

## VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS

## MODULO 2

26 DE SEPTIEMBRE AL 7 DE OCTUBRE DE 1994

DIA	HORA	TEMA	PROFESOR
LUNES 26	9:00 A 11:00	PANORAMICA DE LA CONTAMINACION EN MEXICO	ING. RUBEN CHAVEZ GUILLEN
	11:00 A 14:00	CONTAMINACION DE ACUIFEROS	ING. JUAN M. LESSER ILLADES
	16:00 A 14:00	CONTAMINACION DE ACUIFEROS	ING. JUAN M. LESSER ILLADES
MARTES 27	9:00 A 14:00	PRINCIPIOS DE QUIMICA ORGANICA	QUIM. ALFONSO AQUINO
	16:00 A 19:00	CALIDAD DEL AGUA	QFB. BEATRIZ SANTAMARIA
MIERCOLES 28	9:00 A 14:00	CONTAMINACION DE ACUIFEROS	DR. RAMIRO RODRIGUEZ C.
	16:00 A 19:00		
JUEVES 29	9:00 A 14:00	QUIMICA DE AGUA. EL FIERRO Y EL NITROGENO	DRA. MA AURORA
	16:00 A 19:00	RADON	FIS. ALEJANDRA CORTES
VIERNES 30	9:00 A 14:00	VISITA LABORATORIO ANALISIS QFB Y PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	ING. GREGORIO MARTINEZ
LUNES 3	9:00 A 14:00	RELLENOS SANITARIOS.	ING. FRANCISCO SUZAN
	16:00 A 19:00	IMPACTO AMBIENTAL, DISEÑO Y OPERACION	COLOMBRES
MARTES 4	9:00 A 14:00	CONTAMINACION Y	ING. JUAN M. LESSER ILLADES
	16:00 A 19:00	SANEAMIENTO DE ACUIFEROS POR HIDROCARBUROS.	
MIERCOLES 5	9:00 A 14:00	CROMATOGRAFIA	ING. JUAN J. HERNANDEZ
	16:00 A 14:00	RIESGOS E IMPACTO EN SALUD	DR. RAMIRO RODRIGUEZ C.
JUEVES 6	9:00 A 14:00	RIESGOS E IMPACTO EN SALUD	DR. RAMIRO RODRIGUEZ C.
	16:00 A 19:00		
VIERNES 7	9:00 A 14:00	HIDROGEOQUIMICA	ING. JUAN M. LESSER ILLADES
	16:00 A 19:00	ISOTOPOS EN GEOHIDROLOGIA	FIS. ALEJANDRA CORTES

## EVALUACION DEL PERSONAL DOCENTE

CURSO: Módulo II: Contaminación de Acuíferos

FECHA: Del 26 de septiembre al 7 de octubre de 1994.

CONFERENCISTA	DOMINIO DEL TEMA	USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	COMUNICACION CON EL ASISTENTE	PUNTUALIDAD
Ing. Rubén Chávez Guillén				
Ing. Juan M. Lesser Illades				
Quim. Alfonso Aquino				
QFB. Beatriz Santamaría				
Dr. Ramiro Rodríguez C.				
Dra. Ma. Aurora				
Fis. Alejandra Cortés				
Ing. Gregorio Martínez				
Ing. Francisco Suzan Colombres				
Ing. Juan J. Hernández				

### EVALUACION DE LA ENSEÑANZA

ORGANIZACION Y DESARROLLO DEL CURSO	
GRADO DE PROFUNDIDAD LOGRADO EN EL CURSO	
ACTUALIZACION DEL CURSO	
APLICACION PRACTICA DEL CURSO	

### EVALUACION DEL CURSO

CONCEPTO	CALIF.
CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL CURSO	
CONTINUIDAD EN LOS TEMAS	
CALIDAD DEL MATERIAL DIDACTICO UTILIZADO	

ESCALA DE EVALUACION: 1 A 10

1.- ¿LE AGRADO SU ESTANCIA EN LA DIVISION DE EDUCACION CONTINUA?

SI	NO
----	----

SI INDICA QUE "NO" DIGA PORQUE.

2.- MEDIO A TRAVES DEL CUAL SE ENTERO DEL CURSO:

PERIODICO EXCELSIOR		FOLLETO ANUAL		GACETA UNAM		OTRO MEDIO	
PERIODICO EL UNIVERSAL		FOLLETO DEL CURSO		REVISTAS TECNICAS			

3.- ¿QUE CAMBIOS SUGERIRIA AL CURSO PARA MEJORARLO?

---

---

4.- ¿RECOMENDARIA EL CURSO A OTRA(S) PERSONA(S)?

SI		NO	
----	--	----	--

5.- ¿QUE CURSOS LE SERVIRIA QUE PROGRAMARA LA DIVISION DE EDUCACION CONTINUA.

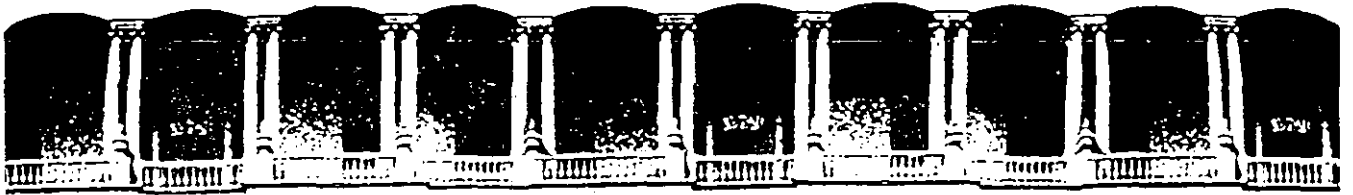
---

---

6.- OTRAS SUGERENCIAS:

---

---



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

*C U R S O S   A B I E R T O S*

*VI CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGIA Y CONTAMINACION DE  
ACUIFEROS*

*M O D U L O   I I*

*HIDROGEOQUIMICA Y CONTAMINACION DE ACUIFEROS*

*CONTAMINACION DE ACUIFEROS*

*ING. RUBEN CHAVEZ GUILLEN*



COMISION NACIONAL DEL AGUA

BASES PARA UN  
**PROGRAMA DE  
SANEAMIENTO RURAL**

(2<sup>ª</sup> Versión)

Elaboró: Ing. Humberto Romero Alvarez  
México, D.F., julio de 1991

---

# CONTENIDO

1. CARACTERIZACION	4
2. OBJETIVO GENERAL Y META	4
3. PRINCIPALES RESTRICCIONES QUE HAN ESTORBADO AL SANEAMIENTO RURAL	4
4. JUSTIFICACION	5
5. PRIORIDADES	6
6. ESTRATEGIA Y LINEAS DE ACCION	6
7. ACCIONES COMPLEMENTARIAS Y DE APOYO	8
8. RECURSOS NECESARIOS	9
9. CALENDARIO	9
10. ACCIONES A TOMAR DE INMEDIATO	10
11. CUADRO SINOPTICO E ILUSTRACIONES	12

---

# **BASES PARA EL PROGRAMA DE SANEAMIENTO RURAL**

## **1. CARACTERIZACION**

- Para fines de este Programa, se entiende por "Saneamiento Rural", las acciones encaminadas a dotar de servicios adecuados de abastecimiento de agua potable y de disposición sanitaria de excretas (alcantarillado o en su defecto letrinas) a la población de las pequeñas localidades, compactas o dispersas, principalmente a las menores de 2500 habitantes.
- Por sus características y campo de aplicación, este programa de saneamiento rural que propone la Comisión Nacional del Agua, se encuadra dentro de los propósitos que persigue el PROGRAMA NACIONAL DE SOLIDARIDAD.
- Un programa de esta naturaleza rebasa el ámbito del sector "agua", y requiere el concurso de todos los sectores gubernamentales y de la sociedad civil en general.

## **2. OBJETIVO GENERAL Y META**

- Extender la cobertura de servicios de agua potable y disposición sanitaria de excretas a la población del medio rural, con garantía de mantenimiento permanente del servicio y de seguridad sanitaria.
- En el mediano plazo (1991-1994), por lo menos el 75% de la población rural deberá tener acceso a los servicios de agua potable y saneamiento.

## **3. PRINCIPALES RESTRICCIONES QUE HAN ESTORBADO EL SANEAMIENTO RURAL**

- Ausencia de acciones específicas integradas y falta de continuidad administrativa en los antiguos programas relacionados con el saneamiento rural, como fueron los de bienestar social rural, erradicación del paludismo, pequeñas obras de agua potable y alcantarillado (SRH, SSA, IMSS-COPLAMAR), etc.
- Indefinición de responsabilidades en la administración pública, lo que propicia la dispersión de actividades y dificulta la coordinación intersectorial, así como la fuerte tendencia a dar prioridad a los problemas de agua potable en los sectores urbanos, de mayor presión social y política.
- Costos relativamente elevados y falta de prioridad en la asignación de recursos financieros al saneamiento rural.

- Ante el dilema que plantea la necesidad de un cambio o el mantener indefinidamente segregados de los beneficios del saneamiento a grandes grupos de población rural, el programa toca en esencia un asunto de orden moral.

## 5. PRIORIDADES

- El programa atenderá con prioridad a las localidades compactas, y dentro de éstas a aquellas que cuentan ya con una infraestructura hidráulico-sanitaria sin operar y que sea susceptible de ser rehabilitada o aprovechada a plenitud mediante obras de mantenimiento.
- También se dará prioridad a las comunidades que:
  - a) Presenten mayor incidencia de enfermedades transmisibles relacionadas con una posible contaminación del agua.
  - b) Muestren mayor interés en su demanda y mayor deseo de participación en la resolución del problema.
  - c) Dispongan de una estructura orgánica, técnico-administrativa, que facilite la implantación de acciones de saneamiento, como son: Distritos de Riego, Clínicas del IMSS-Solidaridad, Centros de Capacitación Comunitaria del I. N. I., Centros de Educación Comunitaria de CONAFE, Expendios de LICONSA, Programa Escuela Digna, etc., y en general en todos los lugares que ya están siendo atendidos por la CNA y el PRONASOL.
- En todas las localidades rurales se dará preferencia al saneamiento básico de las escuelas, centros hospitalarios y de salud.

## 6. ESTRATEGIAS Y LINEAS DE ACCION

- El programa de saneamiento rural estará integrado principalmente por tres componentes básicos:

**Abastecimiento de agua potable**, con especial referencia a la protección de la calidad del agua.

**Disposición sanitaria de las excretas humanas**, mediante servicios de alcantarillado o de letrinas



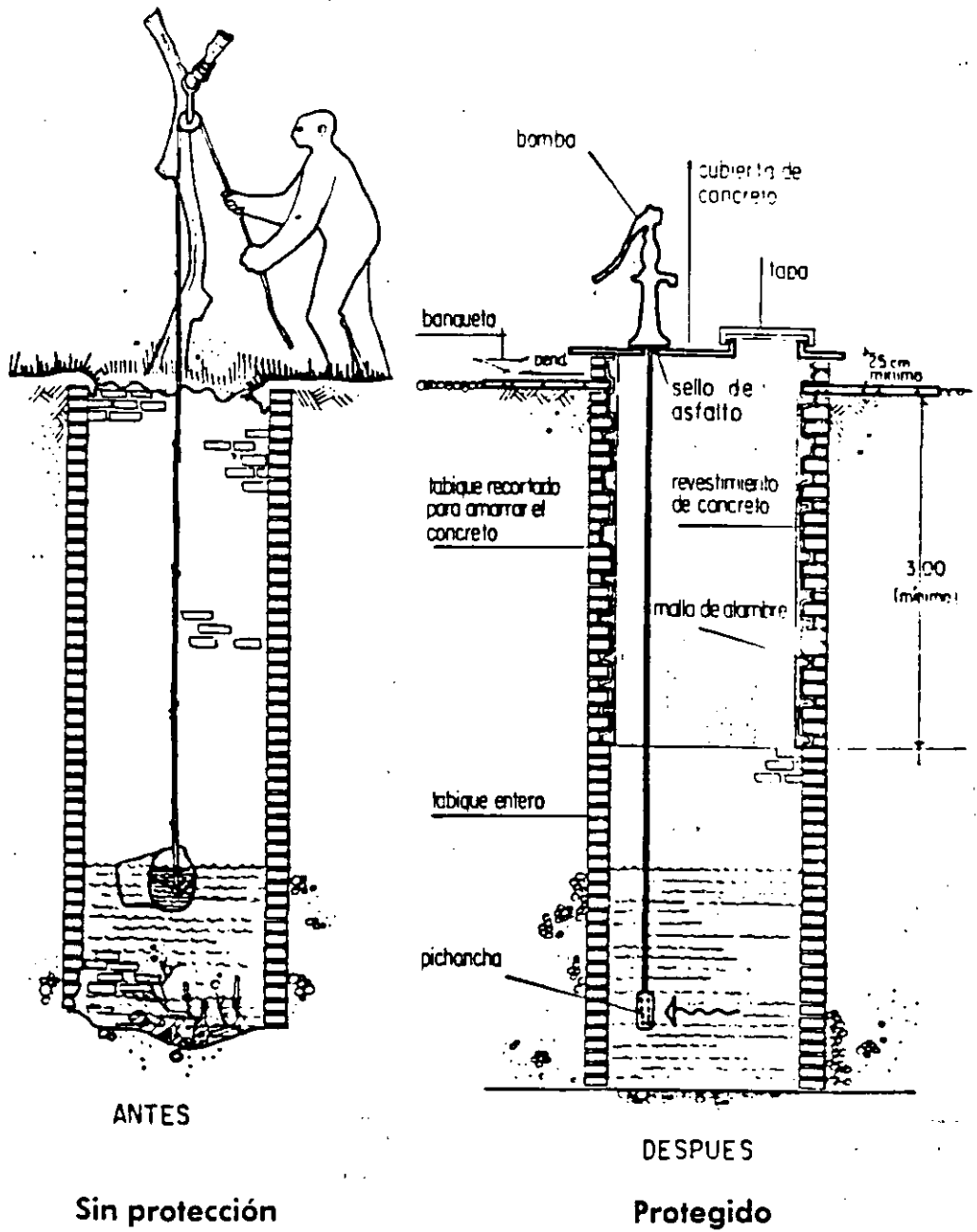
- En la fase aplicativa de demostración, se escogerán por lo menos tres localidades representativas de las características del medio rural, por cada entidad federativa, y en ellas se aplicará el programa con todo rigor, para obtener el máximo de experiencia aprovechable.
- Todos los beneficiados según su capacidad económica, deben contribuir a cubrir total o parcialmente el costo de las obras públicas de agua potable y alcantarillado, su operación y debido mantenimiento.
- Para mayor eficacia de las inversiones, se diseñarán las obras de infraestructura de manera que permitan su mejoramiento gradualmente, aprovechando al máximo la infraestructura ya construida y empleando modelos alternativos de servicios adecuados a cada caso.
- El programa requiere de una infraestructura institucional básica en todos los niveles de gobierno, y dentro de la propia comunidad beneficiada, habrá que aprovechar los comités de solidaridad comunitaria de PRONASOL y demás formas de organización comunitaria para planear y apoyar las acciones de saneamiento rural.
- Se mantendrán los vínculos necesarios con las autoridades de salud para estar informados de la incidencia de enfermedades diarreicas y así actuar efectiva y oportunamente ante la presencia de posibles brotes.
- Se promoverá y asegurará la cooperación externa por parte de organismos tales como la OPS, UNICEF, PNUMA, PNUD y las instituciones internacionales de crédito.

## 7. ACCIONES COMPLEMENTARIAS Y DE APOYO

- Realizar un estudio diagnóstico de la situación en general, por estados y municipios, para efectos de planeación. El diagnóstico por localidad debe ser realizado por los propios miembros de la comunidad, debidamente adiestrados, utilizando un cuestionario lo más sencillo posible.
- Revisar los criterios ingenieriles y los nuevos sistemas de agua potable y disposición de excretas, ajustados técnicamente a los deseos de la población usuaria y a su capacidad de pago. En general, las obras deben ser de bajo costo y fácil operación y mantenimiento conforme a la realidad socioeconómica y cultural de la población.

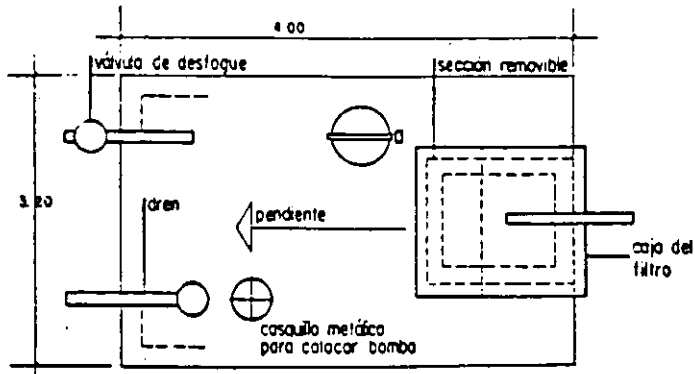
# PROTECCION DE FUENTES Aguas Subterráneas

## NORIA O POZO EXCAVADO

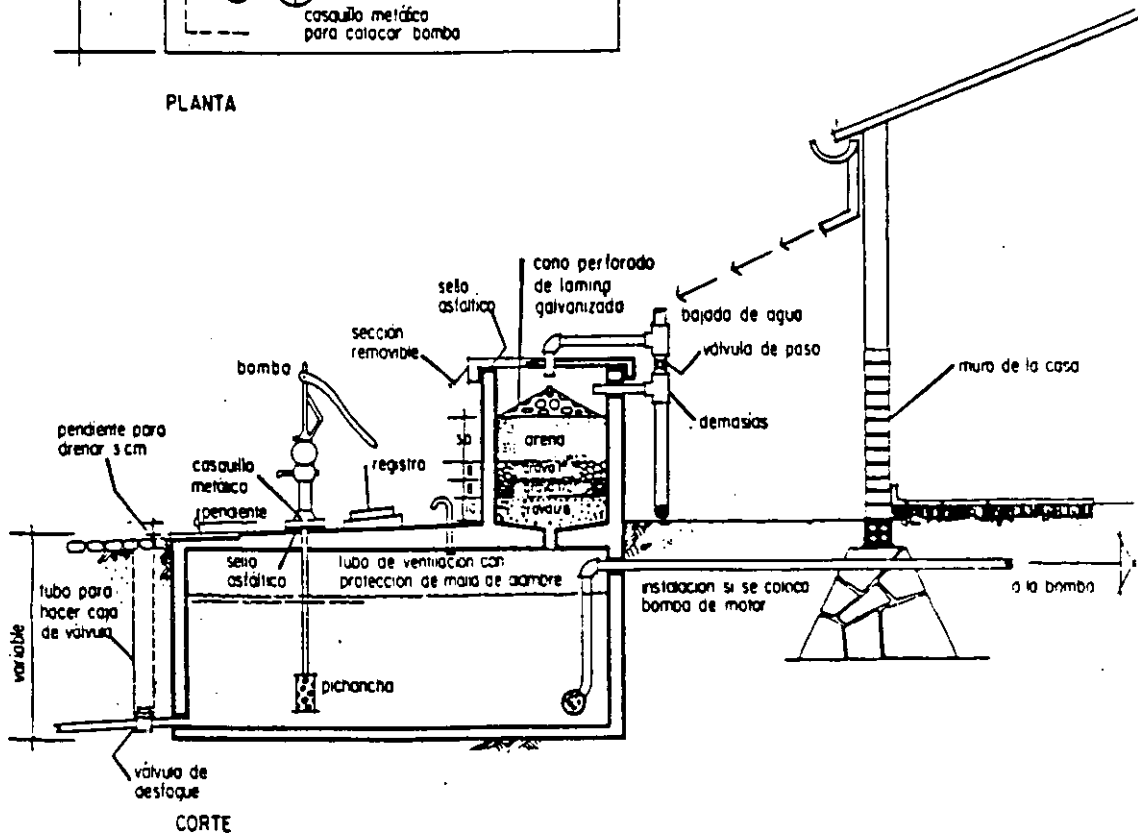


# PROTECCION DE FUENTES

## Aljibe con Filtro



PLANTA



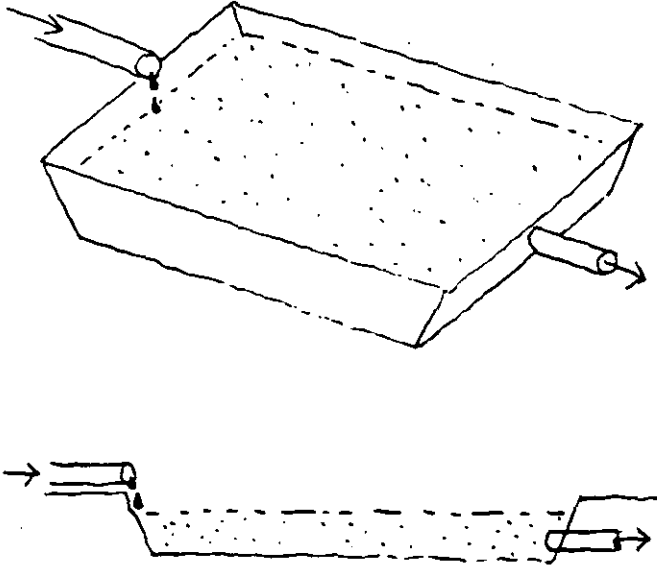
CORTE

# DESINFECCION DEL AGUA

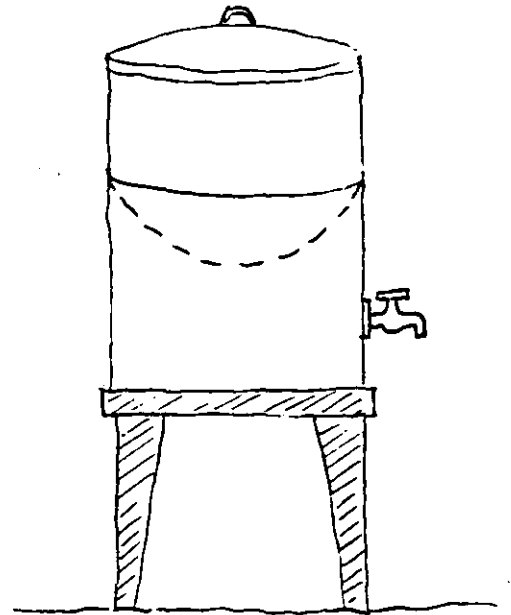
## Pública y Doméstica

---

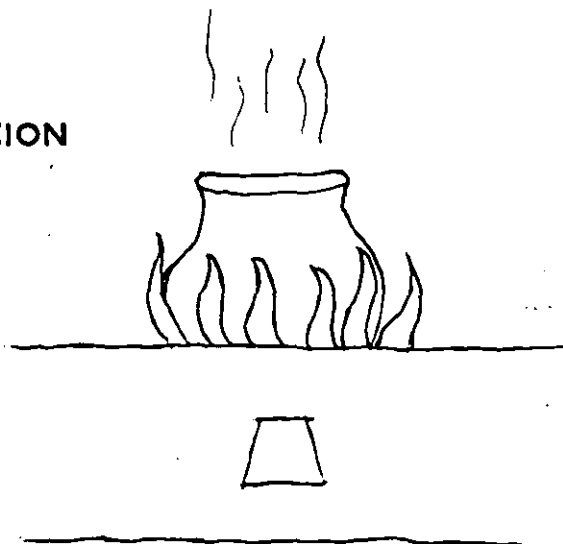
FILTRO LENTO DE ARENA  
(público)



