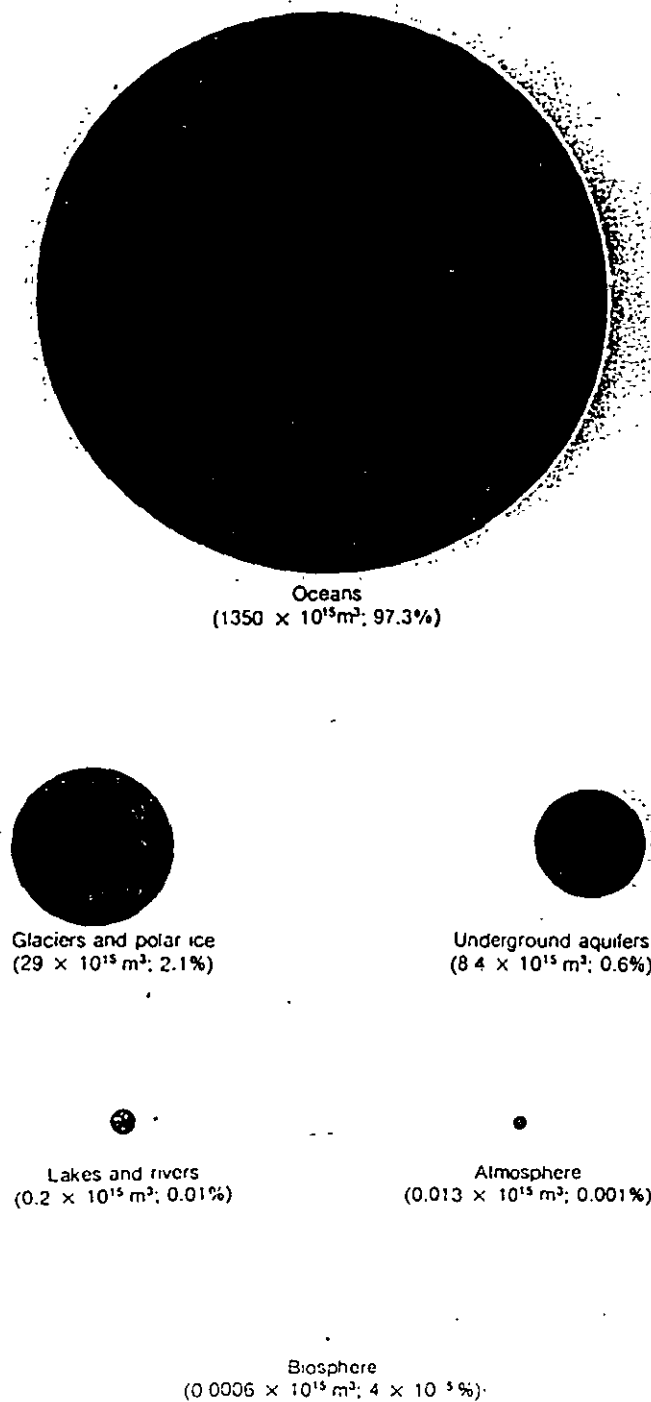
Durante la etapa de diferenciación de la Tierra, el agua se almacena originalmente en el interior de la misma, atrapada en las moléculas de los silicoaluminatos hidratados que formaban la gran mayoría de las rocas. Al aumentar la temperatura en la tierra tuvo lugar la fusión parcial de estas rocas y se inició la liberación ~~acarreó del agua hacia la superficie con el magma fundido.~~ Cuando las lavas alcanzaron la superficie, gran cantidad de agua en forma de vapor caliente se desprendió y llenó los océanos en los primeros 1.000 millones de años de la historia de la Tierra. Aunque en el presente, el vulcanismo contribuye con emisión de agua, CO₂ y otros gases a la atmosfera, los volúmenes de agua constituyen una mínima parte del ciclo hidrológico.

Una gran cantidad de agua que llega a la superficie de la Tierra a formar parte de los ríos, lagos y océanos, vuelve a la atmósfera debido a la transpiración de las plantas; a la interacción de ambos fenomenos - evaporación y transpiración - se le conoce como evapotranspiración y actúa en gran medida principalmente en zonas de clima tropical, donde el calor del sol que llega a la superficie terrestre es alto y la vegetación abundante.

La mayor parte del vapor de agua incorporado a la atmósfera en forma de masa de aire, se reúne en gotas de agua o cristales de hielo que se precipitan sobre los océanos o sobre la superficie hasta llegar a los océanos, donde gran cantidad de agua se evapora nuevamente, reiniciándose en esta fase el ciclo hidrológico.

La cantidad de agua que se infiltra al subsuelo para formar el agua subterránea, es solo una pequeña parte del volumen total que interviene en el ciclo hidrológico.

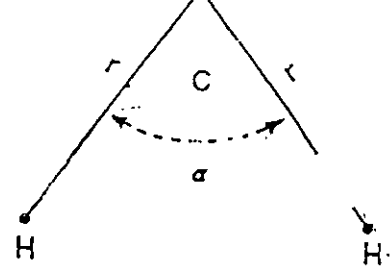
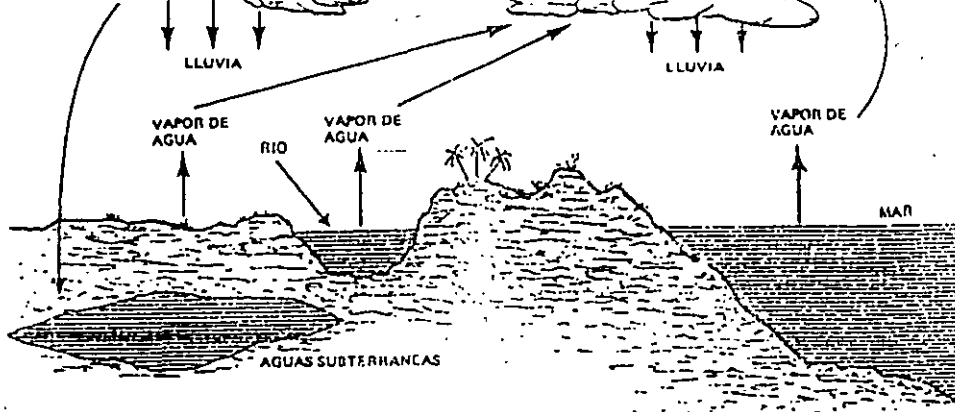
Esto se debe a que la infiltración esta controlada por diversos factores fisiográficos y geológicos tales como el relieve del terreno, la permeabilidad de las rocas, tipo de suelos, temperatura ambiente, cobertura vegetal y modo de ocurrencia de la lluvia en el tiempo y en el espacio. En la figura 40 se muestra de manera esquemática la interacción de los fenómenos que integran el ciclo hidrológico.



Distribution of the world's water supply.

Figure 7-18

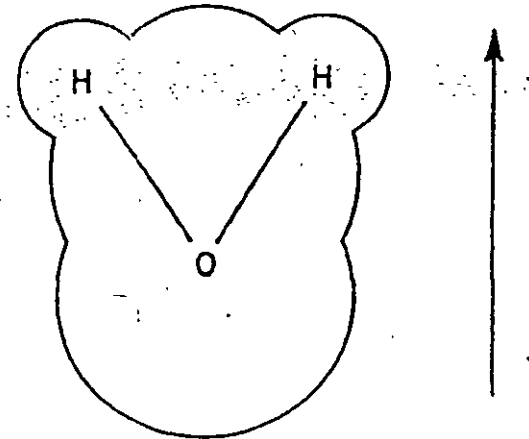
Distribution of water on the Earth. The amount of water present in various natural reservoirs is represented in terms of comparative spherical volumes. The content of each reservoir is given in cubic meters and as a percentage of the whole. Although there is an enormous quantity of groundwater, much of it may be unusable because of its high concentration of dissolved solids. [From "The Control of the Water Cycle," by J. P. Peixoto and M. Ali Kettani. Copyright © 1973 by Scientific American, Inc. All rights reserved.]



Representación simple de la molécula de agua

Distribución del agua dulce en la Tierra

Antártico	$2.5 \text{ a } 2.9 \times 10^7 \text{ Km}^3$
Groenlandia	$2.6 \times 10^6 \text{ Km}^3$
Grandes lagos del mundo	$1.2 \times 10^5 \text{ Km}^3$
Baikal 26.000 Km ³	$2.6 \times 10^4 \text{ Km}^3$
Tanganika 20.000 Km ³	$2.0 \times 10^4 \text{ Km}^3$
Nyasa 13.000 Km ³	$1.3 \times 10^4 \text{ Km}^3$
Superior 12.000 Km ³	$1.2 \times 10^4 \text{ Km}^3$
Todos los ríos de la Tierra	$1.2 \times 10^3 \text{ Km}^3$
Aguas subterráneas	$4.1 \times 10^6 \text{ Km}^3$ hasta 1 Km. de profundidad



Momento eléctrico resultante en la molécula de agua

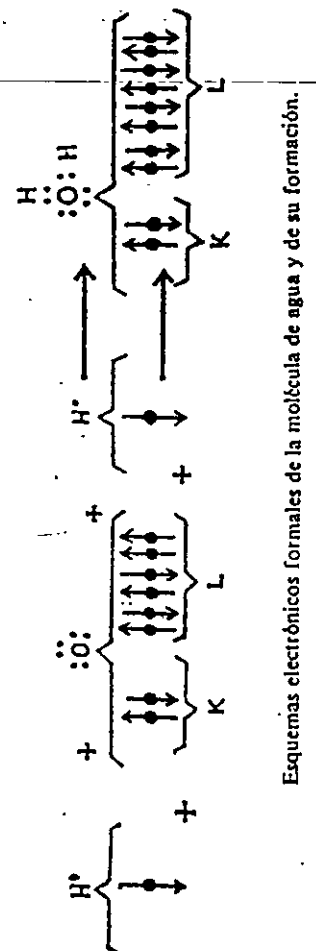
Propiedades del dihidrol y trihidrol

	UNIDAD	(H ₂ O) ₂	(H ₂ O) ₃
Densidad	g/cm ³	1.0894	0.88
Tensión superficial	dina/cm	78.3	73.3
Temperatura crítica	°C	368	538
Calor específico	caloría/g °C	0.8	0.6
Calor latente de fusión	cal/g	—	16
Calor latente de vaporización	cal/g	257.	250
Viscosidad	10 ⁻³ poise	3.0	38.1
2(H ₂ O) = (H ₂ O) ₂ + 6.8 kcal.			
3(H ₂ O) ₂ = 2(H ₂ O) ₃ + 19.1 kcal.			

Contenido de agua en el hombre y algunos de sus tejidos

	en peso
Hombre adulto	65 - 70
Plasma, saliva, jugos gástricos	90 - 99.5
Tejido nervioso	84
Músculos	77
Hígado	73
Piel	71
Tejido adiposo	30

Fuente?



Esquemas electrónicos formales de la molécula de agua y de su formación.

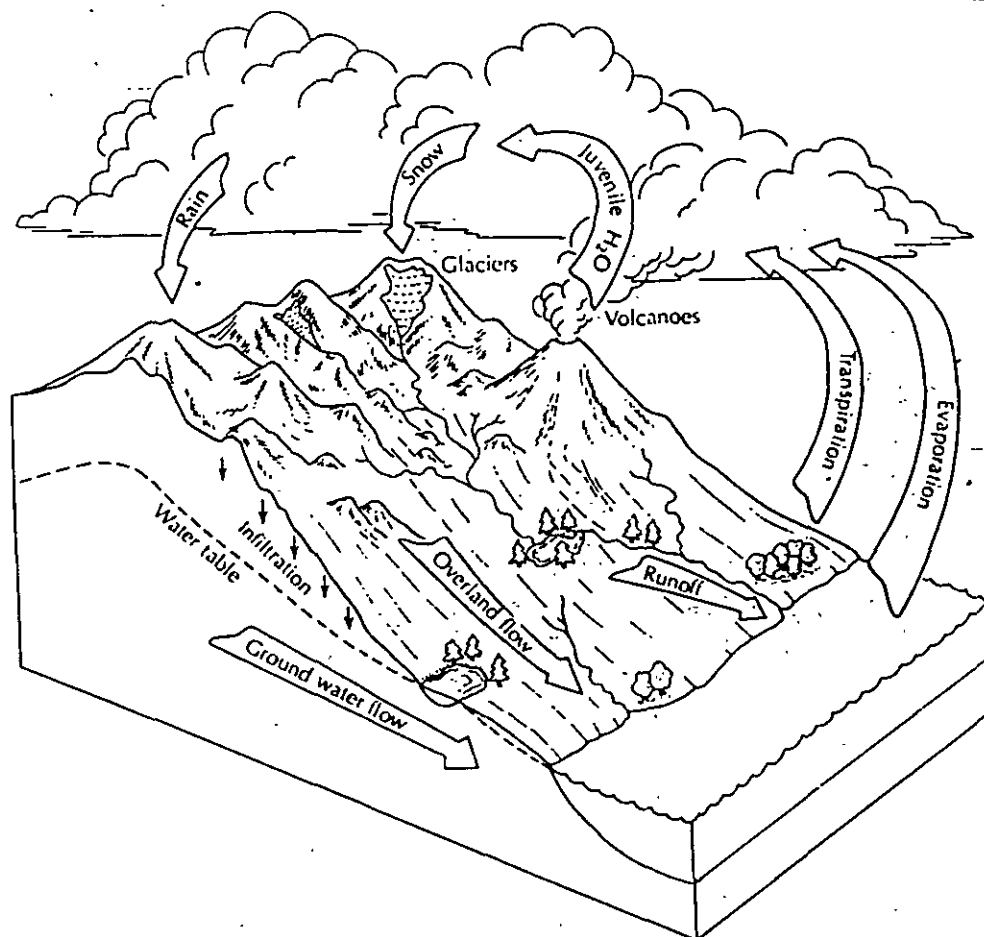


FIGURE 1.4 The hydrologic cycle.

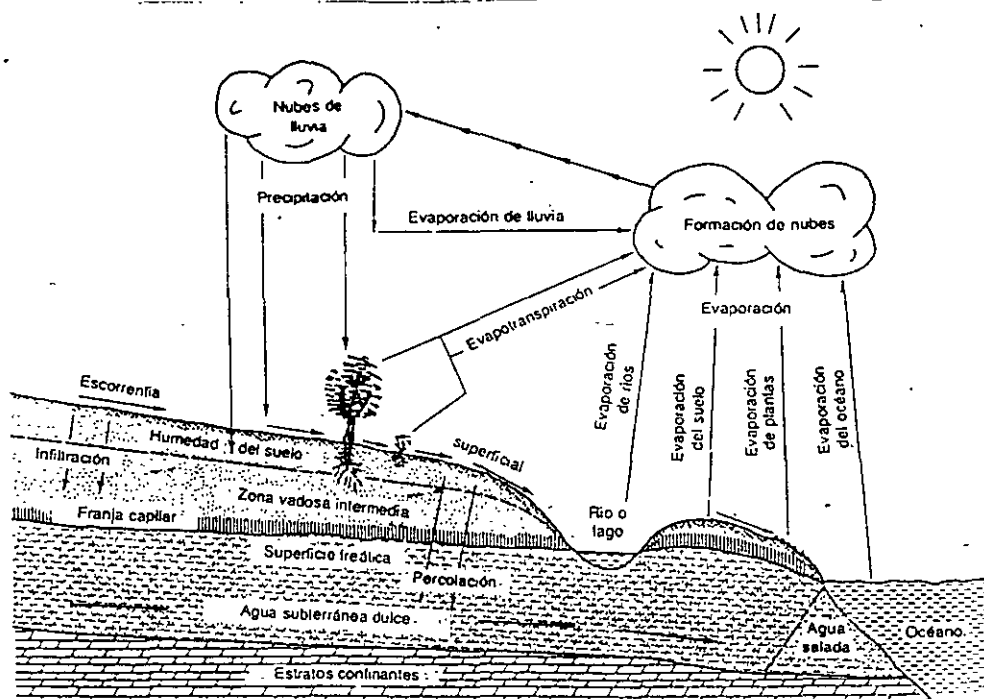


Fig. 8: Diagrama esquemático del ciclo hídrico de la tierra — ciclo hidrológico.

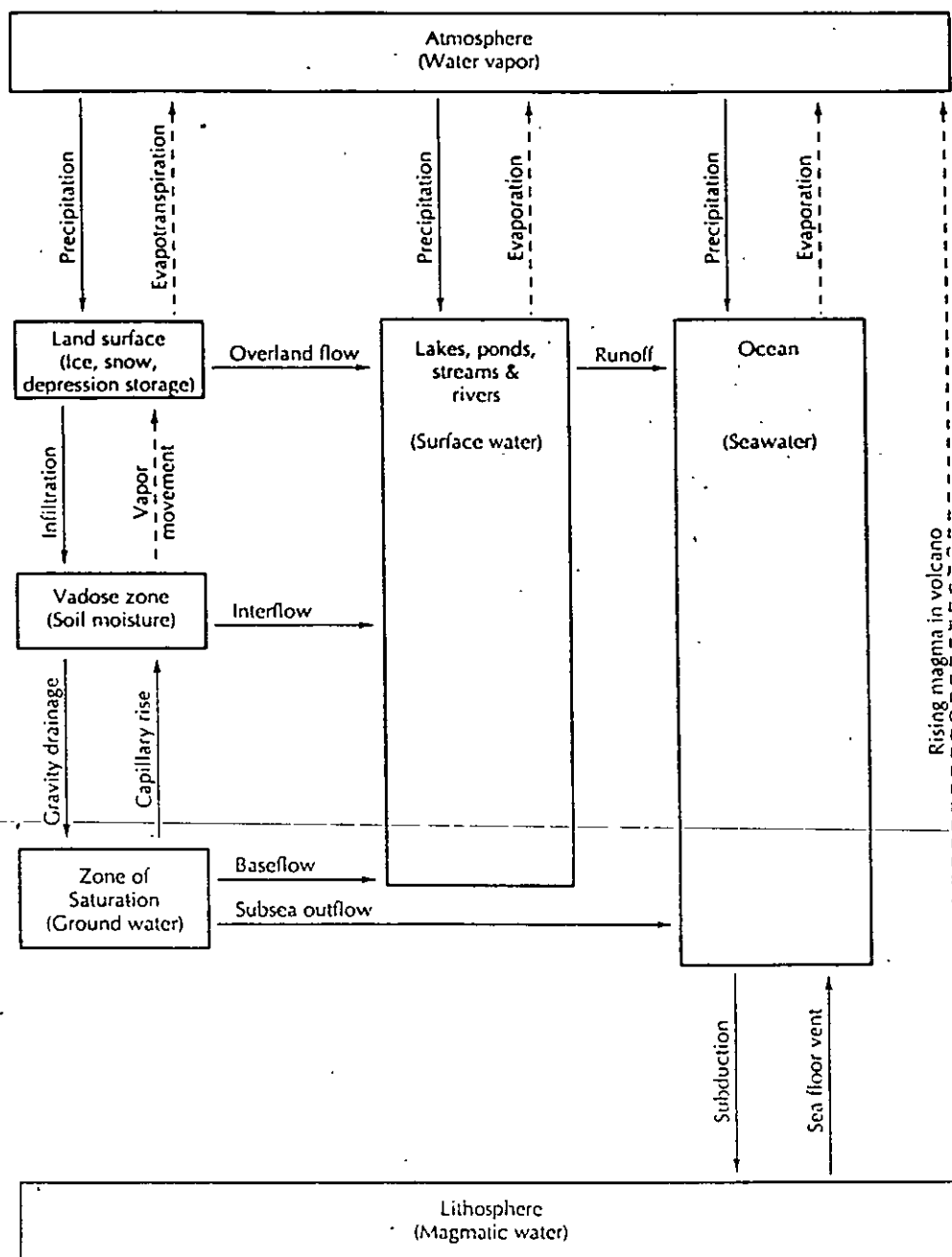


FIGURE 1.5 Schematic drawing of the hydrologic cycle. Movement of liquid water is shown with a solid line and movement of water vapor is shown with a dashed line.

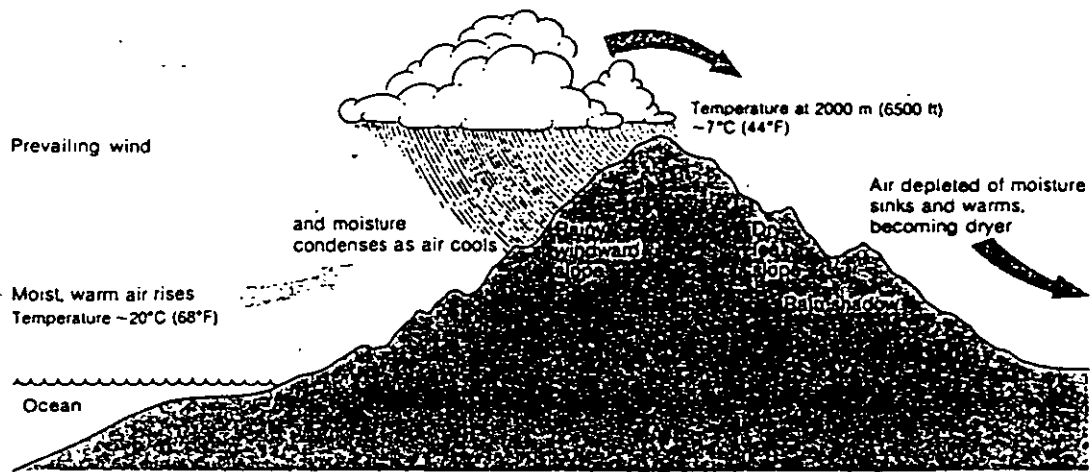


Figure 7-7

A mountain range may produce a rain shadow on its lee slope by forcing warm, moist air to rise with a prevailing wind from the ocean. The rising air cools,

causing precipitation on the windward slope and leaving the lee slope dry.

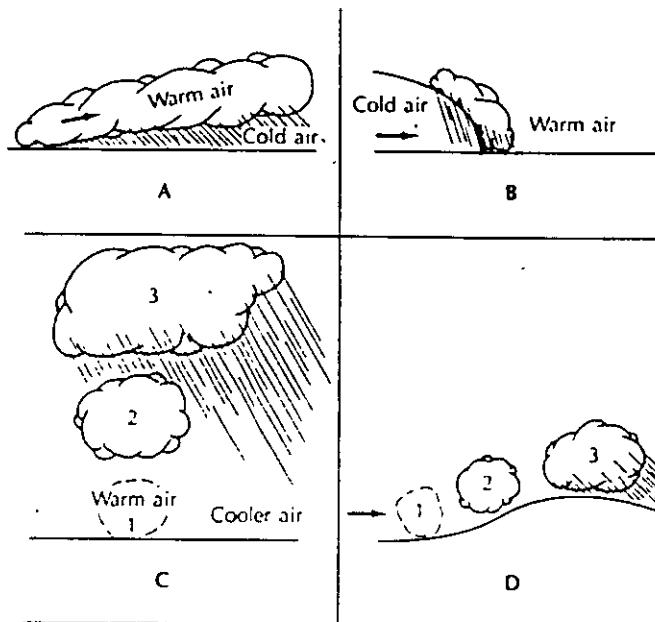
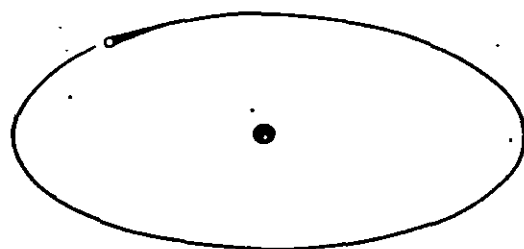


FIGURE 2.4 Precipitation caused by adiabatic lifting of an air mass may be the result of the following activity: A. A warm front pushing over a cold front. B. A cold front colliding with a warm front. C. Uneven heating near the surface causing a warm air mass to rise convectionally. D. Orographic lifting caused by prevailing winds blowing over a topographic high.



Hidrógeno |

FIG. 2-2

Diagrama esquemático de un átomo de hidrógeno formado por un protón y un electrón. Este es el átomo más simple.

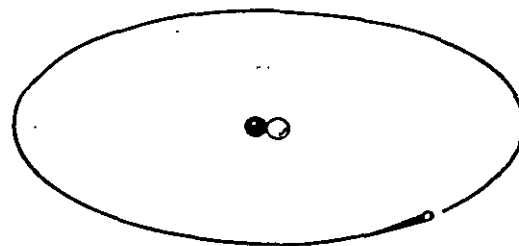
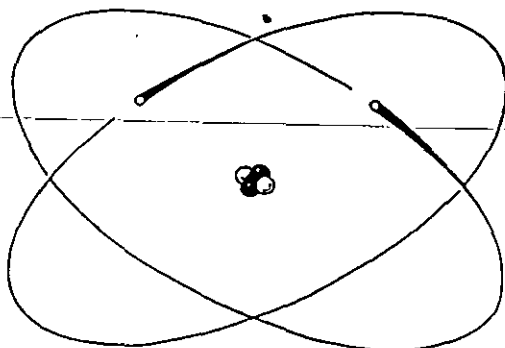


FIG. 2-4

Diagrama esquemático del deuterio, un isótopo del hidrógeno formado por la adición de un neutrón al núcleo. Tiene un número de masa de 2.

22 MATERIA Y ENERGIA



Helio

FIG. 2-3

Representación diagramática de un átomo de helio. El núcleo consta de dos protones y dos neutrones y, consecuentemente, tiene un número de masa de 4. Hay dos electrones (cargas negativas) que equilibran las cargas positivas de los dos protones. Como tiene dos protones en el núcleo, a este átomo le corresponde el N° 2 en la tabla de los elementos. El símbolo He^4 indica: número 2 en la tabla de los elementos, He el nombre de Helio, y 4 el número de masa. El núcleo de helio (2 protones + 2 neutrones) sin ningún electrón acompañante, es llamado algunas veces "partícula alfa".

isótopos. Cada elemento tiene formas que, aunque esencialmente idénticas química y físicamente, tienen masas diferentes. Tales formas son los isótopos, del griego iso, "igual" y topos, "lugar", puesto que, teniendo cada forma el mismo número de protones en el núcleo que las otras, toman la misma colocación en la tabla de los elementos. Los isótopos presentan diferencias de masa como consecuencia de las diferencias en el número de neutrones de sus núcleos. Por ejemplo, el hidrógeno con un protón y sin neutrones en su núcleo, tiene un número de masa de 1. En presencia de un neutrón, el átomo es un isótopo del hidrógeno con un número de masa de 2, y se llama *deuterio* (ver la fig. 2-4). Todos los elementos tienen isótopos (ver el apéndice A).

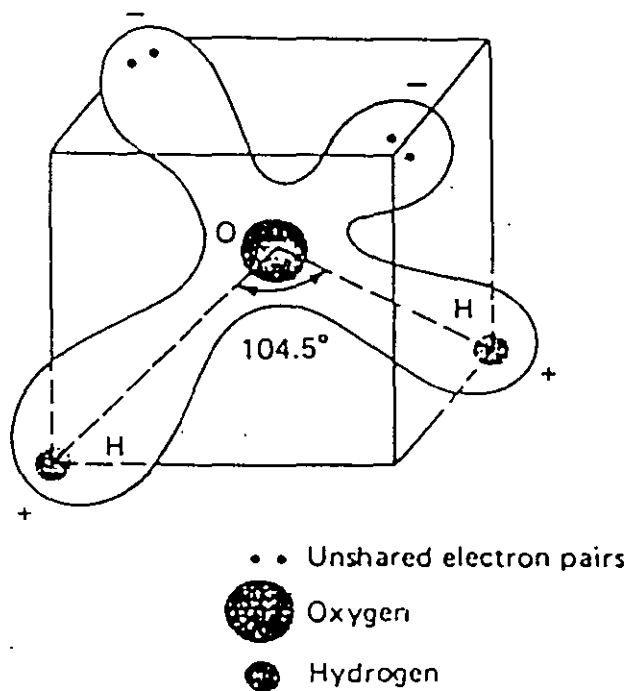


FIGURE 1.2.3 The tetrahedral structure of a water molecule. (Source: *Horne, R. A.*, "Marine Chemistry," © 1969 by John Wiley and Son, Inc. Reprinted by permission of the publisher.)

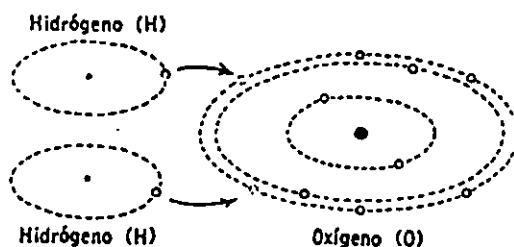


FIG. 2-8

Dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno se unen para formar el agua, H_2O , mediante una ligadura covalente. En esta ligadura, los electrones del hidrógeno desempeñan en cierto sentido, un doble papel, ocupando los dos lugares vacantes en la concha exterior del oxígeno, a la vez que conservan su distancia normal del núcleo de hidrógeno. El resultado es la formación de una molécula de agua, la unidad más pequeña con las propiedades de ese compuesto.

FIG. 2-10

Mecanismo mediante el cual el agua disuelve la sal. Los dipolos de agua se adhieren a los iones que componen la sal y vencen las atracciones iónicas que mantienen unida a la sal como un sólido. Cada ión de Na^+ y Cl^- es entonces "escortado" por cierto número de dipolos de agua para ser incorporado al interior del cuerpo del líquido.

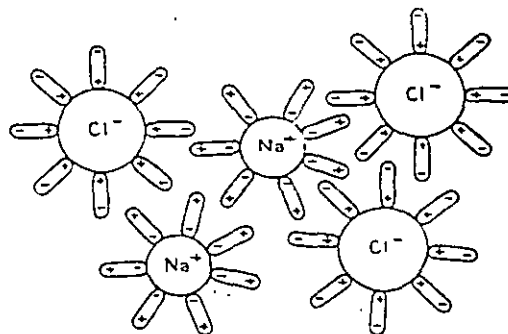
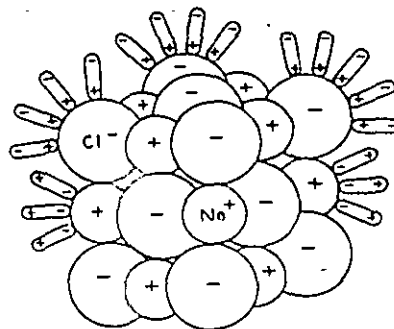


FIG. 2-9

Carácter dipolar del agua.
El oxígeno ha ganado, en efecto, 2 electrones y con ello una doble carga negativa, mientras que los átomos de hidrógeno han perdido cada uno los servicios efectivos de un electrón y representan cargas positivas. Así, la molécula de agua actúa como una pequeña varilla con una carga positiva en un extremo y una carga negativa en el otro, como se indica en la figura v. Las combinaciones de las moléculas de agua están representadas en c.

ALCANCES DE LA GEOHIDROLOGÍA.

- Delimitación en superficie de áreas permeables e impermeables, y sus características físicas: porosidad, en medios granulares o por fracturas en rocas compactas.
- Funcionamiento hidrogeológico de cuencas.
- Dimensionamiento de acuíferos.
- Ubicación de sitios o áreas para nuevas captaciones de agua subterránea.
- Cálculo de las características hidrodinámicas de los acuíferos.
- Diagnóstico sobre la eficiencia hidráulica de pozos.
- Diagnósticos para rehabilitaciones de pozos.

- Cálculo sobre los volúmenes de recarga en cuencas.
- Cálculo del volumen almacenado.
- Disponibilidad de agua subterránea en cuencas.
- Manejo de los recursos hidráulicos a futuro.
- Determinación de la calidad del agua.
- Identificación de fuentes de contaminación de acuíferos.
- Estudios de impacto ambiental.
- Proyectos de reordenamiento urbano.
- Apoyo en estudios geotécnicos. Edificios, presas, túneles, carreteras....
- Asesoramiento legal en casos de controversia sobre el usufructo del agua.