FILTRO DE CANTERA  
(doméstico)

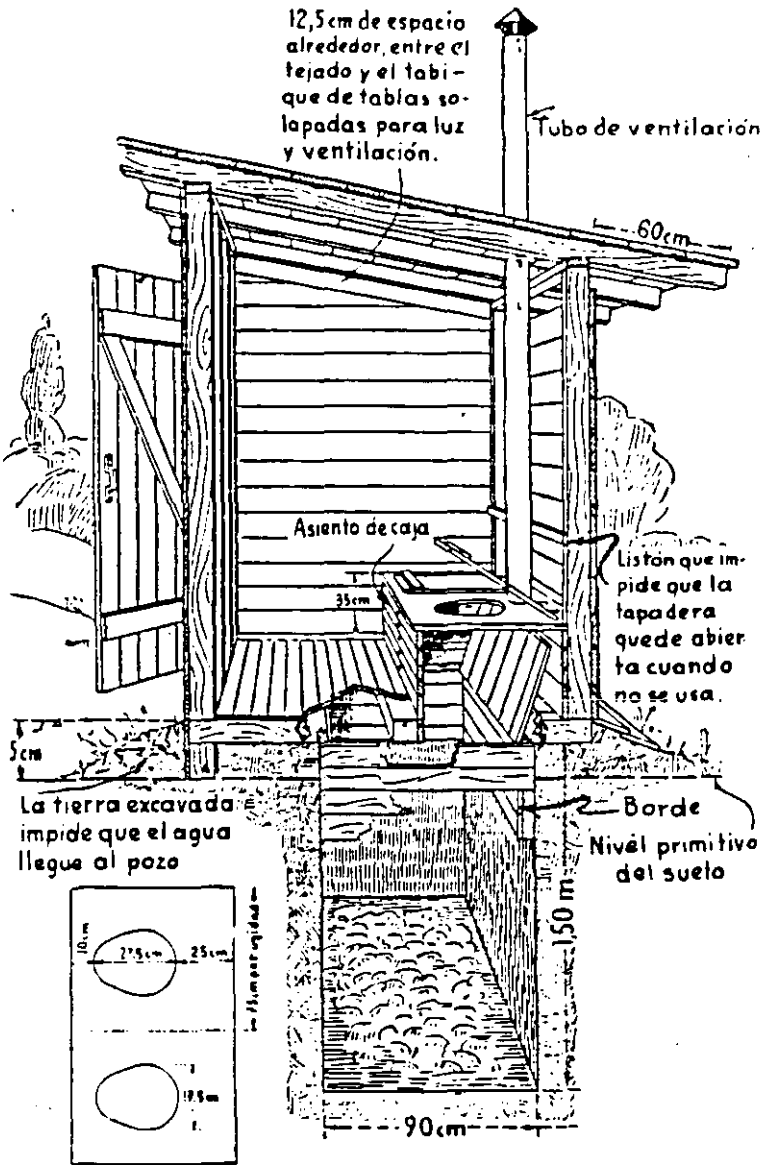


EBULLICION

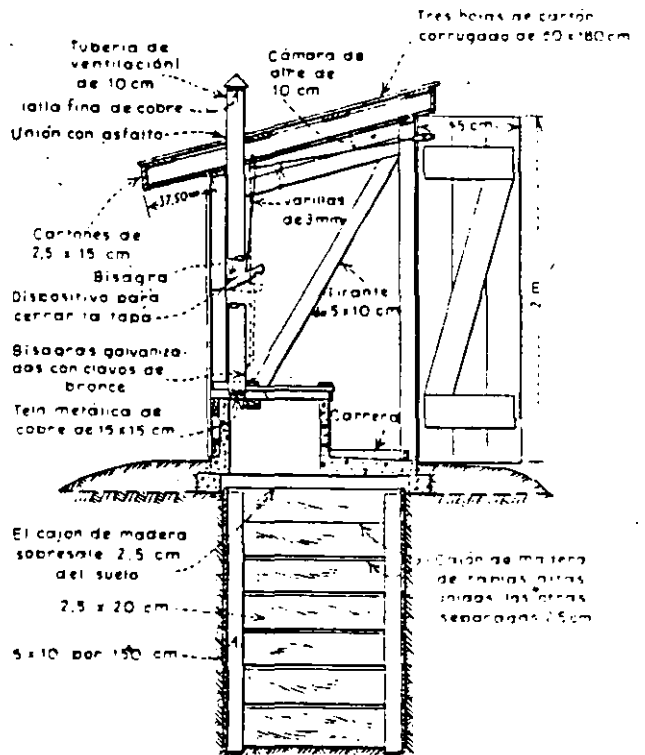
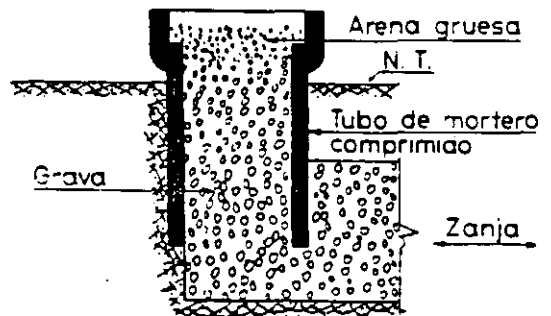


# SISTEMAS DE CONCENTRACION DE EXCRETAS

## Letrina Sanitaria Convencional

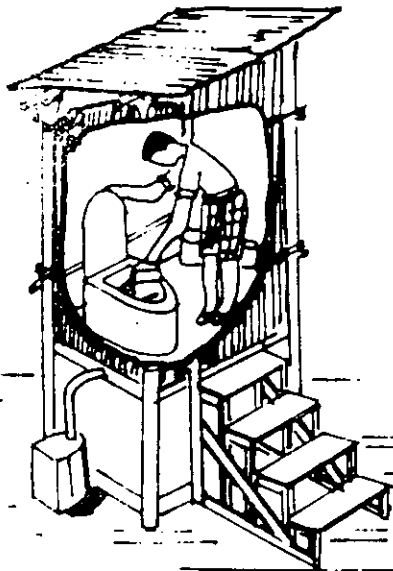


## URINARIO RURAL

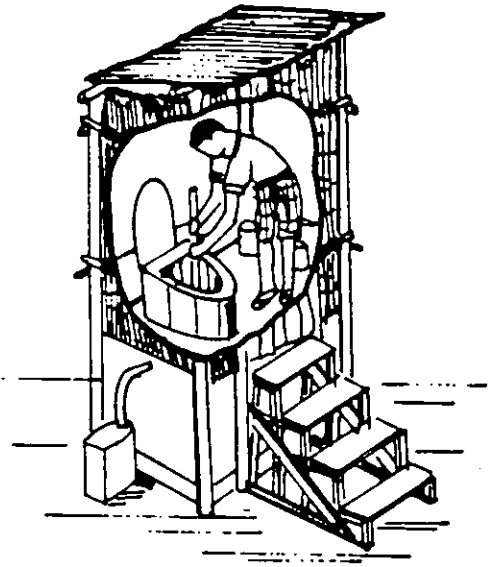


# SISTEMAS DE CONCENTRACION DE EXCRETAS

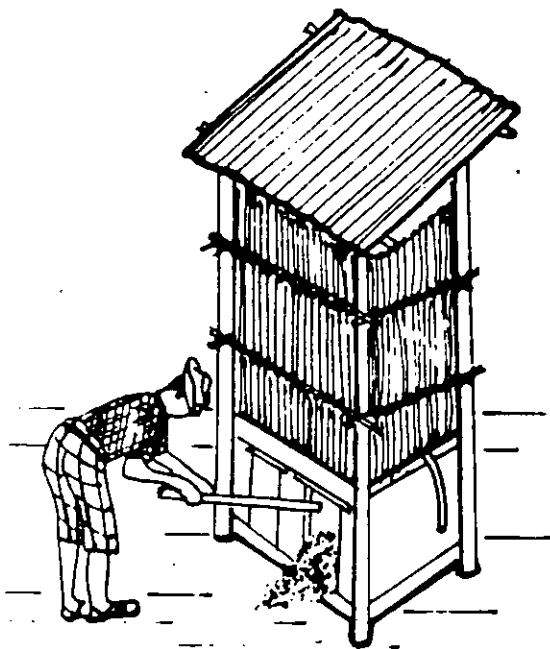
## Letrinas Aboneras (doble cámara)