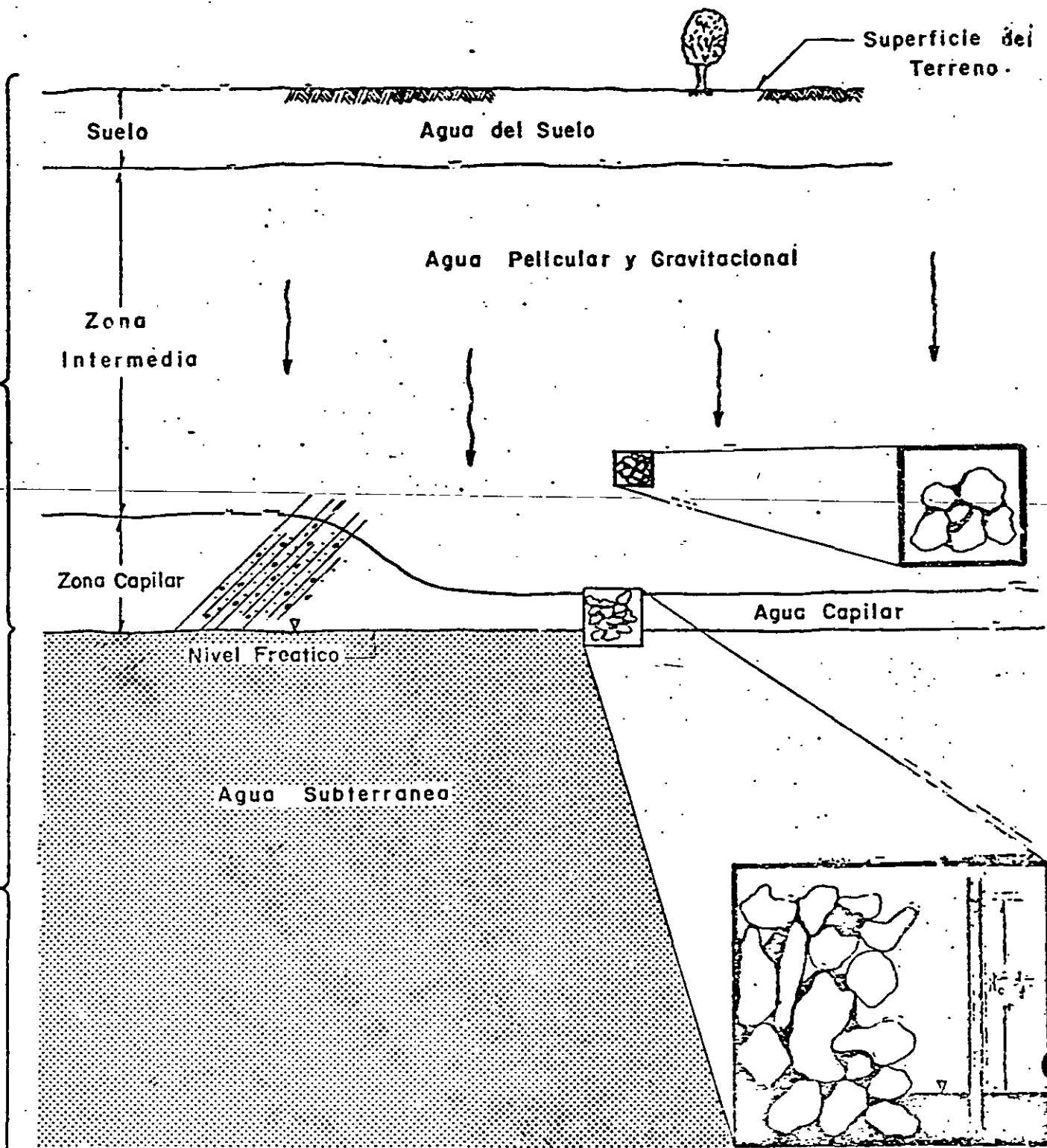
CAMPO DE ACCION

- Sector público : CNA, CFE, DDF, Organismos Operadores Estatales, SRE, SEMARNAP.
- Sector privado : Empresas que prestan servicios al gobierno o a particulares.
- Investigación y docencia : UNAM, IPN, CONACYT

DISTRIBUCION DEL AGUA EN EL SUBSUELO

ZONA DE AERACION

ZONA DE SATURACION



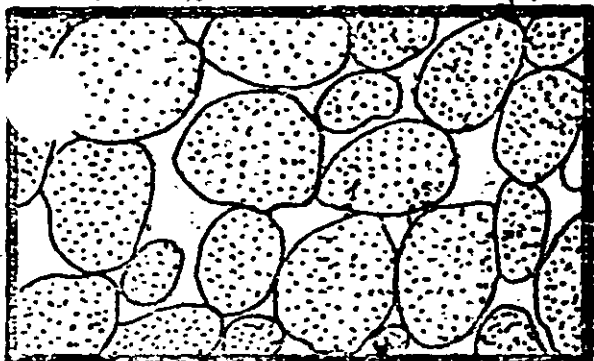
DISTINTOS TIPOS DE INTERSTICIOS Y RELACION ENTRE LA TEXTURA Y LA POROSIDAD DE LAS ROCAS



DEPOSITO SEDIMENTARIO DE GRANULOMETRIA HOMOGENEA Y GRAN POROSIDAD



DEPOSITO SEDIMENTARIO DE GRANULOMETRIA HOMOGENEA CUYA POROSIDAD HA DISMINUIDO POR CEMENTACION DE SUS INTERSTICIOS CON MATERIAS MINERALES.



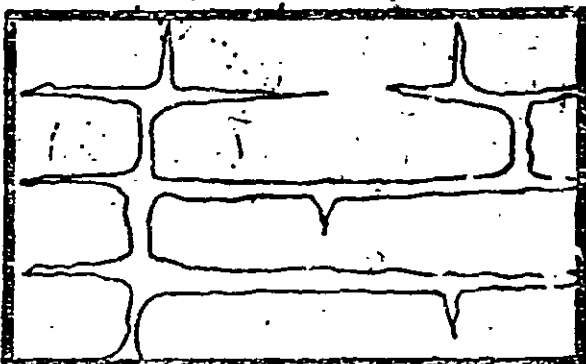
DEPOSITO SEDIMENTARIO DE GRANULOMETRIA HOMOGENIA FORMADO POR ELEMENTOS QUE A SU VEZ SON POROSOS, POR TANTO POROSIDAD MUY ELEVADA



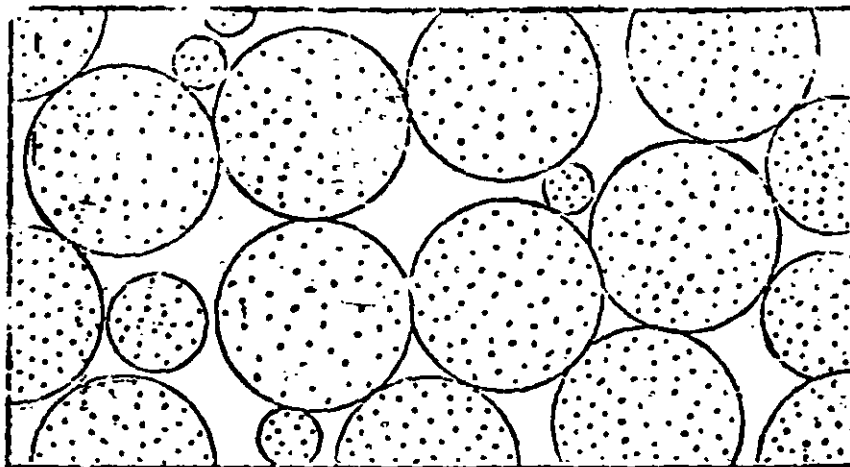
DEPOSITO SEDIMENTARIO DE GRANULOMETRIA HETEROGENEA Y ESCASA POROSIDAD



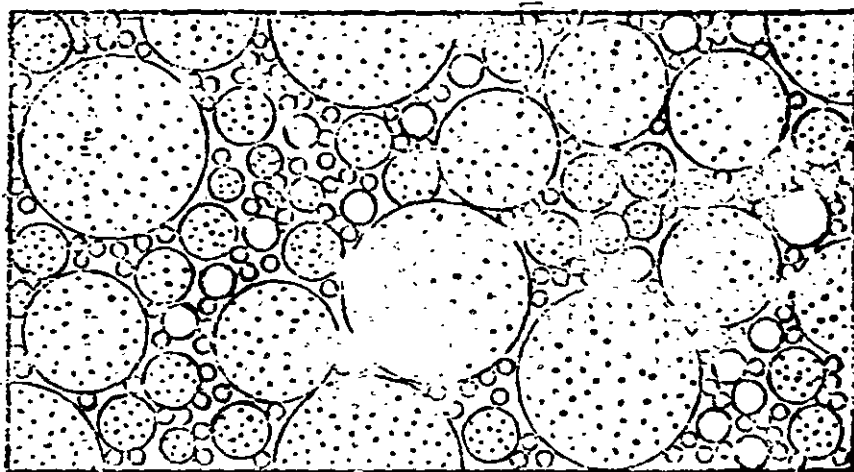
ROCA POROSA POR FRAGMENTACION



ROCA POROSA POR SOLUCION



POROSIDAD 32 %

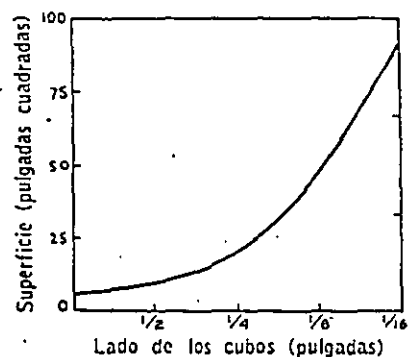


POROSIDAD 17 %

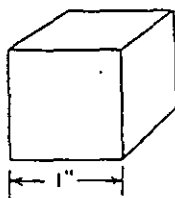
Variación de la porosidad debida al grado de homogeneidad del tamaño de los granos. Los números que figuran al pie de cada dibujo indican el porcentaje de porosidad de la muestra.

FIG. - 3

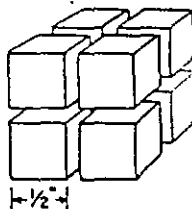
ROCA	POROSIDAD (%)	RENDIMIENTO ESPECIFICO (%)	PERMEABILIDAD (M/SEG)
ARCILLA	40-55	1 - 10	$10^{-10} - 2 \times 10^{-7}$
ARENA	30-40	10 - 30	$10^{-5} - 3 \times 10^{-4}$
GRAVA	30-40	15 - 30	$10^{-4} - 1.3 \times 10^{-3}$
GRAVA Y ARENA	20-35	15 - 25	$10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$
ARENISCAS	10-20	5 - 15	$10^{-8} - 5 \times 10^{-6}$
CALIZA	1-20	9,5 - 5	MUY VARIABLE



1 cubo de 1"
tiene 6 pulg.²
de superficie



8 cubos de 1/2"
tienen 12 pulg.²
de superficie



64 cubos de 1/4"
tienen 24 pulg.²
de superficie

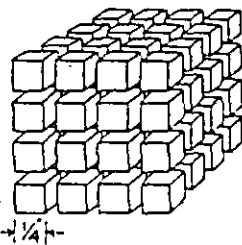


FIG. 7-3

Relaciones entre el volumen, tamaño y superficie de las partículas. En esta ilustración un cubo de un centímetro cuadrado de lado se ha dividido en unidades cada vez más pequeñas.

El volumen permanece constante, pero, a medida que el tamaño de las partículas disminuye, la superficie aumenta. En virtud de que el intemperismo químico está restringido a las superficies, cuanto más finamente se divide un volumen dado de material, mayor será la superficie expuesta a la actividad química y más rápido será el proceso de intemperismo.

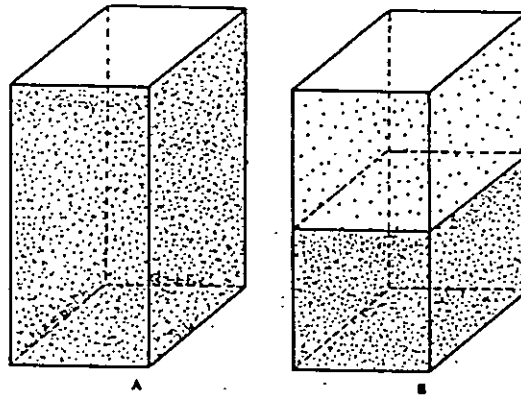


FIGURE 4.8 A. A volume of rock saturated with water. B. After gravity drainage, 1 unit volume of the rock has been dewatered with a corresponding lowering of the level of saturation. Specific yield is the ratio of the volume of water that drained from the rock, owing to gravity, to the total rock volume.

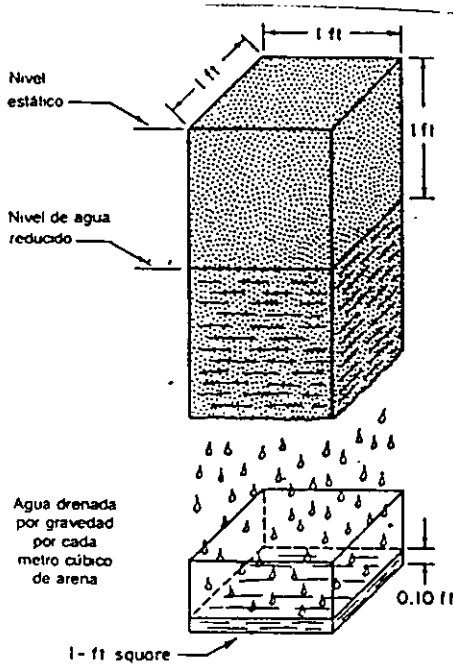


Fig. 23: En el diagrama se visualiza el rendimiento específico de una arena. Su valor en este caso es de 0.10 pies cúbicos de agua, por cada pie cúbico del material acuífero.

TABLE 4.4 Specific yields in percent

Material	Maximum	Specific Yield Minimum	Average
Clay	5	0	2
Sandy clay	12	3	7
Silt	19	3	18
Fine sand	28	10	21
Medium sand	32	15	26
Coarse sand	35	20	27
Gravelly sand	35	20	25
Fine gravel	35	21	25
Medium gravel	26	13	23
Coarse gravel	26	12	22

Source: Johnson (1967).

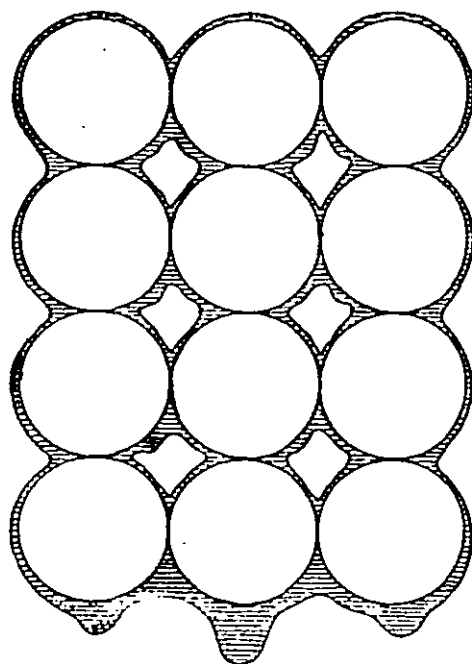


Fig. 368: El agua que ha percolado hasta la zona de aireación, se desplaza en forma de delgadas películas y llena sólo parcialmente los poros.
(Cortesía del U.S. Geological Survey)

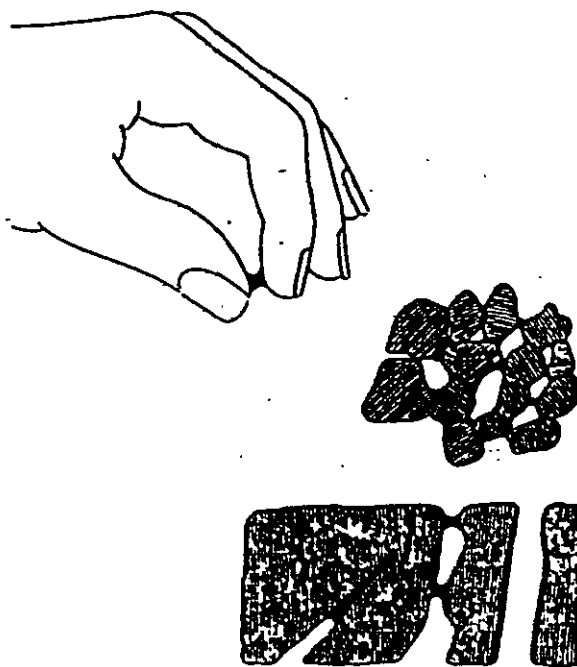


FIG. 12-1

La gota de agua que se sostiene entre dos dedos ilustra la atracción molecular que mantiene el agua colgada en la zona de acreación. La tensión superficial del agua es lo suficientemente grande para coltar su descenso hacia la zona de saturación.

DIFERENTES TIPOS DE ACUIFEROS

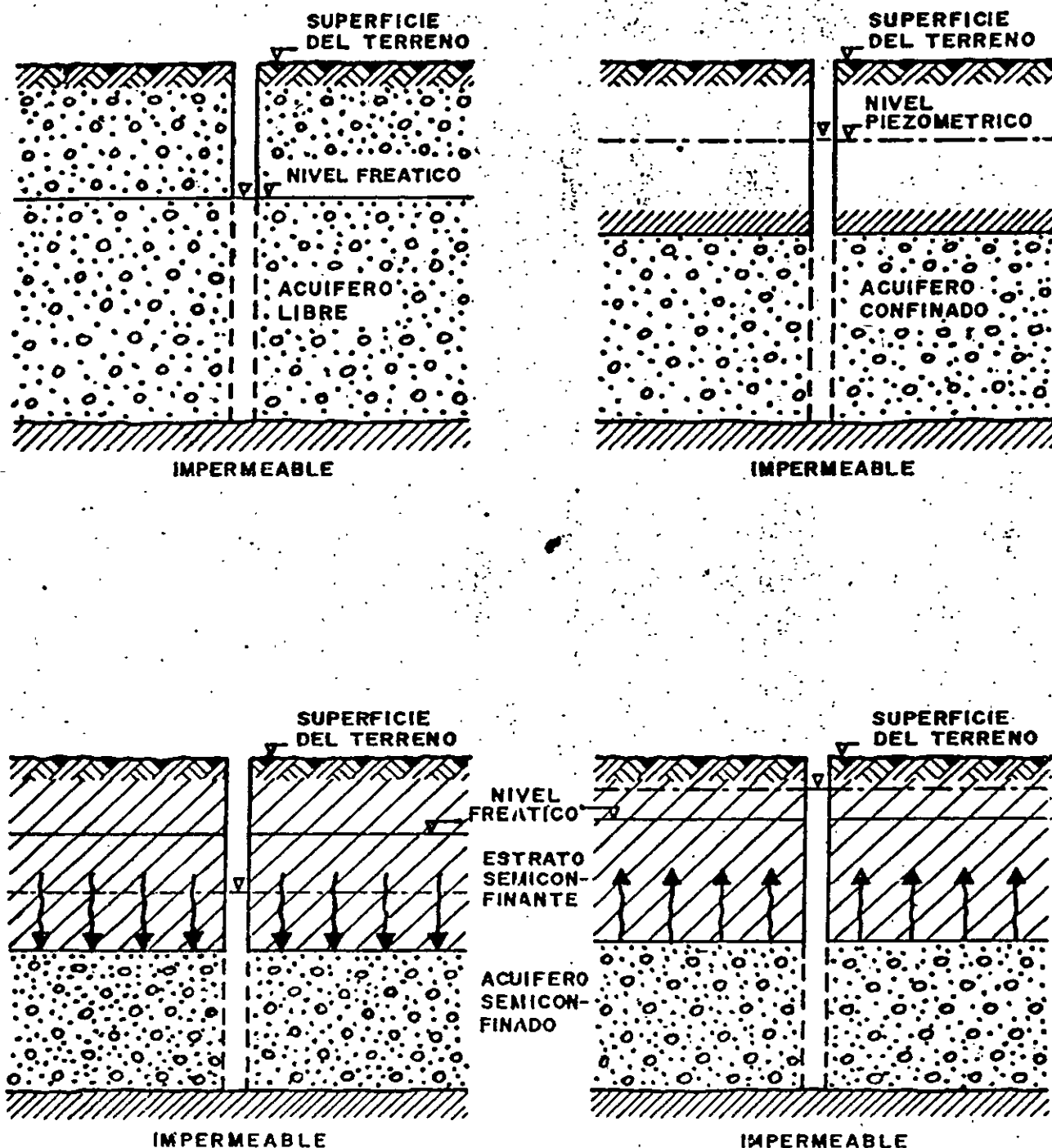
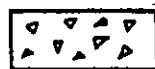
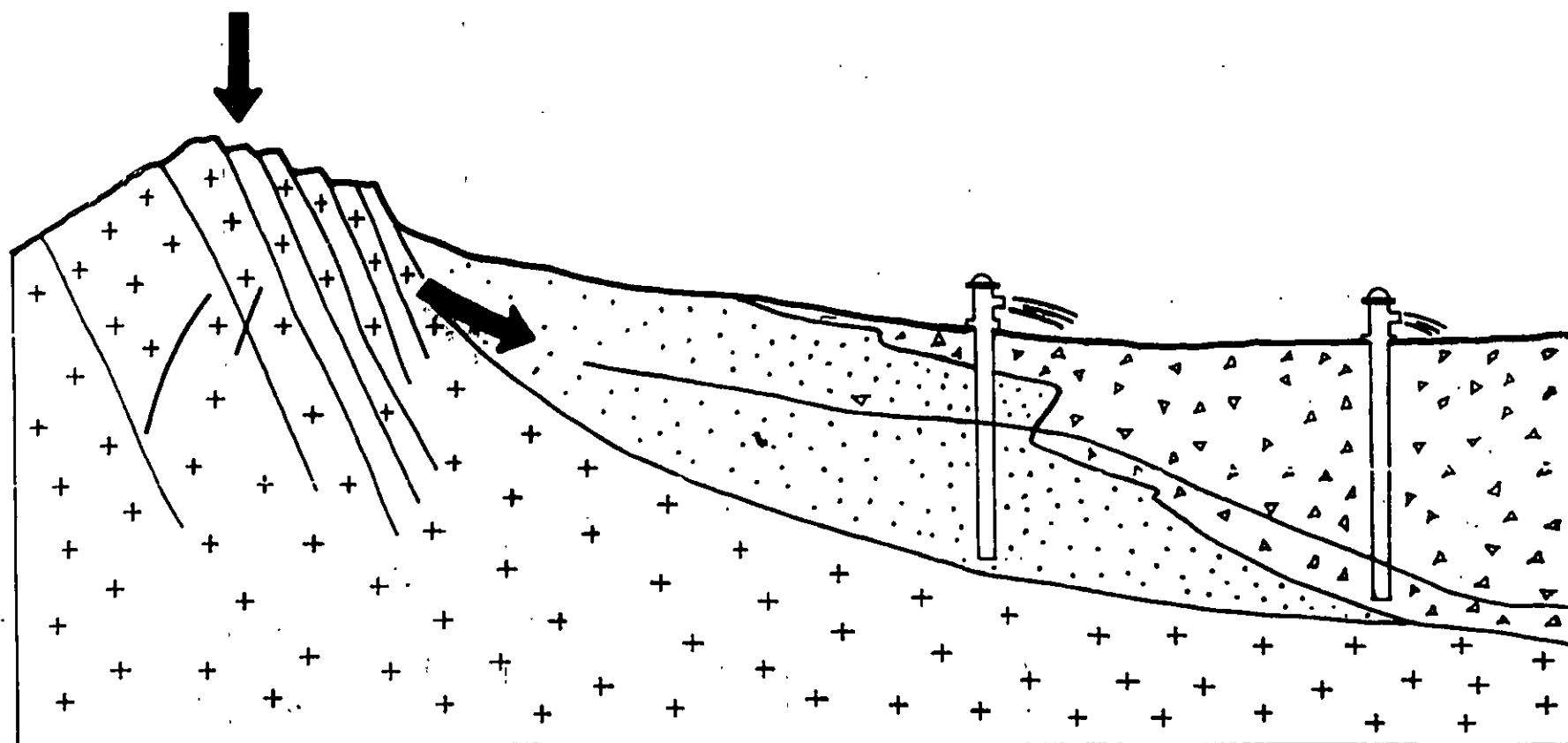
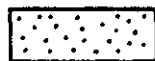


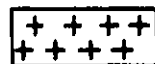
FIG. No. 2



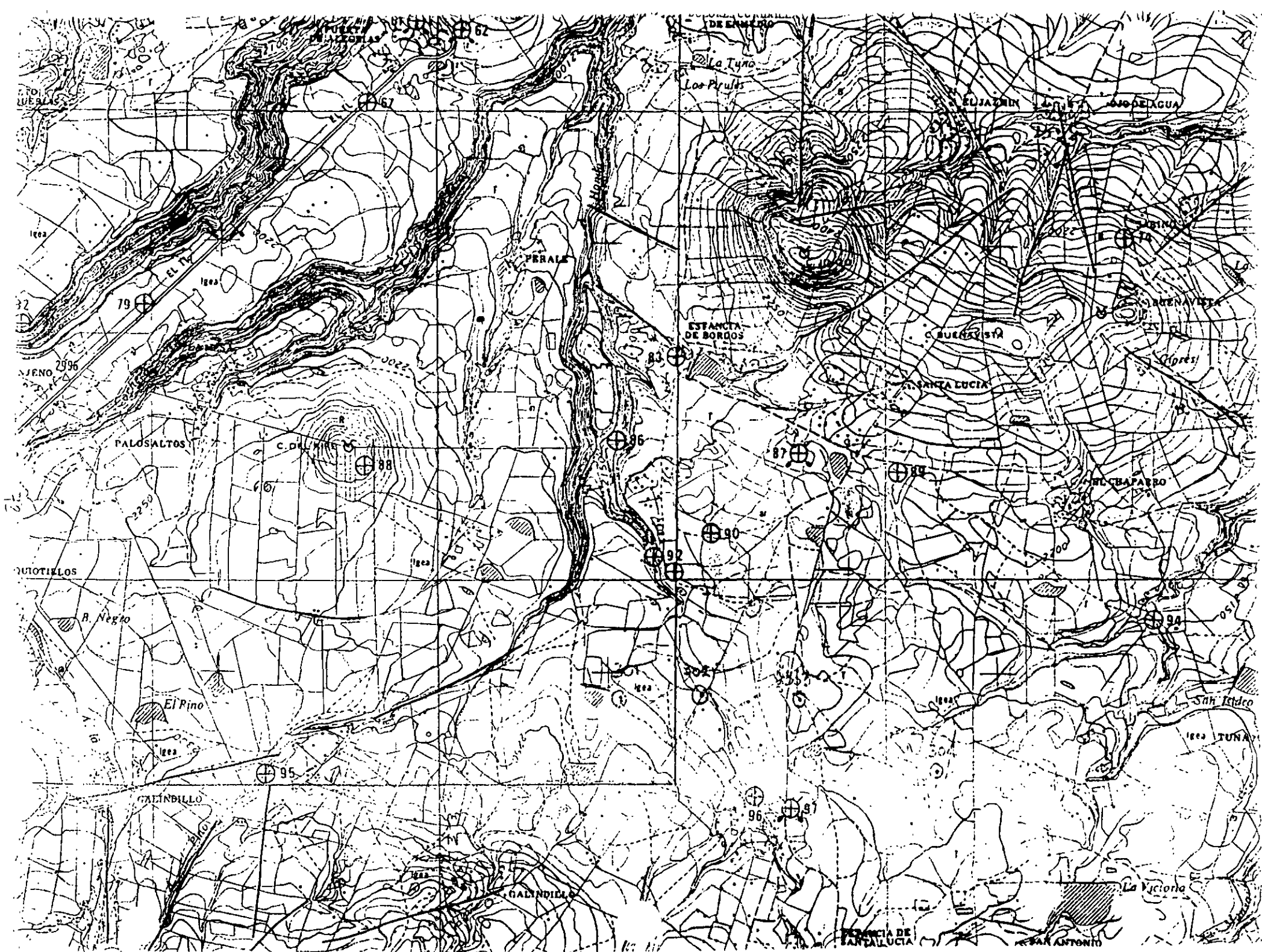
TOBA LITICA



CENIZA VOLCANICA



IGNIMBRITA



de la corteza terrestre y no aflora a la superficie, forman cuerpos que varían en forma y condiciones de yacimiento, dentro de estas formas se puede nombrar al *dique*, *lacolito*, *batolito* y *manto*; las tres primeras son formas *discordantes* con la roca encajonante, mientras que el manto es *concordante*, como se muestra en la figura 2.2. Su enfriamiento es lento y generalmente presentan una cristalización muy desarrollada. Su mismo enfriamiento lento, hace además que se depositen como rocas masivas o macizos, presentando condiciones de poca o nula conductividad hidráulica por lo que no constituyen acuíferos y en muchas ocasiones funcionan como fronteras impermeables al flujo subterráneo.

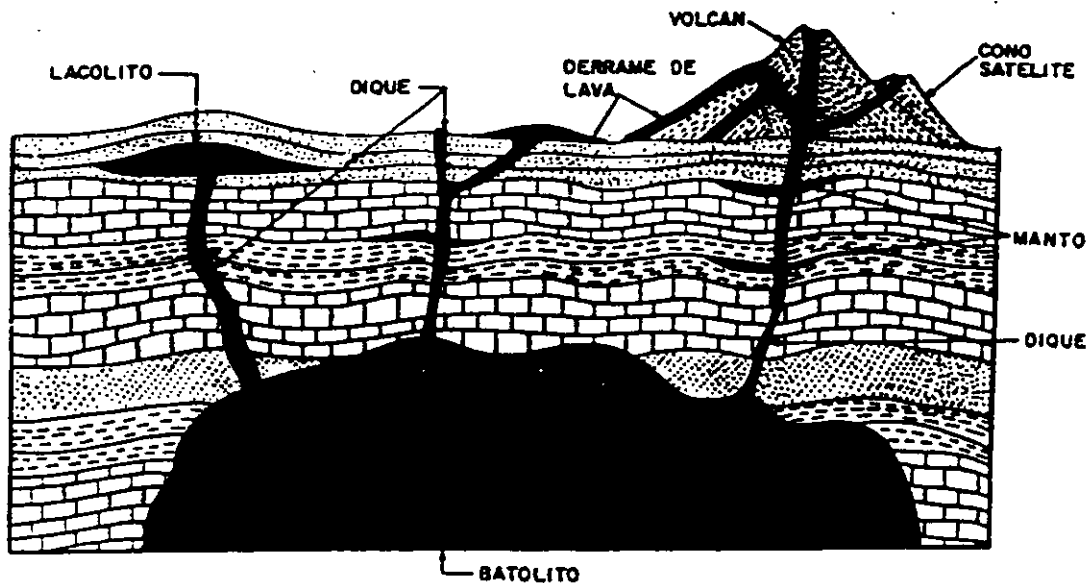
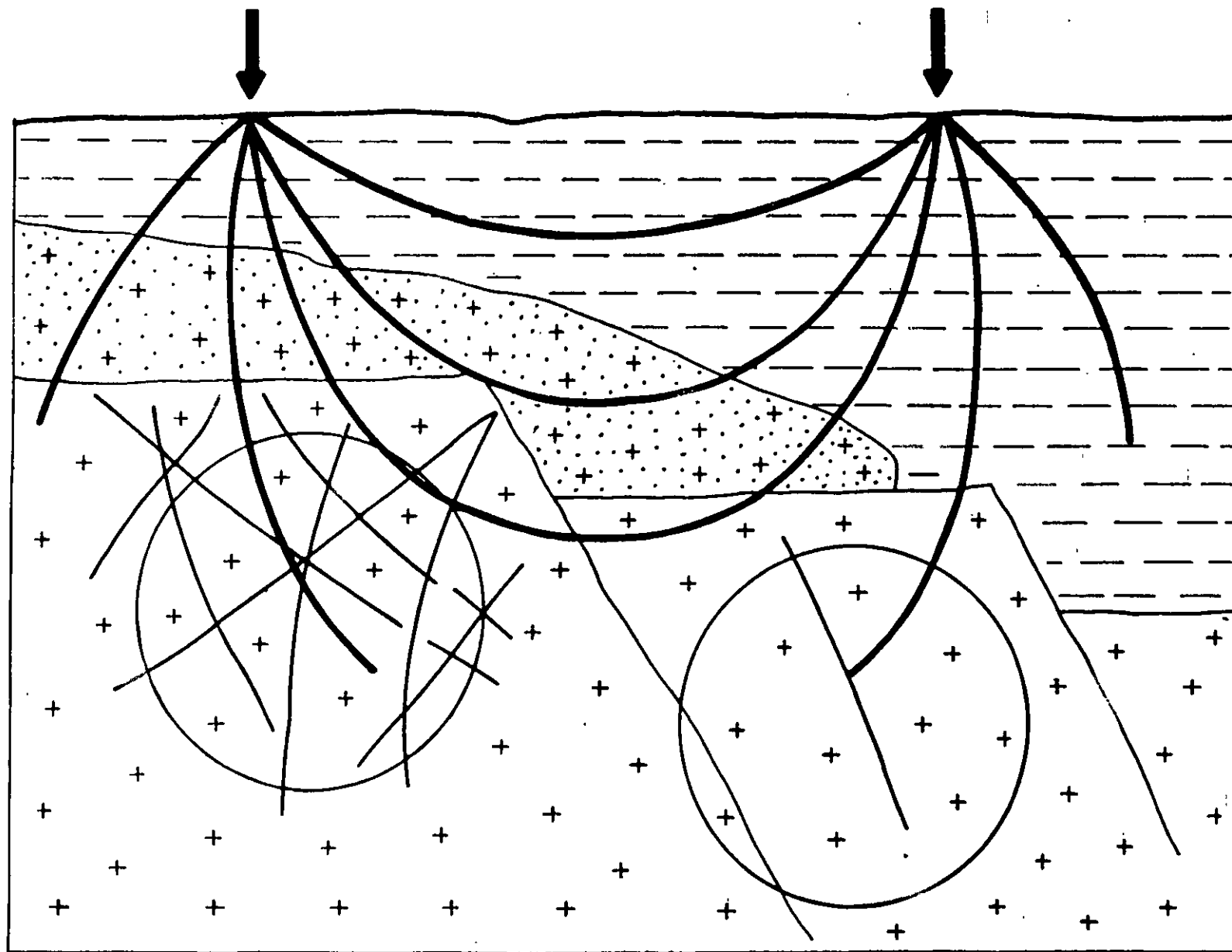


Figura 2.2. Clasificación de los cuerpos magmáticos originados por las rocas ígneas intrusivas (Leet, 1979).