Adición de cenizas después de la deposición diaria

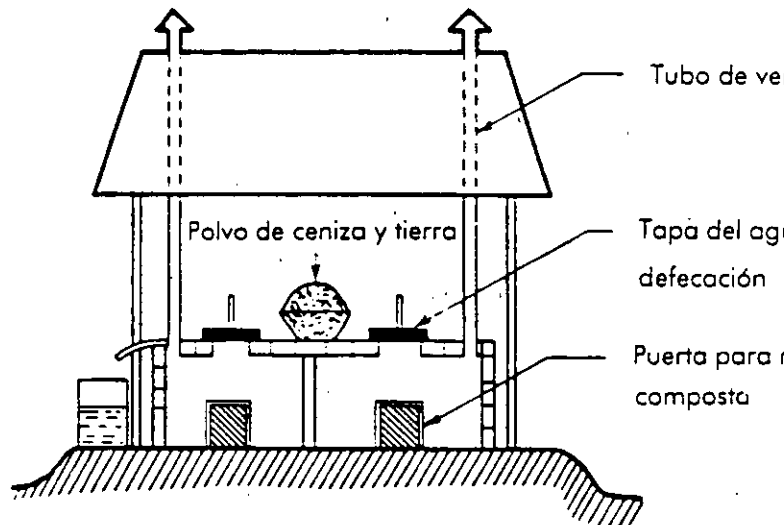


Agitación semanal para desecación homogénea

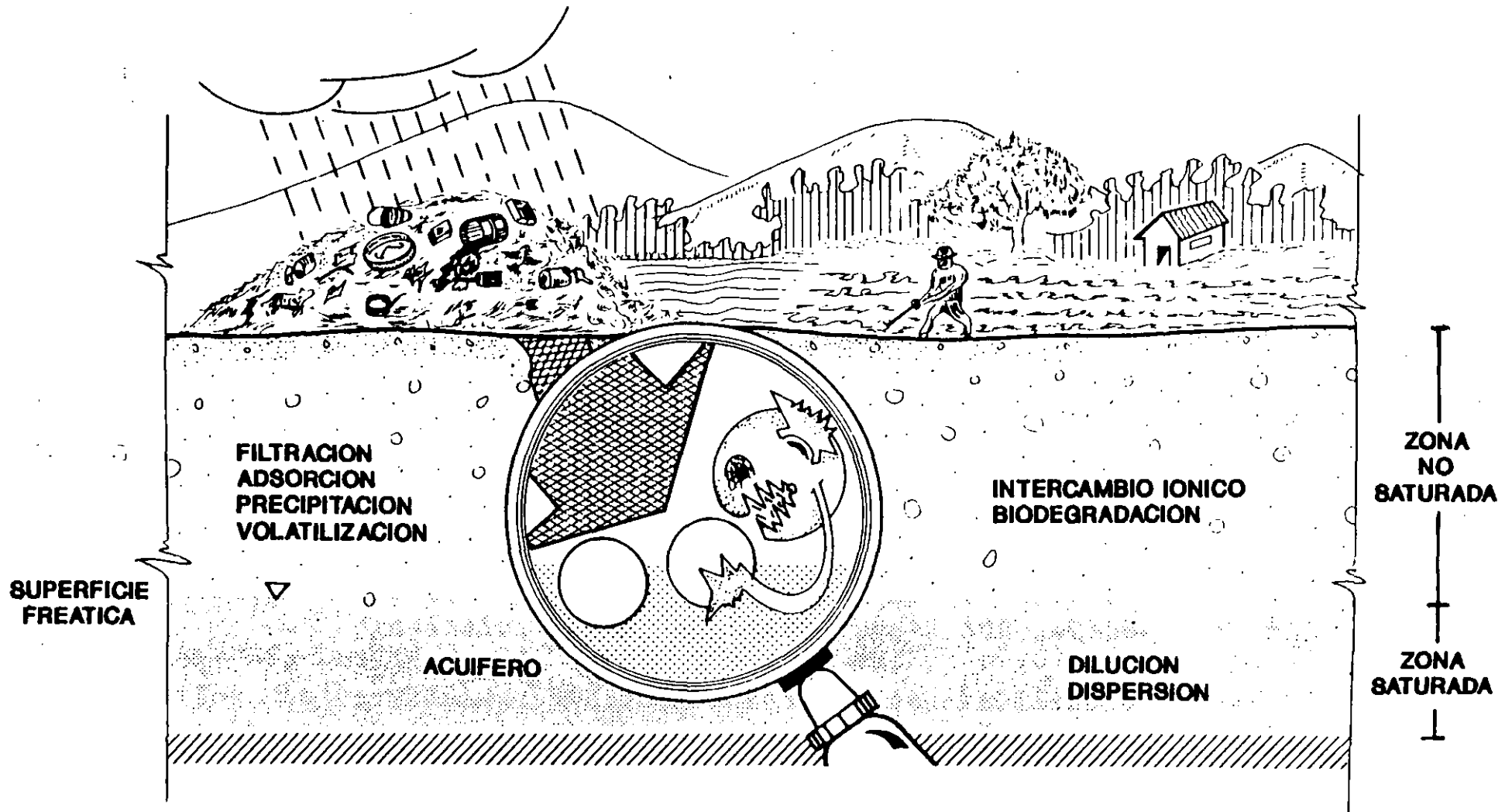


El abono orgánico deberá estar completamente seco

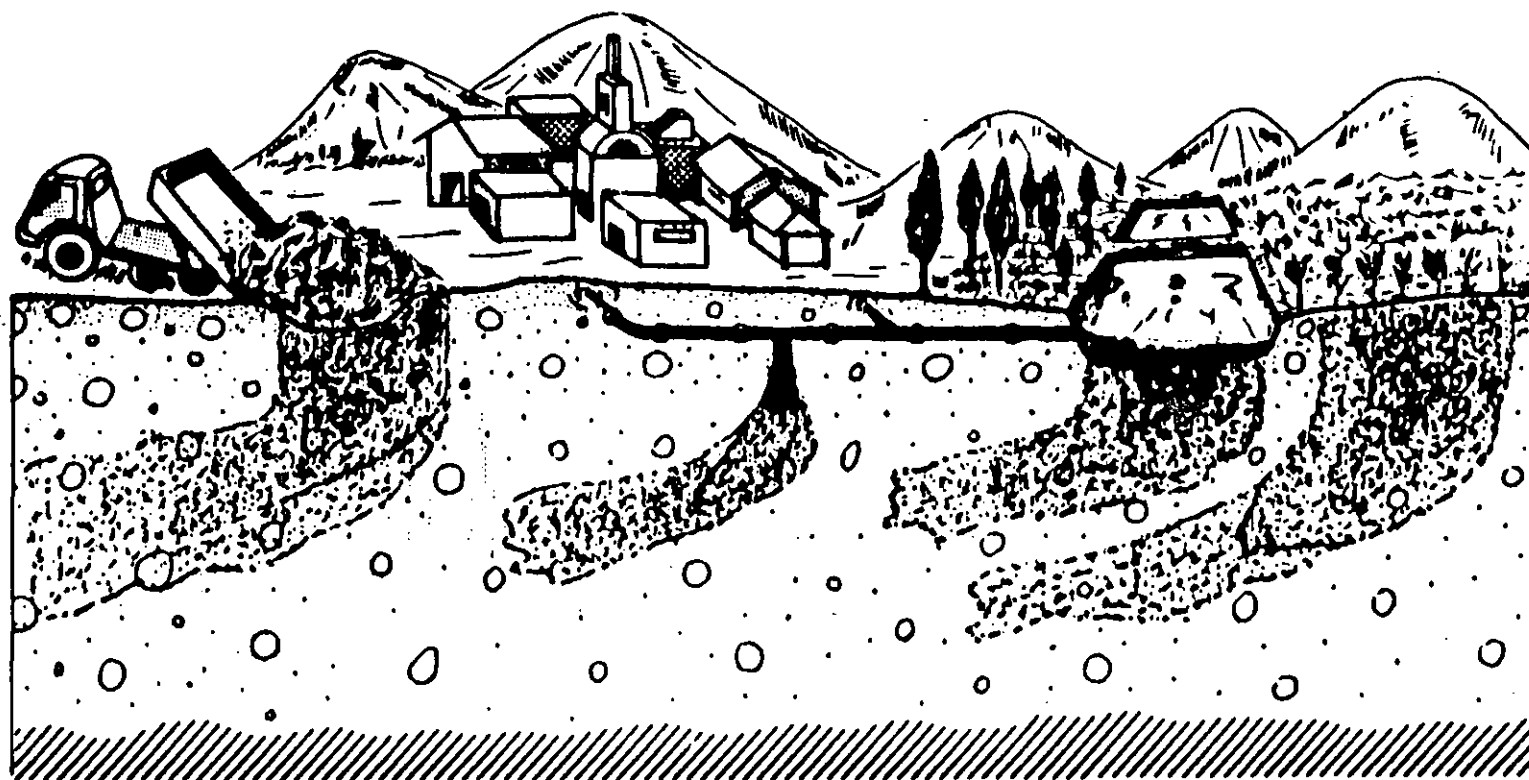
### VIETNAMITA



# EL SUBSUELO : PLANTA DE TRATAMIENTO



## CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA EN LAS ZONAS URBANAS



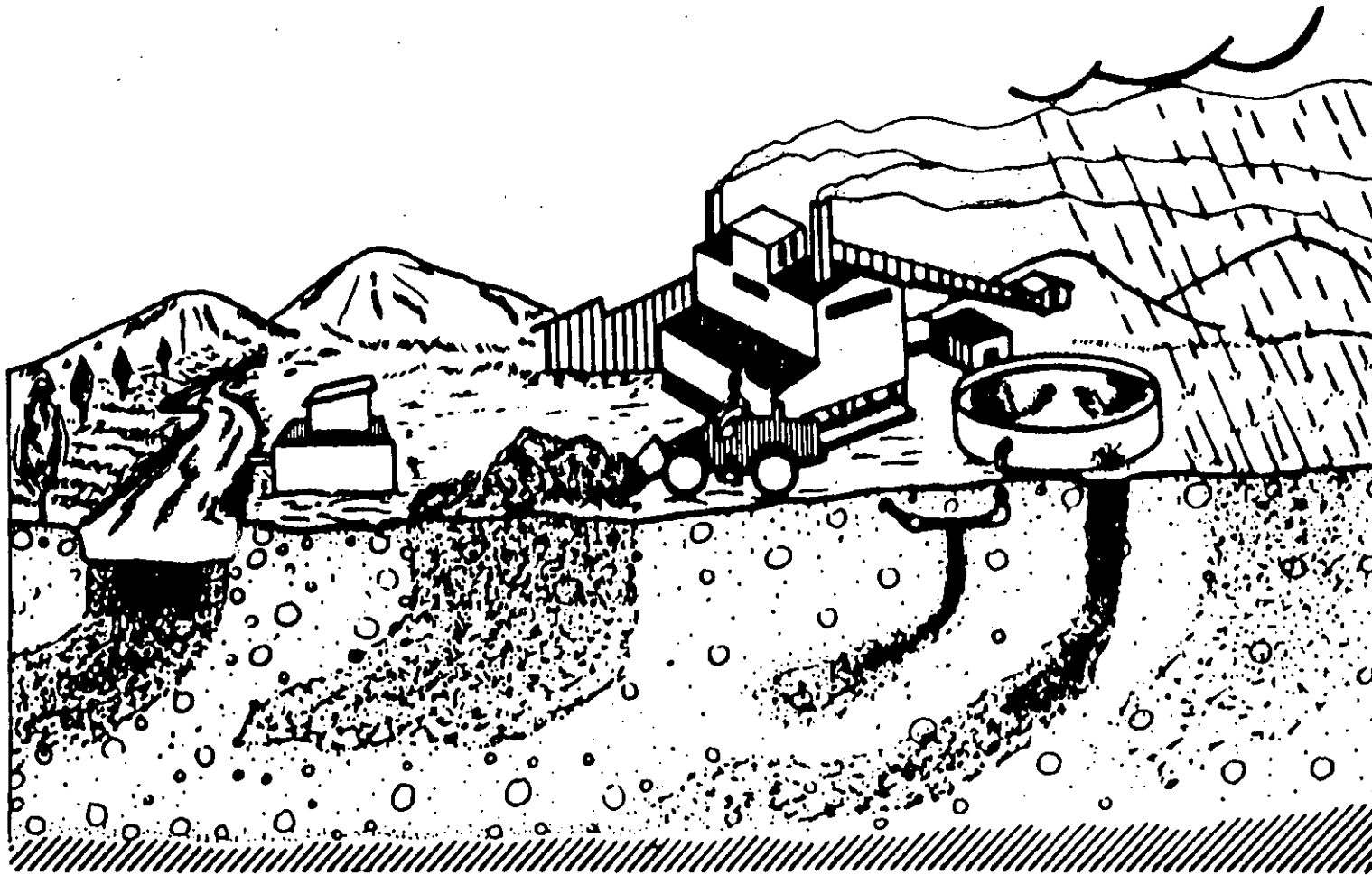
LIXIVIACION DE  
RELLENOS SANITARIOS  
Y BASURALES

FUGAS DE  
ALCANTARILLADOS

LAGUNAS Y RIEGO DE  
AGUAS SERVIDAS



## CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA EN ZONAS INDUSTRIALES

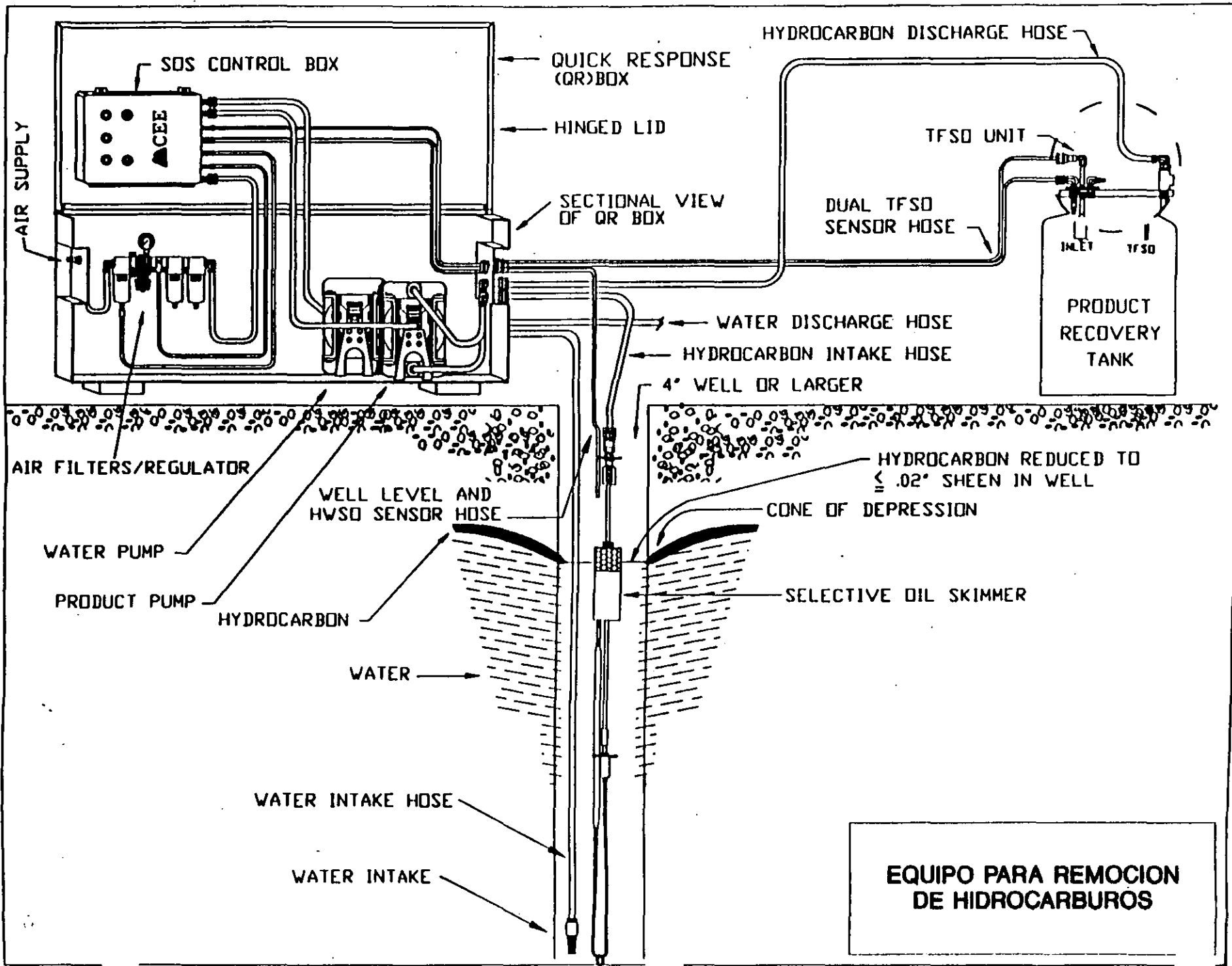


INFILTRACION DE  
RIOS CONTAMINADOS

LIXIVIACION DE  
MATERIALES TOXICOS

FUGAS EN  
TANQUES Y  
TUBERIAS

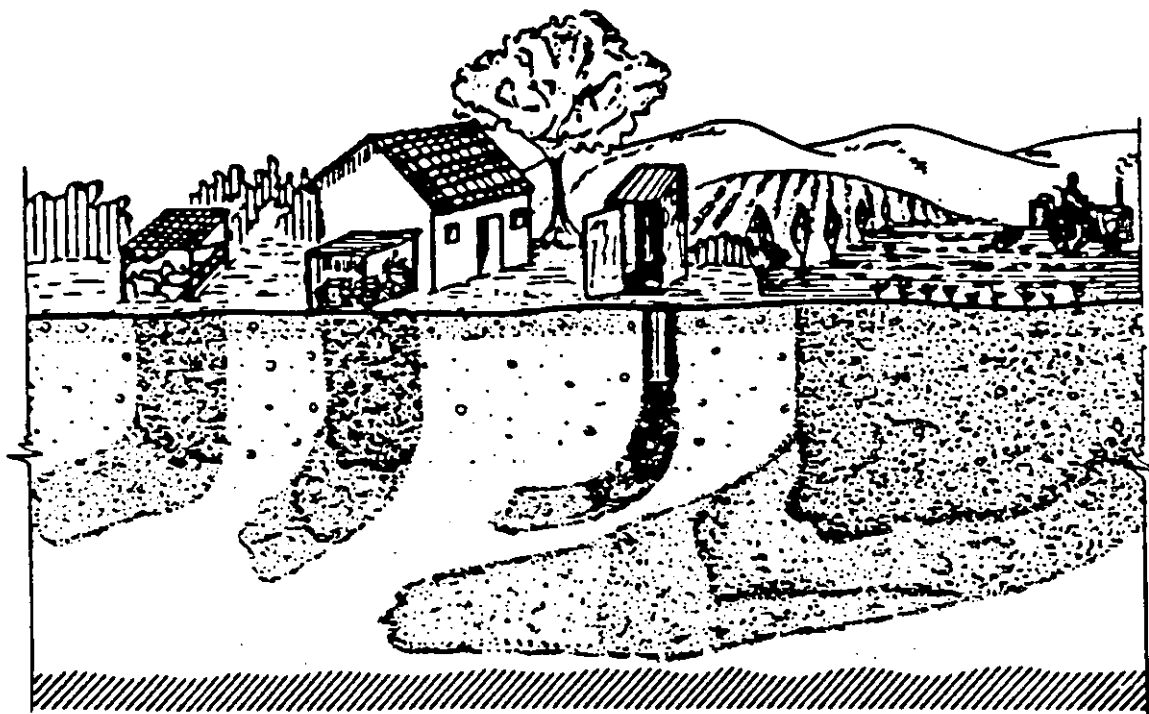
INFILTRACION DE  
LLUVIAS  
CONTAMINADAS



SHALLOW WELL HYDROCARBON AND WATER RECOVERY SYSTEM  
 WITH SELECTIVE OIL SKIMMER  
 HW22/SOS-2

**EQUIPO PARA REMOCION  
 DE HIDROCARBUROS**

# CONTAMINACION DE ACUIFEROS EN EL MEDIO RURAL

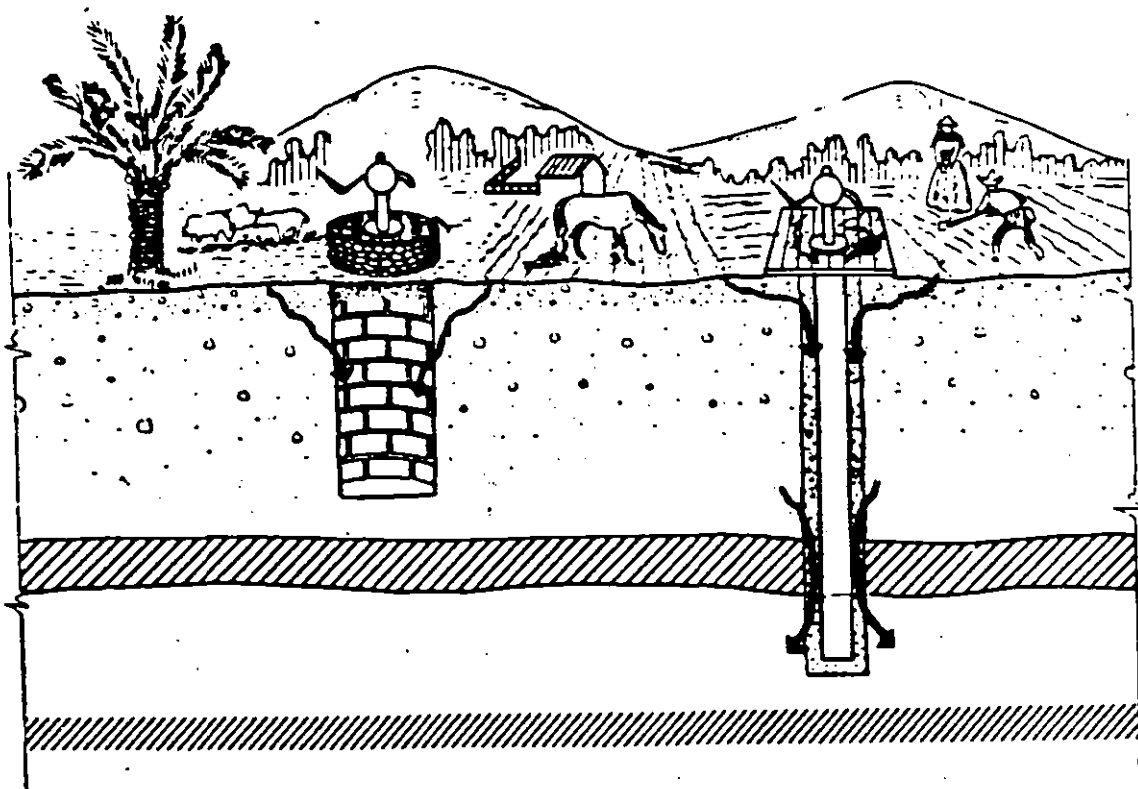


CRADEROS DE ANIMALES

DEPOSITOS DE COMBUSTIBLES Y PESTICIDAS

DESCARGAS DE LETRINAS

LIXIVIACION DE SUELOS CULTIVADOS



## ENFERMEDADES QUE PUEDEN SER TRANSMITIDAS POR AGUAS SUBTERRANEAS CONTAMINADAS

<b>BACTERIAS</b>	<b><u>ENFERMEDAD</u></b>	<b><u>AGENTE PATOGENO</u></b>
	Cólera	<i>Vibrio cholerae</i>
	Fiebre tifoidea	<i>Salmonella typhi</i>
	Fiebre paratifoidea	<i>Salmonella paratyphi</i>
	Disenteria bacilar	<i>Shigella spp.</i>
	Diarreas	<i>E. coli</i> enterotoxigénica <i>E. coli</i> enteropatógena <i>Salmonella spp.</i> y otros

<b>VIRUS</b>	<b><u>ENFERMEDAD</u></b>	<b><u>AGENTE PATOGENO</u></b>
	Hepatitis infecciosa	Virus de hepatitis A
	Poliomelitis	Poliovirus
	Diarreas	Rotavirus agente Norwalk
	Diversos sintomas	Echovirus, Cocksackievirus y otros

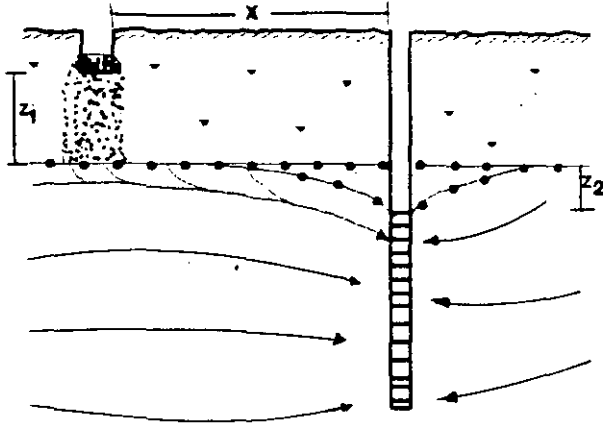
## FACTORES QUE INFLUYEN EN EL TRANSPORTE DE VIRUS Y BACTERIAS A TRAVES DE LA ZONA NO SATURADA

<u>FACTOR</u>	<u>EFFECTOS</u>
ESTRUCTURA O GRANULOMETRIA DEL SUELO Y DE LOS ESTRATOS ADYACENTES	BACTERIAS Y VIRUS SON FACILMENTE ADSORBIDOS POR LOS MATERIALES ARCILLOSOS; LA ATENUACION ES DIRECTAMENTE PROPORCIONAL AL CONTENIDO DE ARCILLA Y MATERIA ORGANICA
pH	EL pH BAJO FAVORECE LA ADSORCION DE LOS MICROORGANISMOS
MATERIA ORGANICA	LA MATERIA ORGANICA COMPITE CON LOS MICROORGANISMOS POR OCUPAR LA SUPERFICIE DE ADSORCION
CATIONES	LOS CATIONES FAVORECEN LA ADSORCION
CARGA HIDRAULICA SOBRE EL TERRENO	A MAYOR CARGA HIDRAULICA CORRESPONDE MAYOR VELOCIDAD DE FLUJO Y, CON ELLA, PENETRACION MAS RAPIDA Y PROFUNDA DE LOS MICROORGANISMOS
PRECIPITACION PLUVIAL	LA INFILTRACION GENERADA POR FUERTES LLUVIAS PUEDE LIBERAR GERMENES ADSORBIDOS

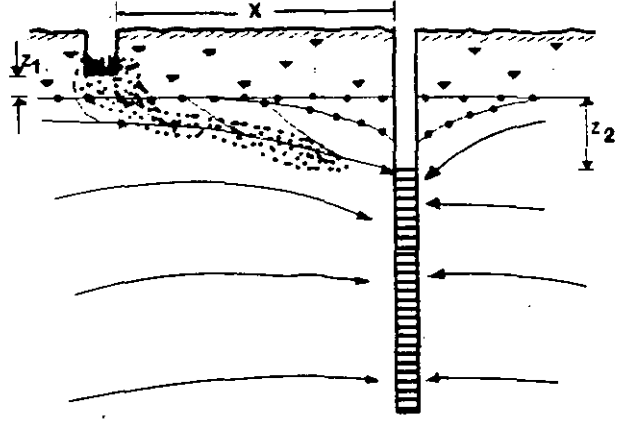
## FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SUPERVIVENCIA DE BACTERIAS Y VIRUS EN EL SUBSUELO (GERBA, 1979)

<u>FACTOR</u>	<u>EFFECTOS</u>
CONTENIDO DE HUMEDAD	LA SUPERVIVENCIA ES MAYOR EN MATERIALES HUMEDOS Y DURANTE LA TEMPORADA LLUVIOSA
RETENCION ESPECIFICA	MAYOR SUPERVIVENCIA EN MATERIALES DE ALTA RETENCION
TEMPERATURA	SUPERVIVENCIA MAS PROLONGADA A BAJAS TEMPERATURAS
ADSORCION	LOS MICROORGANISMOS ADHERIDOS SOBREVIVEN MAS TIEMPO
pH	LA SUPERVIVENCIA ES MENOR EN LOS MATERIALES ACIDOS (pH = 3 A 5)
LUZ SOLAR	EN AMBIENTES OSCUROS LA SUPERVIVENCIA ES MAYOR QUE EN LA SUPERFICIE DEL TERRENO
MATERIA ORGANICA	SUPERVIVENCIA MAS PROLONGADA EN PRESENCIA DE SUFICIENTE MATERIA ORGANICA
MICROFLORA NATURAL	LA SUPERVIVENCIA ES MAYOR EN MATERIAL ESTERIL: LA MICROFLORA DEL SUELO Y LOS MICROORGANISMOS COMPITEN POR LOS NUTRIENTES

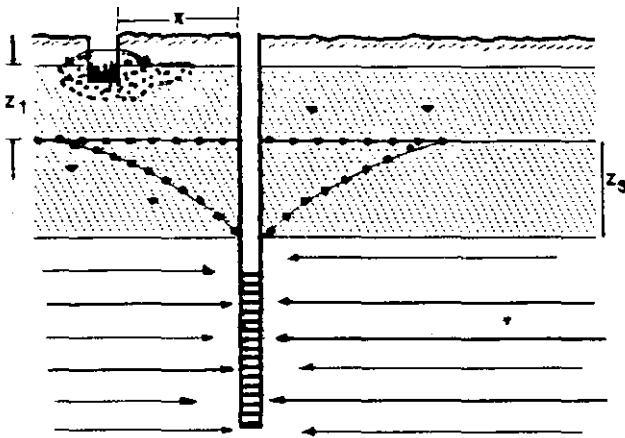
CONTAMINACION EN UN ACUIFERO NO CONFINADO CON NIVEL FREATICO PROFUNDO



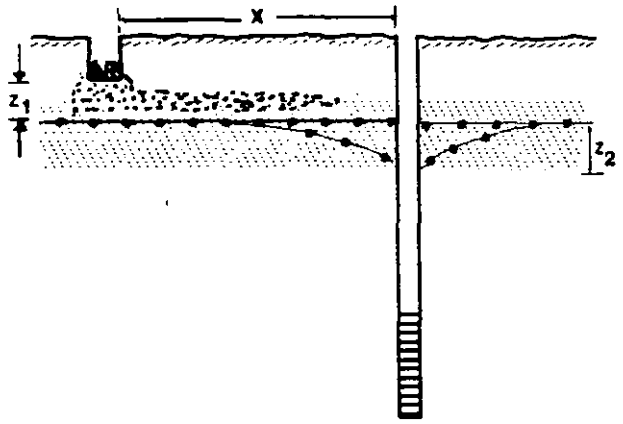
CONTAMINACION EN UN ACUIFERO NO CONFINADO CON NIVEL FREATICO ESTACIONALMENTE PROFUNDO





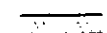
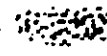


CONTAMINACION EN UN ACUIFERO SEMICONFINADO

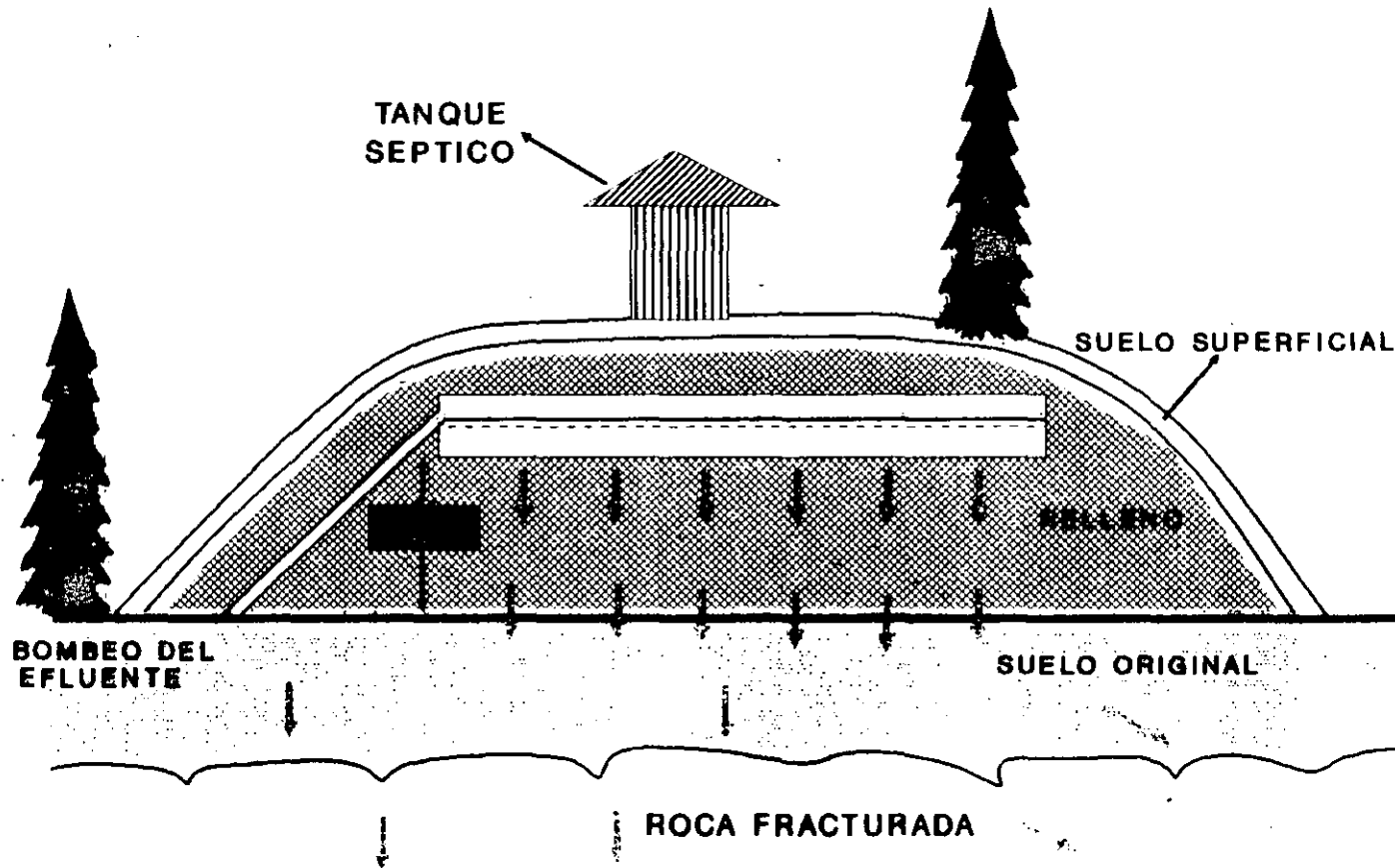


CONTAMINACION EN UN ACUIFERO CONFINADO



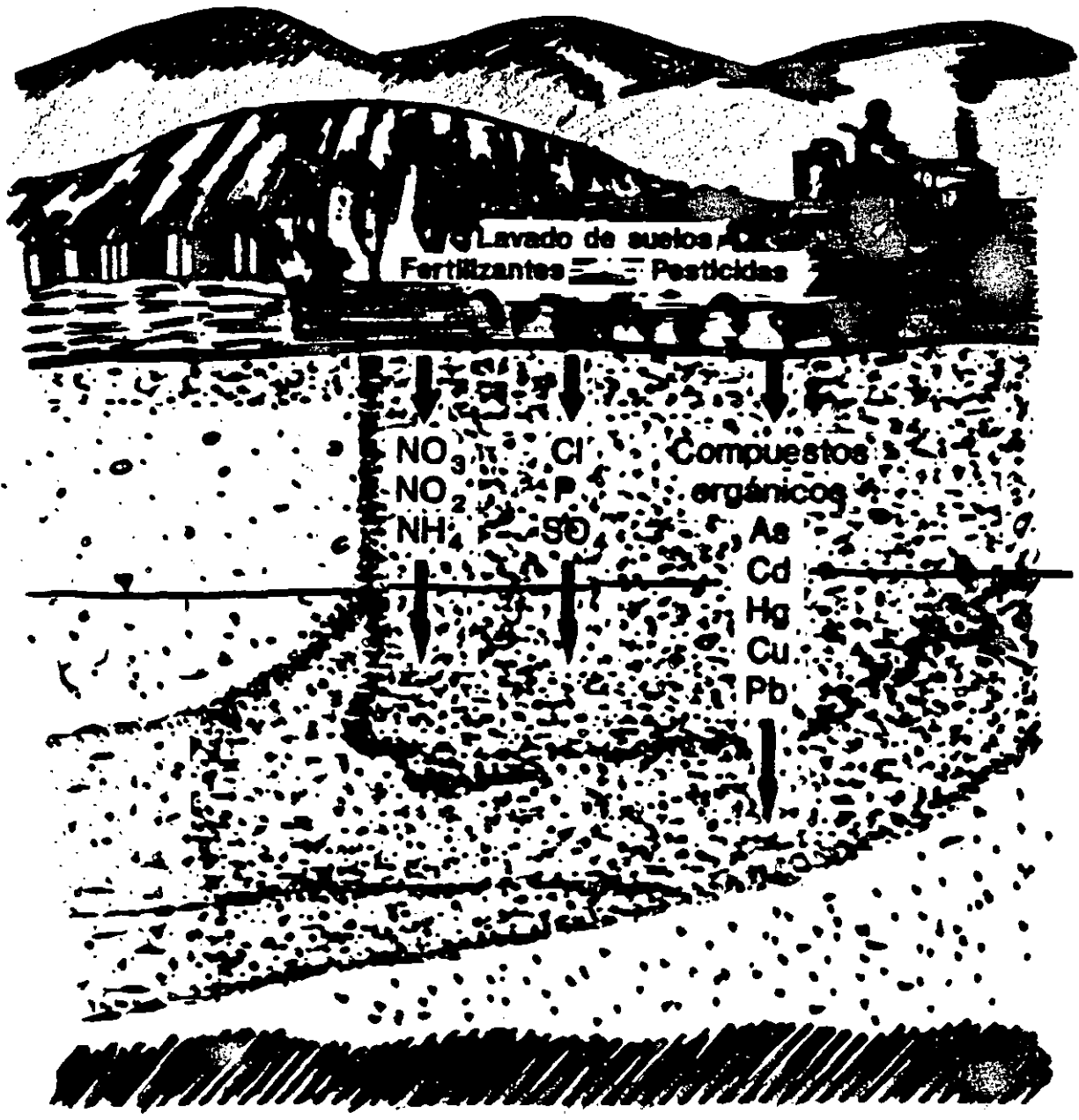
-  INSOLACION SANITARIA
-  NIVEL DE LA TOMA DEL POZO (REJILLA)
-  FLUCTUACION ESTACIONAL DEL NIVEL FREATICO
-  NIVEL FREATICO BAJO CONDICION ESTADICA Y DINAMICA
-  CAPA CONFINANTE SEMIPERMEABLE
-  EXTENSION DE LA CONTAMINACION POR BACTERIAS FECALIAS

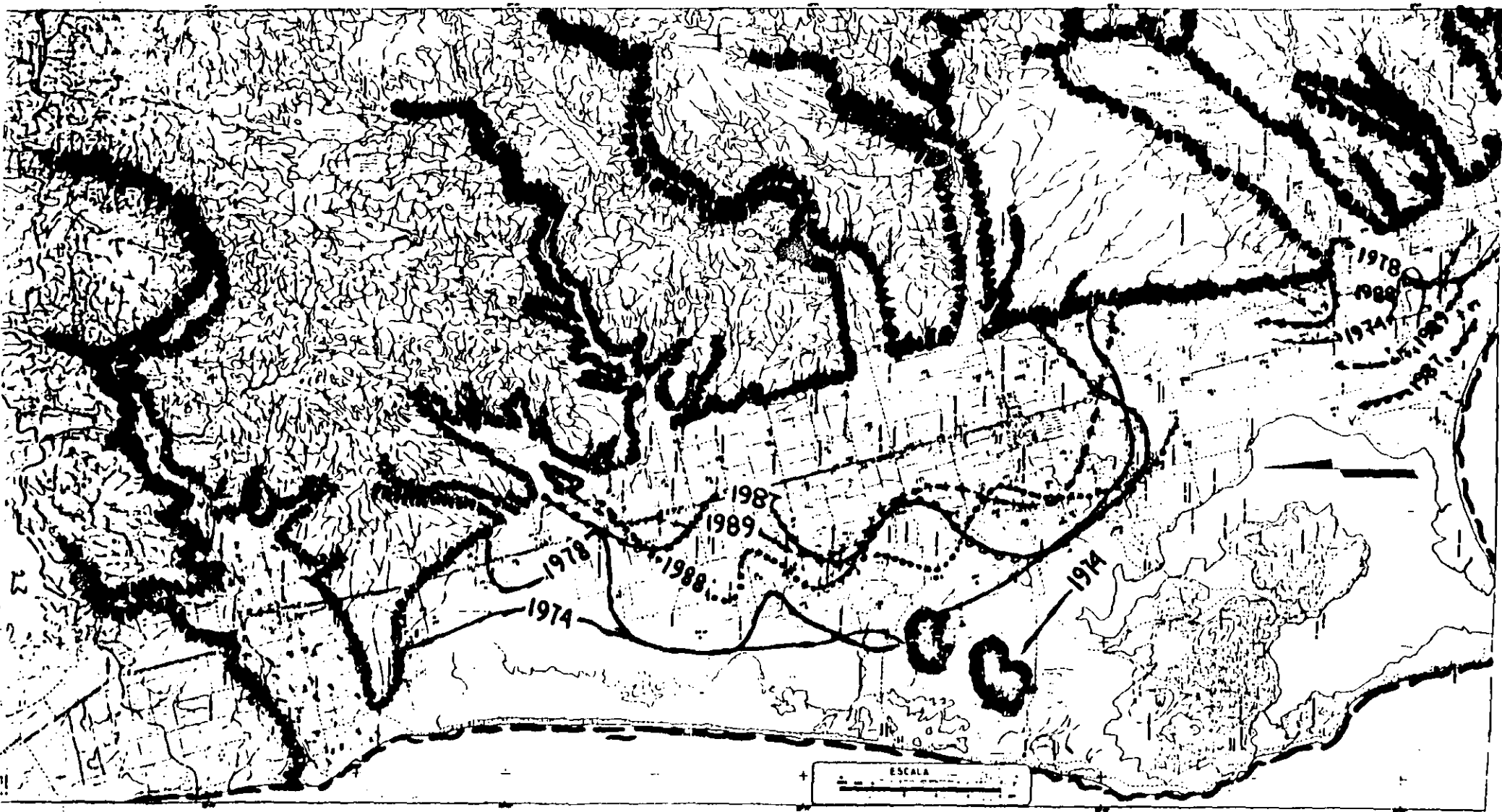
# RELLENO ARTIFICIAL PARA LA PROTECCION DE ACUIFEROS CONTRA LA CONTAMINACION POR EFLUENTES DE TANQUES SEPTICOS



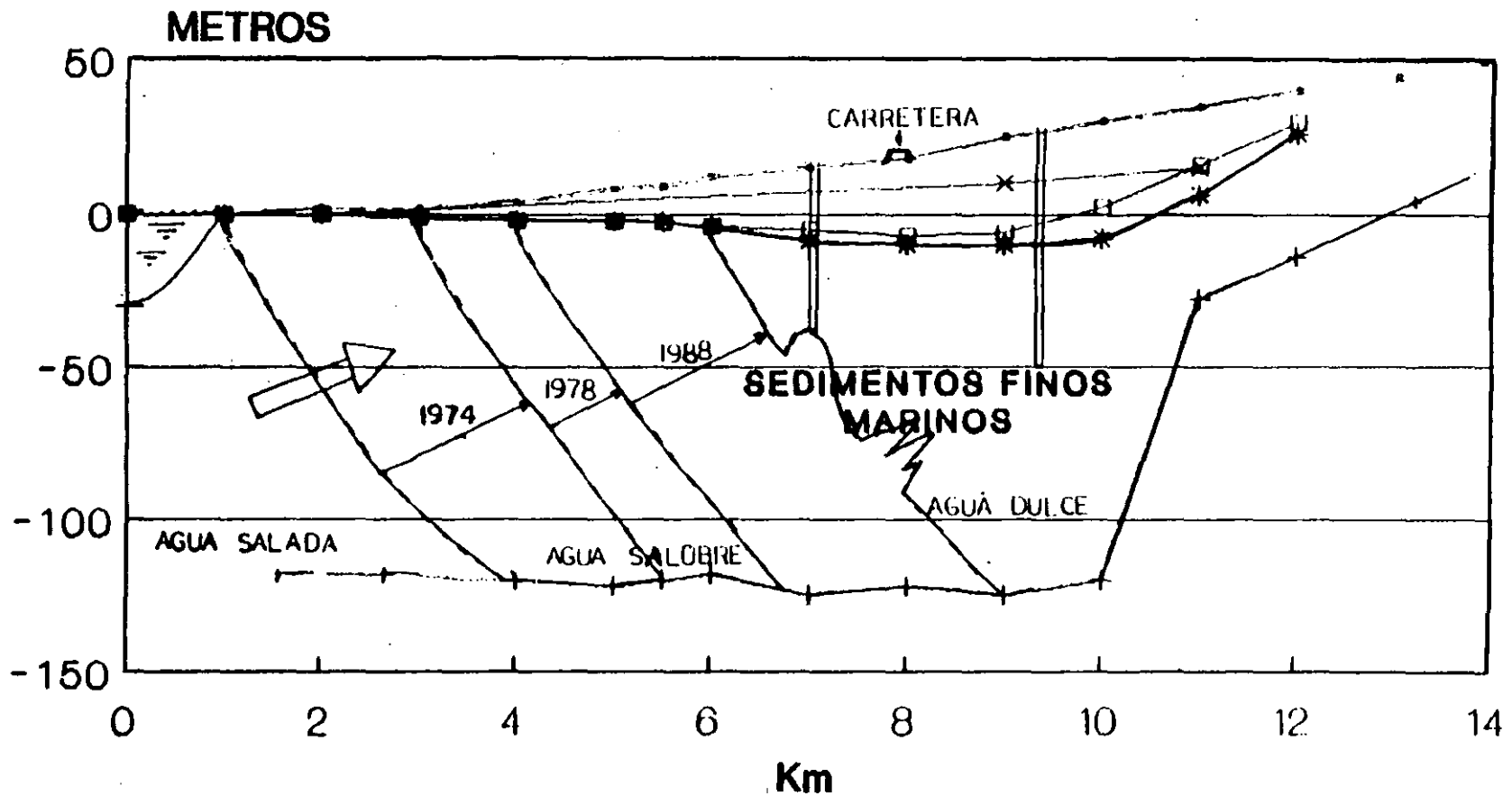


# CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA POR DESARROLLOS AGRICOLAS





# INTRUSION SALINA EN EL ACUIFERO DE SAN QUINTIN, B.C.



—●— N.T.