Al aspecto físico general de una roca, de acuerdo como se observan el tamaño, forma y disposición de las partículas que la constituyen, se le conoce como *textura*. Así pues, las rocas ígneas intrusivas pueden presentar textura *holocristalina*, también llamada *granuda*. Son las más abundantes y presentan cristales o granos de medios a gruesos con dimensiones semejantes entre sí y visibles a simple vista. La textura *porfirítica*, se caracteriza por presentar cristales grandes pero aislados, inmersos en cristales de menor tamaño. Cuando los cristales están inmersos en la matriz se dice que tiene textura *fanerítica*.



NE

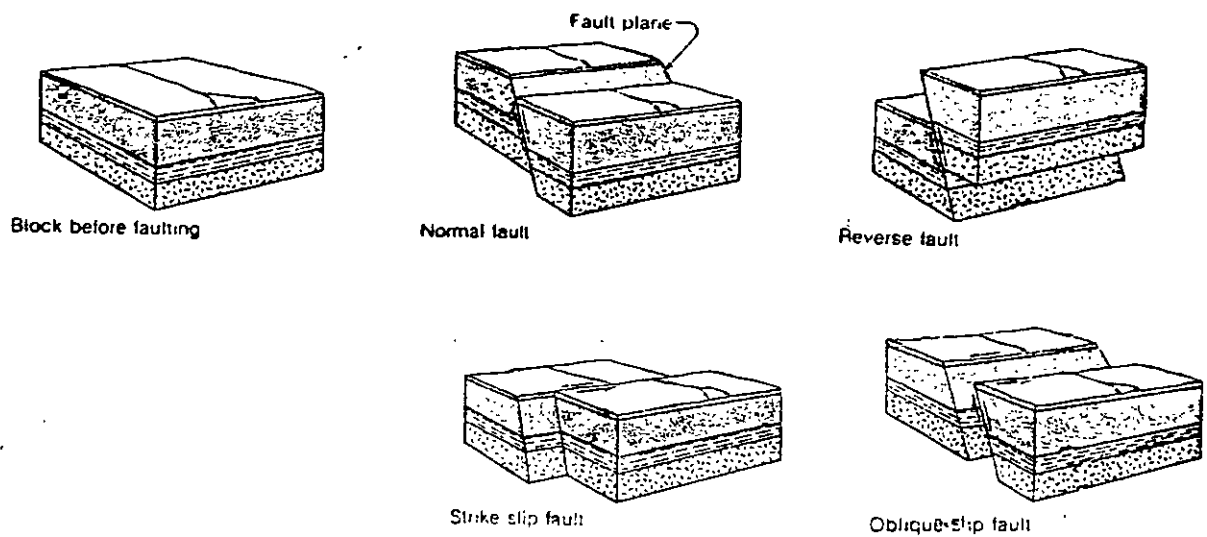
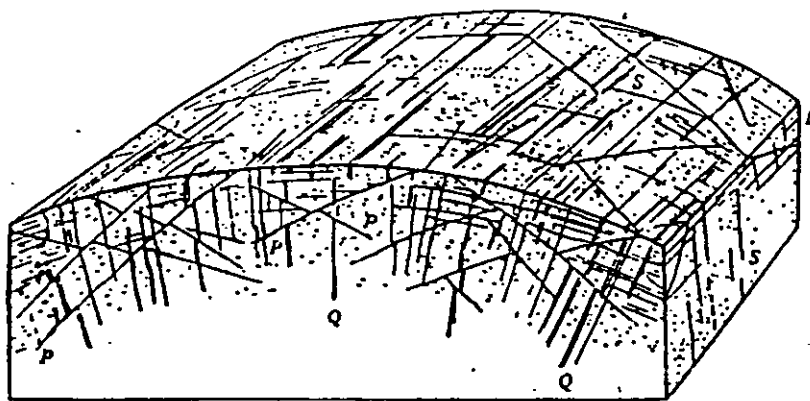
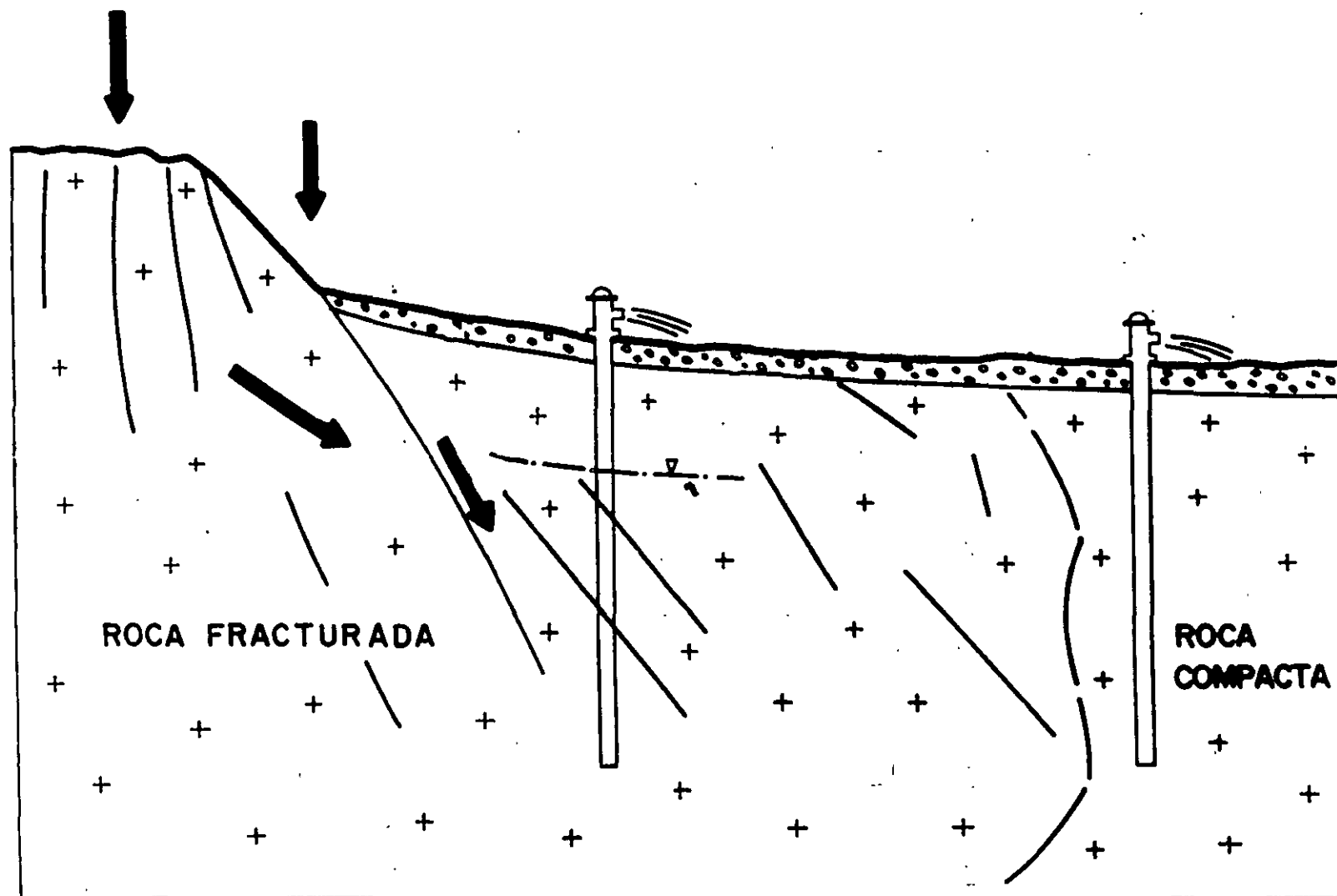


Figure 20-33
Types of faults.



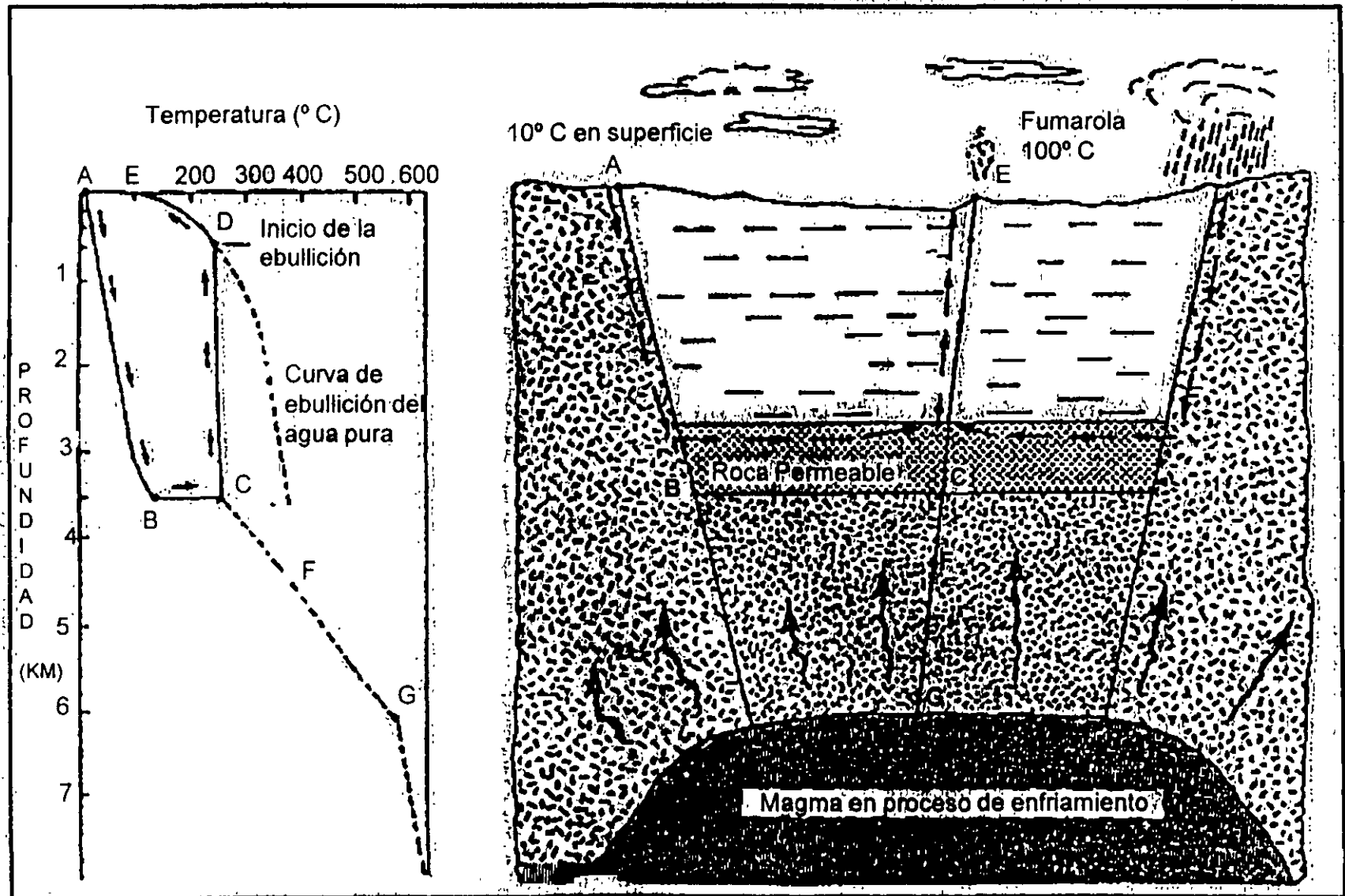
ROCA FRACTURADA

ROCA
COMPACTA

MODELO ESQUEMATICO DE UN SISTEMA GEOTERMICO



MANANTIAL DE IXTAPAN DE LA SAL



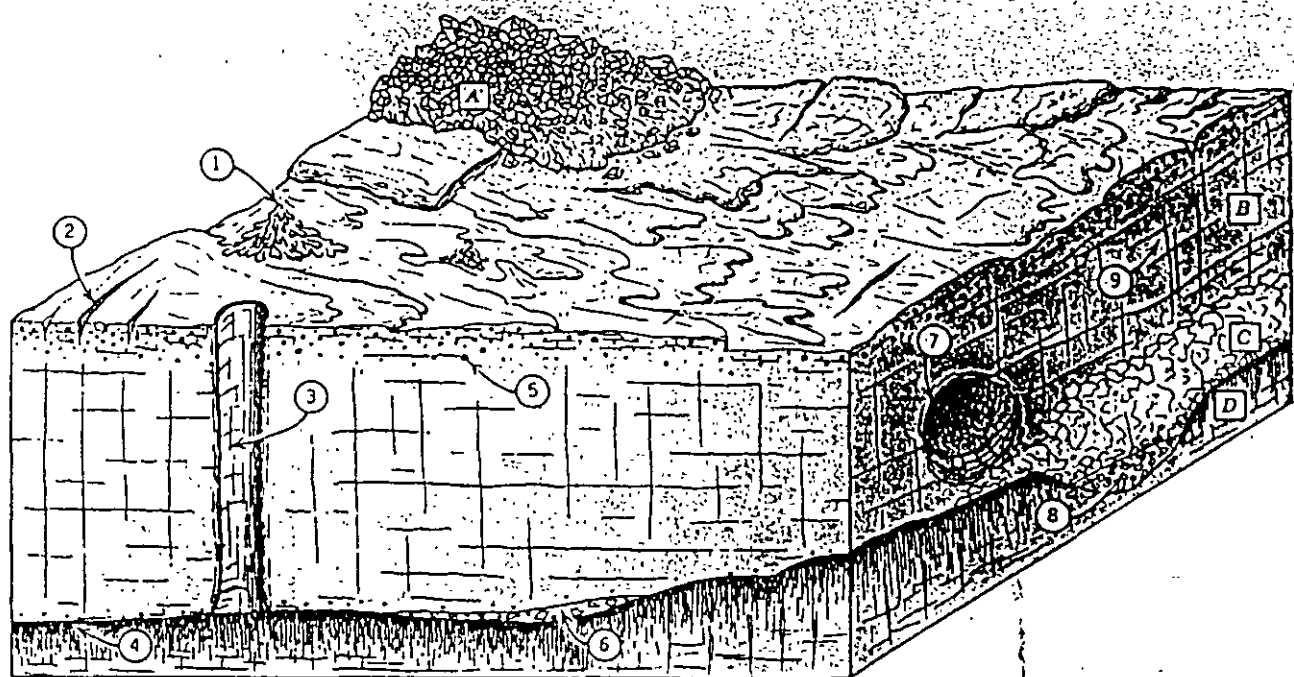


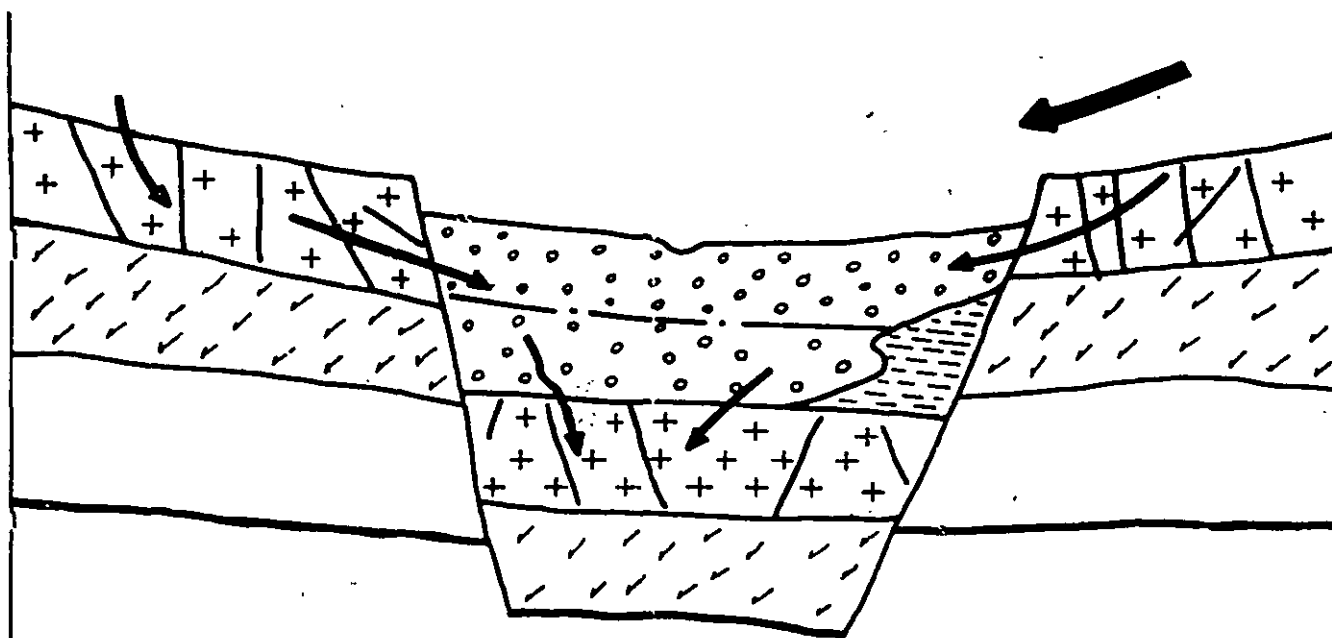
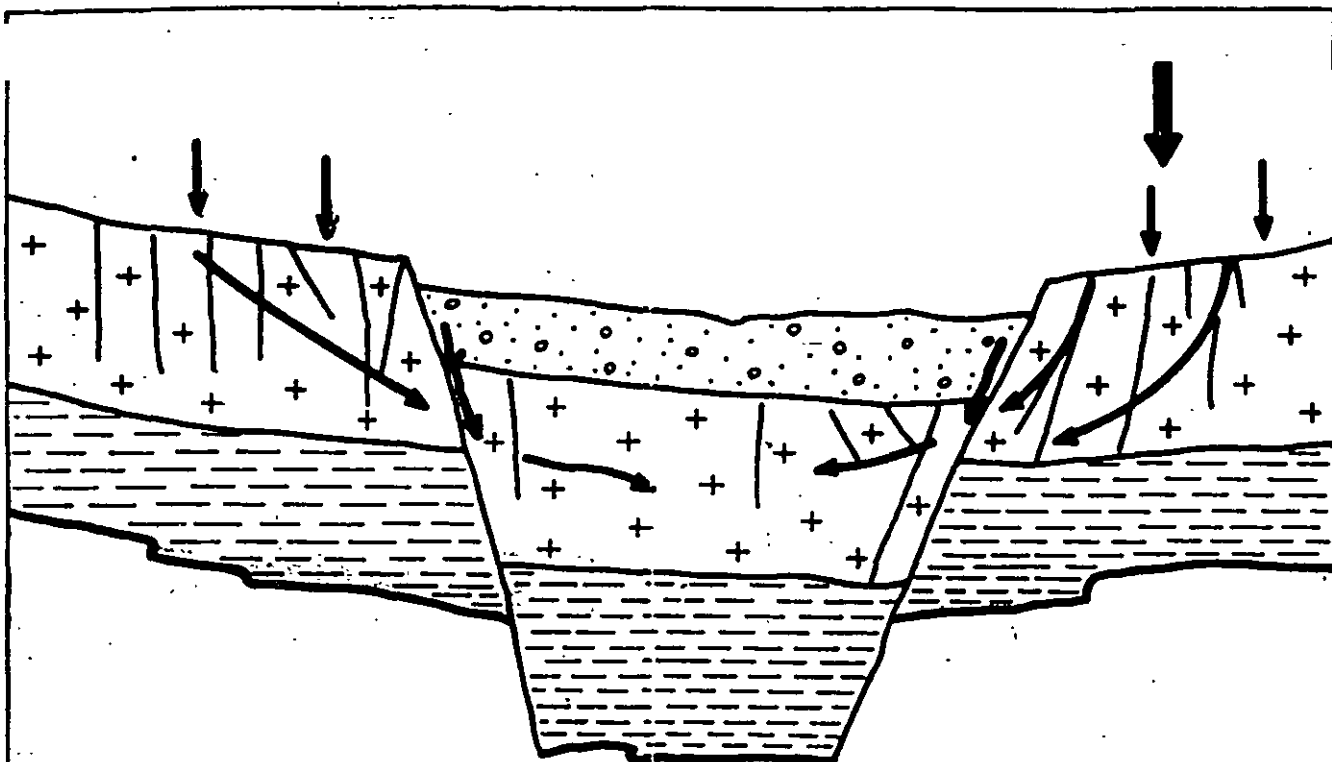
FIG. 9.8. — Secuencias hipotéticas de flujos de lava con los diversos factores que originan la permeabilidad y la porosidad de las rocas basálticas.

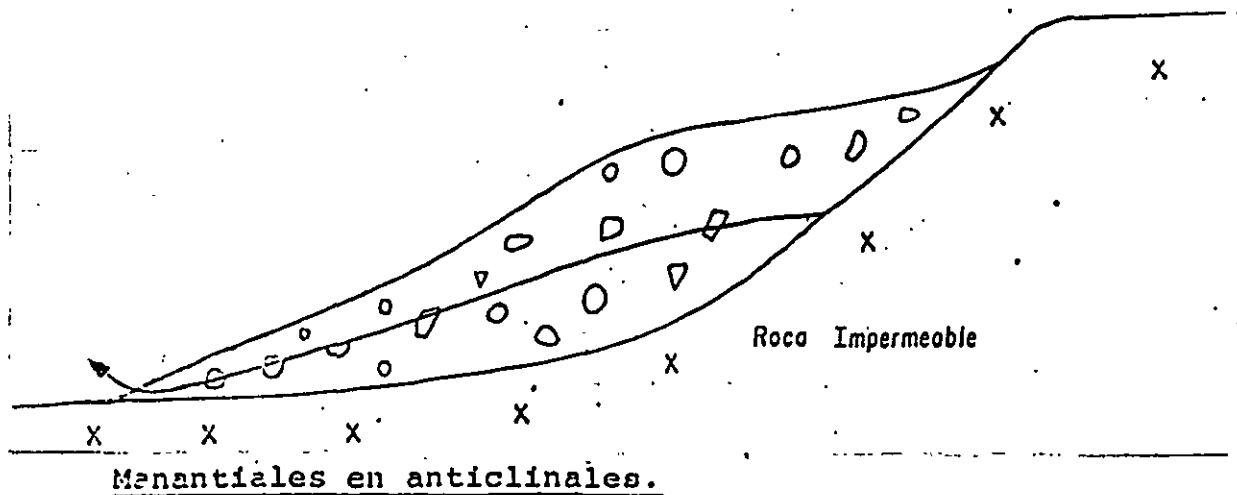
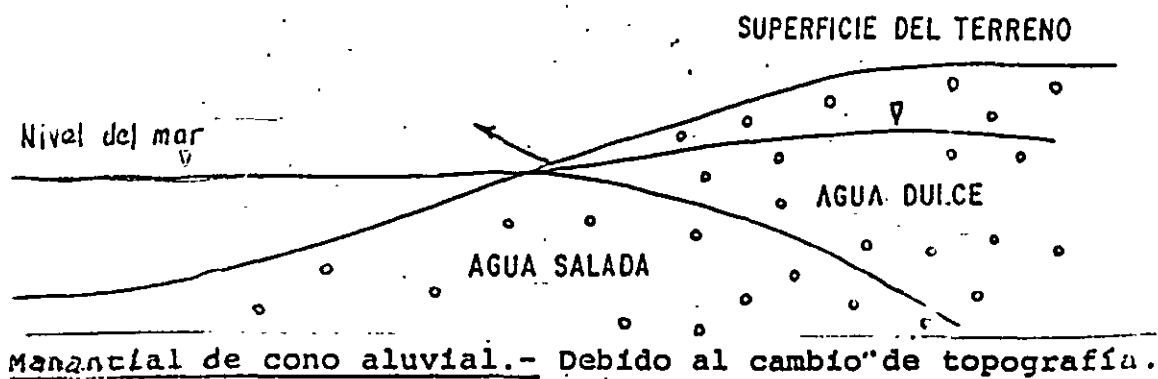
Factores que originan la porosidad:

- | | | |
|---|---|--------------------------------|
| 1. Orificios de los conos de efusión. | 4. Suelo enterrado. | 8. Depósito aluvial enterrado. |
| 2. Grietas abiertas sobre pequeñas arrugas. | 5. Burbujas. | 9. Grietas de enfriamiento. |
| 3. Moldes de árboles. | 6. Pequeño lentejón de bloques piroclásticos. | |
| | 7. Tubo de lava. | |

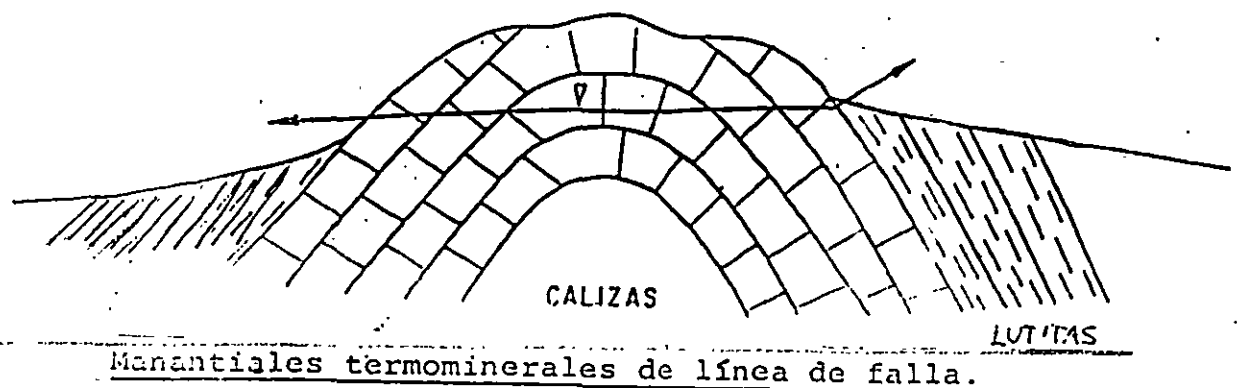
Secuencia de flujos:

- A. Flujos de aa reciente.
 B. Flujo de pahoehoe reciente.
 C. Flujo de aa antiguo enterrado.
 D. Flujo de pahoehoe, muy antiguo, enterrado.

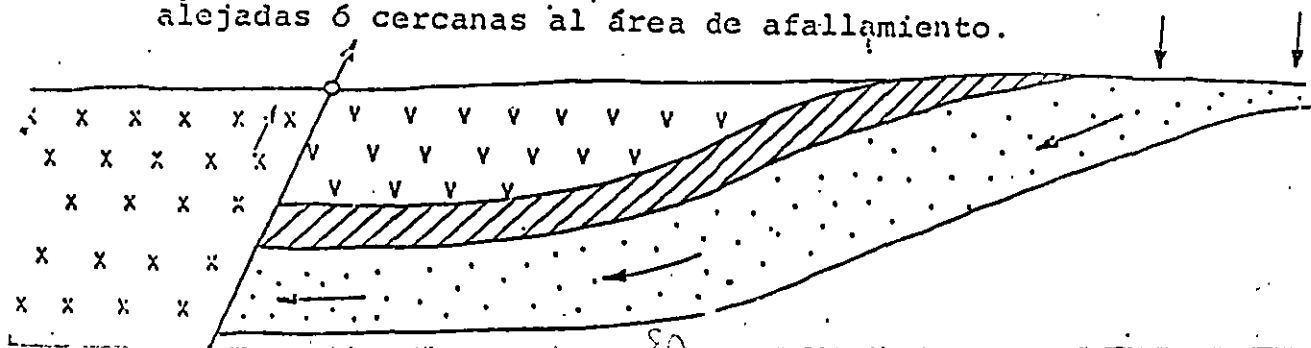




Se forman en algunos puntos de los flancos de la estructura en contacto con rocas impermeables.

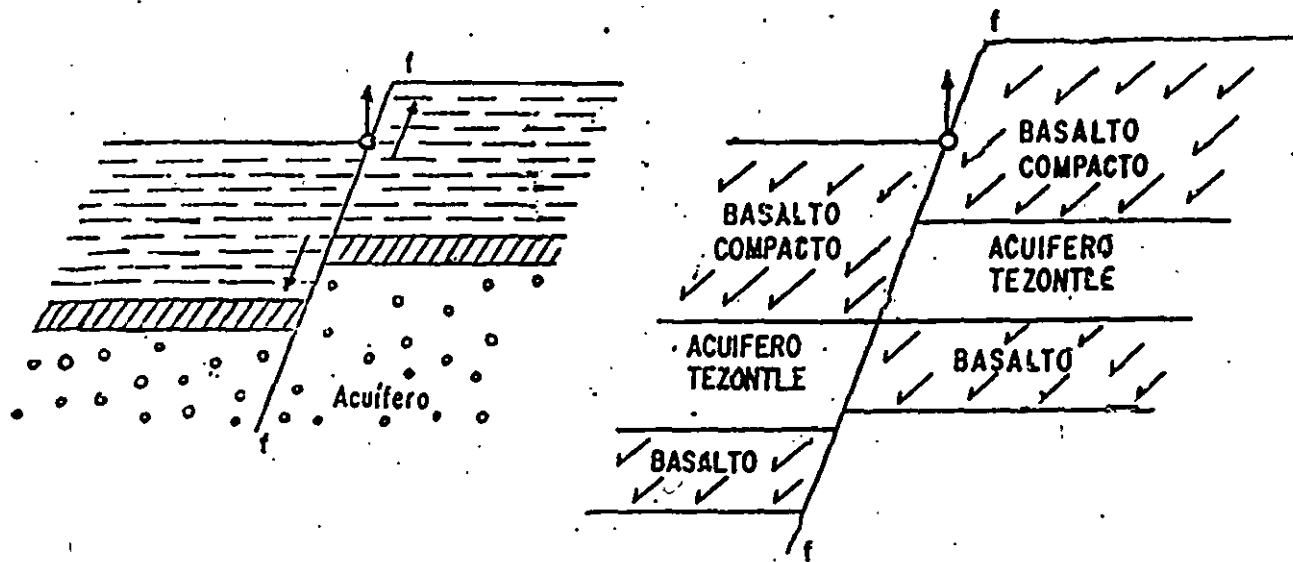


La fuente de agua de tales manantiales es la precipitación de agua de lluvia ocurrida en las áreas de captación ó infiltración, las cuales pueden encontrarse alejadas ó cercanas al área de afallamiento.