—+— BASE

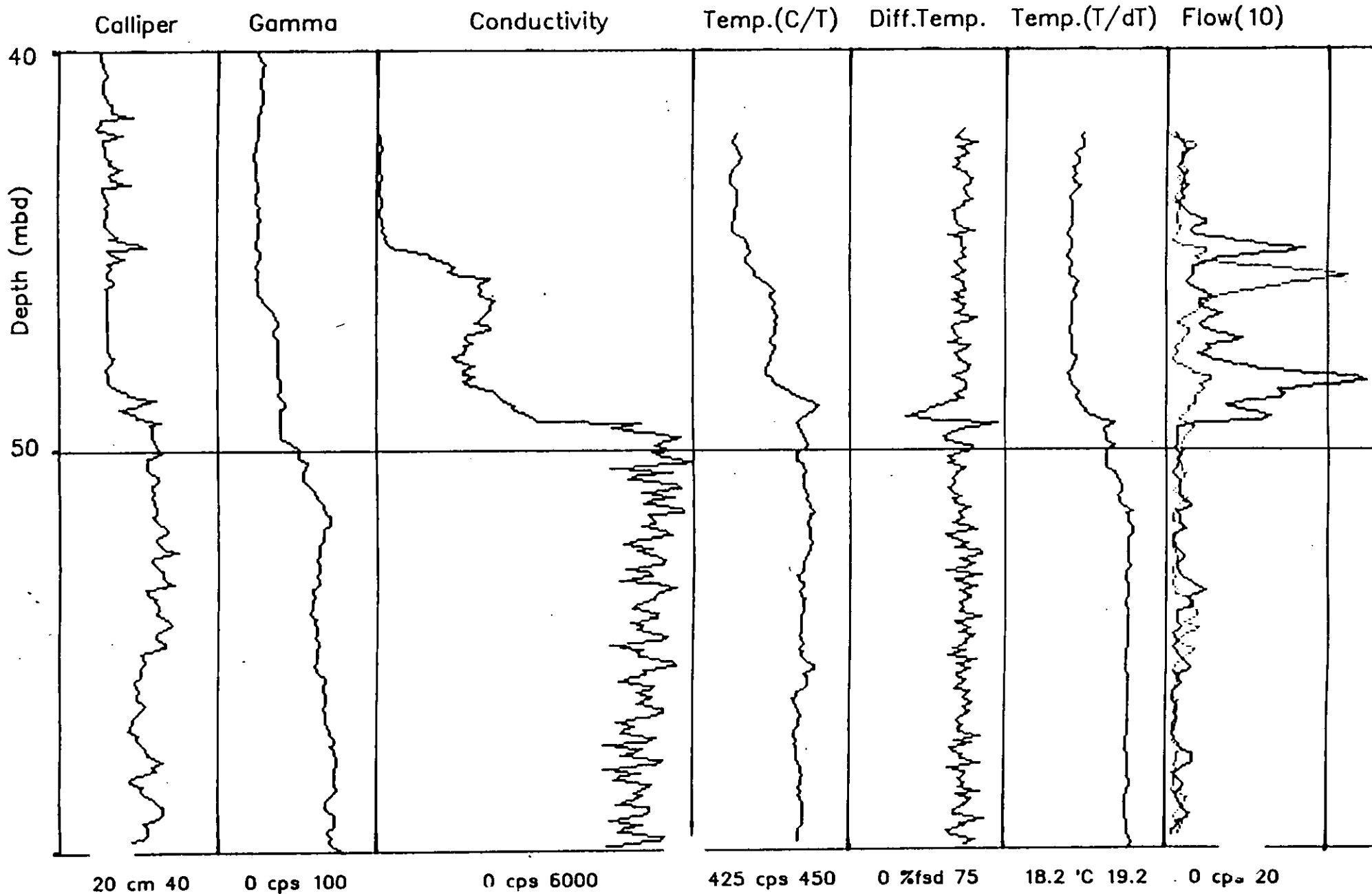
—\*— N.E. 1988

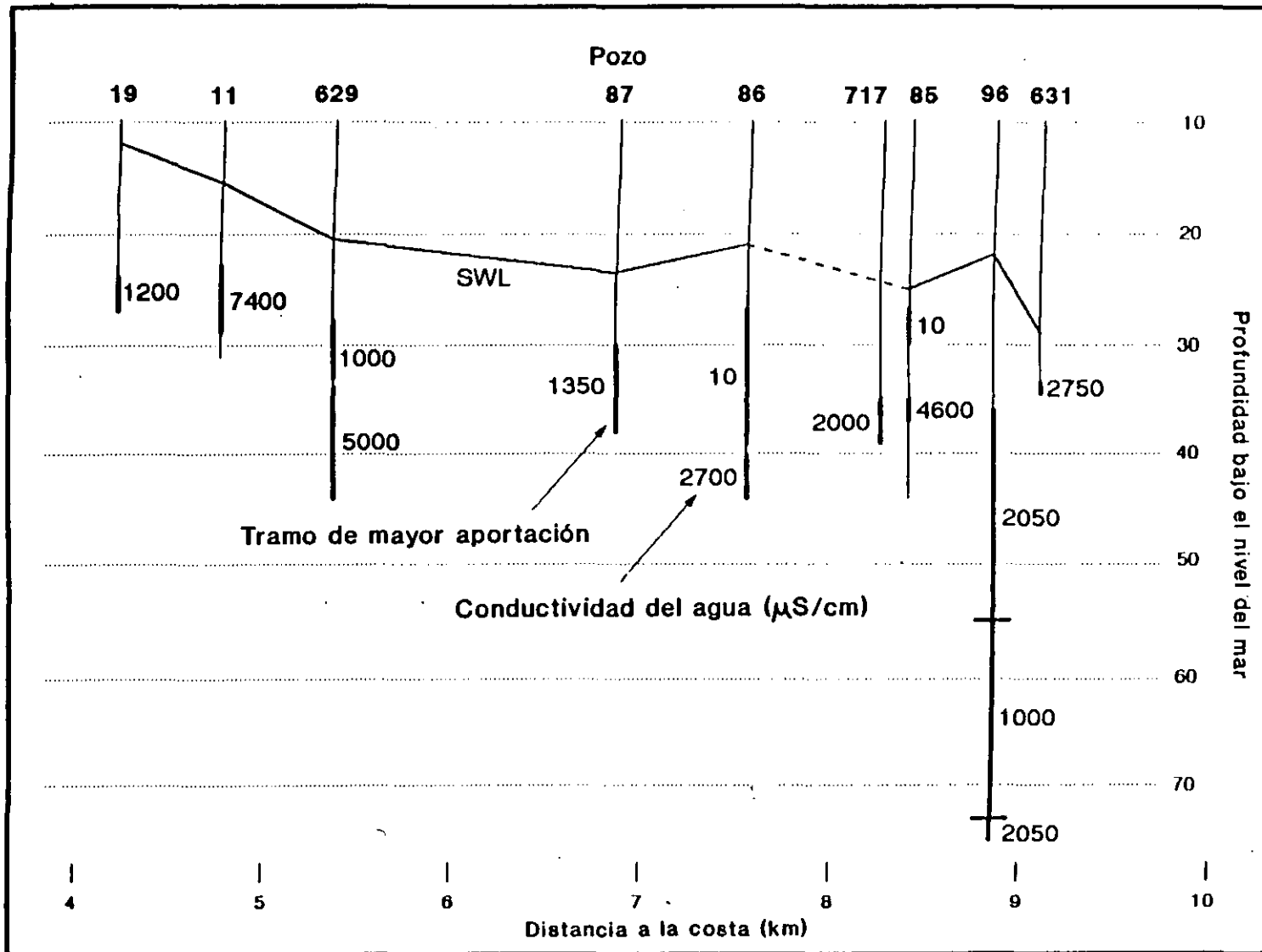
—□— N.E. 1981

—x— N.E. COND. NATURAL

ESTUDIO DE LA INTRUSION SALINA  
DEL ACUIFERO SAN QUINTIN, B.C.  
REGISTROS EN POZOS

BC629

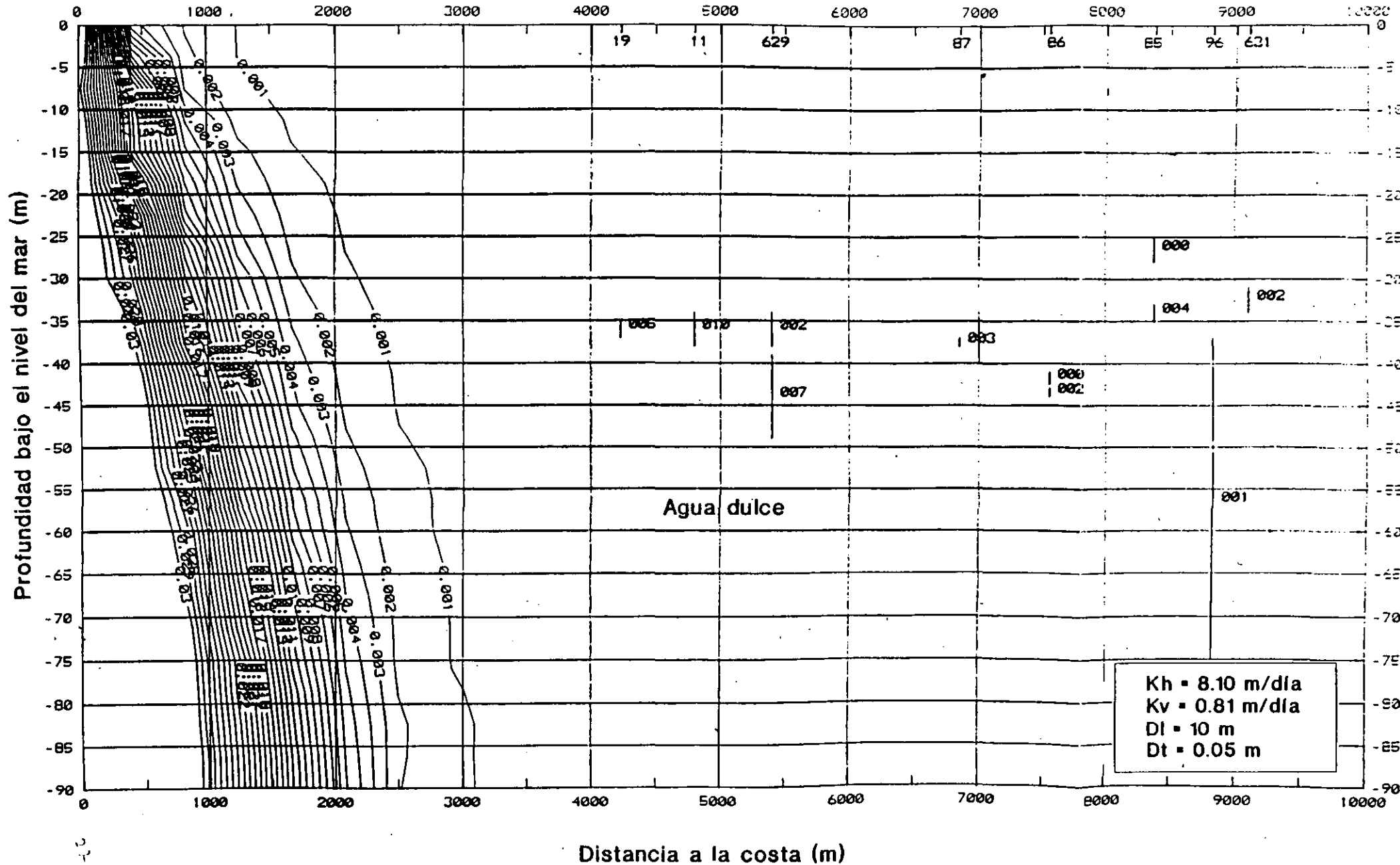




**INTRUSION SALINA EN EL ACUIFERO SAN QUINTIN, B.C.  
DISTRIBUCION VERTICAL DE LA SALINIDAD DEL AGUA CAPTADA POR POZOS**

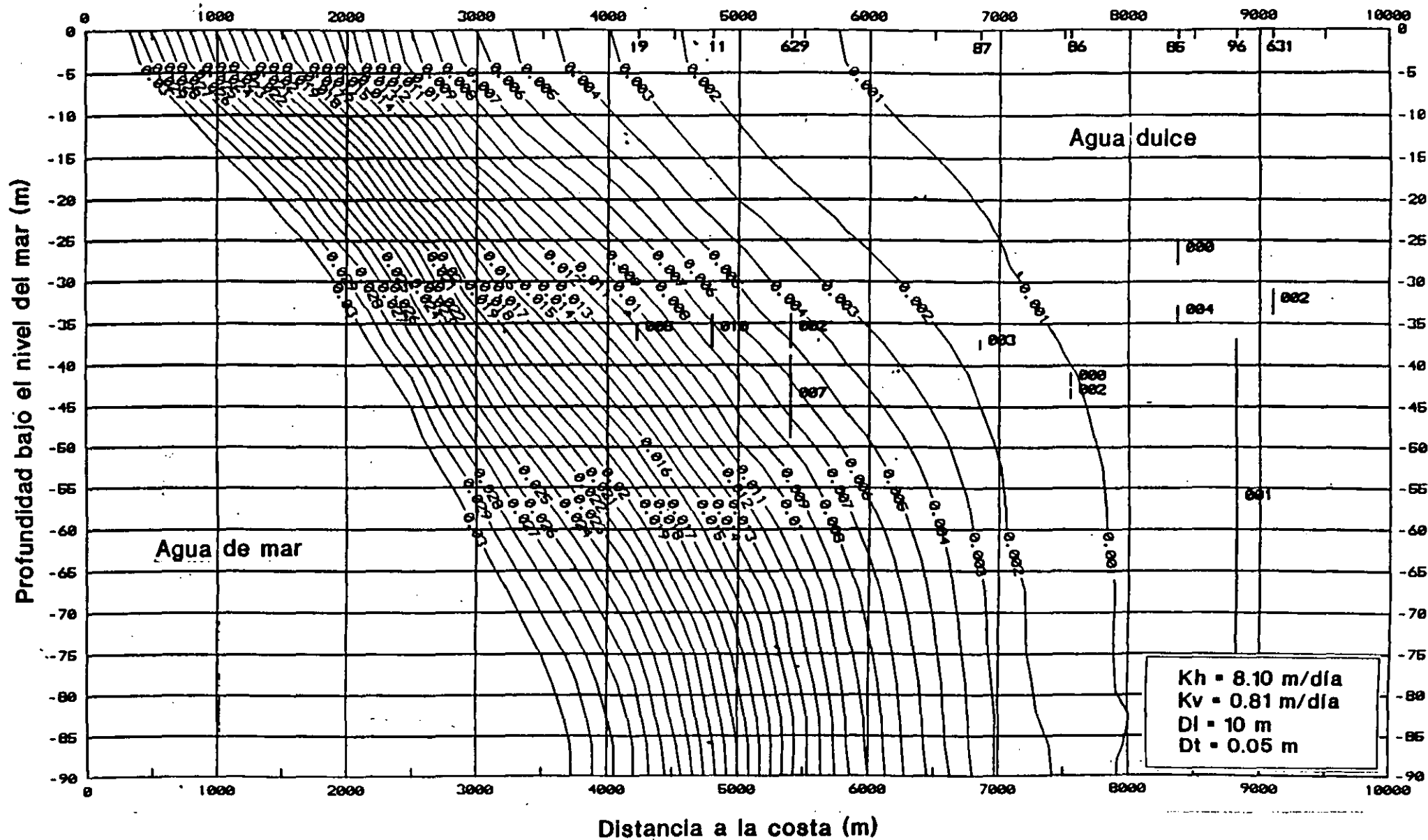
# SIMULACION DE LA INTRUSION SALINA EN EL VALLE DE SAN QUINTIN

## Condiciones naturales



# SIMULACION DE LA INTRUSION SALINA EN EL VALLE DE SAN QUINTIN

## Condiciones actuales (1991)







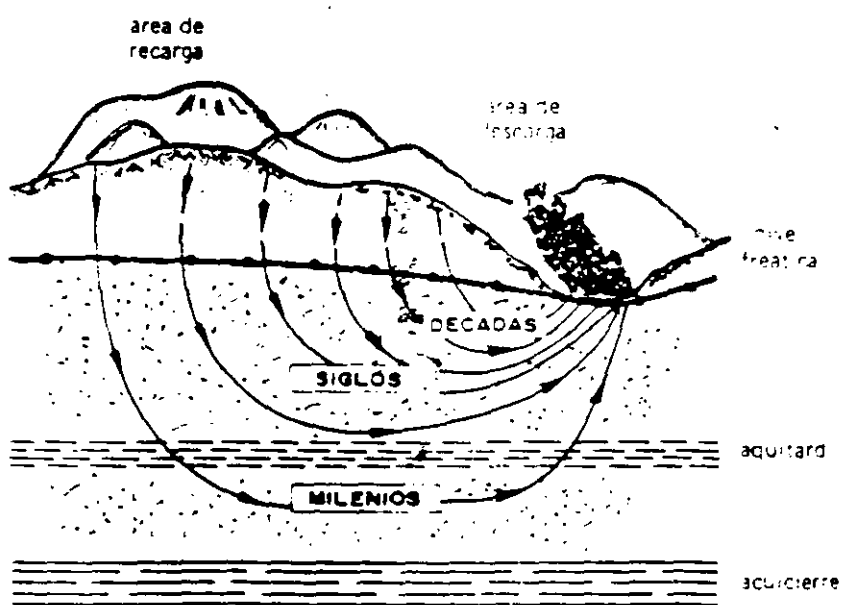
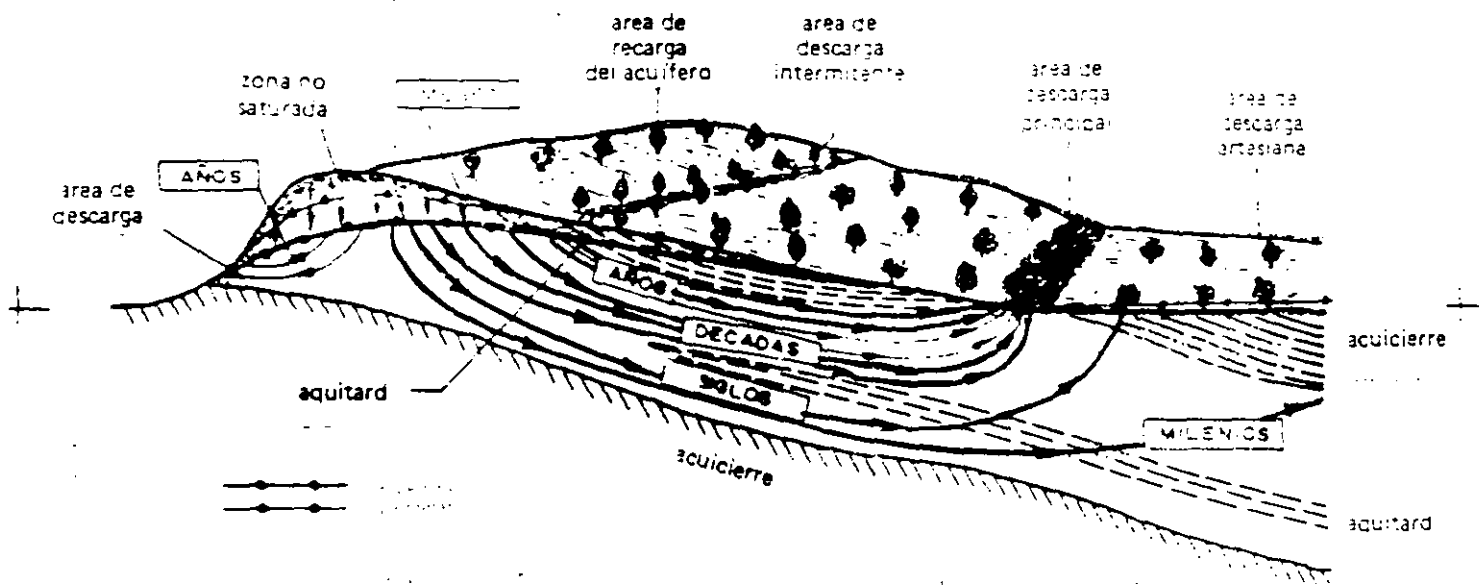
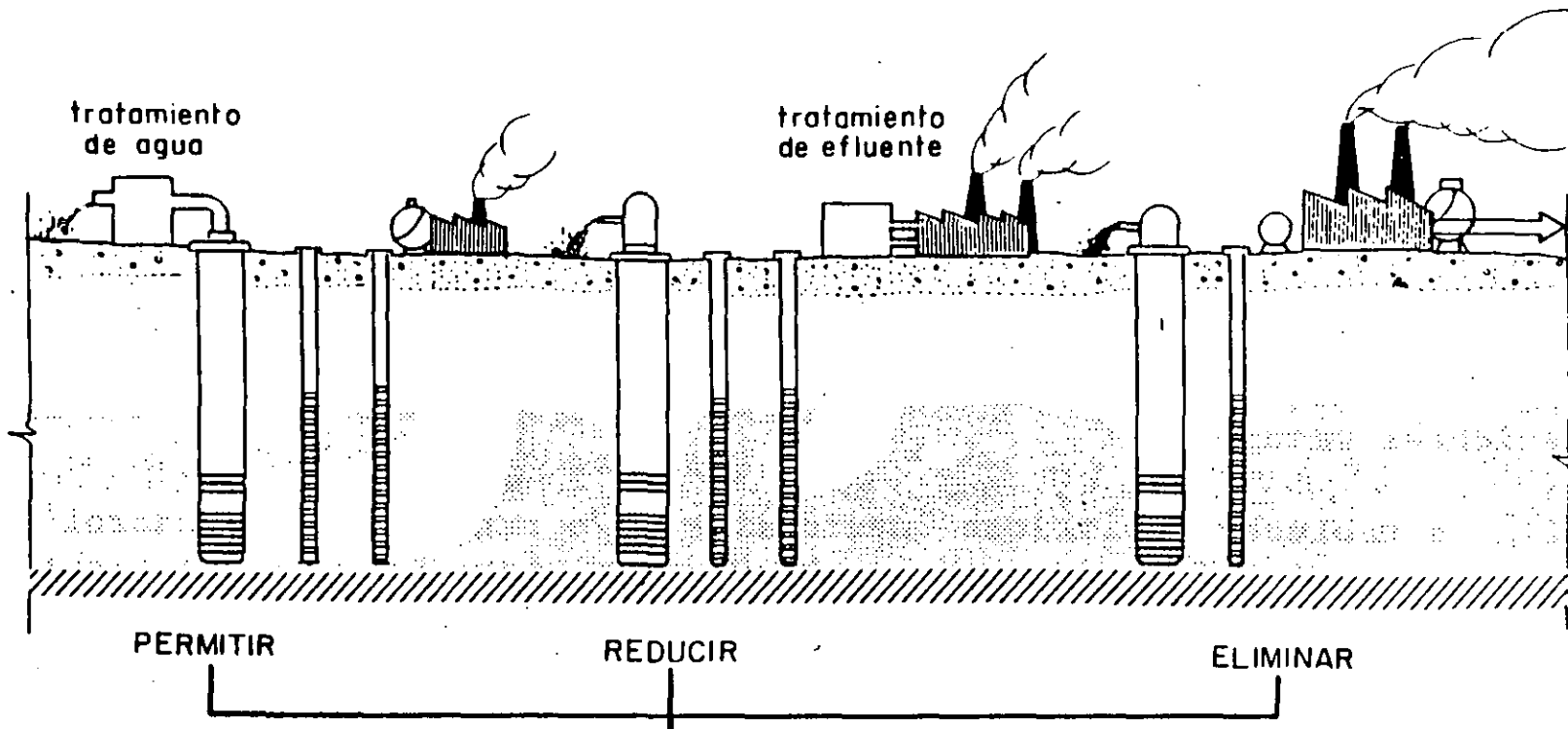
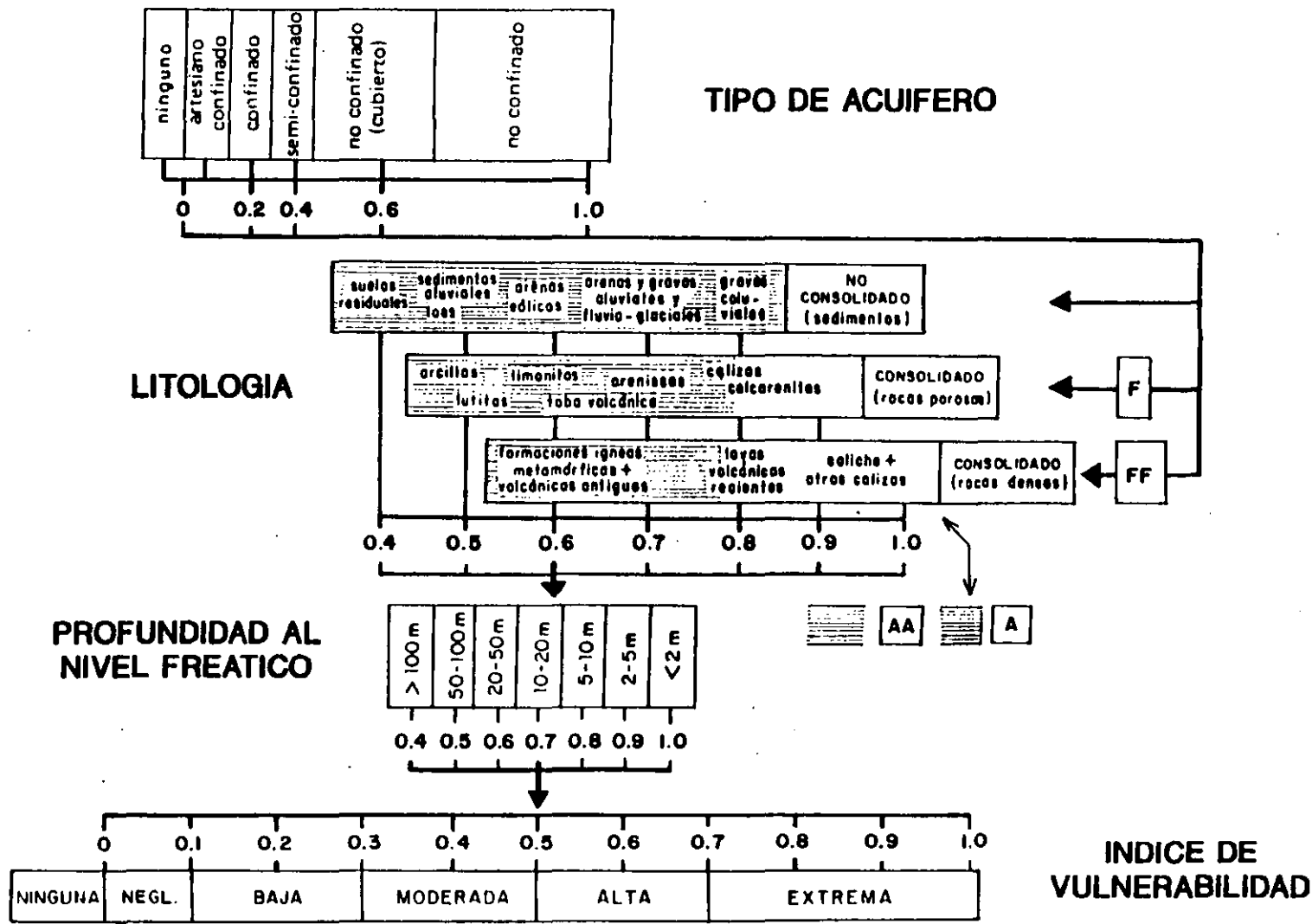


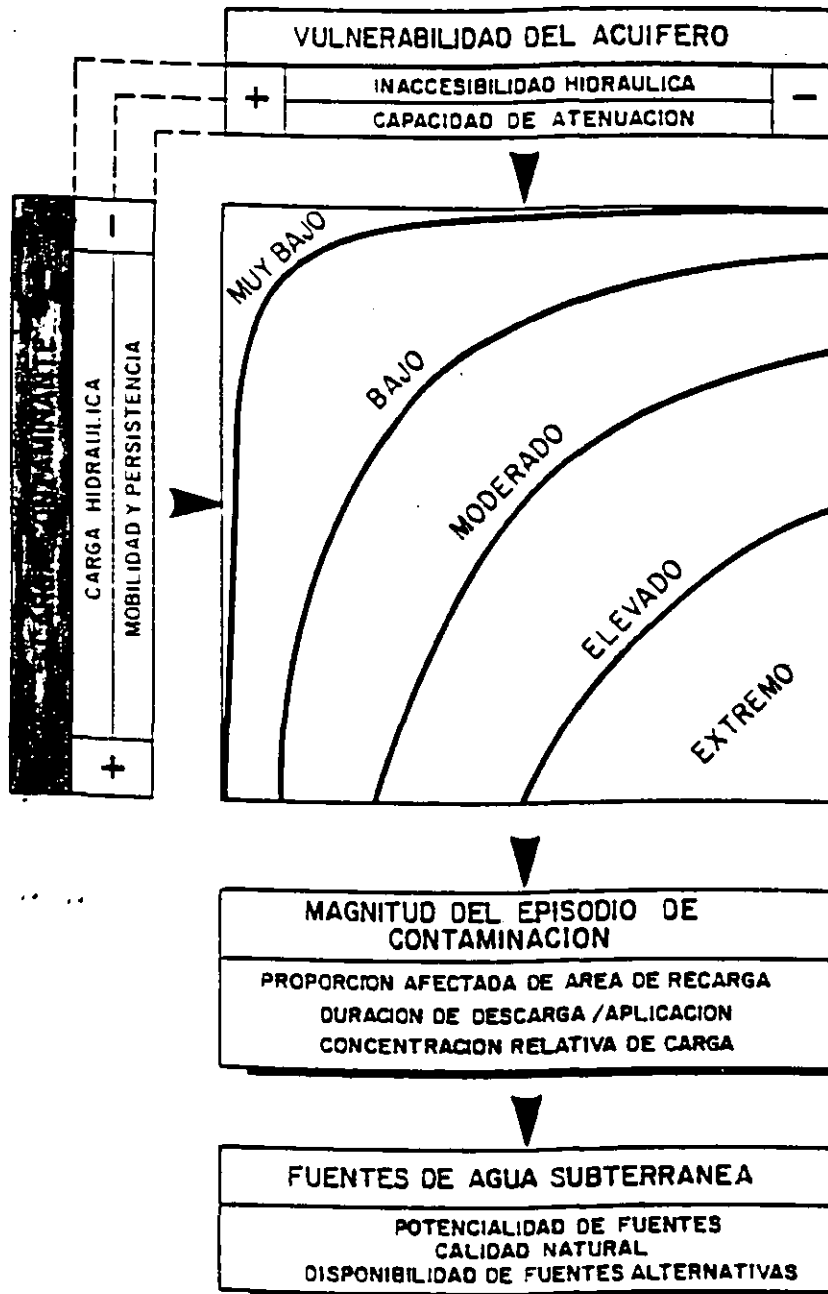
FIGURA 1



**OPCIONES DE MANEJO DE LA CARGA CONTAMINANTE**

# PROCEDIMIENTO PARA VALUAR EL INDICE DE VULNERABILIDAD DE UN ACUIFERO A LA CONTAMINACION A LA CONTAMINACION





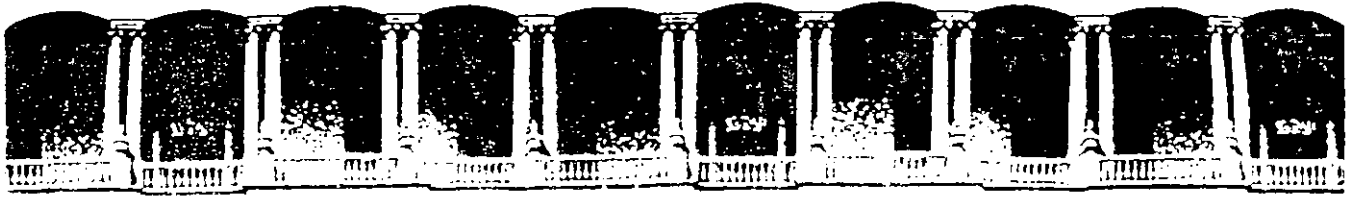
**CRITERIO PARA EVALUACION DE  
RIESGO DE CONTAMINACION DE  
LOS ACUIFEROS**

# **ACCIONES INSTITUCIONALES**

**IMPLEMENTACION DE POLITICAS NACIONALES Y  
REGIONALES DE CONTROL DE LA CONTAMINACION  
LEGISLACION EN LA MATERIA**

## **LINEAS DE ACCION**

- **ZONIFICACION DE LA VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS A LA CONTAMINACION**
- **SANEAMIENTO BASICO DEL MEDIO RURAL**
- **CONTROL DE FERTILIZANTES Y PESTICIDAS, USO EFICIENTE DEL AGUA Y PRACTICAS ADECUADAS DE RIEGO, EN LAS ZONAS AGRICOLAS**
- **APLICACION DE CRITERIOS RACIONALES PARA EL EMPLAZAMIENTO, EL DISEÑO Y LA OPERACION DE LOS RELLENOS SANITARIOS**
- **CONTROL DE FUGAS Y CONDICIONES DE DESCARGA EN LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES**
- **INSTRUMENTACION Y MONITOREO**
- **ESTUDIOS ESPECIFICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LAS ZONAS MINERAS**
- **PARTICIPACION SOCIAL**



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

*CURSOS ABIERTOS*

*VI CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGIA Y CONTAMINACION  
DE ACUIFEROS*

*CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR FUGAS DE  
TANQUES ALMACENADORES DE GASOLINAS*

*ING. JUAN M. LESSER ILLADES*

*PALACIO DE MINERIA*

CONTAMINACIÓN DE ACUIFEROS POR FUGAS DE  
TANQUES ALMACENADORES DE GASOLINAS.

POF: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

LESSER Y ASOCIADOS, S. A.  
P.O. BOX 3, COL. PATHE  
QUERETARO 76020, QRO.

R E S U M E N

Son comunes las fugas a partir de los tanques subterráneos que almacenan gasolinas. Estas, son consecuencia tanto de la corrosión de los tanques como de los movimientos por acomodamientos del terreno. Al infiltrarse en el subsuelo, las gasolinas tienden a avanzar hasta el nivel freático o estatico, sobre el cual se acumulan. Algunos componentes de las gasolinas se volatilizan, propiedad que se aprovecha para su detección. Se describen los métodos de saneamiento de áreas contaminadas.

## INTRODUCCION

Los tanques subterráneos almacenadores de gasolinas llegan a ser corroídos y dar origen a fugas que contaminan el subsuelo. En muchos casos, el contaminante circula y se encuentra en contacto con el acuífero. La gasolina, por tener una densidad menor que el agua, tiende a flotar y almacenarse arriba del nivel freático o estático. (Figura No. 1)

Además de la corrosión, los movimientos por acomodamientos del terreno provocan tensiones que llegan a producir dislocaciones en las conexiones entre el tanque y la superficie, donde también se llegan a generar zonas de fugas de hidrocarburos.

La gasolina infiltrada tiende a avanzar hasta el nivel estático donde, por presentar una menor densidad que el agua, flota sobre ella. Parte de esta gasolina se volatiliza ocupando espacios porosos arriba del nivel estático, que en ocasiones llegan cerca de la superficie del terreno donde pueden ser detectados.

## MEDICION Y DETECCION DE VOLATILES EN EL SUBSUELO

La detección de fugas puede realizarse a través de perforaciones someras en las cuales se efectúan mediciones de la concentración de volátiles orgánicos, como son varios de los compuestos que constituyen a las gasolinas.

Para la perforación de los pozos someros de medición se utilizan equipos especialmente diseñados para ello, que en



general consisten de un martillo electrico, al cual se unen barras de perforación. Su operación es manual y su costo bajo.

## CARACTERÍSTICAS DE LAS GASOLINAS

Las gasolinas son una compleja mezcla de hidrocarburos. Pueden ser identificados entre 100 y 150 compuestos en una gasolina típica. Los constituyentes más comunes son: benceno, etilbenceno, heptano, hexano, tolueno, naftaleno y fenol.

Cada constituyente tiene características físicas y químicas diferentes que controlan su comportamiento en el subsuelo. Así, mientras que algunos pueden ser absorbidos totalmente por el suelo, otros se volatilizan y otros más presentan un comportamiento variado y complejo. En la Tabla No. 1 se muestra la capacidad de adsorción por el suelo, volatilización o solubilidad de los 13 compuestos más comunes que constituyen a las gasolinas.

Estudios efectuados por Fleischer et al (1986), enfocados a los 13 compuestos más comunes en gasolinas, los dividió en los 4 grupos siguientes:

1. Los que preferentemente son adsorbidos 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. 2, se muestran los componentes de cada grupo. Los hidrocarburos ligeros tienden a volatilizarse mientras que los pesados tienden a quedarse entre las partículas del suelo. Los hidrocarburos ligeros son conocidos como LNAPLs (Light-Nonaqueous PHASE Liquids).

De acuerdo a las características de los compuestos que forman a las gasolinas y a su comportamiento en el subsuelo, se han desarrollado diferentes metodologías para su detección y saneamiento.

#### Transporte de líquidos

Cuando existen fugas de líquidos, éstos tienden inicialmente a infiltrarse en forma vertical, por gravedad, con cierta dispersión lateral.

El movimiento del contaminante puede suspenderse cuando es adsorbido por el suelo, por encontrar una barrera impermeable y/o alcanza el nivel estático.

La adsorción por el suelo depende de: El tamaño de los granos del suelo; el porcentaje de materia orgánica y; las características del compuesto. El volumen del suelo requerido para adsorber e inmovilizar un contaminante puede calcularse en forma gruesa mediante la fórmula

$$\text{Vol} = \frac{0.2 V}{PSr}$$

$V_{ol}$  = Volumen del suelo requerido para inmovilizar una sustancia.

$V$  = Volumen de sustancia infiltrada.

$P$  = Porosidad

$S_r$  = Saturación residual (para gasolinas = 0.1)

Cuando la sustancia contaminante infiltrada alcanza el nivel estatico, flotara sobre este. La migración o transporte de la gasolina sobre el acuífero esta gobernando por su densidad, que al ser menor a la del agua ocasionará que flote, invadirá la zona capilar y circulará gradiente abajo.

Hacia la zona saturada no se permite el movimiento o flujo horizontal, mientras que hacia arriba, o sea hacia la zona de aereacion, disminuye la fuerza capilar lo cual permite un flujo lento, que se hace moderado o libre conforme se alcanza la zona no saturada.

#### Transporte de vapores

Muchos de los componentes de las gasolinas son volatiles; al encontrarse expuestos a la presión atmosférica y temperatura ambiente pasan al estado gaseoso. Su presencia es peligrosa ya que pueden llegar a acumullarse ocasionar explosiones o incendios.

El volatil compuesto puede transportarse rápidamente de la zona capilar hacia la zona saturada. Las fluctuaciones de la superficie piezométrica pueden favorecer su desplazamiento.

El transporte de los vapores orgánicos en la zona no saturada del subsuelo es gobernado por los procesos de

difusión y convección, es descrito por la Ley de Fick, aplicada a un gas dentro de un poro, expresada como:

$$Q_g = D_g \frac{dC}{dz} \quad \text{con } D_g = D_a(t)D_{ab}$$

Donde:

$Q_g$  = Flujo de masa por unidad de área por unidad de tiempo.

$C$  = Concentración del soluto "a".

$D_a$  = Aire que llena el poro.

$t$  = Tortuosidad.

$D_{ab}$  = Coeficiente de difusión del gas a al gas b.

$dC_a/dz$  = Gradiente de la concentración.

## TECNICAS DE SANEAMIENTO

Las fugas procedentes de tanques almacenadores de gasolinas se infiltran hasta el nivel freático o estático sobre el cual circulan o se almacenan, invadiendo una cierta zona alrededor del sitio donde se produce la fuga. La mancha contaminante puede presentar una dirección de flujo preferente, la cual generalmente es similar al gradiente de la superficie piezométrica. Existen varios métodos que pueden ser aplicados para sanear las zonas contaminadas, contándose entre los principales a los siguientes: Excavación; volatilización; biodegradación; vitrificación; autoeliminación; aislamiento y; extracción de agua y tratamiento.

A continuación se comentan estos métodos.

## Excavación

Una medida para la eliminación del problema causado por la contaminación de gasolinas es la excavación y extracción del material del subsuelo, el cual es transportado a otra zona en donde recibe el tratamiento necesario para no producir nuevamente contaminación. La zona excavada es rellenada con material arcilloarenoso libre de contaminantes.

La aplicación de este método se encuentra limitada por la magnitud del área por excavar, así como por el tipo de construcciones que existan en los alrededores.

El primer paso consiste en ubicar el área afectada. Las zonas donde el volumen por excavar es poco, son más factibles de atacar por este método que las áreas donde la extensión de la mancha contaminante es grande.

Otro factor directamente involucrado en la factibilidad de aplicación de este método es la permeabilidad de los materiales. En sitios con permeabilidad media o alta, el contaminante puede circular rápidamente y abarcar grandes extensiones, lo que llega a hacer inapropiado el método de excavación. Por el contrario, en sitios donde el material que constituye a la zona afectada tiene baja permeabilidad, el movimiento de la gasolina se reduce y retarda, llegando a presentarse en extensiones reducidas donde, para su eliminación, podría utilizarse el método de excavación.

## Volatilización

Un porcentaje de la gasolina se volatiliza en el subsuelo. Aprovechando esta propiedad, un método de eliminación del contaminante consiste en inyectar aire al subsuelo a través de pozos. El aire inyectado es succionado y extraído mediante otro pozo y en su trayecto arrastra los compuestos volátiles. Este método llega a ser efectivo y de bajo costo donde la permeabilidad del medio es alta.

En la Figura No. 2 se muestra un ejemplo de un sistema utilizado para la ventilación del subsuelo y el arrastre de compuestos volátiles. La preinyección de aire con cierta temperatura incrementa el grado de volatilización. En la figura mencionada, se muestra un calentador de aire, un ventilador con el cual el aire es inyectado al subsuelo a través de una serie de tuberías y pozos. Mediante otra serie de tuberías y pozos, el aire es extraído, habiendo arrastrado volátiles a su paso por el subsuelo. La extracción de aire se auxilia mediante un extractor. Ya en la superficie los volátiles pueden ser retenidos mediante un filtro de carbón activado.

En la Figura No. 3, se muestra un sistema de aereación para la extracción de volátiles del subsuelo, elaborado a escala por Coia, Corbin, ET. AL: (1985) en el cual se incluyen cuatro pozos centrales en los que se inyecta aire y 9 pozos exteriores a través de los cuales se extrae aire y volátiles del subsuelo.

## Biodegradación

Mediante este método se activa el crecimiento de los microorganismos existentes en el subsuelo, los cuales con su proceso metabólico degradan a los hidrocarburos. Este método es acompañado con la adición de oxígeno y nutrientes. Varios factores influyen el grado de crecimiento de los microorganismos, entre ellos la temperatura y el pH. Por costo como efectividad se ha considerado como un método de gran aplicabilidad en la reducción de hidrocarburos en los suelos.

En la Figura 4 se ilustra este método; se muestra un pozo del cual se extrae agua del subsuelo la cual es llevada a un tanque en donde recibe oxígeno y nutrientes, como nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes son transportados por el agua al suelo mediante un pozo de inyección.

## Vitrificación

Se vitrifica a la arcilla utilizando calor generado por electricidad. Estudios experimentales han demostrado que este proceso es efectivo para hidrocarburos presentes en los suelos. Consiste en convertir al suelo en un vidrio o forma cristalina, fundiéndolo por medio de calor proporcionado por corrientes eléctricas. Es una técnica de reciente creación que ha sido patentada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos y utilizada principalmente para suelos conteniendo material radioactivo.

Se realiza con cuatro electrodos clavados en el suelo, con un arreglo cuadrado, distanciados entre 3.5 y 5.5 metros. Una pequeña cantidad de una mezcla de grafito y vidrio se coloca en forma de x entre los electrodos, en la superficie, con el objeto de proveer un paso conductor. Cuando la resistencia interna del medio conductor causa un incremento en la temperatura, lo que provoca que se funda el suelo adyacente. La materia organica tiende a polarizarse creando una zona porosa cerca de la superficie.

Este metodo quema algunos organicos e inmoviliza a otros. El calor provocado llega a alcanzar hasta 1,700° C, ya que los suelos generalmente constituidos por silice y oxidos de aluminio se funden a temperaturas entre 1,100 y 1,800° C.

#### Aislamiento

Consiste en aislar la zona contaminada, para lo cual se forman barreras subterráneas alrededor de la zona contaminada.

Estas barreras pueden ser fisicas o producto de acciones hidrogeologicas. Las barreras fisicas generalmente son construidas con mezclas de cemento, bentonita y arcilla, rellenando "zanjas" o inyectando por medio de pozos, de tal manera que se bloquea e impide el paso del flujo subterraneo y de los hidrocarburos en el subsuelo. Este metodo se encuentra limitado por la profundidad a la que sea necesaria la excavación o inyección.

En la Figura 5 se muestra una típica barrera



Pueden inyectarse al subsuelo mezclas de arcilla con cemento, bentonita o productos químicos como silicato de sodio. La inyección se hace a través de pozos distribuidos a distancias del orden de 1.5 metros y traslapados en la forma como se muestra en la parte alta de la Figura 6.

La cortina impermeable formada por la inyección de productos en el subsuelo se distribuye tratando de aislar el área hacia donde fluye el contaminante en el subsuelo. En la parte baja de la Figura 6 se muestra el área contaminada, dentro de ella un pozo para recuperar el contaminante.

Otra forma de aislamiento puede provocarse mediante la formación de una barrera de pozos de inyección que impida el paso del circulante. Esta forma presenta variantes, siendo una de ellas el método que a continuación se trata.

### Extracción de Agua y Tratamiento

Este es un método usual para la extracción y eliminación de hidrocarburos del subsuelo que tienden a flotar sobre la superficie piezométrica.

El agua y la gasolina son bombeados al exterior. Existen varias formas de realizarlo: (1) Bombeo agua-gasolina y separación en la superficie; (2) bombeo de agua y gasolina, en forma independiente.

La primer forma consiste en bombear, en un pozo, tanto agua como gasolina, las que en la superficie son separadas. La gasolina puede reutilizarse y el agua se trata para eliminar los residuos de hidrocarburos, pudiendo ésto realizarse

mediante carbon activado. El agua tratada puede inyectarse al subsuelo para ayudar al flujo del agua y lavar el medio.

La segunda forma de extraer por bombeo el agua y los hidrocarburos del subsuelo se muestra en la Figura 7. Consiste en una perforación de diámetro amplio o pozo a cielo abierto, construido hasta una profundidad bajo el nivel del agua, de manera tal que permita la colocación de dos bombas, y una para la extracción de agua, la que se coloca hasta el fondo del pozo y tiene por objeto abatir el nivel del agua y de esta manera provocar un cono de abatimiento que facilita el flujo del hidrocarburo que flota sobre la superficie piezométrica; el flujo contaminante se dirigirá hacia el pozo donde se formará una capa de gasolinas que es extraída por otra bomba. El agua extraída es pasada a través de una torre desgasificadora.

#### Autoeliminación

Un método que se trata como tal, consiste en la autodepuración del medio permitiendo que en forma natural actúen procesos de biodegradación, volatilización y adsorción en el suelo. La biodegradación se efectúa debido a que todos los suelos constituyen un habitat natural de microorganismos, muchos de los cuales pueden convertir a parte de las gasolinas en bióxidos de carbono y agua. Otra parte de los hidrocarburos en el subsuelo son retenidos por adsorción, por las partículas del suelo. Cierta parte de las gasolinas se volatiliza y se puede perder en la atmósfera. El paso de agua a través del medio, puede constituir también una fuente natural del lavado de los suelos. Cuando la permeabilidad de los suelos es reducida y el nivel de saturación somero, se

favorezca la autodepuración, al impedir la fácil o rápida propagación de las gasolinas. Las zonas donde se encuentra el nivel piezométrico profundo, presentan mayores problemas para su saneamiento..

## CONCLUSIONES

La mayor parte de los tanques almacenadores de gasolinas presentan fugas que contaminan el subsuelo. Medida imprescindible es la detección de los expendios que presentan fugas, su corrección y el saneamiento del subsuelo.

La detección de la zona contaminante en el subsuelo, se realiza mediante la medición de volátiles orgánicos en perforaciones construidas alrededor de las gasolineras.

Existen varios métodos que pueden ser aplicados para sanear las zonas contaminadas. Una medida es la excavación y extracción del material del subsuelo y el relleno de la zona excavada con material libre de contaminantes. Aprovechando la propiedad de volatilización de las gasolinas, otra forma de su eliminación del subsuelo consiste en inyectar aire a través de pozos, el cual se succiona y extrae mediante otros pozos arrastrando los volátiles del subsuelo. Otro método de saneamiento consiste en la biodegradación de gasolinas en el subsuelo, producida por microorganismos que en su proceso metabólico degradan a los hidrocarburos; en este método, se inyecta agua con nutrientes al subsuelo. Otro método es la vitrificación de la arcilla que forma el subsuelo, utilizando calor generado por una corriente eléctrica.

En ocasiones, es necesario aislar las zonas contaminadas, formando barreras que pueden ser físicas o producto de acciones hidrogeológicas. Otro método para el saneamiento de una zona contaminada, es la extracción, eliminación del hidrocarburo, bombeando tanto el agua como la gasolina hacia la superficie.

#### P E R E R E N C I A S

ABDUL, S. A. 1989. Migration of Petroleum Products Through Sandy Hydrogeologic Systems. In: GWMR.

ABDUL, S. A. 1989. Limitations of Monitoring Wells for the Detection and Quantification of Petroleum Products in Soils and Aquifers In: GWMR.

BAKER, J. F. AND P. DICKHOUT. 1988. An Evaluation of Some Systems for Sampling Gas-Charged Ground Water for Volatile Organic Analysis. In: GWMR.

DEVITT, D. A., ET. AL. 1987. Soil Gas Sensing for Detection and Mapping of Volatile Organics. Publisher National - Water Well Association. 270 p.

HAYES, D., E. C. HERNPY AND S. M. TESTA. 1989. A Practical Approach to Shallow Petroleum Hydrocarbon Recovery.

HEPZOG, B. L. 1989. Investigations of Failure Mechanisms and Migration of Organic Chemicals at Wilsonville, - - Wilsonville, Illinois. In: GWMR.

KIM, ANALYTICAL SYSTEMS. 1990. Soil Gas Equipment and Brief Field Techniques. Publisher, K-M Associates, INC. 50 p.

KOFFROT, R. 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: GWMP.

NIYER, E. K. 1989. Relating the Physical and Chemical Properties of Petroleum Hydrocarbons to soil an Aquifer Remediation. In: GWMP.

SCHWENDEMAN, T. G. 1987. Underground Storage Systems. Lewis Publishers. 213 p.

STOVER, E. L. 1989. Coproduced Groundwater Treatment and - Disposal Options During Hydrocarbon Recovery Operations. In: GWMP.

TABLA 1 CAPACIDAD DE ADSORCION, VOLATILIZACION Y SOLUBILIDAD DE LOS COMPONENTES MAS COMUNES DE LAS GASOLINAS

COMPUESTOS DE LAS GASOLINAS	C A P A C I D A D D E		
	ADSORCION POR EL SUELO (%)	VOLATILIZACION (%)	SOLUBILIDAD EN AGUA (%)
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)Antraceno	100	0	0
Benc(a)Pireno	100	0	0
Naftaleno	61	8	31
Fenantreno	88	2	10
1-penteno	0.1	99.8	0.1
Fenol	9	0.01	91
Tolueno	3	77	20
Xileno	15	54	31

De: Fleischer et al., 1986

TABLA 2 GRUPOS DE ACUERDO AL COMPORTAMIENTO DE CADA COMPUESTO

DE ADSORBE	SE VOLATILIZA	SE SOLUBILIZA	COMPORTAMIENTO VARIABLE
Benc(a)Pireno Fenantreno Benc(a)Antraceno	(n)Hexano (n)Heptano (n)Pentano 1-penteno	Fenol	Benceno Etilbenceno Naftaleno Xileno

De: Fleischer et al., 1986

GASOLINERA

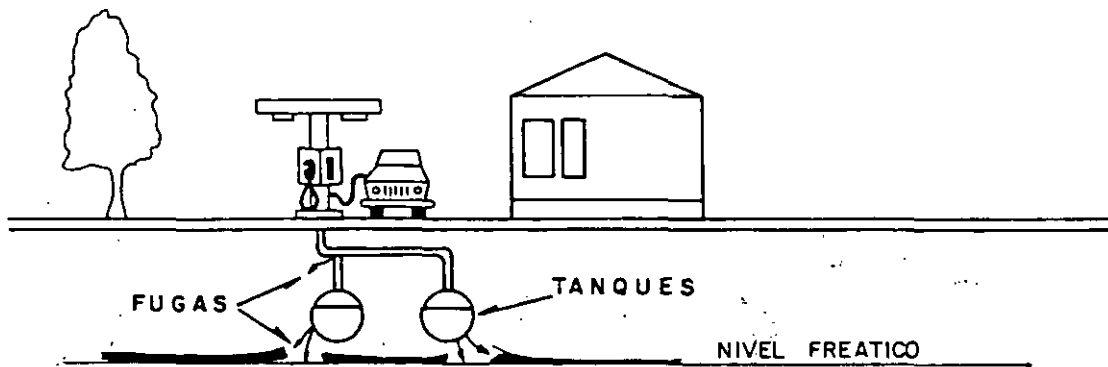
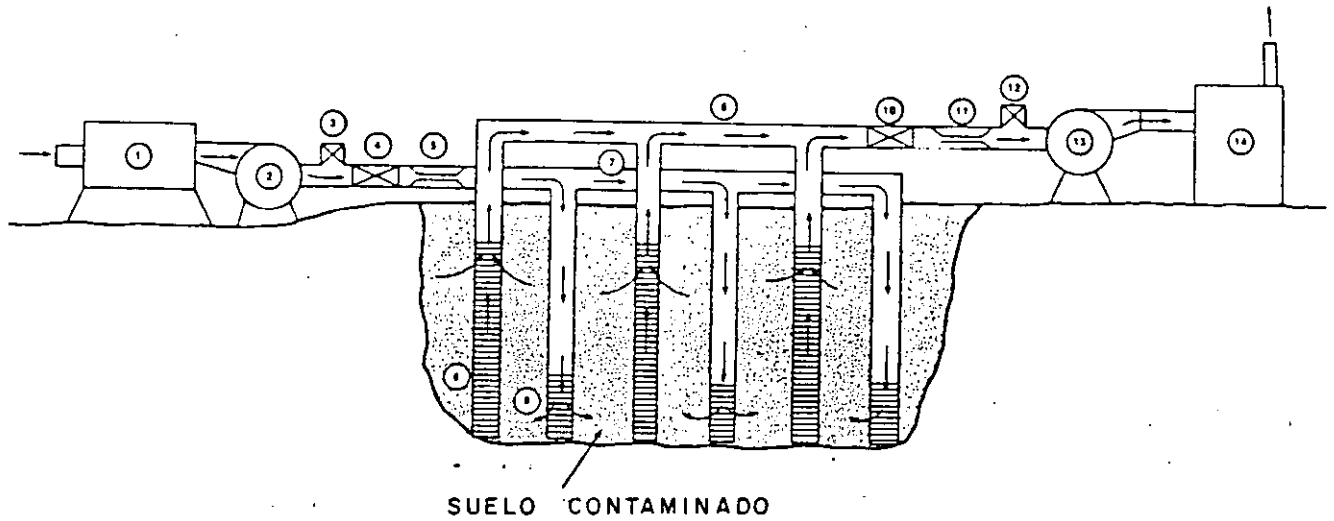


FIGURA 1 - TANQUES ALMACENADORES DE GASOLINAS Y FUGAS



- |                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| 1.- CALENTADOR DE AIRE                | 8.- POZO CON REJILLAS PARA EXTRACCION                 |
| 2.- INYECTOR                          | 9.- POZO CON REJILLAS PARA INYECCION                  |
| 3.- VALVULA                           | 10.- PREPARACION PARA MUESTREO DE AIRE                |
| 4.- PREPARACION PARA MUESTREO DE AIRE | 11.- MEDIDOR  |
| 5.- MEDIDOR                           | 12.- VALVULA  |
| 6.- TUBERIAS DE EXTRACCION            | 13.- EXTRACTOR  |
| 7.- TUBERIAS DE INYECCION             | 14.- UNIDAD DE CARBON PARA RETENCION DE CONTAMINANTES |

FIGURA 2 VENTILACION DEL SUBSUELO Y ARRASTRE DE VOLATILES

DE : REMEDIAL TECHNOLOGIES FOR LEAKING  
 UNDERGROUND STORAGE TANKS. 1989,  
 MODIFICADO POR LESSER Y ASOC., S.A.



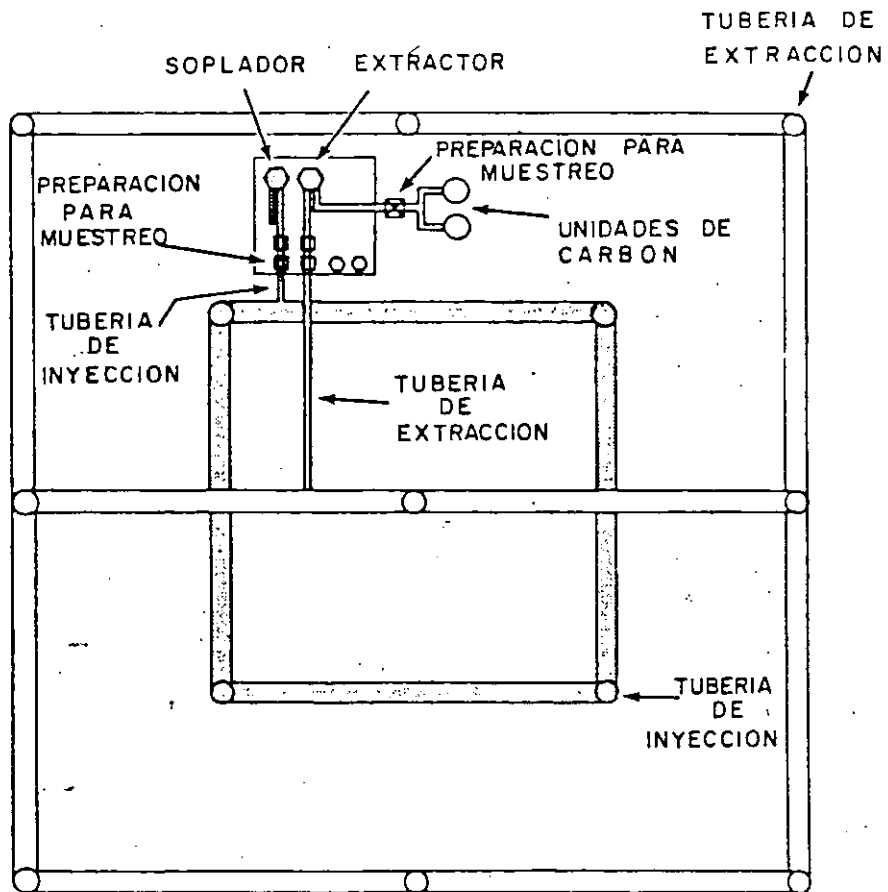


FIGURA 3 SISTEMA EXPERIMENTAL DE VOLATILIZACION

DE: REMEDIAL TECHNOLOGIES FOR LEAKING  
 UNDERGROUND STORAGE, 1989,  
 MODIFICADO POR LESSER Y ASOC., S.A.