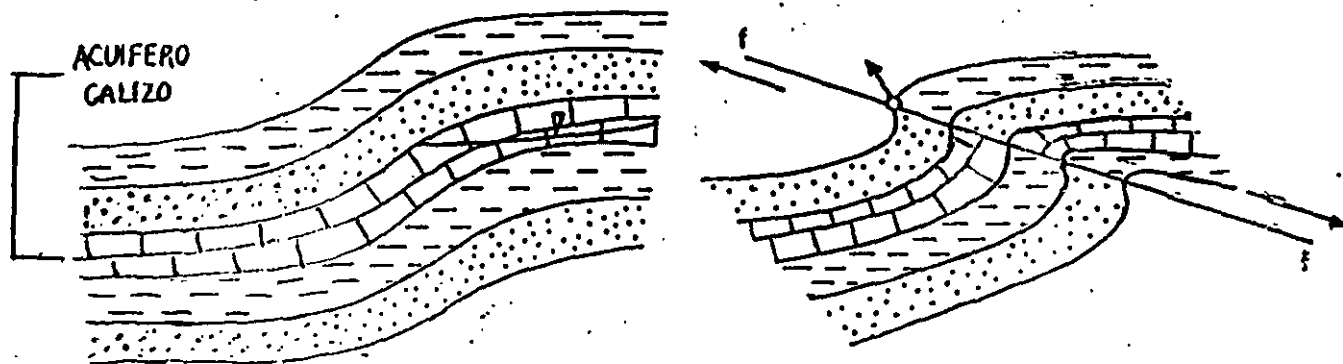


Manantiales Originados por Fallas.

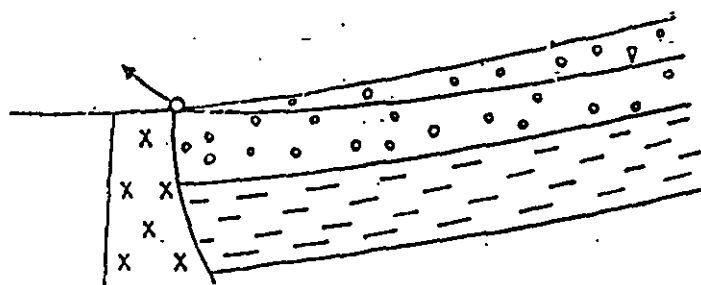
Manantiales emergentes.



Manantiales de planos plegados.



Manantiales originados por diques.



DESCARGA DE LOS ACUÍFEROS

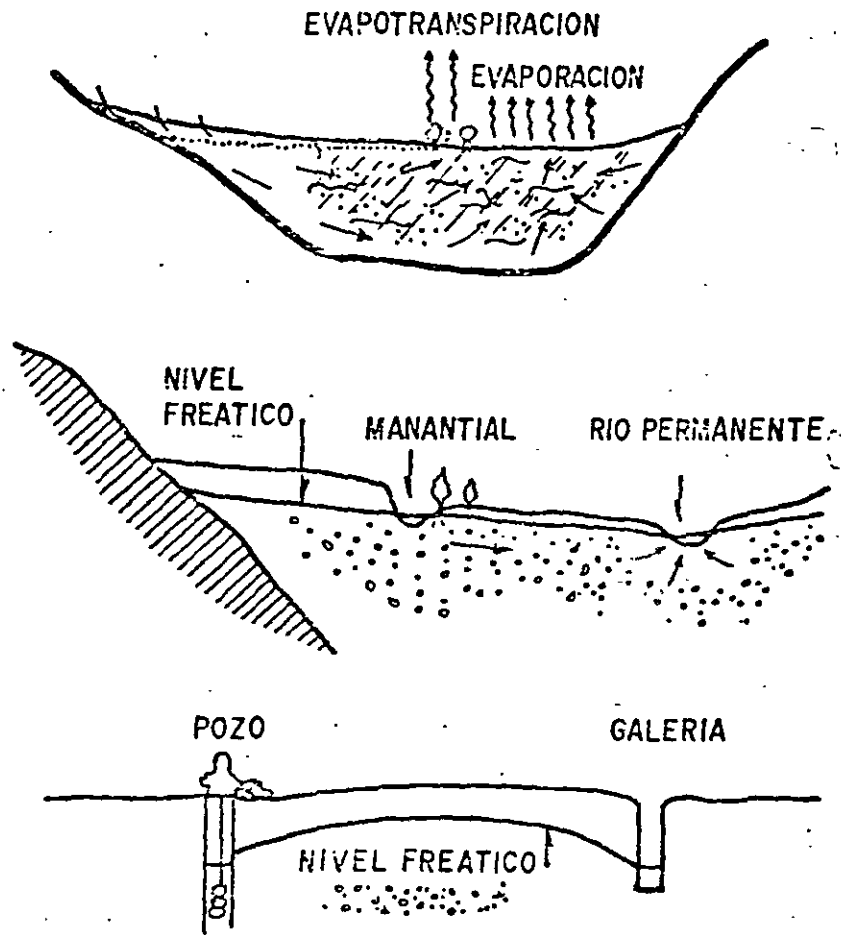


FIG. No. 10

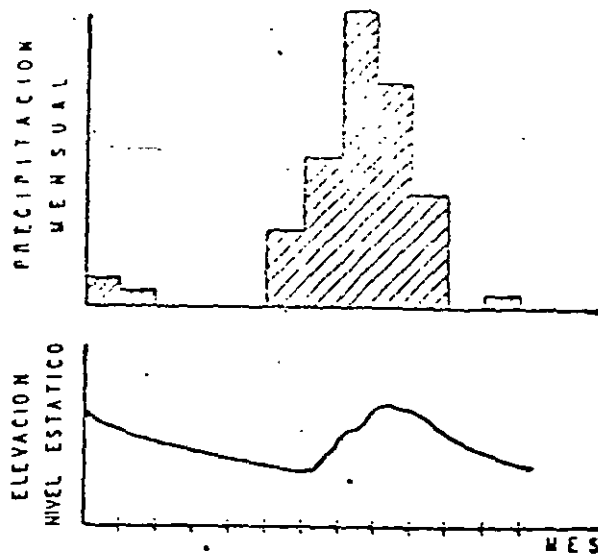


FIGURA 5.- LA GRAFICA DE PRECIPITACION MENSUAL CORRELACIONADA CON EL COMPORTAMIENTO DE LOS NIVELES ESTATICOS PERMITE INFERIR LA INFLUENCIA DE LA LLUVIA EN LA RECARGA DE LOS ACUIFEROS.

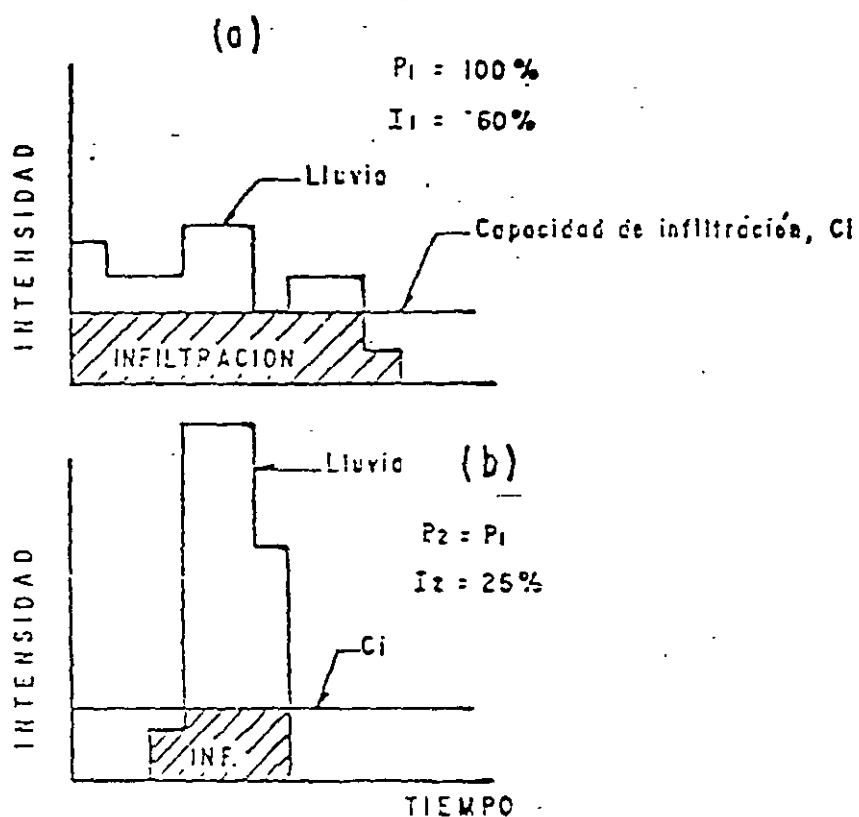


FIGURA 6.-LA INTENSIDAD DE LLUVIA TIENE UNA INFLUENCIA DEFINITIVA EN LA MAGNITUD DEL VOLUMEN INFILTRADO. EL VOLUMEN DE PRECIPITACION REPRESENTADO EN (a) Y (b) ES EL MISMO; NO OBTANTE, LA INFILTRACION ES MUCHO MAYOR EN (a) DESIDO A LA MENOR INTENSIDAD DE LLUVIA.

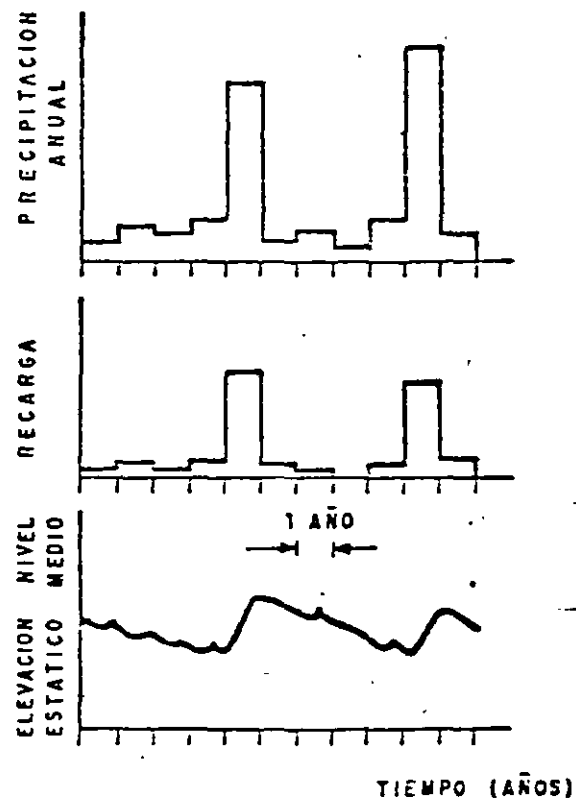
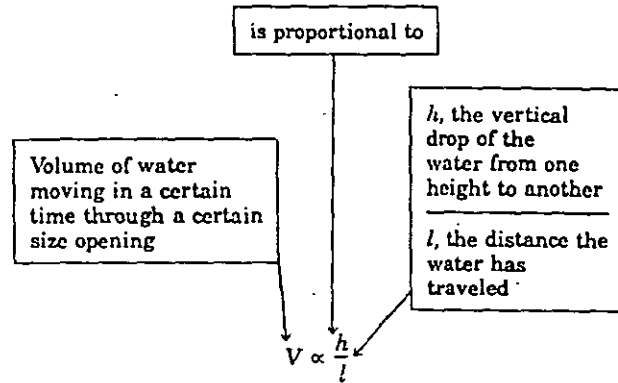


FIGURA 2.- LA VARIACION DE LA PRECIPITACION ANUAL DA UNA IDEA DE LA PROBABLE VARIABILIDAD DE LA RECARGA DE LOS ACUIFEROS. EN LAS ZONAS ARIDAS LA RECARGA SUELE SER SIGNIFICATIVA UNICAMENTE EN AÑOS RELATIVAMENTE LLUVIOSOS.

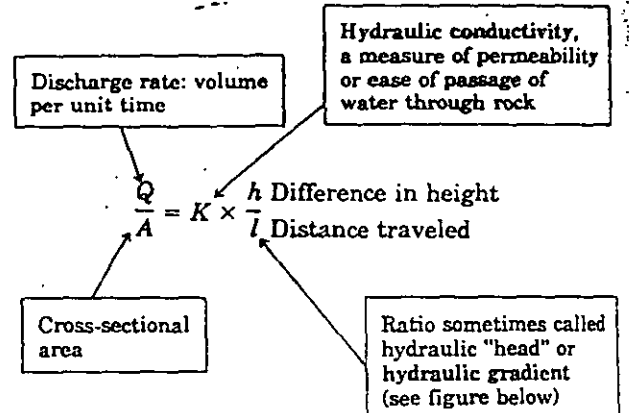
Box 7-1

Darcy's Law of Groundwater Motion

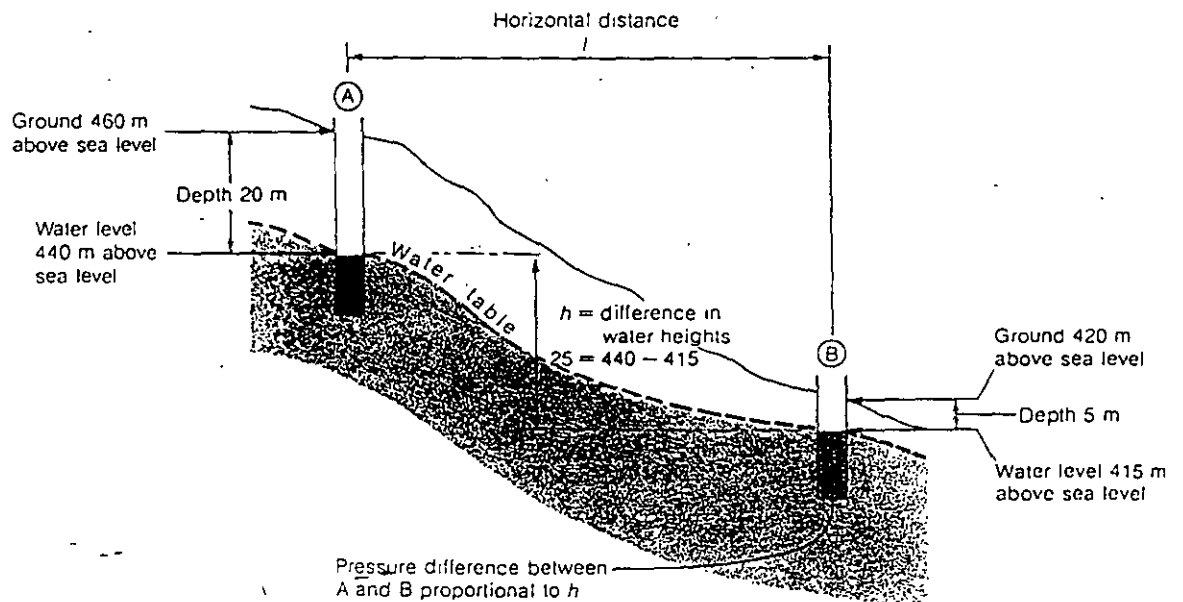
The law formulated by Darcy is given in terms of the volume of water moving through any opening in a given amount of time, essentially a velocity term, and the geometry of the general flow, or the ratio of the vertical to the horizontal distance.



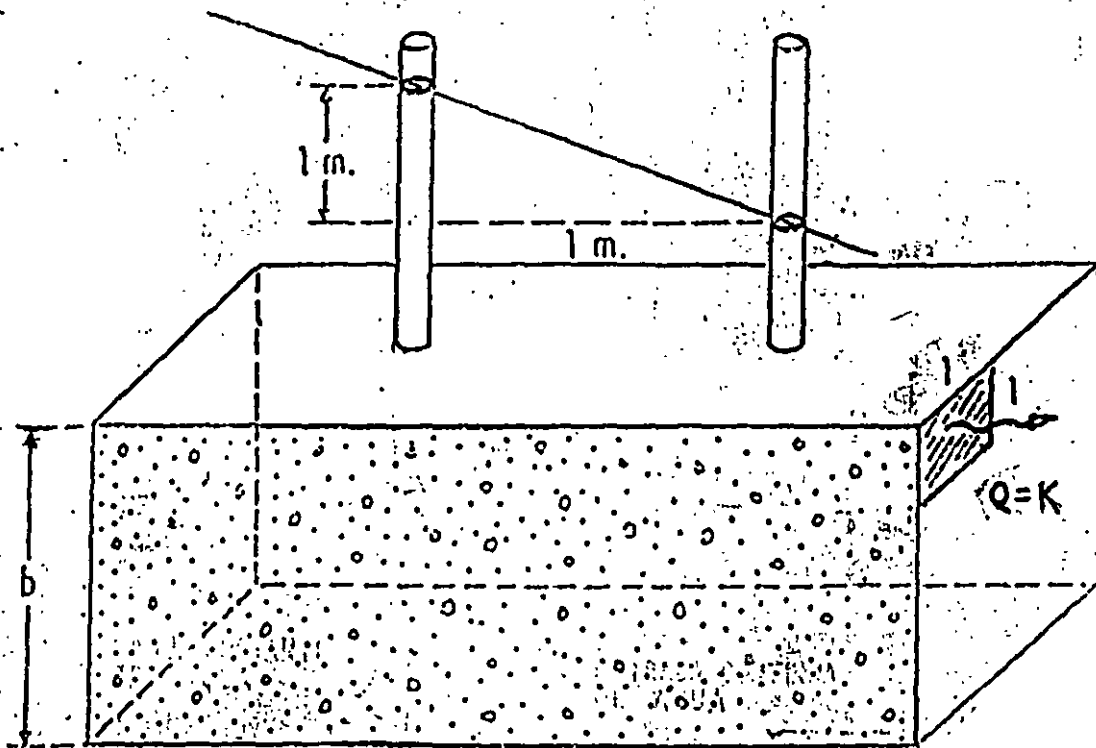
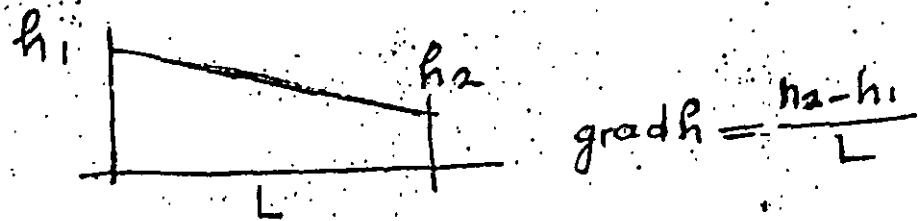
Darcy reasoned that the permeability of a rock is what slows down the flow for a given drop of height h in a certain distance l . So he made this proportion into an equation by multiplying the right-hand side by a proportionality factor, K . Darcy identified K as a measure of the permeability of the rock, or in other words, how easily it transmits water.

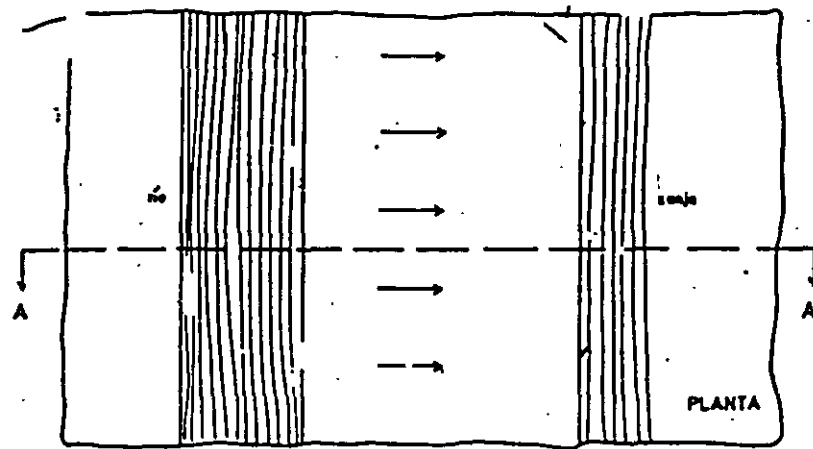


From this equation, we can determine the velocity of flow, or, if we know the velocity, the hydraulic conductivity.



Darcy's Law





$$\nabla^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi \quad \text{y} \quad \nabla^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi$$

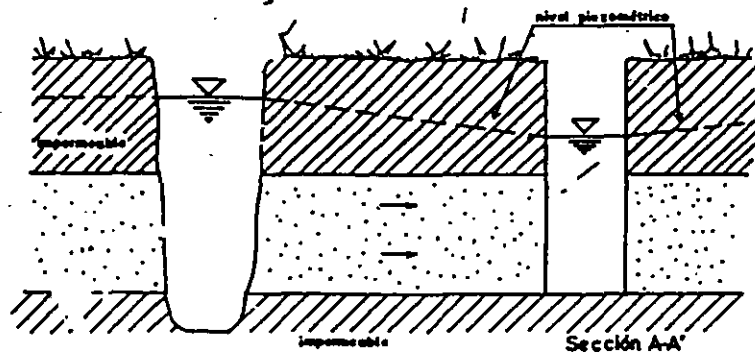


FIGURA 8.25
Problema de flujo unidimensional según el eje x.

RECARGA DE LOS ACUÍFEROS

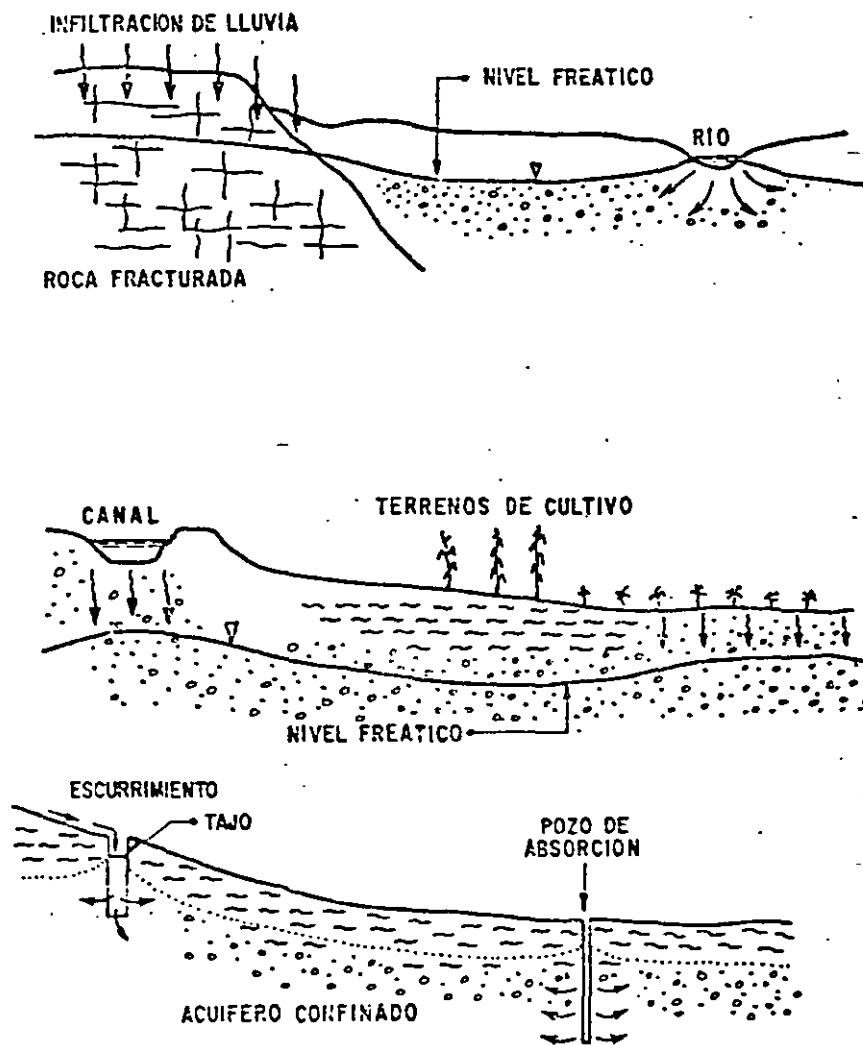


FIGURA No. 8

existe una diferencia de potencial de un volt; de esta forma la unidad de medida de la resistividad es el ohmio-metro (Camarena, 1975).

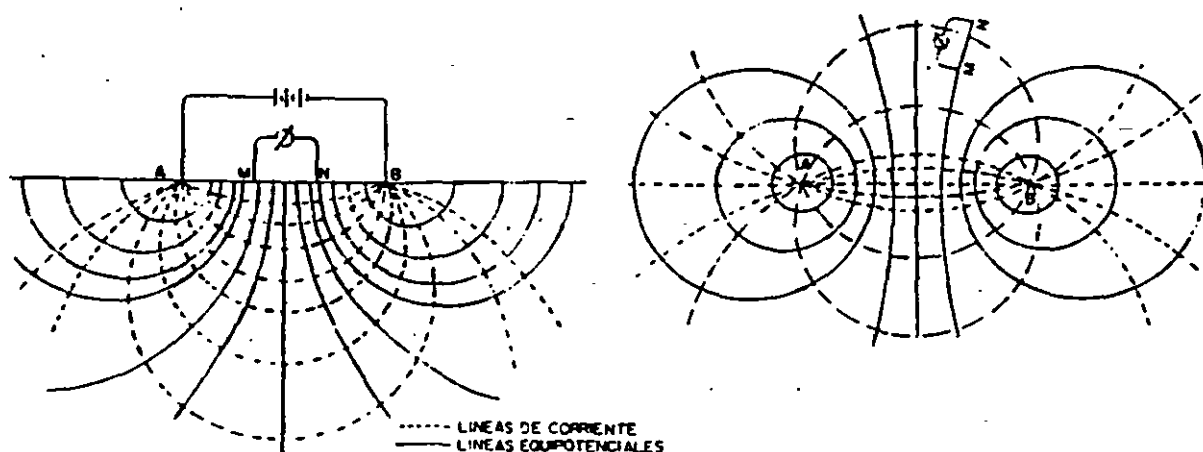
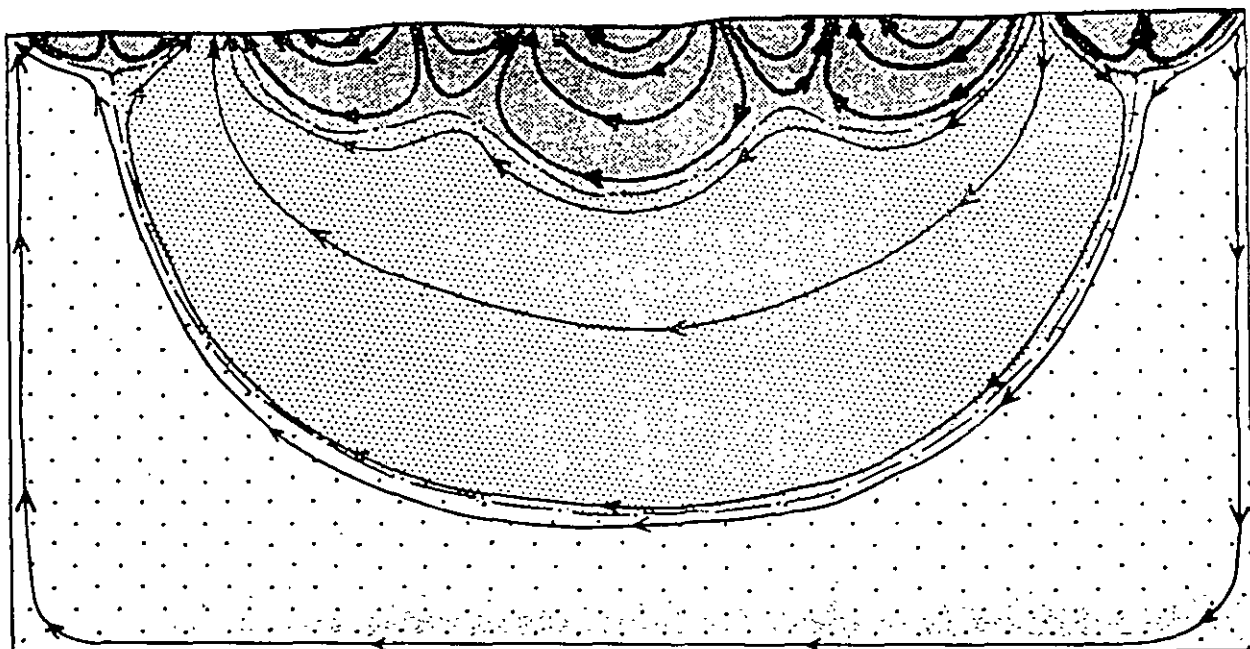


Figura 3.4 Campo eléctrico generado (Cantos, 1974).

Los factores de mayor influencia en el valor de la resistividad de las rocas, son la constitución mineralógica, grado de saturación y calidad del agua que la satura, la porosidad, edad geológica y grado de compactación, otros factores que también influyen son la temperatura, presión y la humedad.

Tabla 3.1 Resistividades de algunos materiales (Custodio, 1976).

Medio	ohmios-metro
Granito saturado	20-100
Caliza y acarreos saturados	50-20
Aguas salobres	1-10
Agua potable	50-300
Agua de mar	menor de 0.2
Agua destilada	más de 500
Arcillas y margas	10-100
Calizas y areniscas	50-3000
Pizarras	50-300
Rocas metamórficas	100-10,000
Gravas	100-10,000
Arenas	130-1,000
Limos	30-500






Domain of flow-systems:  local  intermediate  regional
 --- Boundary between flow systems of different order → Direction of flow

Figure 6. Composite basin with homogeneous rock framework, showing flow-system types (modified from Tóth, 1963).

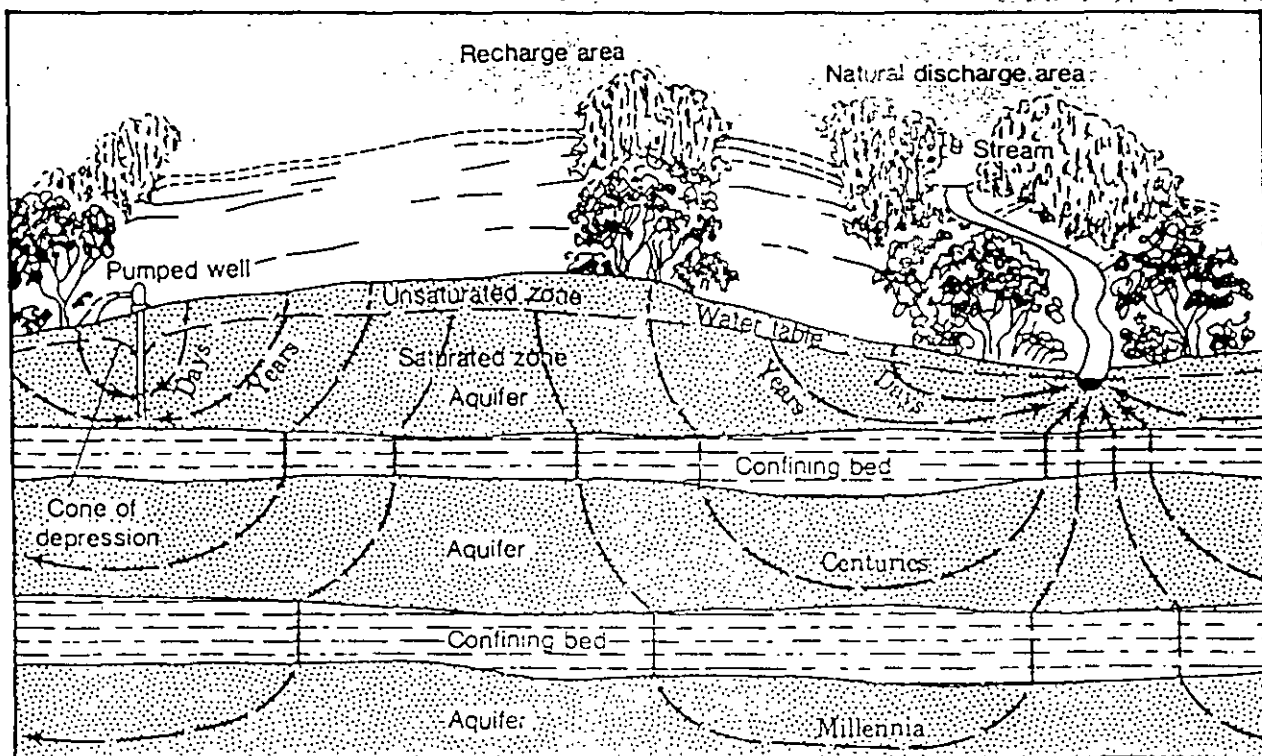


Figure 10. Simultaneous groundwater flow on different time scales.