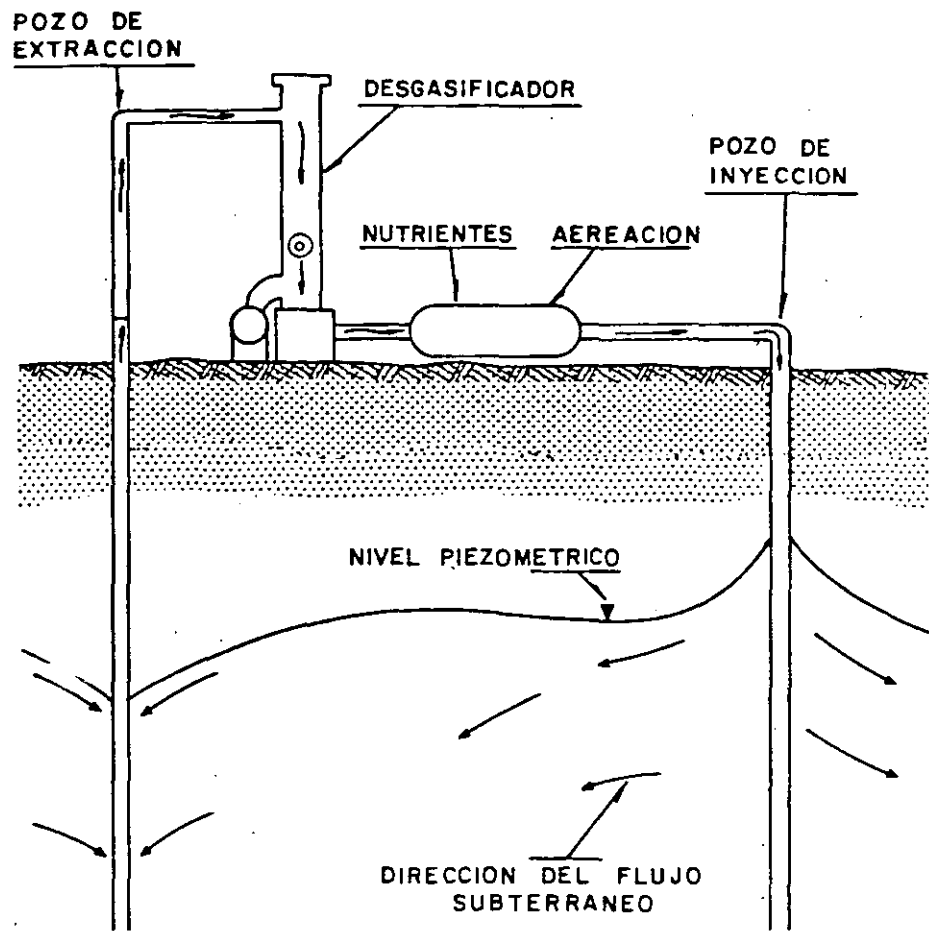
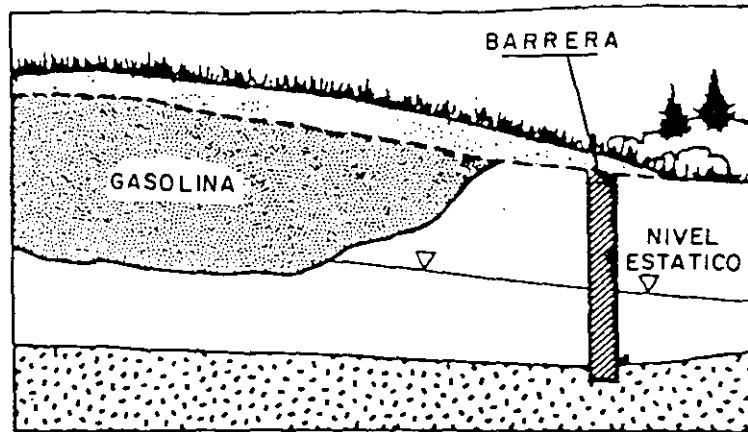


FIGURA 4 BIODEGRADACION APLICANDO NUTRIENTES Y OXIGENO.



BARRERA SUBTERRANEA PARA IMPEDIR EL PASO DEL CONTAMINANTE

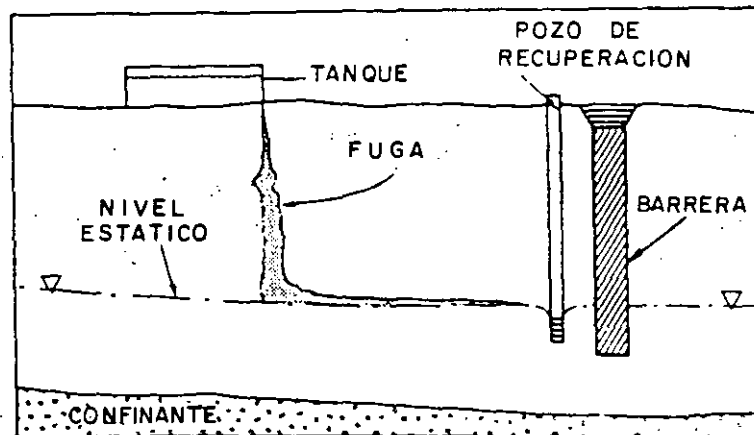
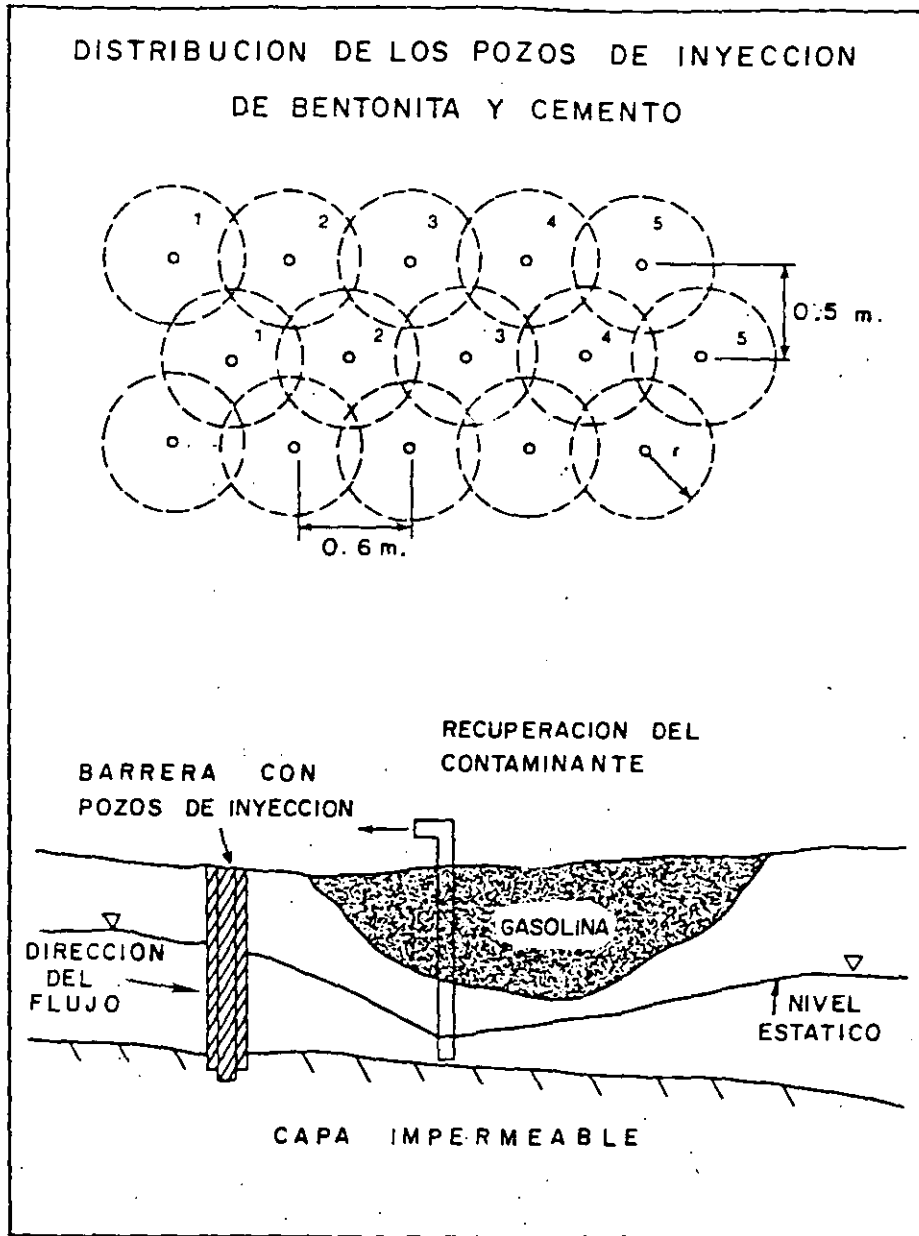


FIGURA 5 BARRERA PARA AISLAMIENTO DE ZONAS CONTAMINADAS

DE: REMEDIAL TECHNOLOGIES FOR LEAKING UNDERGROUND STORAGE TANKS. 1989, MODIFICADO POR LESSER Y ASOC., S.A.



**FIGURA 6 BARRERA MEDIANTE INYECCION DE BENTONITA Y CEMENTO**

DE: REMEDIAL TECHNOLOGIES FOR LEAKING UNDERGROUND STORAGE TANKS. 1989, MODIFICADO POR LESSER Y ASOC., S.A.

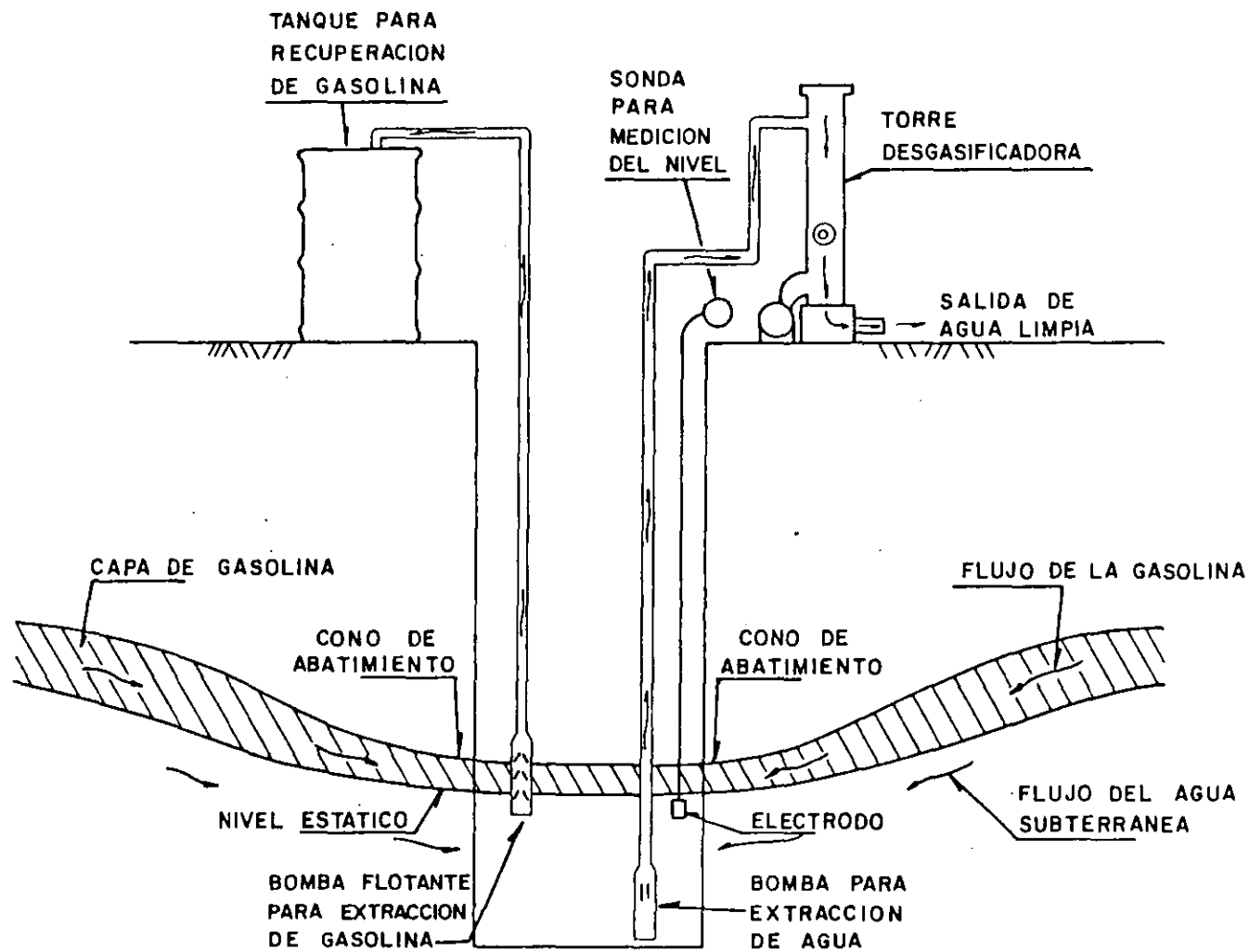


FIGURA 7 METODO PARA RECUPERACION DE GASOLINAS

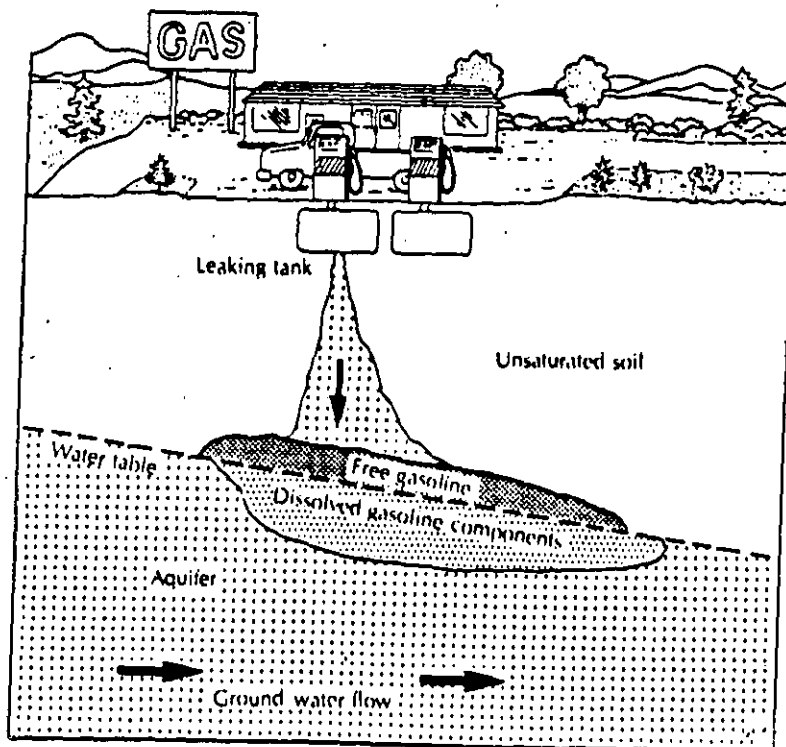
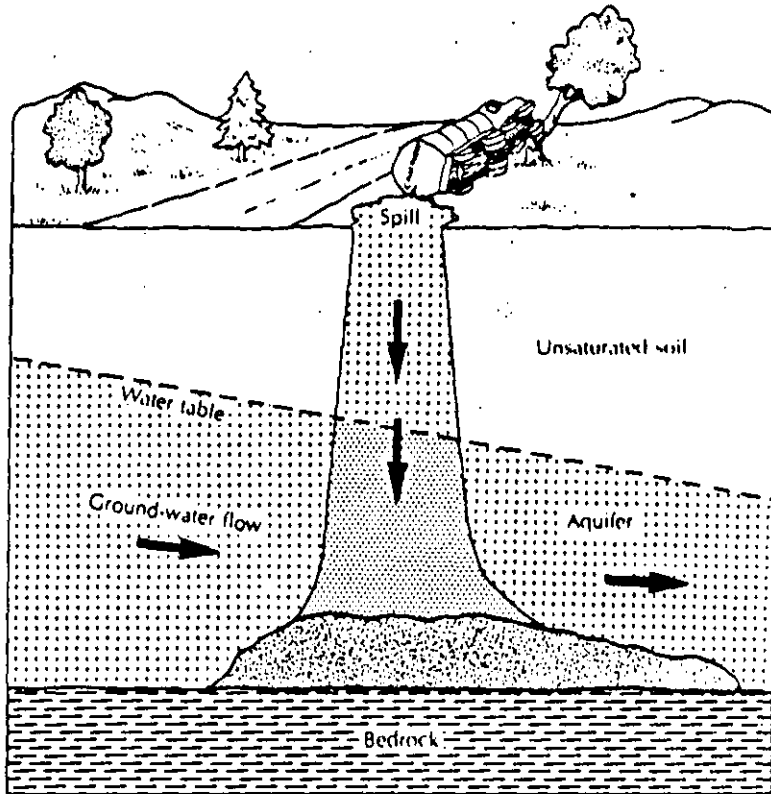


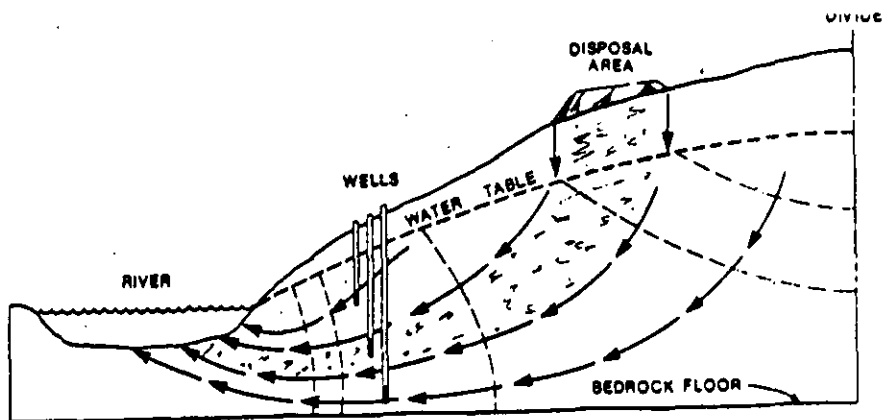
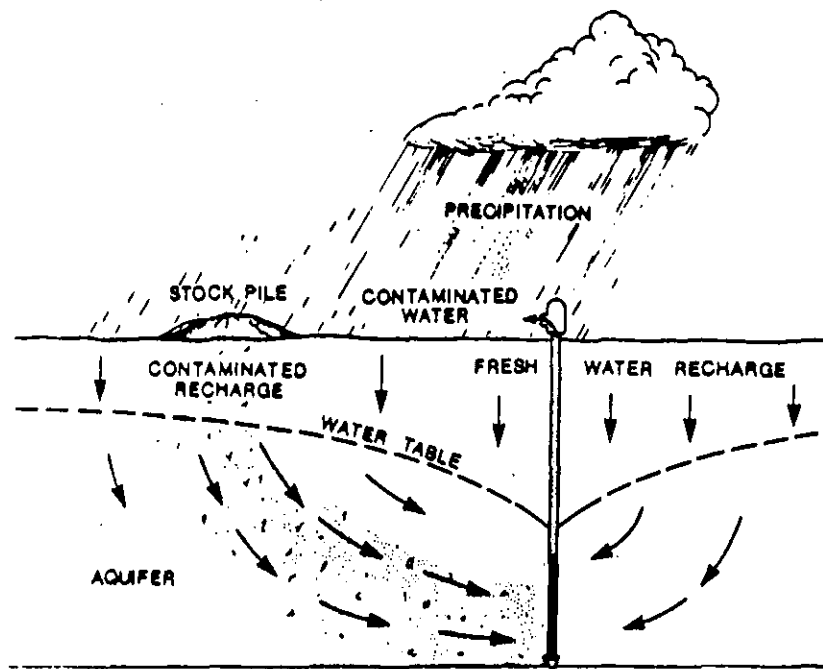
**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
MODULO II CONTAMINACION DE ACUIFEROS**

**COMPLEMENTO CONTAMINACION DE ACUIFEROS**

**ING. JUAN MANUEL LESSER**







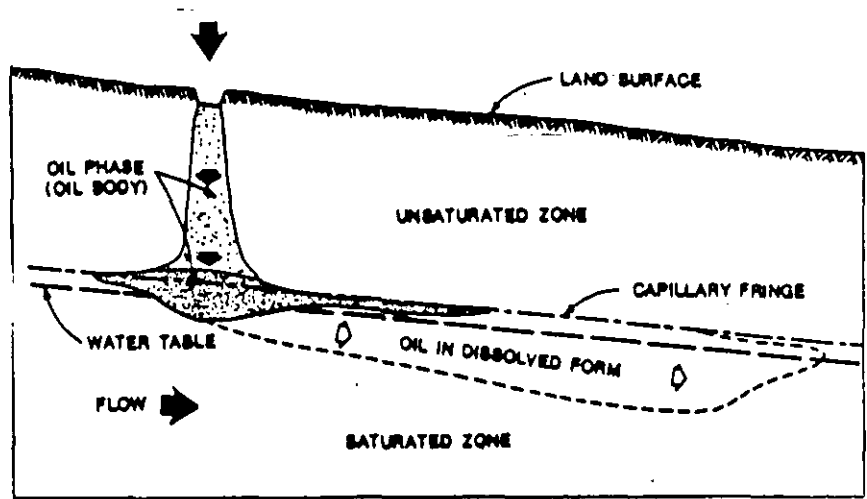


Figure 3-35. Example of multiphase flow in the subsurface (adapted from Schwille, 1975).

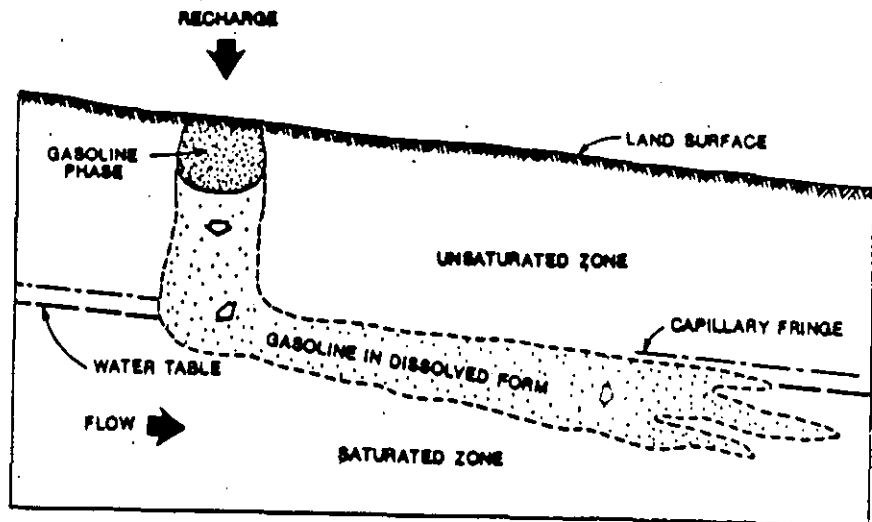


Figure 3-34. Movement of gasoline in the subsurface (adapted from Schwille, 1975).