8.48 Flujo del agua en los medios porosos

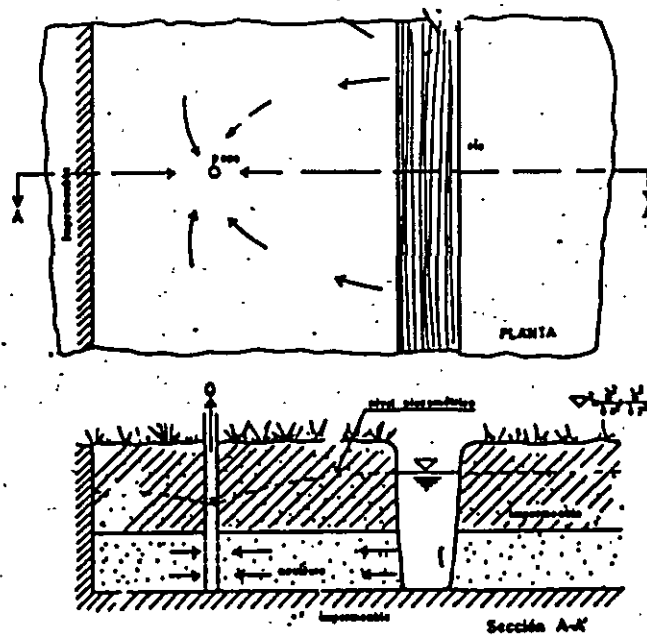


FIG. 8.23
Problema de flujo bidimensional en el plano xy (horizontal).

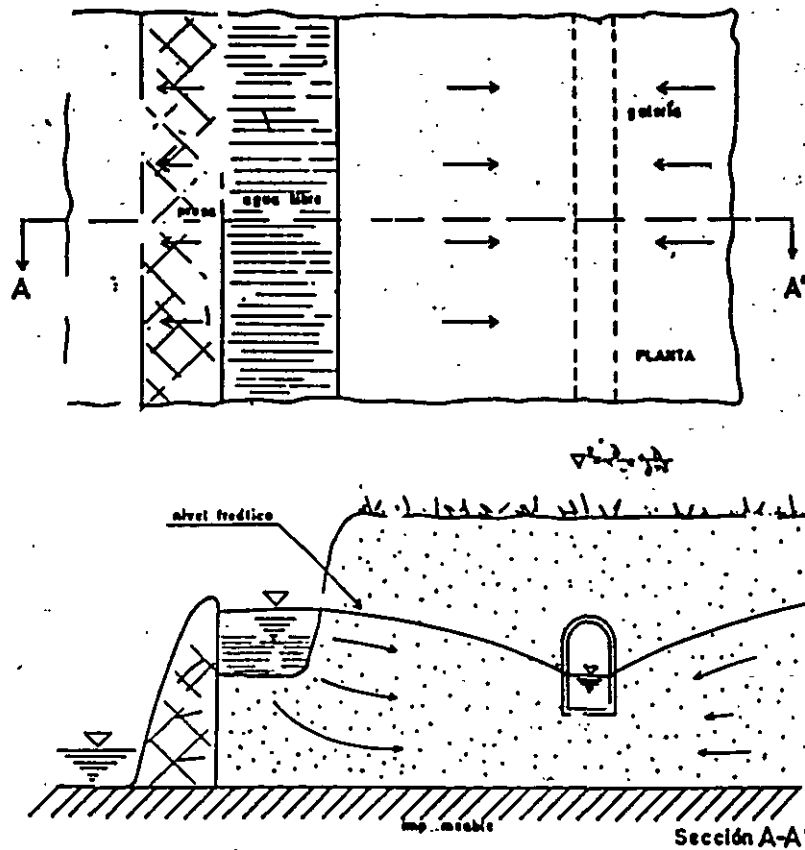
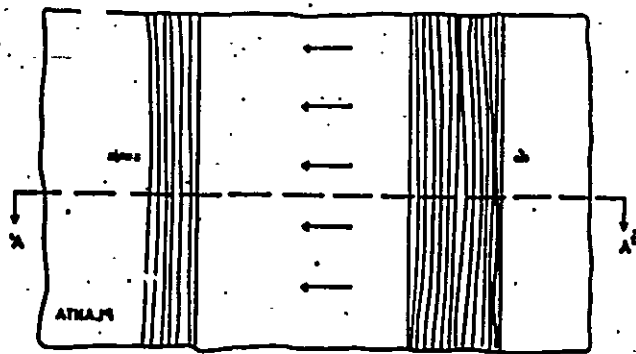


FIGURA 8.24
Ejemplo de flujo bidimensional en el plano xz (vertical).



$$A_1 \frac{v_1}{2} + A_2 \frac{v_2}{2}$$

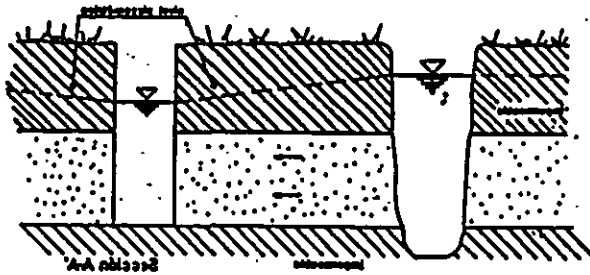
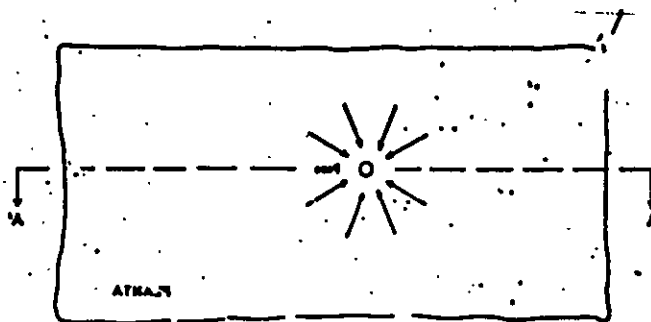


FIGURA 8.25
Problema de flujo unidimensional según el eje x.



Radial asimétrico

$$A_1 \frac{v_1}{2} + A_2 \frac{v_2}{2}$$

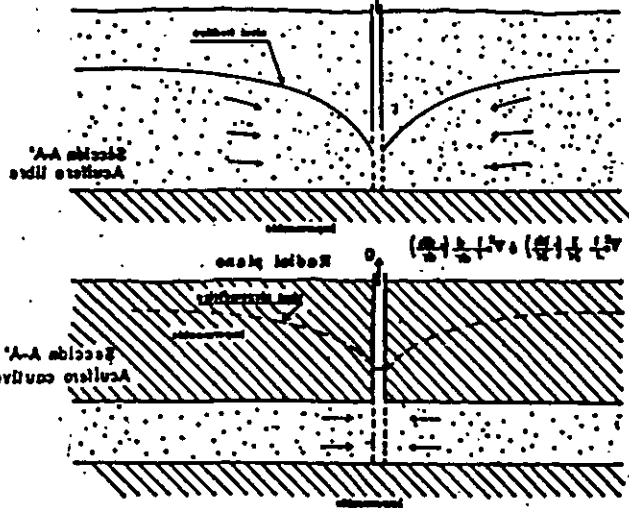
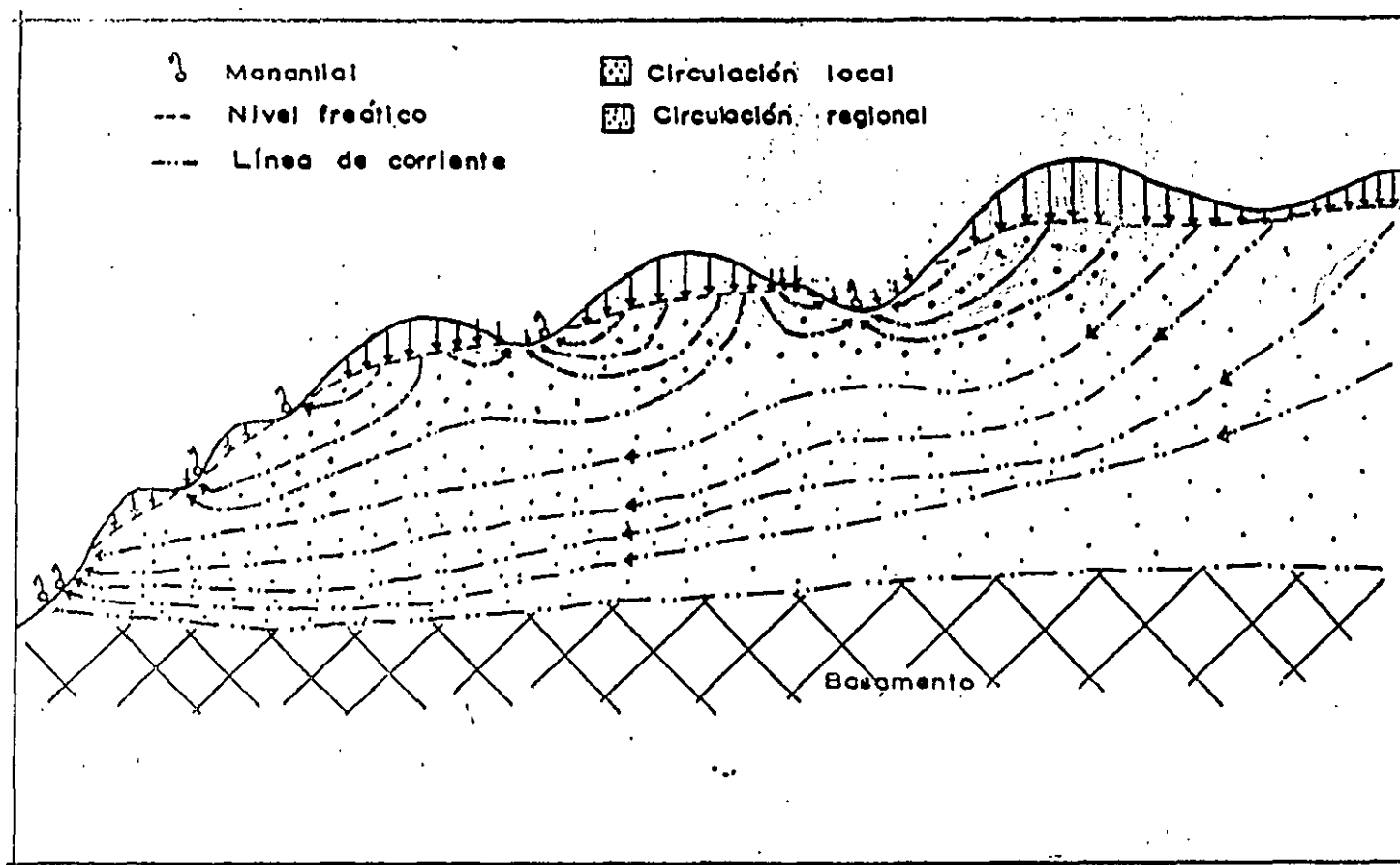
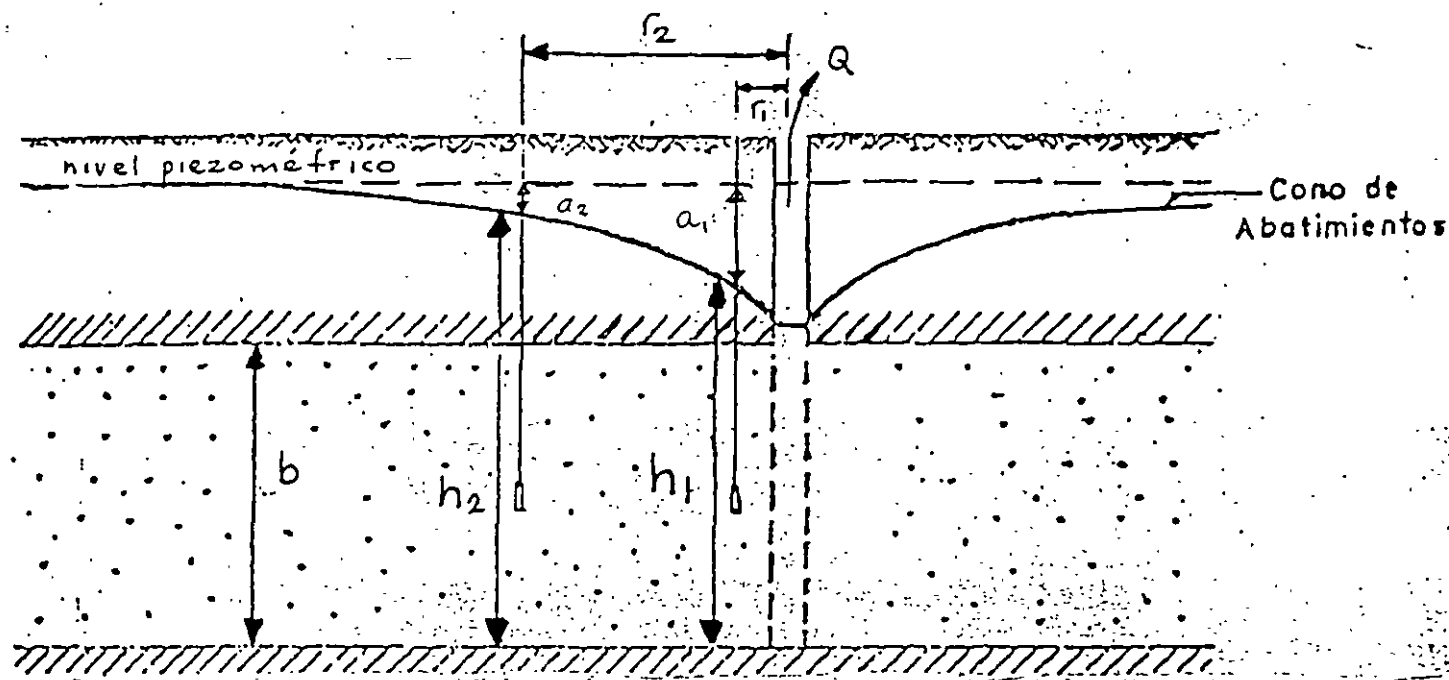


FIGURA 8.26
Problema radial o asimétrico y problema radial plano.



Esquema de la circulación del agua en un conjunto de terrenos permeables recargados por la lluvia en los que se establece circulación local y circulación regional.

FIG. 3.4



HIPOTESIS BASICAS DE LA ECUACION DE THIEM

- ACUÍFERO HOMOGENEO E ISOTROPO EN EL AREA AFECTADA POR EL BOMBEO.
- EL ESPESOR DEL ACUÍFERO ES CONSTANTE (ACUÍFERO CONFINADO) O EL ESPESOR SATURADO INICIAL ES CONSTANTE ANTES DE INICIAR EL BOMBEO (ACUÍFERO LIBRE).
- EL POZO ES TOTALMENTE PENETRANTE.
- LA SUPERFICIE PIEZOMETRICA O FREATICA ES HORIZONTAL ANTES DE INICIARSE EL BOMBEO.
- EL ABATIMIENTO EN LAS PROXIMIDADES DEL POZO NO VARIA EN EL TIEMPO.

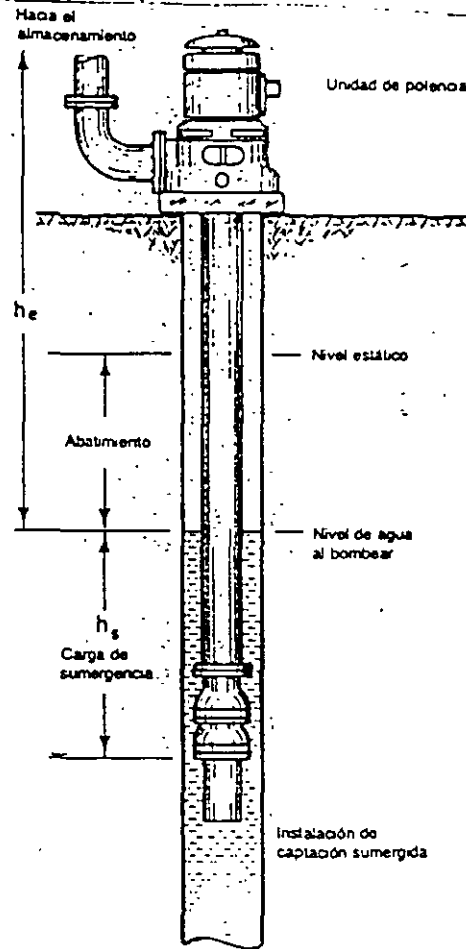


Fig. 358: La carga dinámica total contra la cual actúa una bomba instalada dentro de un pozo, comprende la elevación vertical estática, h_s , más la fracción correspondiente a pérdidas por fricción y carga de velocidad.

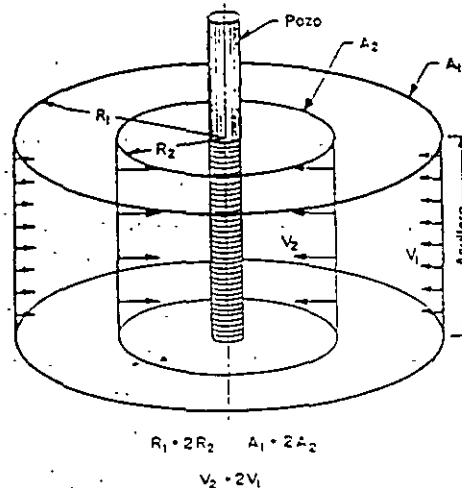


Fig. 65: El flujo converge hacia el pozo, pasando a través de superficies cilíndricas imaginarias que van siendo menores conforme se aproximan a aquél.

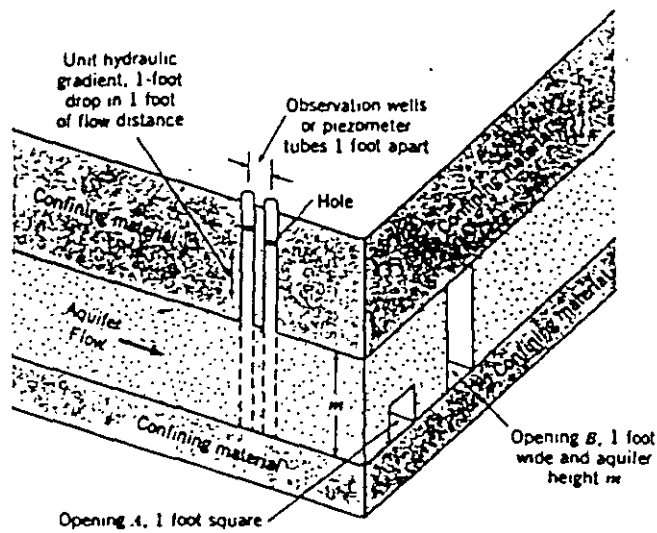


Figure 4.7 Diagram illustrating hydraulic conductivity and transmissivity (from Ferris and others, 1962).

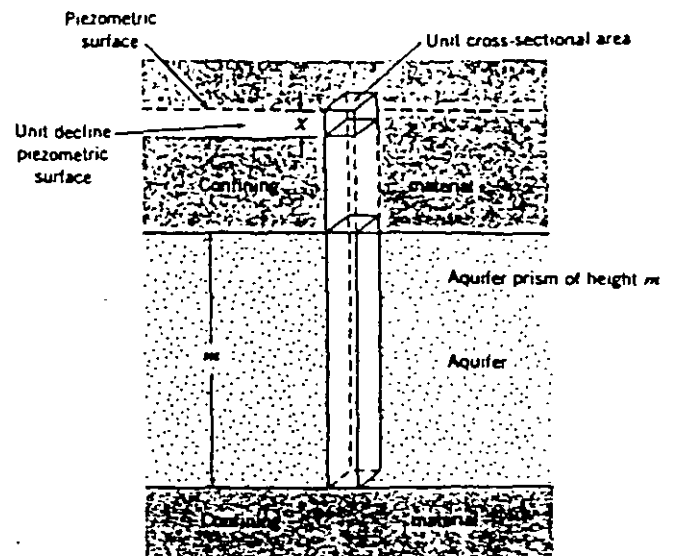


Figure 4.6 Diagram illustrating the storativity for confined conditions (from Ferris and others, 1962).

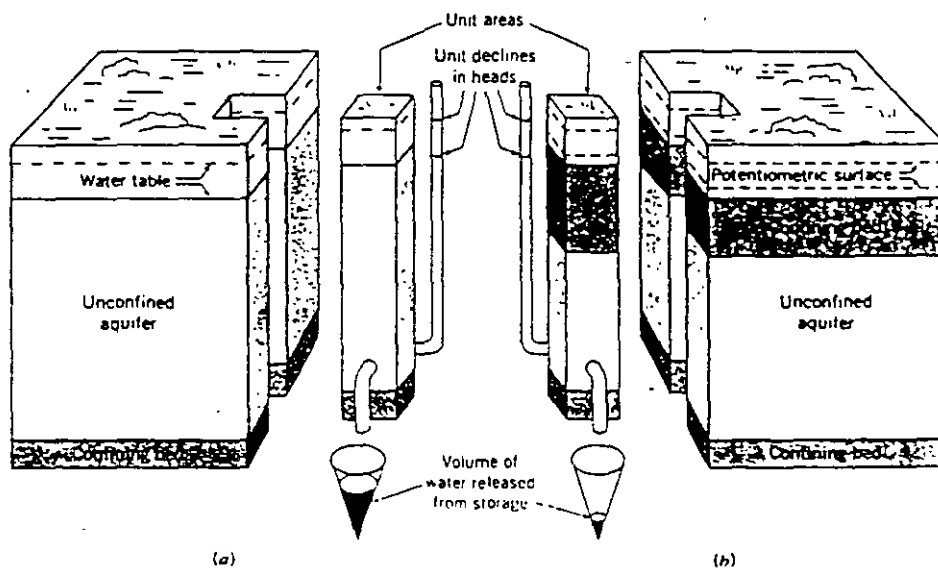


Figure 4.3 Diagrams illustrating the concept of storativity in (a) an unconfined aquifer and (b) a confined aquifer (from Heath, 1982).

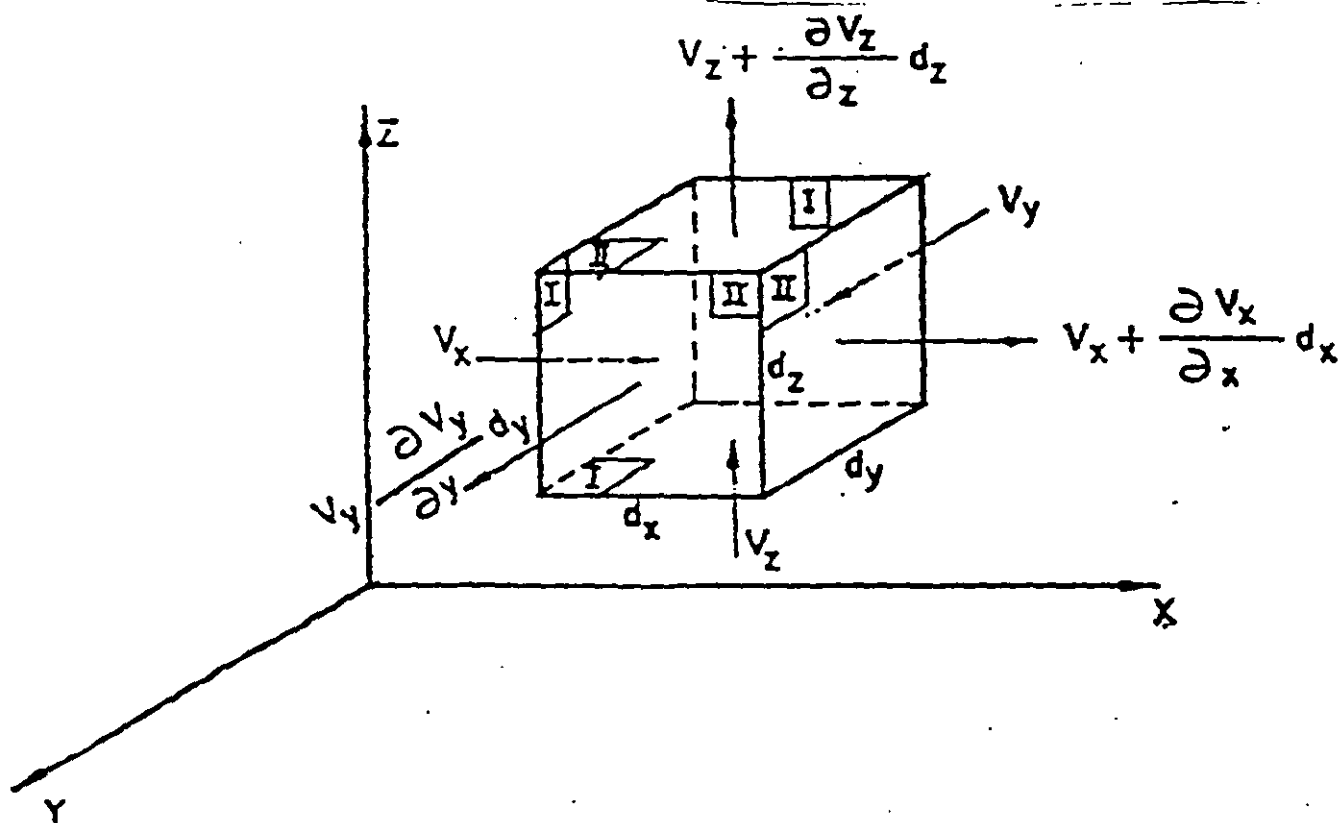


FIG. 1-1. Elemento de una región sujeta a flujo tridimensional

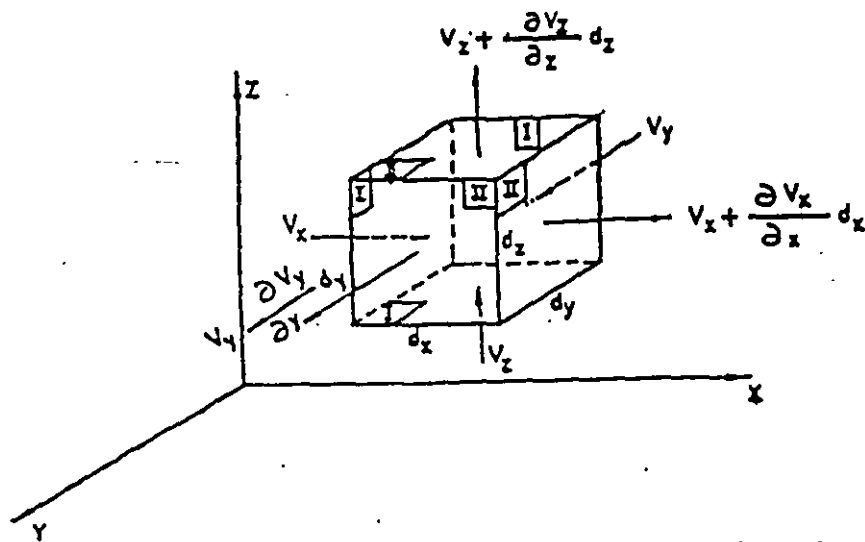


FIG. 1-1. Elemento de una región sujeta a flujo tridimensional

LAS COMPONENTES DE LA VELOCIDAD DEL AGUA A LAS ENTRADAS AL SISTEMA SON V_x, V_y, V_z .

EN LAS CARAS OPUESTAS ESTAS COMPONENTES SERAN

$$V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx$$

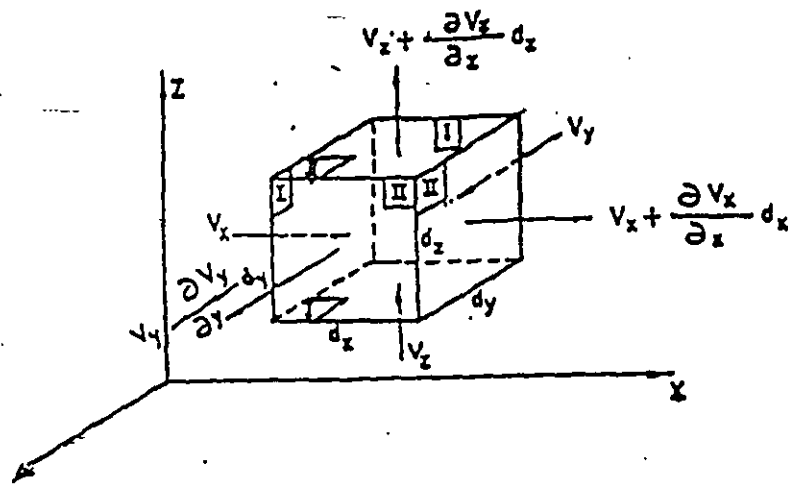
$$V_y + \frac{\partial V_y}{\partial y} dy$$

$$V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz$$

EN FUNCION DEL GASTO $Q = V \cdot A$

$$\underbrace{V_x dy dz}_{A} + \underbrace{V_y dx dz}_{A} + \underbrace{V_z dx dy}_{A} = \underbrace{\left(V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} dx\right) dy dz}_{A} + \underbrace{\left(V_y + \frac{\partial V_y}{\partial y} dy\right) dx dz}_{A} + \underbrace{\left(V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} dz\right) dx dy}_{A}$$

EN ESTA ECUACION EL PRIMER MIEMBRO REPRESENTA EL GASTO QUE ENTRA Y EL SEGUNDO EL QUE SALE.



AL REDUCIR TERMINOS SEMEJANTES EFECTUANDO LAS OPERACIONES DEL SEGUNDO MIEMBRO:

$$v_x dy dz + v_y dx dz + v_z dx dy = v_x dy dz + \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy dz + v_y dx dz + \frac{\partial v_y}{\partial y} dx dy dz + v_z dx dy + \frac{\partial v_z}{\partial z} dx dy dz$$

CANCELANDO TERMINOS SEMEJANTES:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy dz + \frac{\partial v_y}{\partial y} dx dy dz + \frac{\partial v_z}{\partial z} dx dy dz = 0$$

$$dx dy dz \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0$$

$dx dy dz = \text{volumen del paralelepipedo} \neq 0 \therefore$

$$\boxed{\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0}$$

ECUACION DE CONTINUIDAD EXPRESADA EN TERMINOS DE VELOCIDAD.

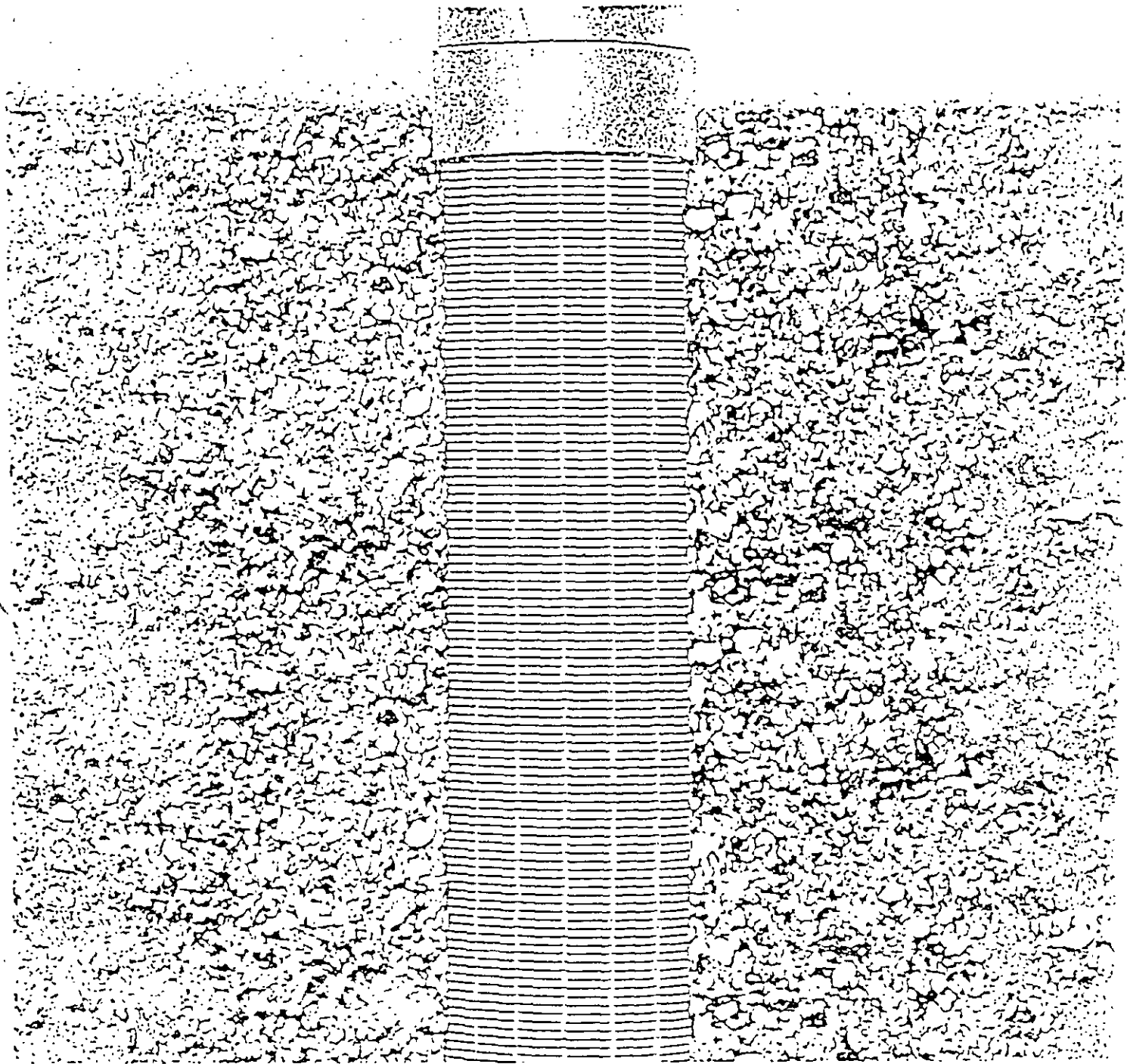


Fig. 275: Una vez eliminado el efecto de película producido por la perforación, el desarrollo remueve a las partículas cuyo tamaño sea menor que las aberturas de la rejilla. Las partículas más gruesas, con porosidad y permeabilidad aumentadas, rodean entonces a la rejilla, como en ésta de fabricación John instalada en un pozo desarrollado por vía natural.

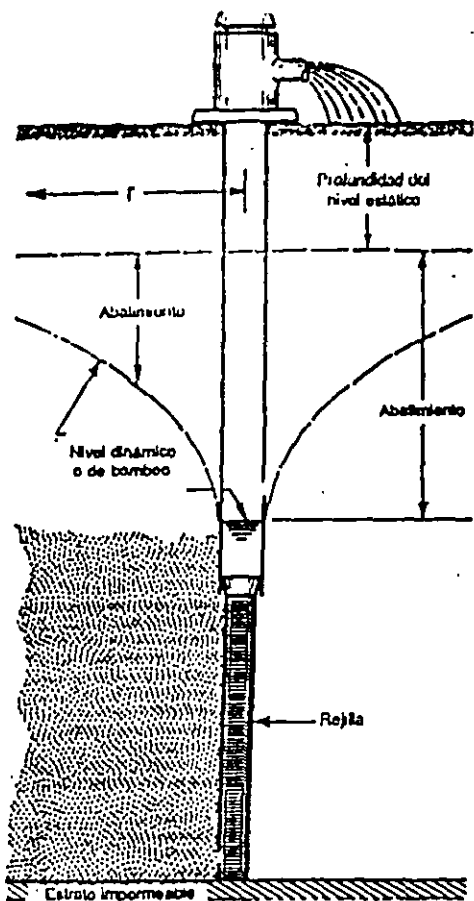


Fig. 50: Medidas relativas al comportamiento de los pozos, y a pruebas de bombeo de pozos y pozos.

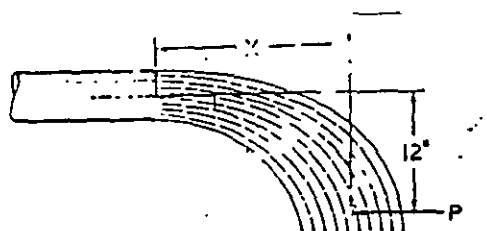


Fig. 63: La descarga de una tubería horizontal puede estimarse conociendo la distancia x.

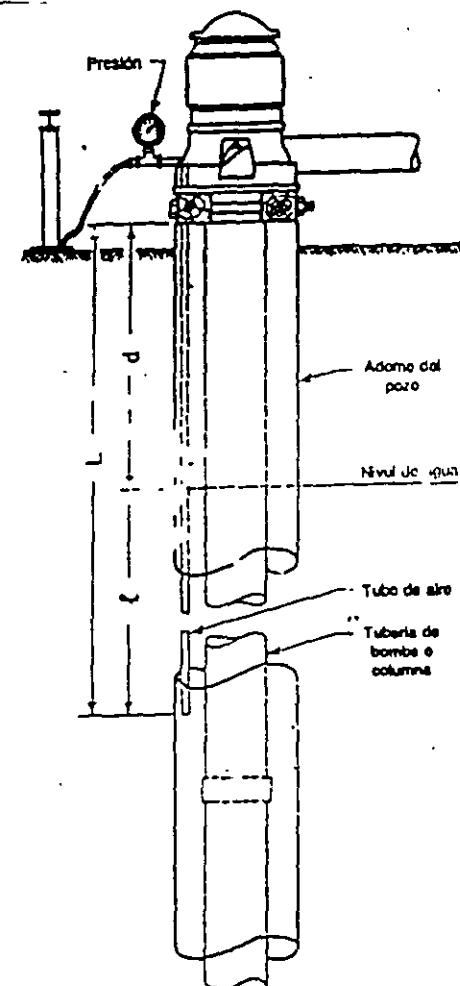


Fig. 58: Instalación típica para la medición de los niveles de agua por el método de la línea de aire.

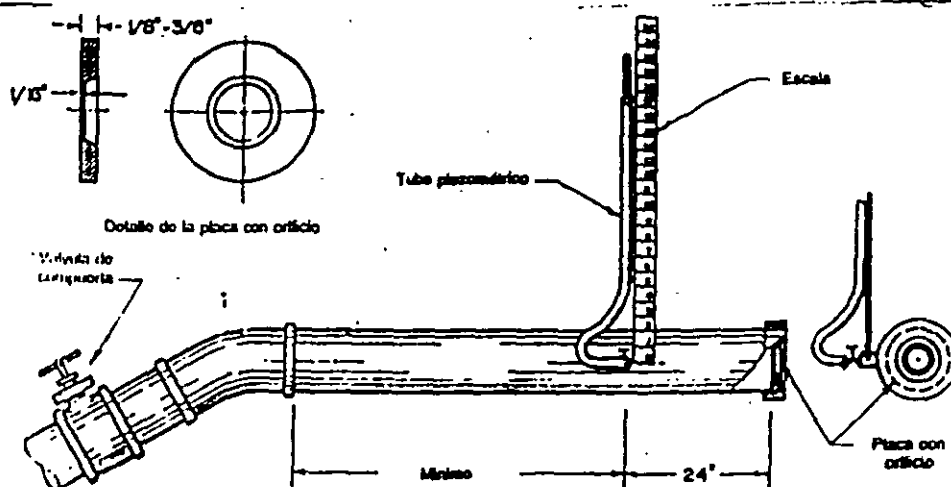


Fig. 51: Detalles esenciales del vertedero de orificio circular usado comúnmente para la medición de caudal de bombeo cuando se extrae agua por medio de una bomba turbina. La tubería de descarga debe permanecer en el nivel.

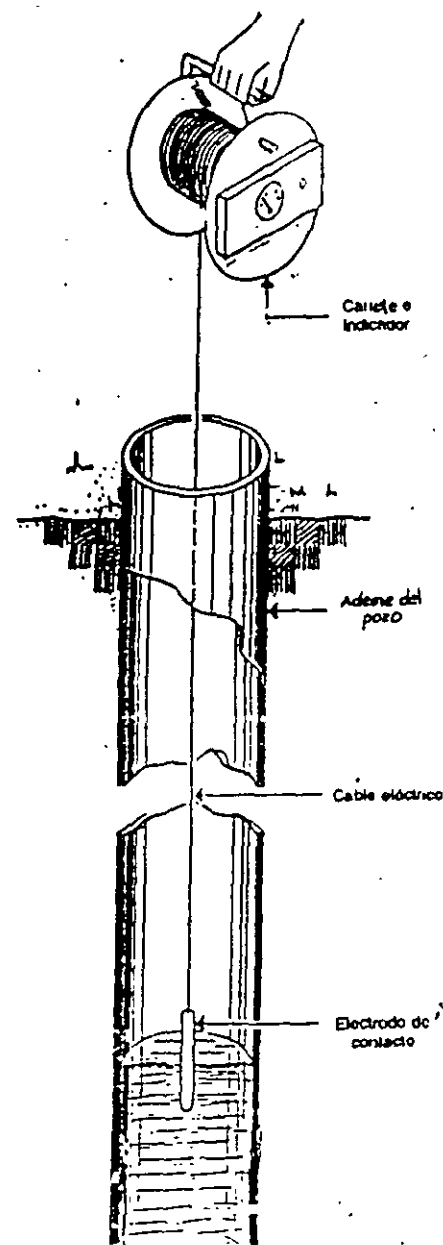
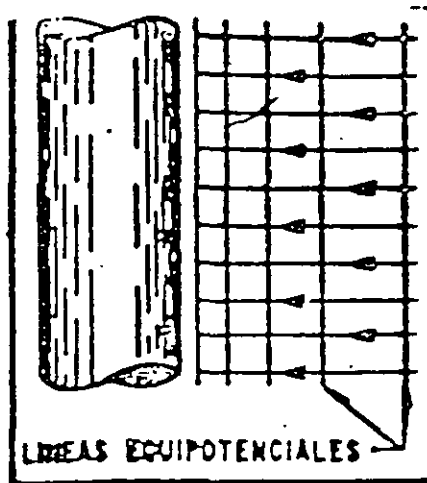
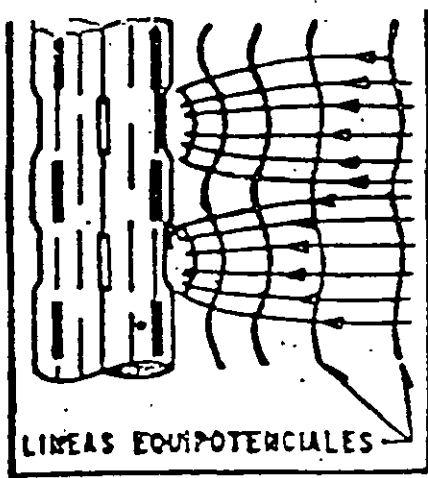
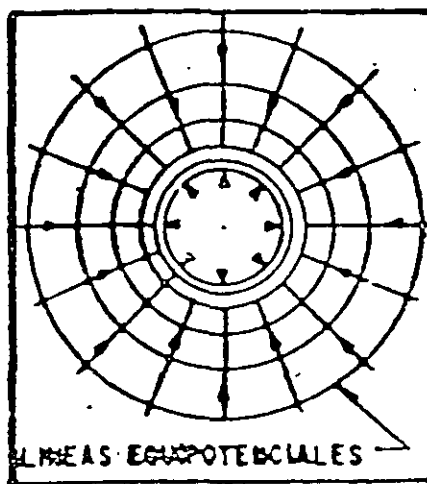
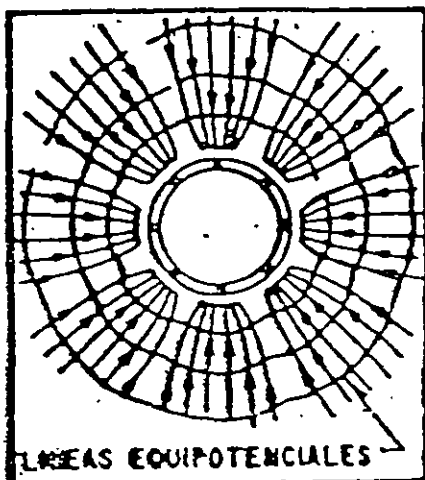


Fig. 57: Sonda eléctrica para medir la profundidad del agua, que consiste en un electrodo, un cable de hilos y un amperímetro que indica cuando cierra el circuito y que el electrodo ha tocado el agua.



C O R T E



TUBERIA RANURADA

P L A N T A

FIGURA 2

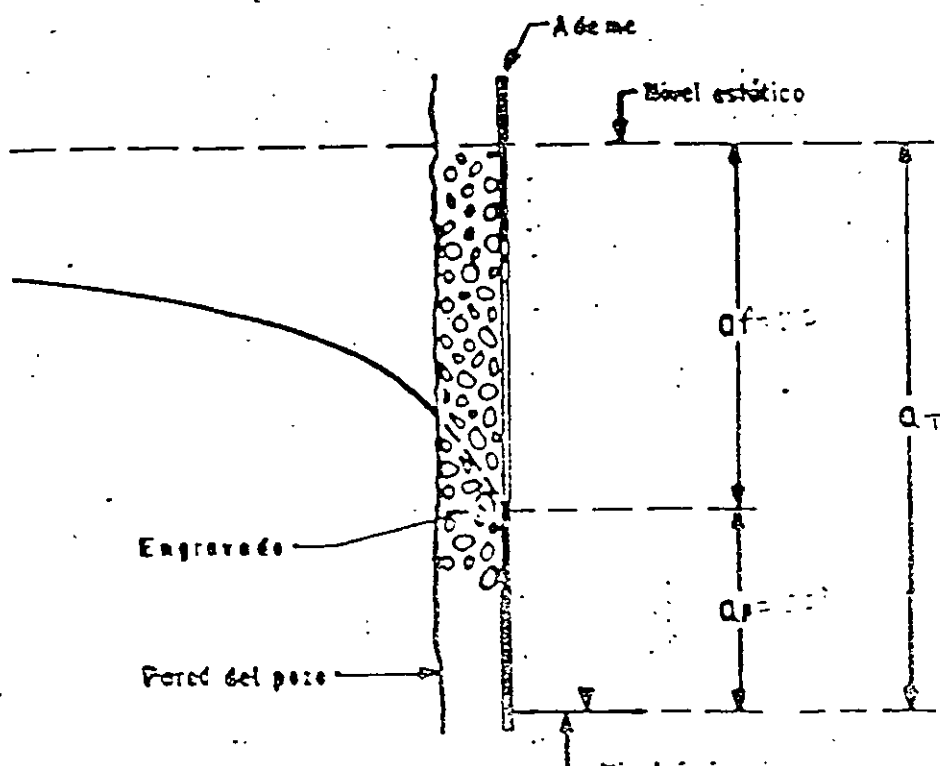


FIGURA 3

AFORO DE BOMBAS

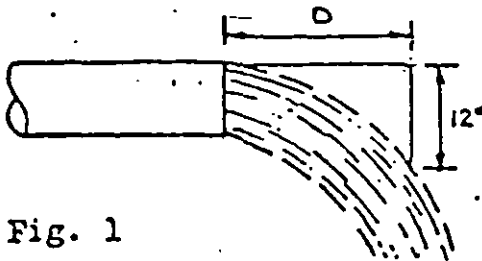


Fig. 1

Descarga en tubo horizontal lleno,

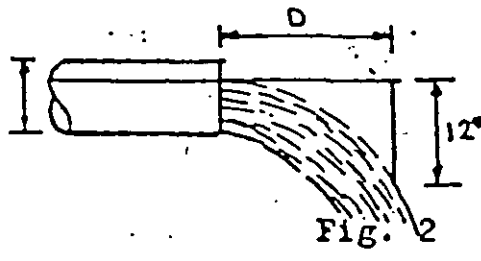


Fig. 2

Descarga en tubo horizontal
parcialmente lleno.

TABLA I (Continuación.)

AFORO DE TUBOS HORIZONTALES CON DESCARGA COMPLETA.

Diámetro del tubo en pulgadas dist. horizontal en cms. en lts/seg.

Dist. Htal.	2"	2-1/2"	3"	3-1/2"	4"	4-1/2"	5"	5-1/2"	6"	7"
80	6.6	10.1	14.5	19.9	26.0	32.8	40.5	49.1	58.4	79.5
82	6.7	10.4	14.9	20.4	26.7	33.6	41.5	50.3	59.9	81.5
84	6.9	10.6	15.2	20.9	27.3	34.4	42.6	51.5	61.3	83.5
86	7.1	10.9	15.6	21.4	28.0	35.3	43.6	52.8	62.8	85.4
88	7.2	11.1	16.0	21.9	28.6	36.1	44.6	54.0	64.3	87.4
90	7.4	11.4	16.3	22.4	29.3	36.9	45.6	55.2	65.7	89.4
92	7.5	11.7	16.7	22.9	29.9	37.7	46.6	56.4	67.2	91.4
94	7.7	11.9	17.0	23.3	30.6	38.5	47.6	57.7	68.6	93.4
96	7.9	12.2	17.4	23.8	31.2	39.4	48.6	58.9	70.1	95.4
98	8.0	12.4	17.8	24.3	31.9	40.2	49.7	60.1	71.6	97.4
100	8.2	12.7	18.1	24.8	32.5	41.0	50.7	61.4	73.0	99.4
102	8.4	12.9	18.5	25.3	33.2	41.8	51.7	62.6	74.5	101.3
104	8.5	13.2	18.9	25.8	33.8	42.6	52.7	63.8	76.0	103.3
106	8.7	13.4	19.2	26.3	34.5	43.4	53.7	65.0	77.4	105.3
108	8.9	13.7	19.6	26.8	35.1	44.3	54.7	66.3	78.9	107.3
110	9.0	13.9	19.9	27.3	35.8	45.1	55.7	67.5	80.3	109.3
112	9.2	14.1	20.3	27.8	36.4	45.9	56.8	68.7	81.8	111.3
114	9.3	14.4	20.7	28.3	37.1	46.7	57.8	69.9	83.3	113.3
116	9.5	14.7	21.0	28.8	37.7	47.5	58.8	71.2	84.7	115.3
118	9.7	15.0	21.4	29.3	38.4	48.4	59.8	72.4	86.2	117.2
120	9.8	15.2	21.8	29.8	39.0	49.2	60.8	73.6	87.6	119.2
122	10.0	15.5	22.1	30.3	39.7	50.0	61.8	74.8	89.1	121.2
124	10.2	15.7	22.5	30.8	40.3	50.8	62.8	76.1	90.6	123.2
126	10.3	16.0	22.8	31.3	41.0	51.6	63.8	77.3	92.0	125.2
128	10.5	16.2	23.2	31.8	41.7	52.5	64.9	78.5	93.5	127.2
130	10.7	16.5	23.6	32.3	42.3	53.3	65.9	79.8	95.0	129.2
132	10.8	16.7	23.9	32.8	43.0	54.1	66.9	81.0	96.4	131.2
134	11.0	17.0	24.3	33.3	43.6	54.9	67.9	82.2	97.9	133.1
136	11.2	17.2	24.7	33.8	44.3	55.7	68.9	83.4	99.3	135.1
138	11.3	17.5	25.0	34.3	44.9	56.6	69.9	84.7	100.8	137.1
140	11.5	17.7	25.4	34.8	45.6	57.4	70.9	85.9	102.2	139.1

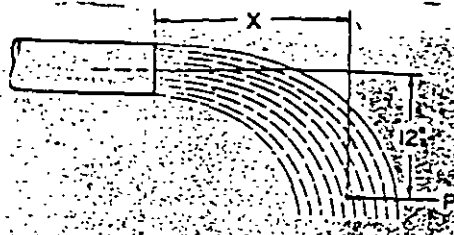


Fig. 61: La descarga de una tubería horizontal puede estimarse conociendo la distancia x.

Descarga de Tubos Horizontales, Fluyendo a Sección Llena, en m³/min

Distancia X en centímetros a 30 cm. de caída	Diámetro del Tubo					
	2" = 50,8 mm	3" = 76,2 mm	4" = 101,6 mm	5" = 127 mm	6" = 152,4 mm	8" = 203,2 mm
15,2 (6")	0,079	0,174	0,303	0,473	0,684	0,806
17,8 (7")	0,091	0,191	0,352	0,553	0,799	1,378
20,3 (8")	0,106	0,231	0,401	0,632	0,916	1,585
22,9 (9")	0,117	0,261	0,450	0,712	1,030	1,772
25,4 (10")	0,132	0,291	0,503	0,787	1,143	1,968
27,9 (11")	0,159	0,318	0,553	0,867	1,256	2,165
30,5 (12")	0,144	0,348	0,602	0,926	1,370	2,308
38,1 (15")	0,198	0,435	0,753	1,185	1,715	2,952
50,8 (20")	0,265	0,583	0,803	1,578	2,368	3,936

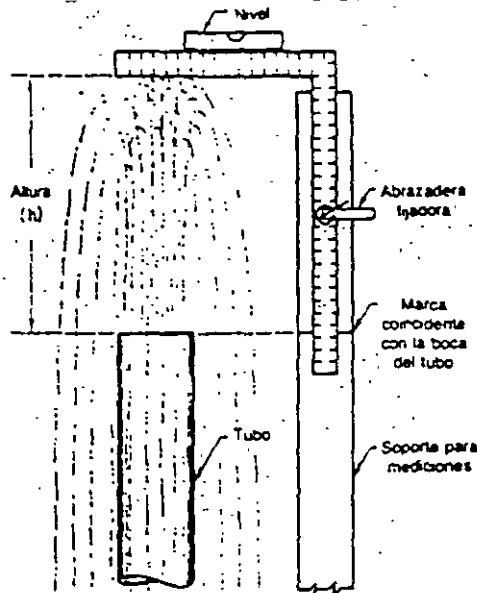
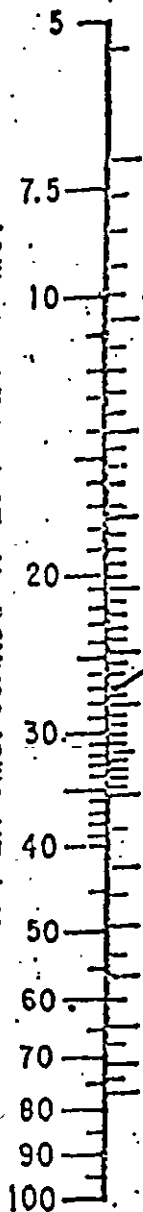


Fig. 62: Forma de medir la altura de la cresta en descarga a chorro de una tubería vertical.

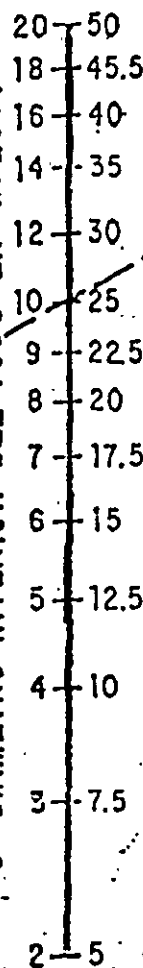
Descarga en Tubos Verticales, en Metros Cúbicos por Minuto

Altura de la Cresta en mm.	Diámetro Nominal del Tubo					
	2" = 50,8 mm	3" = 76,2 mm	4" = 101,6 mm	5" = 127,0 mm	6" = 152,4 mm	8" = 203,2 mm
38 (1,5")	0,083	0,163	0,257	0,322	0,416	0,606
51 (2")	0,098	0,208	0,352	0,454	0,606	0,871
76 (3")	0,125	0,280	0,492	0,700	0,926	1,457
102 (4")	0,144	0,333	0,587	0,871	1,211	1,978
127 (5")	0,167	0,375	0,662	1,022	1,438	2,385
152 (5")	0,182	0,416	0,719	1,136	1,628	2,763
203 (8")	0,212	0,473	0,852	1,363	1,930	3,407
254 (10")	0,235	0,530	0,965	1,514	2,195	3,974
305 (12")	0,261	0,606	1,060	1,665	2,422	4,353
381 (15")	0,295	0,662	1,192	1,893	2,650	4,921
457 (18")	0,322	0,738	1,325	1,908	2,952	5,299
523 (21")	0,352	0,795	1,438	2,251	3,217	5,867
609 (24")	0,379	0,879	1,514	2,422	3,482	6,245

"A" EN CMS. CUANDO "H" ES IGUAL A 15 CMS.

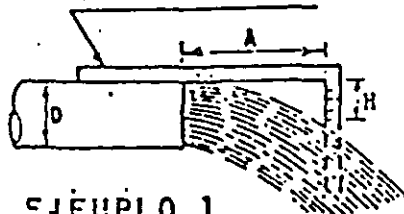


"D" DIAMETRO INTERIOR DEL TUBO EN PULGS.



DIAMETRO DE LA TUBERIA EN CMS.

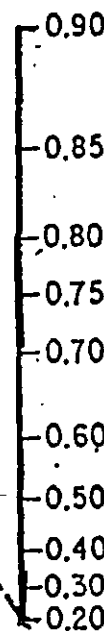
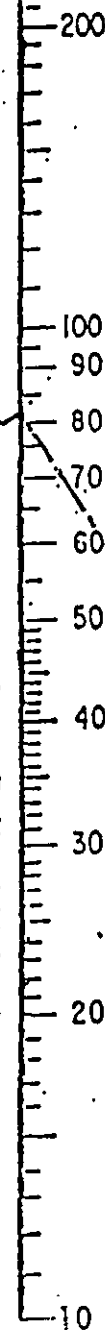
ESCUADRA DE CARPINTERO
O REGLA PLEGADIZA



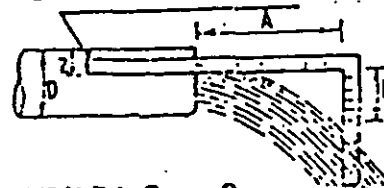
EJEMPLO 1
TUBO LLENO

-) EL DIAMETRO DEL TUBO 25 (10")
-) "A" = 27.5 cm. $Q = 82 \text{ lps}$

"Q" GASTO EN LA DESCARGA EN LTS/SEG



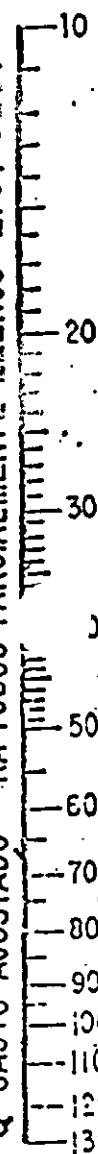
ESCUADRA DE CARPINTERO



EJEMPLO 2
TUBO PARCIALMENTE LLENO

-) EL DIAMETRO DEL TUBO 25 (10")
-) "A" = 27.5 cm.
-) "H" = 15 cm.
-) "Z" = 5 cm.
-) FALTANTE 5

"Q" GASTO AJUSTADO PARA TUBOS PARCIALMENTE LLENOS LTS/SEG.



COMPONENTES DEL ABATIMIENTO DEL NIVEL DEL AGUA (OBSERVADO EN UN POZO DE BOMBEO)

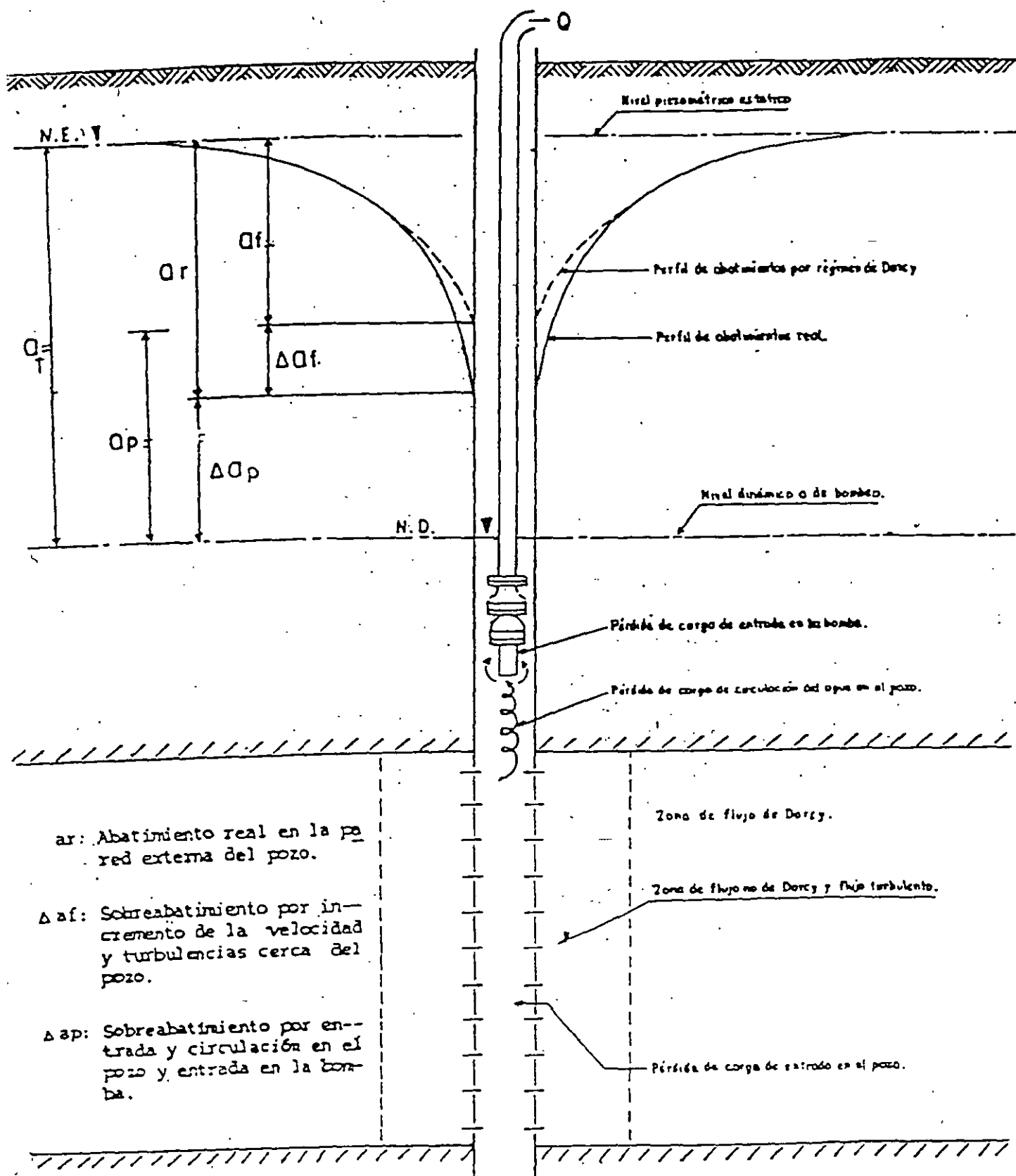


FIGURA Nº 1

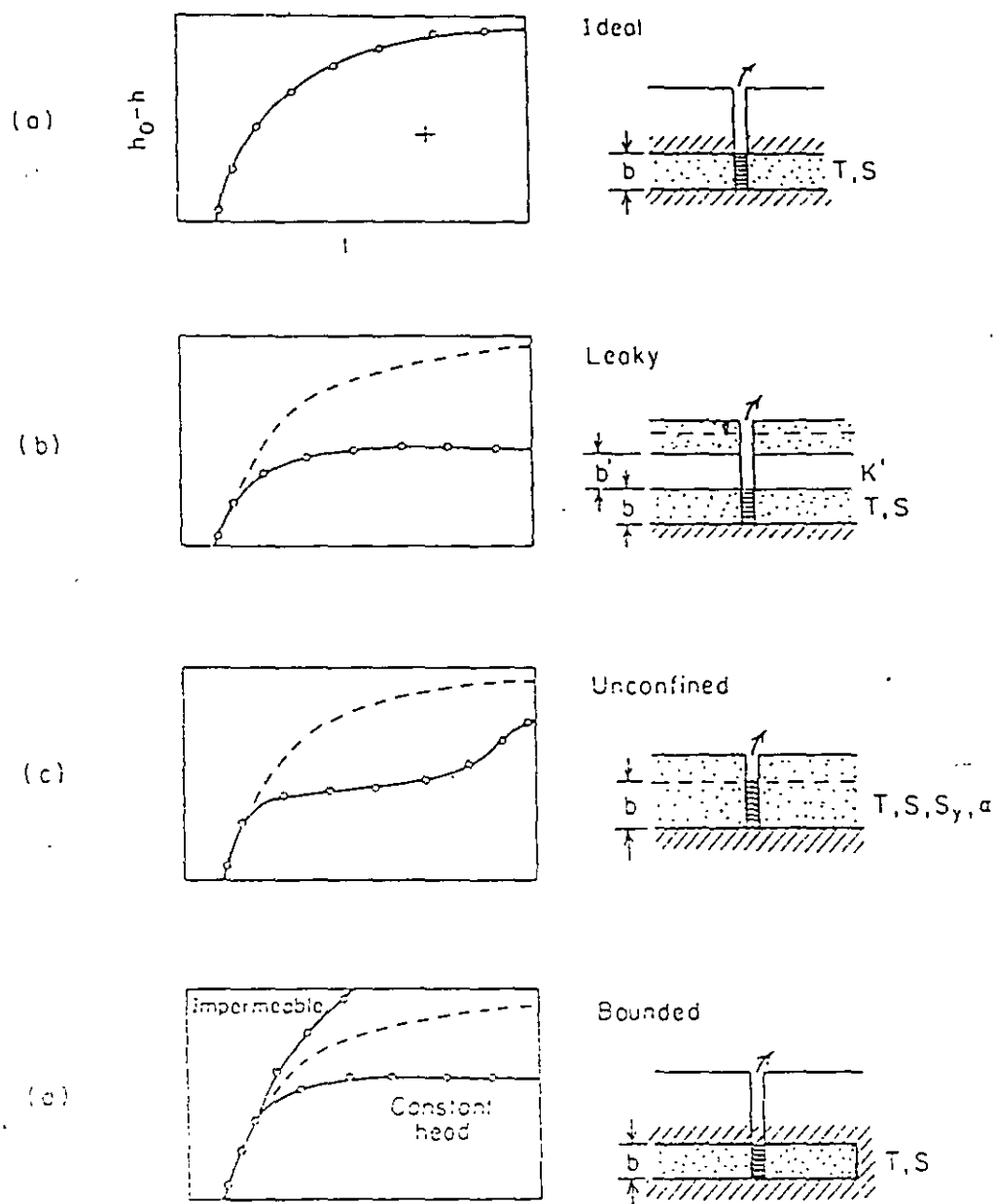


Figure 8.23 Comparison of log-log $h_0 - h$ versus t data for ideal, leaky, unconfined, and bounded systems.

Waterloo Hydrogeologic
180 Columbia St. W.
Waterloo, Ontario, Canada
ph. (519) 746-1798

Pumping test analysis
Time-Drawdown-method after
COOPER & JACOB
Confined aquifer

Joram Carriles Diaz, Page 1

Project: Allixco

Evaluated by: F.I.

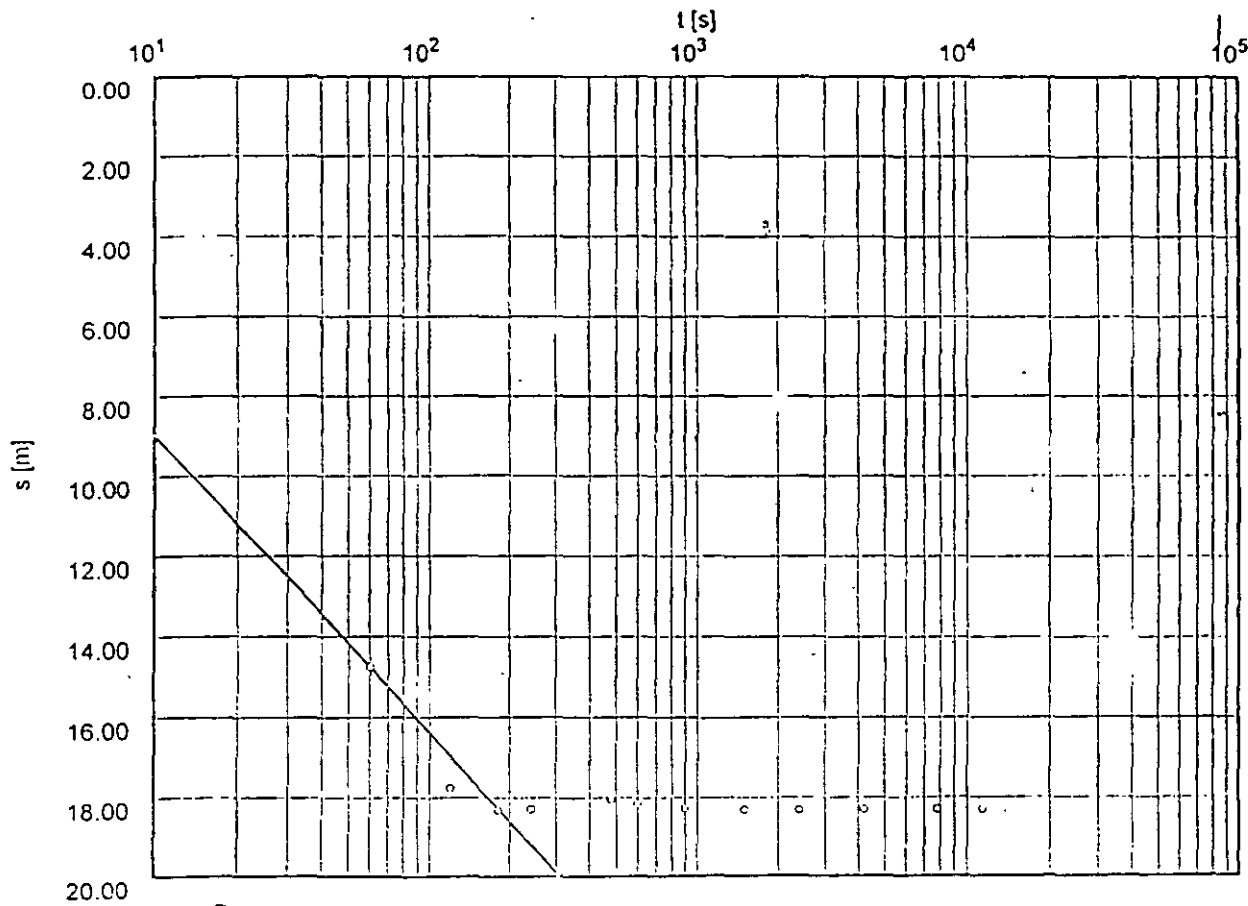
Date: 21.05.1998

Pumping Test No. 3

Test conducted on: UNAM

Las Palmas

Discharge 25.00 l/s



Transmissivity [m^2/s]: 6.17×10^{-4}

Storativity: 3.42×10^{-7}

EJEMPLO:

LUNA GÓMEZ PA3LO/91

HANTUSH - JACOBI

DATOS:

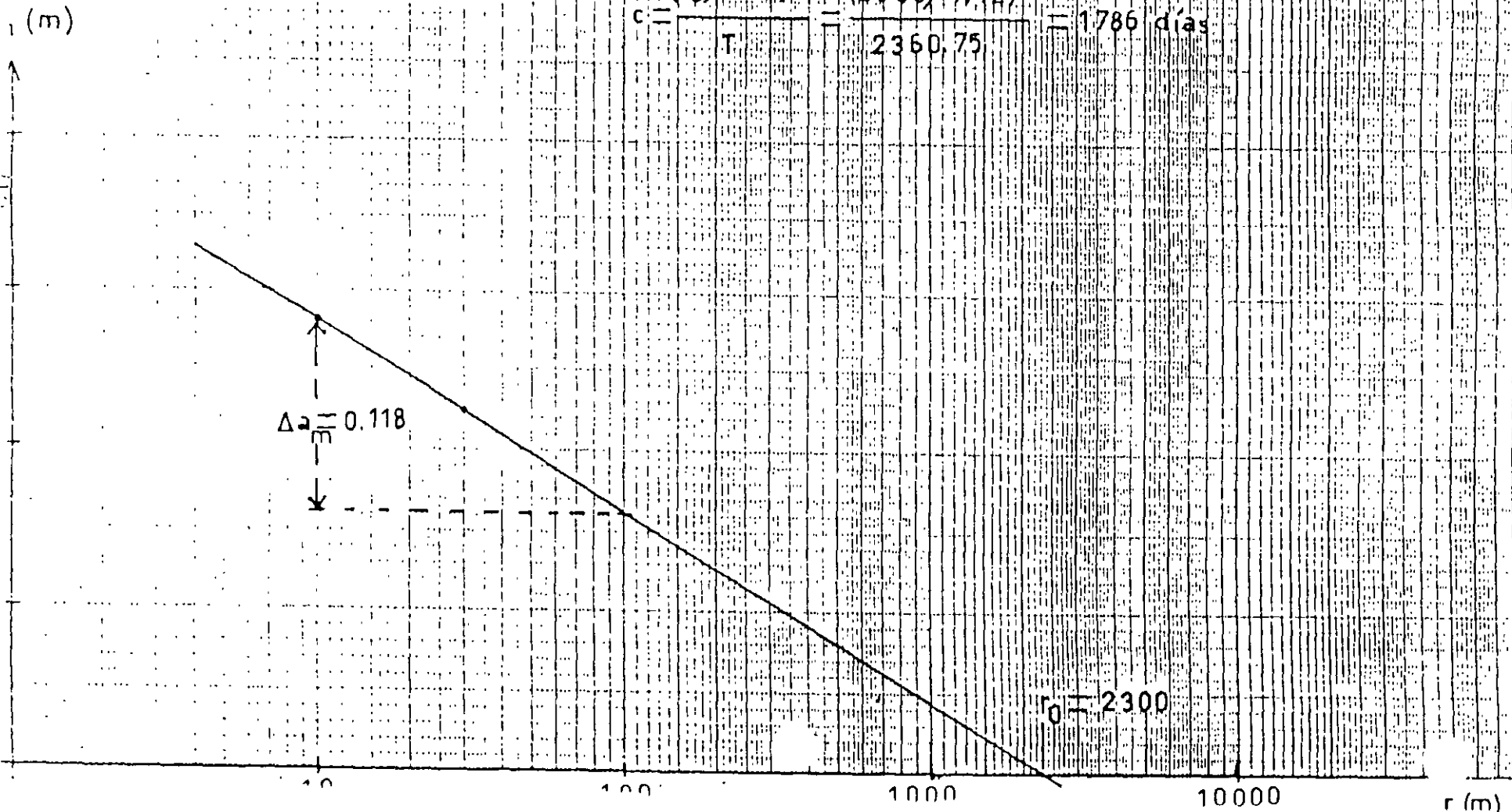
PIEZOMETRO	P ₁₀	P ₃₀
a _m	0.280	0.224

$$Q = 761 \text{ m}^3/\text{día}$$

CÁLCULOS:

$$T = \frac{2.3Q}{2\pi\Delta a_m} = \frac{2.3 \times 761}{2 \times 3.14 \times 0.118} = 2360.75 \text{ m}^2/\text{día}$$

$$c = \frac{(r_0/1.12)^2}{T} = \frac{(2300/1.12)^2}{2360.75} = 1786 \text{ días}$$



Waterloo Hydrogeologic
180 Columbia St. W.
Waterloo, Ontario, Canada
ph.(519)746-1798

Pumping test analysis
NEUMAN's method
Unconfined aquifer with
delayed watertable response

Joram Carriles Diaz, Page 1

Project: Atlixco

Evaluated by: F.I.

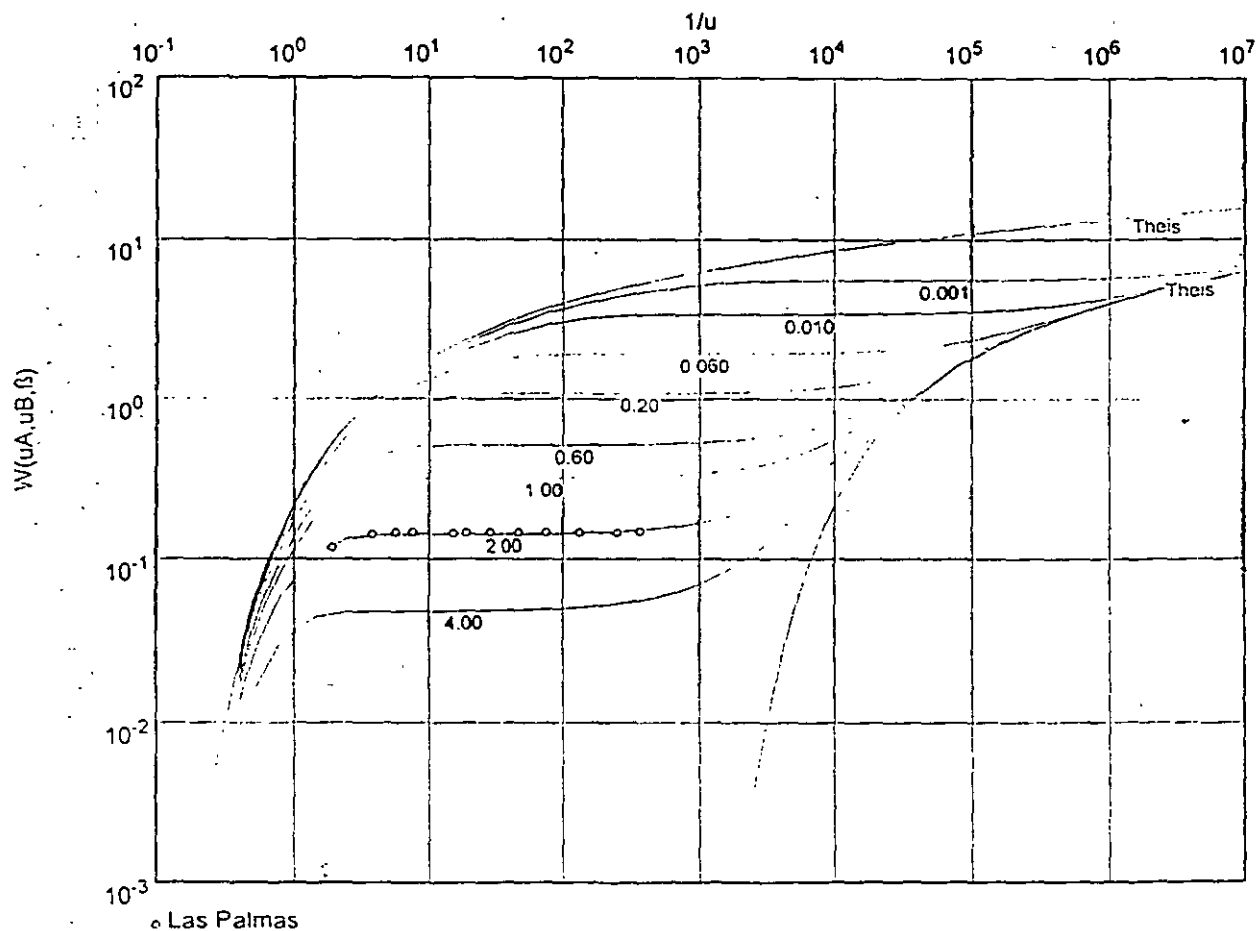
Date: 21.05.1998

Pumping Test No. 3

Test conducted on: UNAM

Las Palmas

Discharge 25.00 l/s



Transmissivity [m^2/s]: 1.58×10^{-5}

Storativity: 7.99×10^{-7}

Specific yield: 7.99×10^{-3}

Waterloo Hydrogeologic
180 Columbia St. W.
Waterloo, Ontario, Canada
ph (519)746-1798

Pumping test analysis
HANTUSH's method
Leaky aquifer, no aquitard storage

Joram Carriles Diaz, Page 1

Project: Atlixco

Evaluated by: F.I.

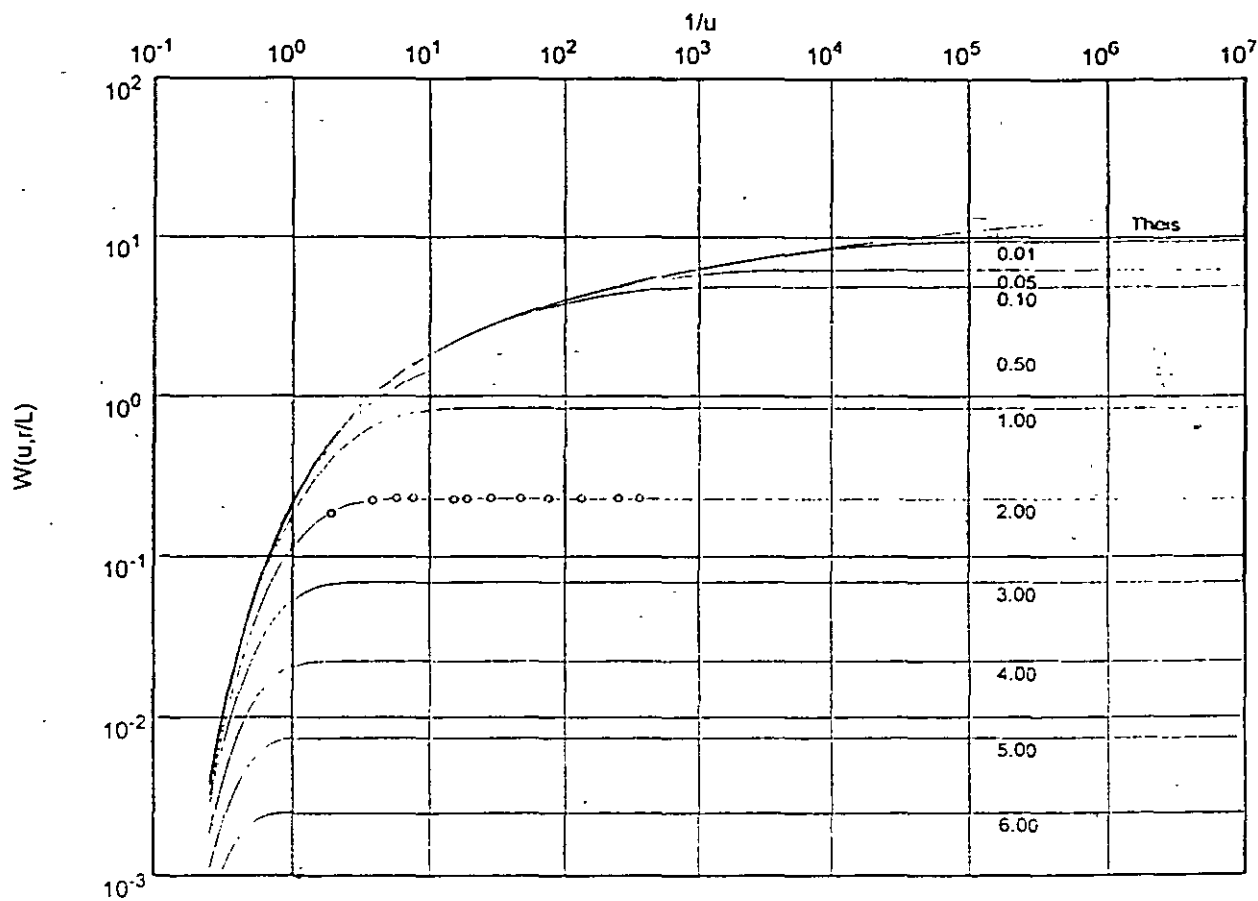
Date: 21.05.1998

Pumping Test No. 3

Test conducted on: UNAM

Las Palmas

Discharge 25.00 l/s



Transmissivity [m^2/s]: 2.50×10^{-5}

Storativity: 1.26×10^{-6}

Waterloo Hydrogeologic
180 Columbia St. W.
Waterloo, Ontario, Canada
ph. (519) 746-1798

Pumping test analysis
Distance-Time-Drawdown-method
after COOPER & JACOB
Confined aquifer.

ING. ALBERTO ARIAS PAZ, Page 1

Project: PROYECTO ATLIXCO, PUEBLA

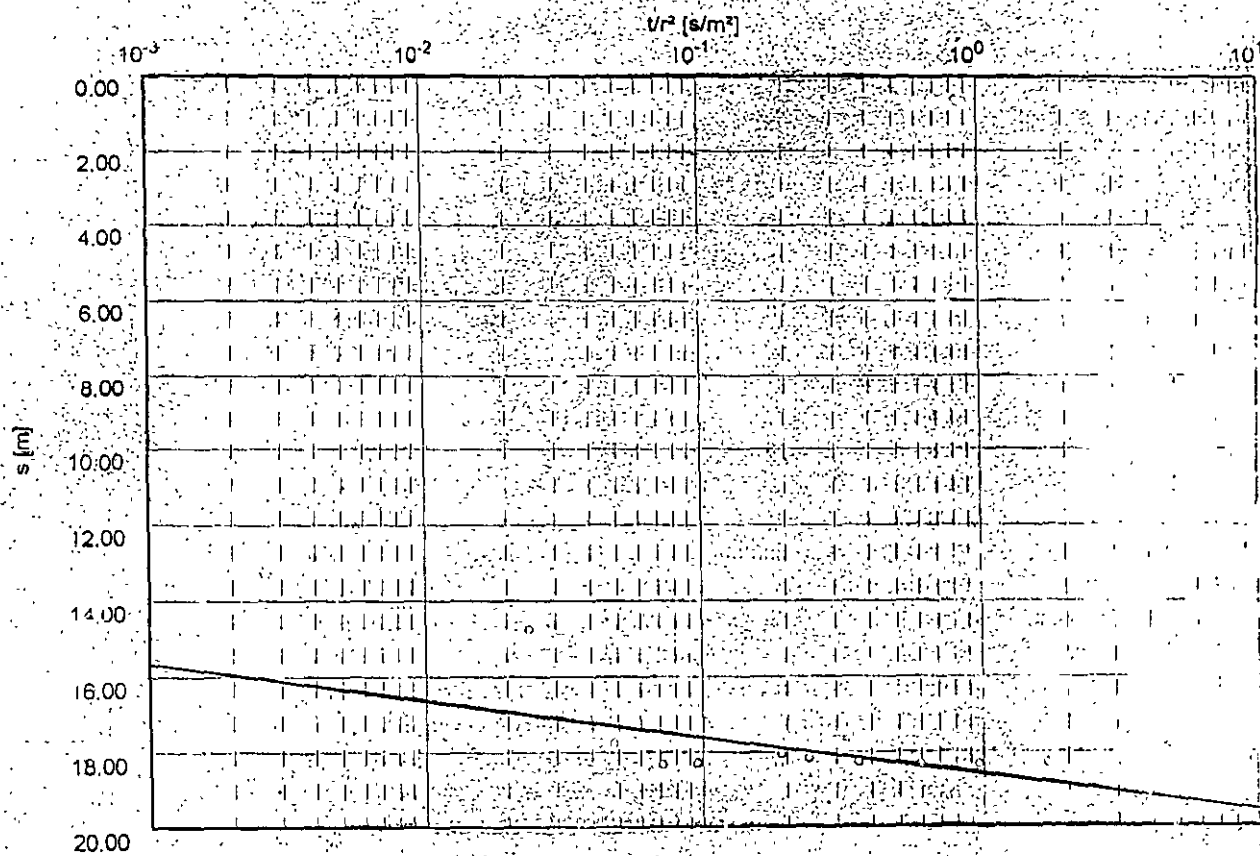
Evaluated by: FACULT/Date: 04.05.1998/IA

Pumping Test No. 1

Test conducted on: UNAM

PALMAS

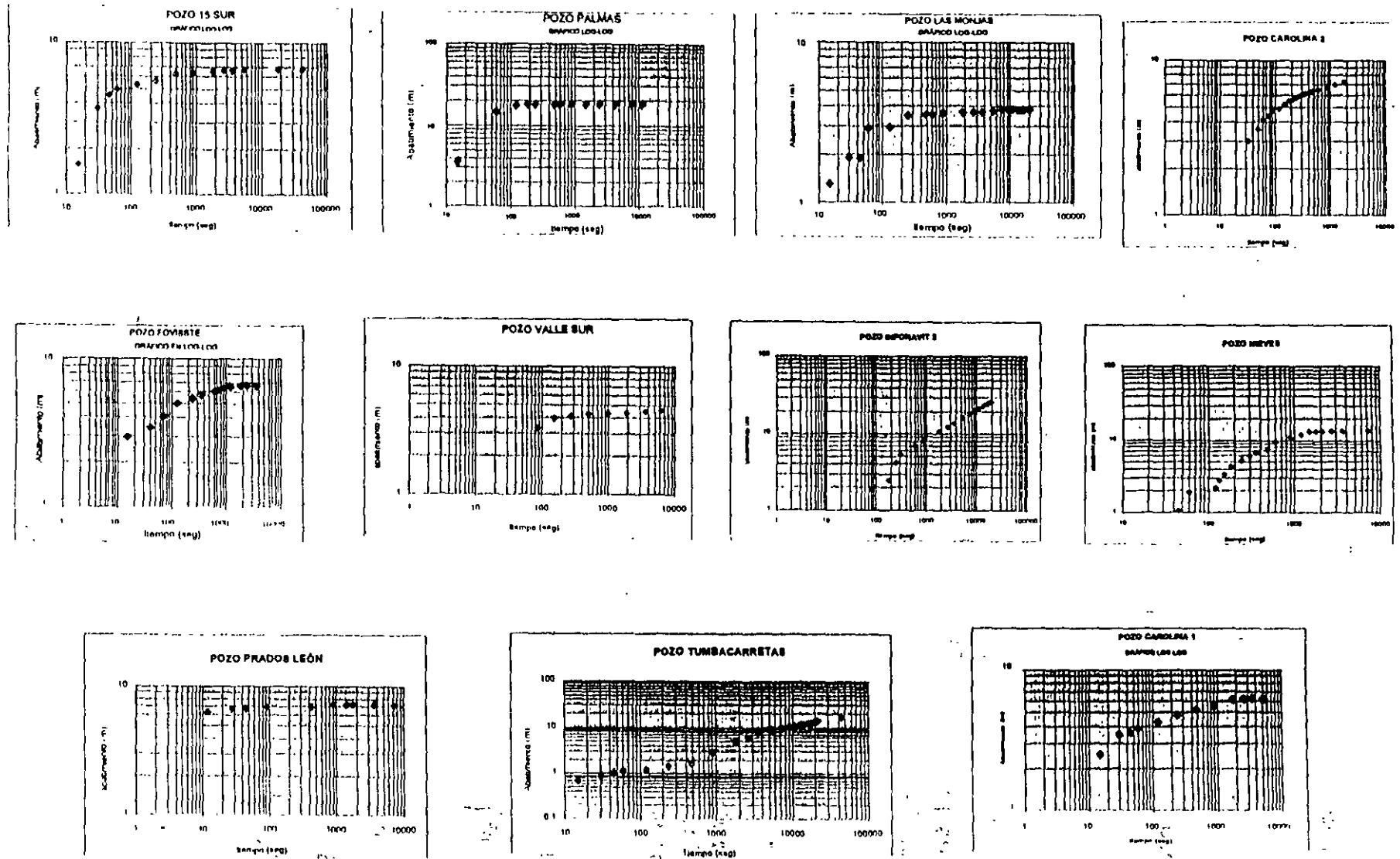
Discharge 25.00 l/s



POZO PALMAS

Transmissivity [m^2/s]: 4.68×10^{-3}

FIGURA 3.1 RESUMEN DE GRÁFICAS INTERPRETADAS EN LOG-LOG DE LA ZONA DE ATLIXCO, PUEBLA
(PRUEBAS DE BOMBEO REALIZADAS EL 27 DE MARZO DE 1998)



que es la relación de Theis para acuífero libre, admitiendo descensos muy pequeños frente al espesor saturado.

Si, por el contrario, el índice de retraso es muy grande, que físicamente significaría que el acuífero tuviera encima un paquete de materiales saturados muy poco permeables y de granulometría muy fina, el esquema físico sería de acuífero cautivo:

En la relación [1], $1/x \rightarrow \infty$, $\alpha \rightarrow 0$ y

$$d = \frac{Q}{4\pi T} W(u)$$

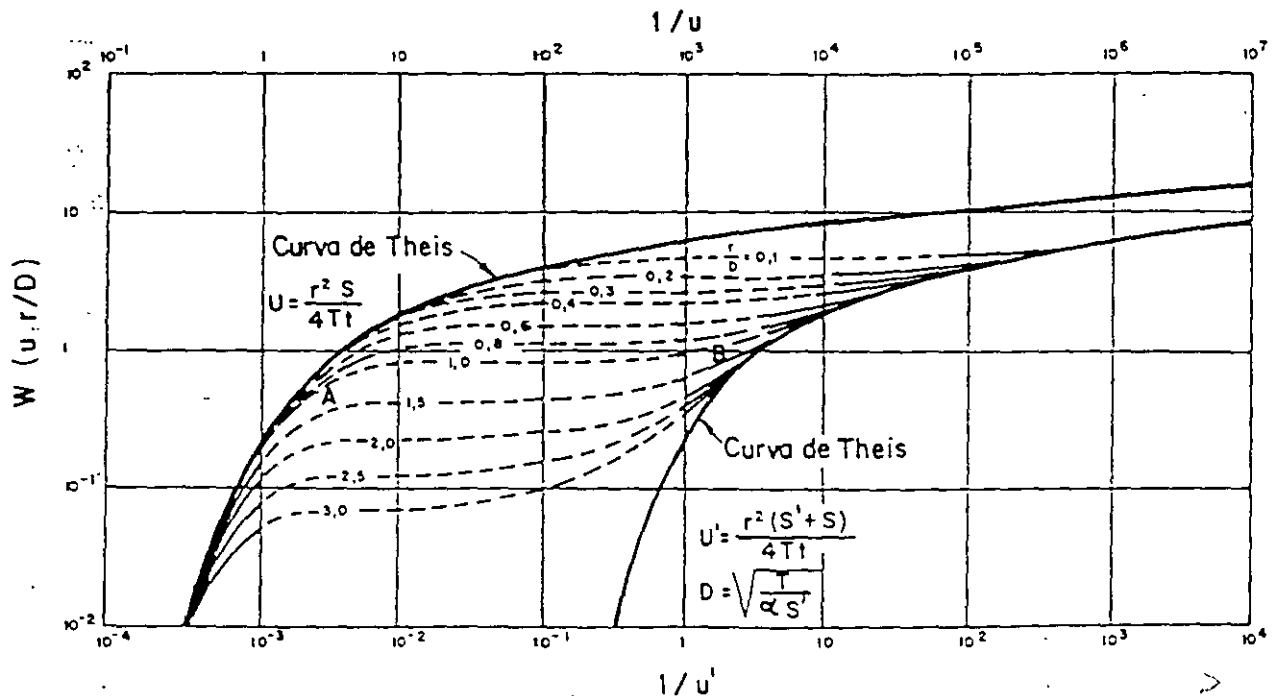
que es la relación de Theis para acuífero cautivo.

La ecuación:

$$d = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/D)$$

es muy parecida a la de Hantush para el drenaje vertical.

La función $W(u, r/D)$ no tiene solución analítica y está tabulada. Se representa en el gráfico 41, que es debido a Prickett.



El primer tramo de las curvas de campo será «más o menos normal», pudiendo ajustarse a los esquemas teóricos.

En el segundo tramo, la recarga diferida empieza a dejar notar su efecto y, como ocurre ante los procesos de recarga, las curvas tienden a estabilizarse.

Por último el efecto de recarga anómala desaparece y las curvas vuelven a tomar su forma normal.

Los gráficos 39 y 40 muestran esquemáticamente la distorsión debida a un posible drenaje diferido.

Un drenaje diferido en el sentido amplio que se ha comentado puede ser debido a muchas causas, de muy distinto origen en su concepto físico y, según sea este concepto, puede motivar distintos criterios en la interpretación de los ensayos.

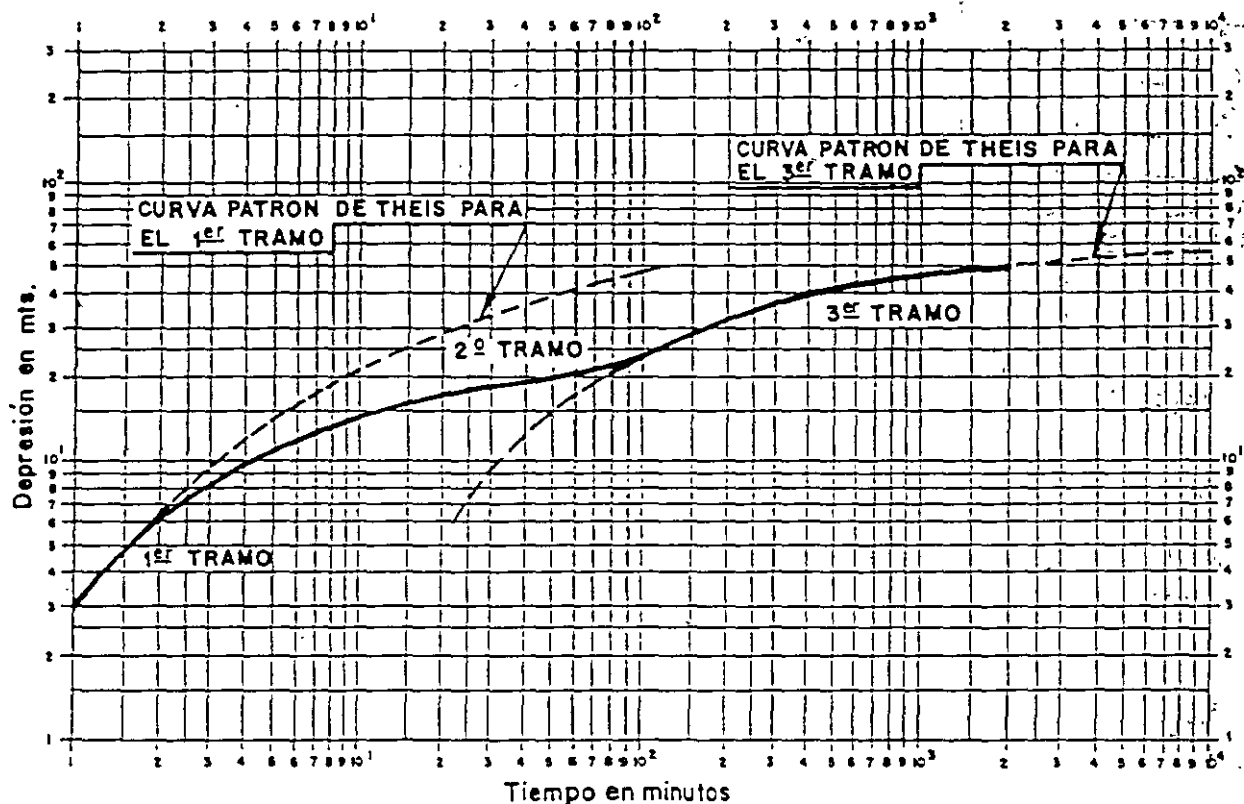


Gráfico 39.—Distorsión de las curvas de Theis por efecto de drenaje diferido.

Los valores de la T , que arrojan el primer y tercer tramos, serán coincidentes tanto si se usa el método de Theis como el de Jacob, o al menos deberían serlo si se está en un esquema de drenaje diferido. Ello es lógico si se piensa que en el primero y en el tercero no existen las influencias de la recarga anómala. El fenómeno es más fácilmente explicable acudiendo a las rectas de

- Tanto De Glee como Hantush - Jacob, llegaron a la ECUACION QUE EXPRESA LA DISTRIBUCION DE ABATIMIENTOS EN LAS CERCANIAS DEL POZO DE BOMBEO:

$$a_m = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{L} \right)$$

Ec. 1

a_m = Abat. m. (m), observado en un piezómetro a "r" metros del pozo de bombeo.

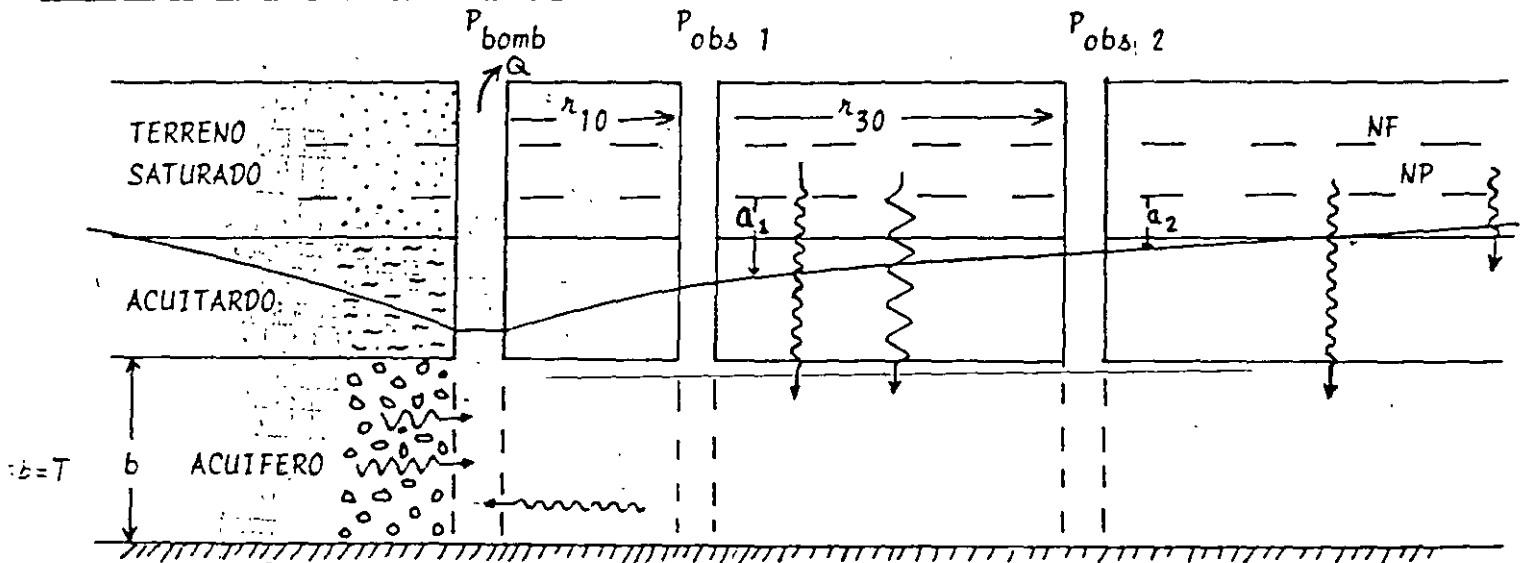
Q = Gasto de bombeo (m³/día).

L = Factor de filtración (m).

C = Resistencia hidráulica que opone el acuitardo, al flujo vertical del agua.

K_0 = Funcion de Bessel, modificada por Hankel.

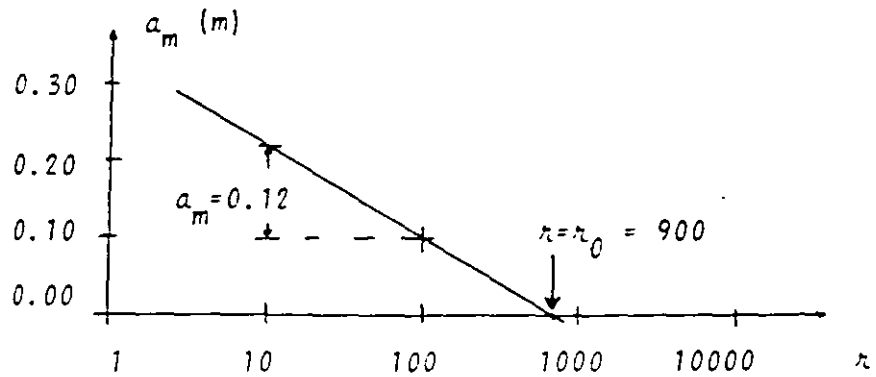
ACUIFERO SEMI-CONFINADO.



- Hantush (1956, 1964); apuntó que si $r/L \ll 0.05$, entonces y para fines prácticos, la Ec. 1 puede expresarse como:

$$a_m = \frac{Q}{2\pi T} \left[\log 1.12 \frac{L}{r} \right]$$

Graficando a_m VS r en papel semi-log. y prolongando la recta hasta cortar el eje de las "r" se obtiene el pto. de coordenadas: $a=0, r=r_0$ con lo que:



$$0 = \frac{2.3Q}{2\pi T} \left[\log 1.12 \frac{L}{r_0} \right] \rightarrow 1.12 \frac{L}{r_0} = \frac{1.12}{\sqrt{Tc}} = 1 \rightarrow$$

$$T = \frac{2.3Q}{2\pi \Delta a_m}$$

$$C = \frac{(r_0/1.12)^2}{T}$$

METODO DE HSINTUSH - JACOBCONDICIONES PARA LAS QUE SE CUMPLE:

- a) Acuífero semi-confinado.
- b) Flujo de agua hacia el pozo en REGIMEN PERMANENTE.
- c) $r/l \leq 0.05$

PROCEDIMIENTO:

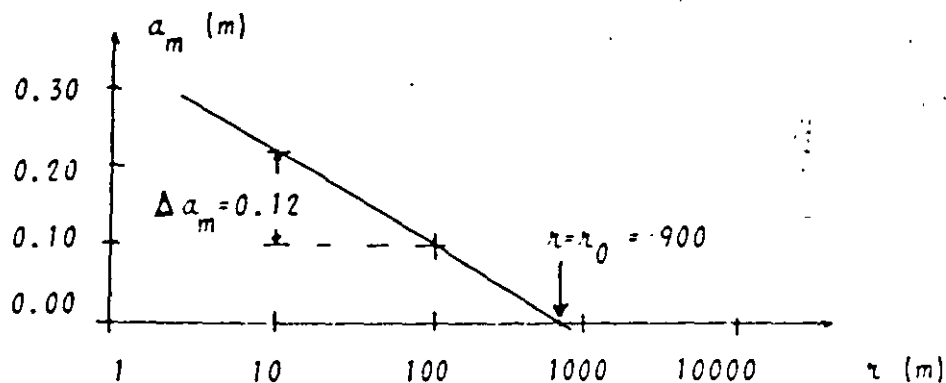
- 1) En papel semi-log. graficar a_m VS r ; " r ", en escala Log.

a_m = Máximos abat. observados en cada piezómetro.

r = Distancias de los piezómetros al pozo de bombeo.

- 2) Trazar la recta que mejor se ajuste a los puntos.

- 3) Determinar la pendiente Δa_m para un ciclo semi-Log.



- 4) Sustituir Δa_m y Q en la Ec. de la Transmisibilidad y calcular T .

$$T = \frac{2.3Q}{2\pi \Delta a_m}$$

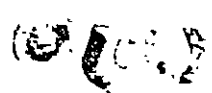
- 5) Prolongar la recta hasta cortar el eje de las " r " y leer el valor r_0

- 6) Sustituir r_0 y T en la ecuación de la Resistencia hidráulica y calcularla.

$$C = \frac{(r_0 / 1.12)}{T}$$

u para ser Utilizados en la Fórmula de No Equilibrio de Theis

N	u	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-4}$	$N \times 10^{-4}$	N
1.0	13.2383	10.9357	8.6322	6.3318	4.0379	1.8279	0.2194	
1.1	13.1430	10.8404	8.6379	6.2363	3.9435	1.7371	.1860	
1.2	13.0660	10.7534	8.4509	6.1494	2.8576	1.6595	.1584	
1.3	12.9759	10.6734	8.3709	6.0625	3.7785	1.6839	.1355	
1.4	12.9018	10.6993	8.2928	5.9955	4.7054	1.5241	.1162	
1.5	12.8328	10.6503	8.2278	5.9266	5.6371	1.4645	.1099	
1.6	12.7683	10.4637	8.1634	5.8421	6.5739	1.4092	.08231	
1.7	12.7077	10.4051	8.1027	5.8018	7.5143	1.3578	.07465	
1.8	12.6505	10.3479	8.0455	5.7446	8.4581	1.3093	.06471	
1.9	12.5964	10.2939	7.9915	5.6906	9.4050	1.2649	.05629	
2.0	12.5451	10.2428	7.9402	5.6394	1.3547	1.2227	.04820	
2.1	12.4964	10.1935	7.8914	5.5907	2.3089	1.1829	.04261	
2.2	12.4498	10.1473	7.8449	5.5443	3.2614	1.1454	.03719	
2.3	12.4054	10.1028	7.8004	5.4999	4.2179	1.1099	.03250	
2.4	12.3628	10.0603	7.7579	5.4575	5.1763	1.0762	.02844	
2.5	12.3220	10.0194	7.7172	5.4167	6.1365	1.0443	.02491	
2.6	12.2825	9.9802	7.6779	5.3776	7.0983	1.0139	.02185	
2.7	12.2450	9.9425	7.6401	5.3400	8.0615	.9842	.01913	
2.8	12.2087	9.9061	7.6038	5.3037	9.0261	.9573	.01668	
2.9	12.1736	9.8710	7.5687	5.2687	1.9920	.9309	.01462	
3.0	12.1397	9.8371	7.5348	5.2349	2.9591	.9057	.01305	
3.1	12.1069	9.8043	7.5020	5.2022	3.9273	.8816	.01149	
3.2	12.0751	9.7729	7.4703	5.1706	4.8965	.8582	.01013	
3.3	12.0444	9.7418	7.4395	5.1399	5.8668	.8361	.008839	
3.4	12.0145	9.7120	7.4097	5.1102	6.8379	.8147	.007691	
3.5	11.9855	9.6830	7.3807	5.0813	7.8099	.7942	.006670	
3.6	11.9574	9.6548	7.3526	5.0532	8.7827	.7745	.005760	
3.7	11.9300	9.6274	7.3252	5.0259	9.7563	.7554	.004943	
3.8	11.9033	9.6007	7.2985	4.9993	1.7306	.7371	.004220	
3.9	11.8773	9.5745	7.2725	4.9735	2.7056	.7194	.003587	
4.0	11.8520	9.5495	7.2472	4.9482	3.6813	.7024	.003039	
4.1	11.8273	9.5248	7.2225	4.9236	4.6576	.6859	.002569	
4.2	11.8032	9.5007	7.1983	4.8997	5.6344	.6700	.002169	
4.3	11.7797	9.4771	7.1749	4.8762	6.6119	.6546	.001833	
4.4	11.7567	9.4541	7.1520	4.8533	7.5899	.6397	.001550	
4.5	11.7342	9.4317	7.1295	4.8310	8.5684	.6253	.001313	
4.6	11.7122	9.4097	7.1075	4.8091	9.5474	.6114	.001114	
4.7	11.6907	9.3882	7.0860	4.7877	1.5268	.5979	.000953	
4.8	11.6697	9.3671	7.0650	4.7667	2.5063	.5848	.000820	
4.9	11.6491	9.3465	7.0444	4.7462	3.4871	.5721	.000711	
5.0	11.6289	9.3263	7.0242	4.7261	4.4679	.5598	.000621	
5.1	11.6091	9.3065	7.0044	4.7064	5.4491	.5478	.000550	
5.2	11.5896	9.2871	6.9850	4.6871	6.4306	.5362	.000495	
5.3	11.5706	9.2681	6.9659	4.6681	7.4120	.5250	.000450	
5.4	11.5519	9.2494	6.9473	4.6495	8.3945	.5140	.000413	
5.5	11.5336	9.2310	6.9282	4.6313	9.3775	.5034	.000382	
5.6	11.5155	9.2130	6.9109	4.6134	1.3604	.4930	.000355	
5.7	11.4978	9.1953	6.8932	4.5958	2.3437	.4830	.000330	
5.8	11.4804	9.1779	6.8758	4.5785	3.3273	.4732	.000307	
5.9	11.4633	9.1608	6.8588	4.5615	4.3111	.4637	.000286	
6.0	11.4465	9.1440	6.8420	4.5448	5.2953	.4544	.000267	
6.1	11.4300	9.1275	6.8254	4.5283	6.2797	.4454	.000249	
6.2	11.4138	9.1112	6.8092	4.5122	7.2645	.4366	.000232	
6.3	11.3978	9.0952	6.7932	4.4963	8.2494	.4280	.000216	
6.4	11.3820	9.0795	6.7775	4.4806	9.2346	.4197	.000201	
6.5	11.3665	9.0640	6.7620	4.4652	1.2201	.4116	.000187	
6.6	11.3512	9.0487	6.7467	4.4501	2.2053	.4038	.000174	
6.7	11.3362	9.0337	6.7317	4.4351	3.1917	.3959	.000162	
6.8	11.3214	9.0189	6.7169	4.4204	4.1779	.3883	.000150	
6.9	11.3068	9.0043	6.7023	4.4059	5.1643	.3810	.000139	
7.0	11.2924	8.9899	6.6879	4.3916	6.1508	.3738	.000129	
7.1	11.2782	8.9757	6.6737	4.3776	7.1376	.3668	.000120	
7.2	11.2642	8.9617	6.6598	4.3636	8.1248	.3599	.000111	
7.3	11.2504	8.9479	6.6460	4.3500	9.1118	.3532	.000103	
7.4	11.2368	8.9343	6.6324	4.3364	1.0991	.3467	.000095	
7.5	11.2234	8.9209	6.6190	4.3231	2.0867	.3403	.000088	
7.6	11.2102	8.9078	6.6057	4.3100	3.0741	.3341	.000081	
7.7	11.1971	8.8945	6.5927	4.2970	4.0623	.3280	.000075	
7.8	11.1842	8.8817	6.5793	4.2842	5.0503	.3221	.000069	
7.9	11.1714	8.8689	6.5671	4.2716	6.0385	.3163	.000064	
8.0	11.1589	8.8563	6.5545	4.2591	7.0269	.3106	.000059	
8.1	11.1464	8.8439	6.5421	4.2469	8.0155	.3050	.000054	
8.2	11.1342	8.8317	6.5298	4.2348	9.0042	.2996	.000049	
8.3	11.1220	8.8195	6.5177	4.2228	1.9930	.2943	.000045	
8.4	11.1101	8.8076	6.5057	4.2107	2.9820	.2891	.000041	
8.5	11.0982	8.7957	6.4939	4.1987	3.9711	.2840	.000037	
8.6	11.0865	8.7840	6.4822	4.1871	4.9604	.2790	.000033	
8.7	11.0750	8.7725	6.4707	4.1759	5.9503	.2742	.000029	
8.8	11.0635	8.7610	6.4592	4.1646	6.9403	.2694	.000026	
8.9	11.0523	8.7497	6.4480	4.1534	7.9309	.2647	.000022	
9.0	11.0411	8.7384	6.4368	4.1423	8.9217	.2602	.000019	
9.1	11.0300	8.7275	6.4258	4.1313	9.9127	.2557	.000016	
9.2	11.0191	8.7166	6.4148	4.1203	1.9037	.2513	.000013	
9.3	11.0083	8.7053	6.4040	4.1093	2.8948	.2470	.000010	
9.4	11.0076	8.6951	6.3934	4.0992	3.8861	.2429	.000008	
9.5	11.0070	8.6845	6.3828	4.0895	4.8776	.2387	.000006	
9.6	11.0065	8.6740	6.3723	4.0794	5.8693	.2347	.000004	
9.7	11.0062	8.6637	6.3620	4.0691	6.8611	.2308	.000003	
9.8	11.0060	8.6534	6.3517	4.0590	7.8530	.2269	.000002	

Tabla XIV Valores de $W(u)$ Correspondientes a Valores de

N	$N \times 10^{-15}$	$N \times 10^{-14}$	$N \times 10^{-13}$	$N \times 10^{-12}$	$N \times 10^{-11}$	$N \times 10^{-10}$	$N \times 10^{-9}$	$N \times 10^{-8}$	$N \times 10^{-7}$
1.0	31.9416	31.6500	29.3564	27.0538	24.7512	22.4486	20.1460	17.8435	15.5409
1.1	31.8663	31.5637	29.2611	26.9535	24.6559	22.3533	20.0507	17.7452	15.4456
1.2	31.7992	31.4767	29.1741	26.8715	24.5689	22.2663	19.9637	17.6511	15.3586
1.3	31.7392	31.3968	29.0940	26.7914	24.4839	22.1863	19.8837	17.5611	15.2785
1.4	31.6751	31.3225	29.0199	26.7173	24.4147	22.1122	19.8096	17.4760	15.2044
1.5	31.6161	31.2535	28.9509	26.6483	24.3458	22.0432	19.7406	17.3950	15.1354
1.6	31.5516	31.1890	28.8864	26.5838	24.2812	21.9786	19.6760	17.3175	15.0709
1.7	31.4909	31.1293	28.8258	26.5252	24.2206	21.9180	19.6154	17.2428	15.0103
1.8	31.4338	31.0713	28.7684	26.4660	24.1634	21.8603	19.5583	17.1767	14.9531
1.9	31.3797	31.0171	28.7145	26.4119	24.1094	21.8068	19.5042	17.1106	14.8990
2.0	31.3284	30.9659	28.6632	26.3607	24.0581	21.7555	19.4529	17.0483	14.8477
2.1	31.2796	30.9170	28.6145	26.3119	24.0093	21.7067	19.4041	16.9898	14.7990
2.2	31.2331	30.8705	28.5679	26.2653	23.9628	21.6602	19.3576	16.9350	14.7524
2.3	31.1886	30.8261	28.5235	26.2209	23.9183	21.6157	19.3131	16.8838	14.7080
2.4	31.1461	30.7835	28.4809	26.1783	23.8753	21.5732	19.2708	16.8350	14.6654
2.5	31.1053	30.7427	28.4401	26.1375	23.8349	21.5323	19.2298	16.7872	14.6246
2.6	31.0660	30.7035	28.4009	26.0983	23.7957	21.4931	19.1903	16.7416	14.5854
2.7	31.0283	30.6657	28.3631	26.0606	23.7580	21.4554	19.1528	16.6972	14.5476
2.8	30.9919	30.6294	28.3268	26.0242	23.7216	21.4194	19.1164	16.6548	14.5112
2.9	30.9568	30.5943	28.2917	25.9891	23.6863	21.3839	19.0813	16.6136	14.4763
3.0	30.9229	30.5604	28.2578	25.9552	23.6526	21.3500	19.0474	16.5740	14.4422
3.1	30.8902	30.5276	28.2250	25.9224	23.6193	21.3172	19.0146	16.5351	14.4096
3.2	30.8584	30.4953	28.1932	25.8907	23.5881	21.2855	18.9829	16.4970	14.3777
3.3	30.8276	30.4631	28.1625	25.8599	23.5573	21.2547	18.9521	16.4595	14.3470
3.4	30.7978	30.4322	28.1326	25.8300	23.5274	21.2249	18.9223	16.4237	14.3171
3.5	30.7688	30.4026	28.1036	25.8010	23.4983	21.1959	18.8933	16.3897	14.2881
3.6	30.7406	30.3739	28.0755	25.7729	23.4703	21.1677	18.8651	16.3565	14.2599
3.7	30.7132	30.3466	28.0481	25.7455	23.4429	21.1403	18.8377	16.3251	14.2325
3.8	30.6866	30.3204	28.0214	25.7188	23.4162	21.1138	18.8110	16.2955	14.2059
3.9	30.6606	30.2950	27.9954	25.6928	23.3902	21.0877	18.7851	16.2685	14.1799
4.0	30.6353	30.2707	27.9701	25.6673	23.3649	21.0623	18.7598	16.2432	14.1546
4.1	30.6106	30.2480	27.9454	25.6428	23.3402	21.0376	18.7351	16.2185	14.1299
4.2	30.5865	30.2259	27.9213	25.6187	23.3161	21.0136	18.7110	16.1944	14.1058
4.3	30.5629	30.2044	27.8978	25.5952	23.2926	20.9900	18.6874	16.1707	14.0822
4.4	30.5398	30.1774	27.8748	25.5722	23.2696	20.9670	18.6644	16.1476	14.0593
4.5	30.5173	30.1549	27.8523	25.5497	23.2471	20.9446	18.6420	16.1254	14.0368
4.6	30.4953	30.1329	27.8303	25.5277	23.2253	20.9228	18.6200	16.1034	14.0148
4.7	30.4738	30.1114	27.8083	25.5052	23.2037	20.9011	18.5985	16.0819	13.9933
4.8	30.4528	30.0904	27.7878	25.4832	23.1826	20.8800	18.5774	16.0613	13.9723
4.9	30.4322	30.0697	27.7672	25.4616	23.1620	20.8594	18.5568	16.0412	13.9516
5.0	30.4121	30.0495	27.7470	25.4414	23.1418	20.8392	18.5366	16.0216	13.9314
5.1	30.3923	30.0297	27.7271	25.4214	23.1220	20.8194	18.5168	16.0024	13.9116
5.2	30.3729	30.0103	27.7077	25.4011	23.1026	20.8006	18.4974	15.9832	13.8922
5.3	30.3539	29.9913	27.6887	25.3811	23.0835	20.7809	18.4783	15.9642	13.8732
5.4	30.3352	29.9728	27.6706	25.3674	23.0648	20.7622	18.4596	15.9451	13.8545
5.5	30.3168	29.9542	27.6516	25.3491	23.0465	20.7439	18.4413	15.9267	13.8361
5.6	30.2988	29.9361	27.6336	25.3310	23.0285	20.7259	18.4233	15.9087	13.8181
5.7	30.2811	29.9185	27.6159	25.3133	23.0108	20.7082	18.4056	15.8910	13.8004
5.8	30.2637	29.9011	27.5985	25.2959	22.9934	20.6908	18.3882	15.8735	13.7830
5.9	30.2466	29.8840	27.5814	25.2789	22.9763	20.6737	18.3711	15.8568	13.7659
6.0	30.2298	29.8672	27.5646	25.2620	22.9595	20.6569	18.3543	15.8407	13.7491
6.1	30.2133	29.8507	27.5481	25.2453	22.9429	20.6403	18.3378	15.8250	13.7328
6.2	30.1970	29.8344	27.5318	25.2293	22.9267	20.6241	18.3215	15.8093	13.7163
6.3	30.1810	29.8184	27.5158	25.2133	22.9107	20.6081	18.3055	15.7940	13.7003
6.4	30.1653	29.8027	27.4991	25.1973	22.8949	20.5923	18.2898	15.7787	13.6846
6.5	30.1498	29.7872	27.4846	25.1820	22.8794	20.5768	18.2742	15.7637	13.6691
6.6	30.1345	29.7719	27.4693	25.1667	22.8641	20.5616	18.2590	15.7484	13.6538
6.7	30.1193	29.7569	27.4543	25.1517	22.8491	20.5465	18.2439	15.7334	13.6388
6.8	30.1044	29.7421	27.4393	25.1369	22.8343	20.5317	18.2291	15.7185	13.6240
6.9	30.0896	29.7276	27.4249	25.1223	22.8197	20.5171	18.2145	15.7039	13.6094
7.0	30.0750	29.7131	27.4103	25.1079	22.8053	20.5027	18.2001	15.6896	13.5950
7.1	30.0605	29.6989	27.3963	25.0937	22.7911	20.4885	18.1860	15.6754	13.5808
7.2	30.0461	29.6849	27.3823	25.0797	22.7771	20.4746	18.1720	15.6614	13.5668
7.3	30.0319	29.6711	27.3685	25.0659	22.7633	20.4608	18.1582	15.6476	13.5530
7.4	30.0178	29.6575	27.3549	25.0523	22.7497	20.4472	18.1446	15.6340	13.5394
7.5	30.0038	29.6441	27.3415	25.0389	22.7363	20.4337	18.1311	15.6206	13.5259
7.6	29.9899	29.6308	27.3282	25.0257	22.7231	20.4205	18.1179	15.6073	13.5127
7.7	29.9761	29.6178	27.3152	25.0126	22.7100	20.4074	18.1048	15.5942	13.4997
7.8	29.9624	29.6048	27.3023	24.9997	22.6971	20.3945	18.0919	15.5812	13.4868
7.9	29.9487	29.5921	27.2893	24.9869	22.6844	20.3818	18.0792	15.5684	13.4740
8.0	29.9351	29.5795	27.2769	24.9744	22.6718	20.3692	18.0666	15.5558	13.4614
8.1	29.9216	29.5671	27.2645	24.9619	22.6594	20.3568	18.0542	15.5434	13.4490
8.2	29.9082	29.5548	27.2523	24.9497	22.6471	20.3445	18.0419	15.5312	13.4367
8.3	29.8949	29.5427	27.2401	24.9375	22.6350	20.3324	18.0298	15.5192	13.4246
8.4	29.8817	29.5307	27.2282	24.9256	22.6230	20.3204	18.0178	15.5073	13.4126
8.5	29.8686	29.5189	27.2163	24.9137	22.6112	20.3086	18.0060	15.4954	13.4008
8.6	29.8556	29.5072	27.2046	24.9020	22.5995	20.2969	17.9943	15.4837	13.3891
8.7	29.8427	29.4957	27.1931	24.8905	22.5879	20.2853	17.9827	15.4721	13.3776
8.8	29.8298	29.4842	27.1816	24.8790	22.5765	20.2739	17.9713	15.4607	13.3661
8.9	29.8170	29.4729	27.1703	24.8676	22.5652	20.2626	17.9600	15.4494	13.3548
9.0	29.8043	29.4618	27.1592	24.8566	22.5540	20.2514	17.9488	15.4383	13.3437
9.1	29.7917	29.4507	27.1481	24.8455	22.5429	20.2404	17.9378	15.4273	13.3328
9.2	29.7792	29.4398	27.1372	24.8346	22.5320	20.2294	17.9268	15.4164	13.3217
9.3	29.7667	29.4290	27.1264	24.8238	22.5212	20.2186	17.9160	15.4056	13.3109
9.4	29.7543	29.4183	27.1157	24.8131	22.5105	20.2079	17.9053	15.3948	13.3002
9.5	29.7420	29.4077	27.1051	24.8025	22.4999	20.1973	17.8943	15.3842	13.2896
9.6	29.7298	29.3972	27.0946	24.7920	22.4895	20.1869	17.8833	15.3737	13.2791
9.7	29.7177	29.3868	27.0843	24.7817	22.4791	20.1765	17.8733	15.3633	13.2688
9.8	29.7057	29.3765	27.0740	24.7714	22.4688	20.1663	17.8637	15.3531	13.2585
9.9	29.6937	29.3664	27.0639	24.7613	22.4587	20.1561	17.8535	15.3430	13.2483