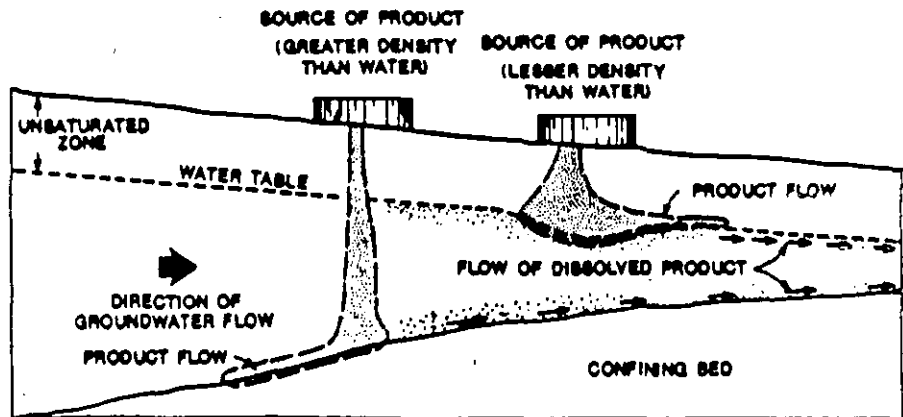
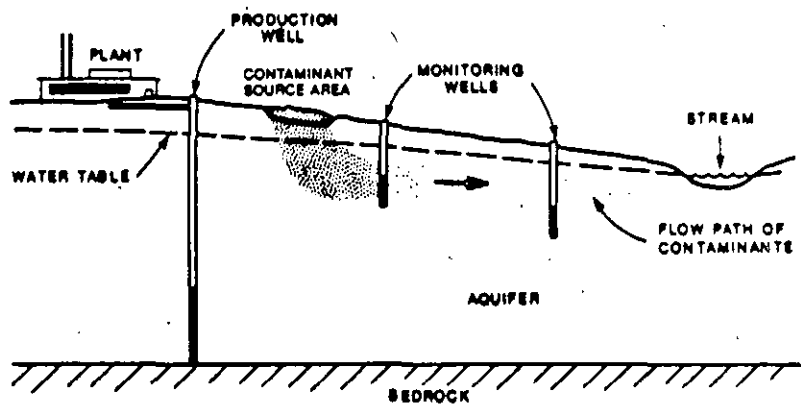
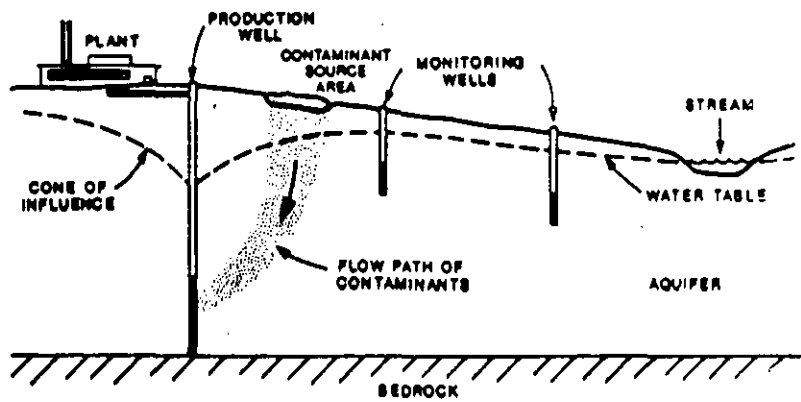


Figure 3-36. Example of the subsurface movement of fluids with densities greater than, and less than, that of water.

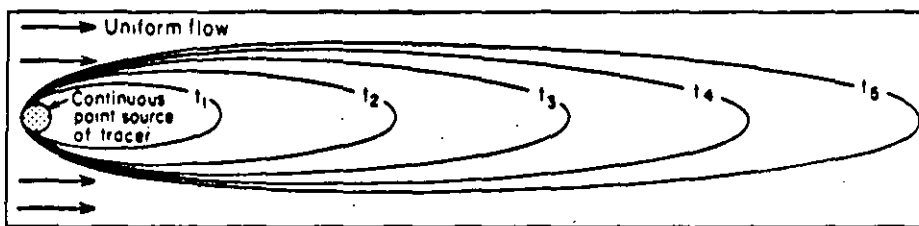
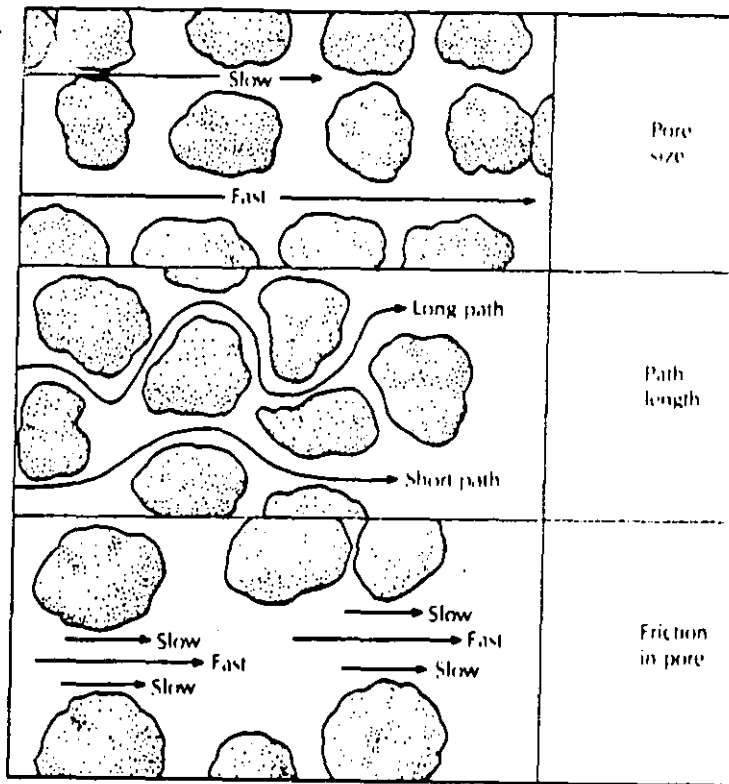


A. IF NO PUMPING OCCURS

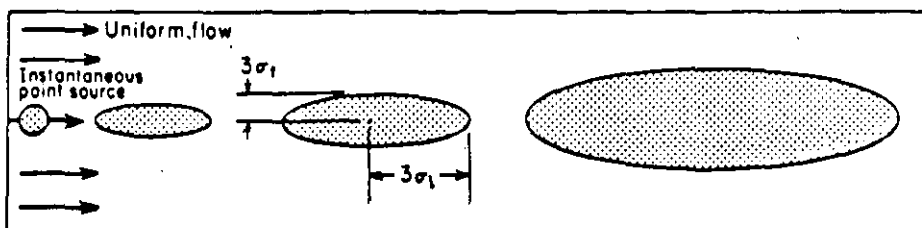


B. IF PUMPING OCCURS

Figure 3-46. Locating monitoring wells to map contaminants in an area affected by pumping w

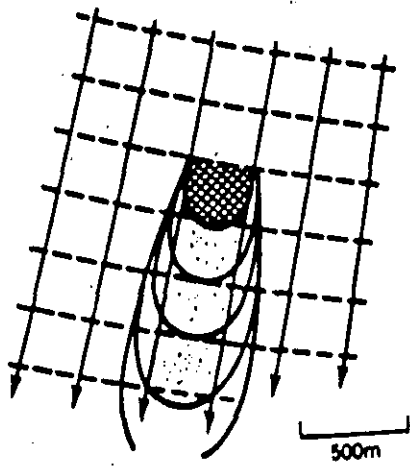
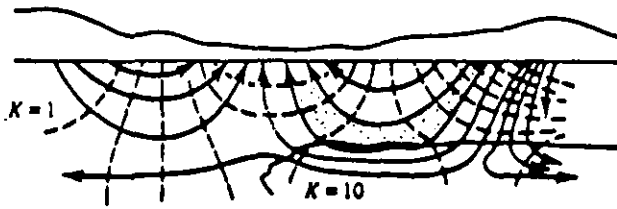
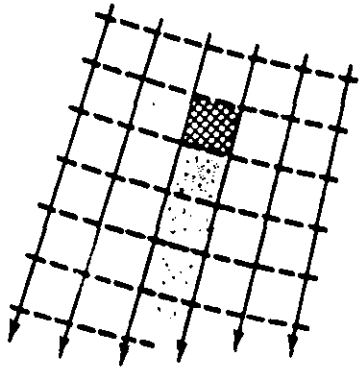


(a)



(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.



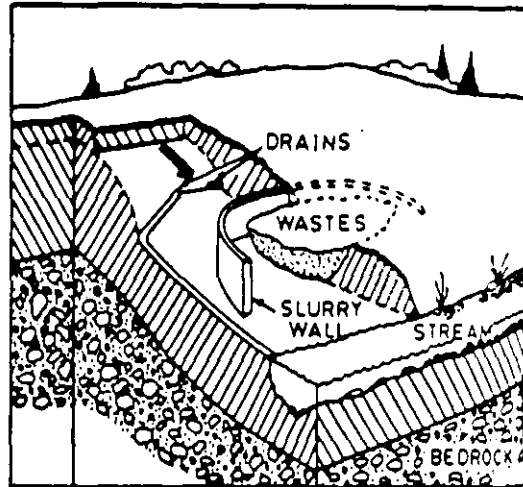
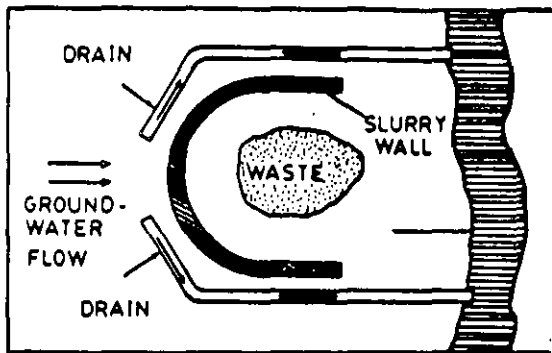


Figure 9-6. Combination of drains and slurry wall used to prevent leaching of contaminants into groundwater and a surface stream.

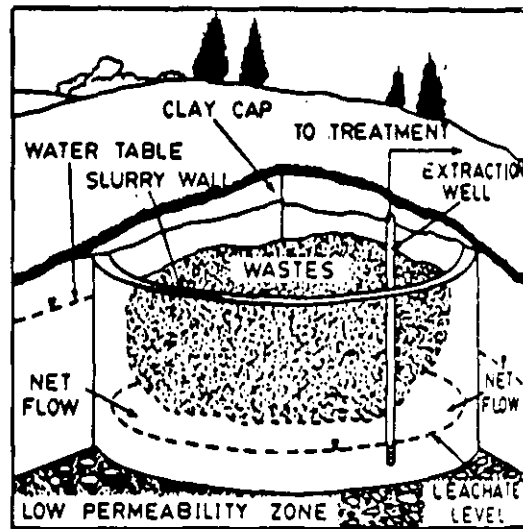
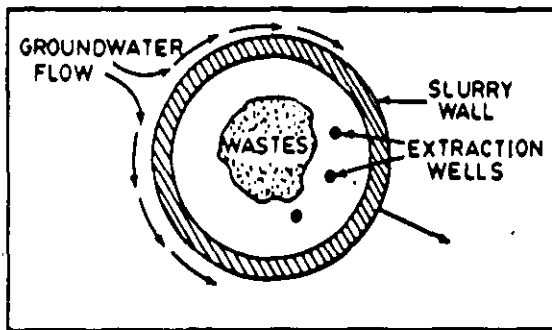


Figure 9-7. Circular slurry wall and groundwater extraction combined to prevent groundwater contamination.

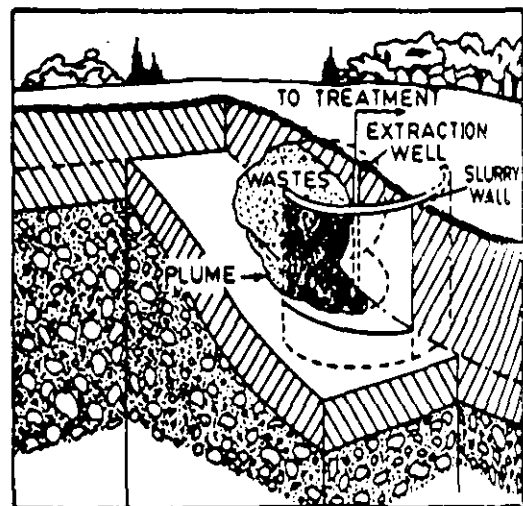
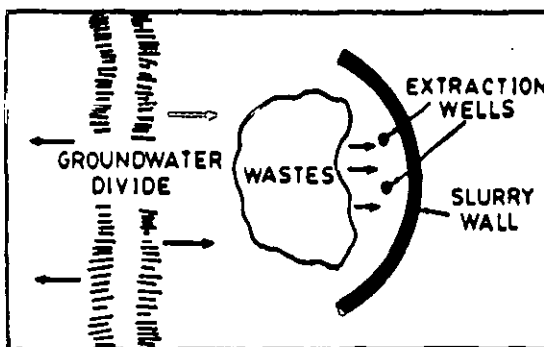
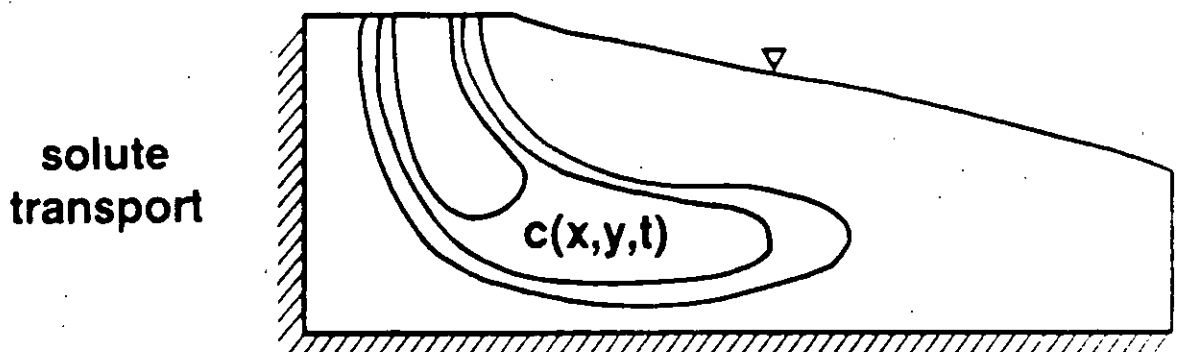
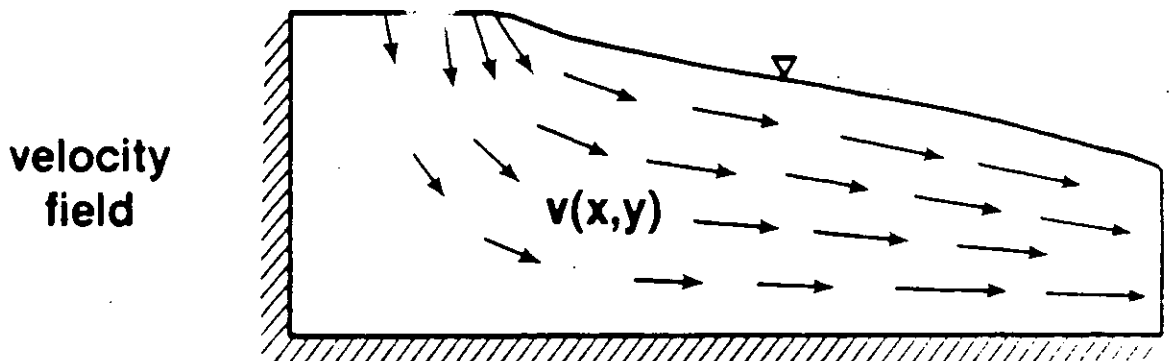
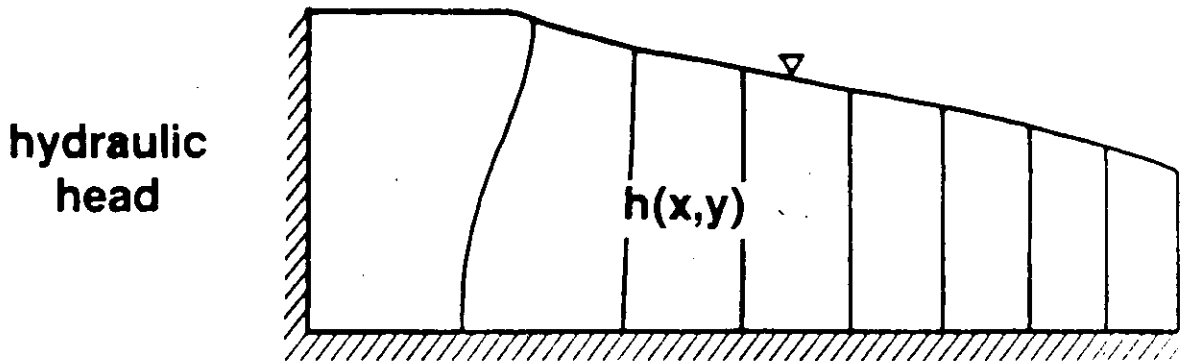


Figure 9-8. Slurry wall and extraction wells used to collect leachate.

# Coupling of Groundwater Flow and Solute Transport



linear

nonlinear

*EMMATION POLYMER*

*NOTE*

**dilute solutions, isothermal**

**fluid density changes with solute concentration to modify  $v(x,y)$**

# DISPERSION, ADVECTION, REACTION

$$D_x \frac{\partial^2 (Cn)}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial (Cn)}{\partial x} \pm r = \frac{\partial (Cn)}{\partial t}$$

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} \pm \frac{r}{n} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} \pm \frac{r}{n} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

## CLASSIFICATION OF REACTIONS

HOMOGENEOUS (SINGLE PHASE)

HETEROGENEOUS (LIQUID AND SOLID PHASES)

EQUILIBRIUM CONTROLLED

NONEQUILIBRIUM CONTROLLED

## HOMOGENEOUS AND HETEROGENEOUS RATE LAWS

DISINTEGRATION, BACTERIAL DECAY, HYDROLYSIS

$$r = \frac{d(nC)}{dt} = -\lambda nC \quad \lambda \left( \frac{L^3}{L^3 T} \right)$$

## SURFACE REACTIONS

$$r = K \sum C^m \quad \begin{matrix} \text{SPECIFIC} \\ \text{SURFACE} \end{matrix} \quad \begin{matrix} K \left( \frac{L}{T} \right) \quad \Sigma \left( \frac{L^2}{L^3} \right) \\ K \quad \Sigma \left( \frac{1}{T} \right) \end{matrix}$$

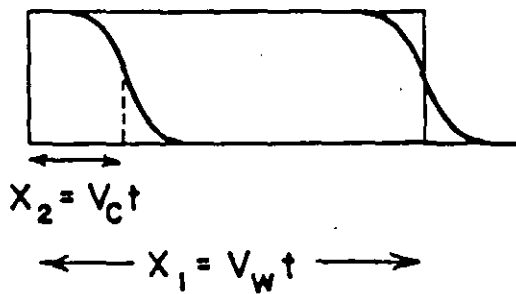
$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} - [K \Sigma C \text{ or } \lambda C] = \frac{\partial C}{\partial t}$$

## THE RETARDATION EQUATION

$$\frac{D_x}{R_F} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - \frac{V_x}{R_F} \frac{\partial C}{\partial X} = \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$R_F = 1 + \left( \frac{1-n}{n} \right) \rho_s K_d$$

$$C = \frac{C_o}{2} \operatorname{erfc} \frac{R_F X - V_w t}{2(\alpha_x V_w t R_F)^{1/2}}$$



$$\text{At } C = \frac{C_o}{2}$$

$$X_1 = V_w t$$

$$R_F X_2 = V_w t$$

$$R_F V_c t = V_w t$$

$$R_F = \frac{V_w}{V_c}$$

$$V_c = \frac{V_w}{R_F} = \frac{V_w}{1 + \left( \frac{1-n}{n} \right) \rho_s K_d}$$

$$\rho_s \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3}$$

$$K_d \frac{\text{ml}}{\text{gm}}$$

$$\rho_s K_d \frac{\text{gm}}{\text{cm}^3} \frac{\text{ml}}{\text{gm}} = \frac{\text{ml}}{\text{cm}^3} = \left( \frac{\text{L}^3}{\text{L}^3} \right)$$

$$\frac{1-n}{n} = \frac{1}{e}$$

$$\frac{\text{ml}}{\text{cm}^3} \frac{10^3 \text{cm}^3}{10^3 \text{ml}}$$

$$\left( \frac{1-n}{n} \right) \rho_s = \frac{\rho_s}{e}$$

$e = \text{void ratio}$



## RADIOACTIVE DECAY, BIODEGRADATION, HYDROLYSIS

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial X} - \lambda C = \frac{\partial C}{\partial t}$$

$$C = \frac{C_0}{2} \exp \left\{ \frac{X}{2\alpha_x} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{4\lambda\alpha_x}{V} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

$$\operatorname{erfc} \frac{X - Vt}{2(\alpha_x Vt)^{1/2}} \left( 1 + \frac{4\lambda\alpha_x}{V} \right)^{1/2}$$

$$\lambda = \frac{0.693}{\text{half life}}$$

$$e^0 = 1$$

$$e^{-\infty} = 0$$

### THE SIGNIFICANCE OF THE DIMENSIONLESS GROUP

$$\frac{4\lambda\alpha_x}{V}$$

$\lambda$  large wrt  $V$ ,  $e \rightarrow 0$ ,  $C \rightarrow 0$

$V$  large wrt  $V$ ,  $e \rightarrow 1$ ,  $C \rightarrow C_0$

### THE STEADY STATE

$$C = C_0 \exp \left\{ \frac{X}{2\alpha_x} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{4\lambda\alpha_x}{V} \right)^{1/2} \right] \right\}$$

ASSUME HALF LIFE 1000 YRS,  $v = 5 \frac{M}{YR}$ ,  $x = 5 \text{ KM}$

$$\alpha_x = 30 \text{ M}, 100\text{M}, 300\text{M}$$

$$C = 0.5 C_0 \quad C = 0.505 C_0 \quad C = 0.51 C_0$$

AN EQUATION WHICH RELATES DATA FROM THREE WELLS (X1, Y1, C1, X2, Y2, C2, X3, Y3, C3) WITH  $\alpha_4$  AND SOURCE DIMENSION  $\gamma$  - By David Edwards

Let  $A1 = \frac{y_1 + \gamma/2}{2\lambda_3 x_1}$ ,  $A2 = \frac{y_1 - \gamma/2}{2\lambda_3 x_1}$ ,  $A3 = \frac{y_2 + \gamma/2}{2\lambda_3 x_2}$ ,  $A4 = \frac{y_2 - \gamma/2}{2\lambda_3 x_2}$   
 $A5 = \frac{y_3 + \gamma/2}{2\lambda_3 x_3}$ ,  $A6 = \frac{y_3 - \gamma/2}{2\lambda_3 x_3}$

$C_0$  = source strength  $\gamma$  = velocity of containment  
 $\lambda$  = decay constant  
 $N$  = dispersivity factor.  $N = \frac{\gamma - \alpha_4}{\alpha_4 \gamma}$

- 1)  $C_3 = \frac{C_0}{2} \exp\left\{\frac{x_1}{2\alpha_4} [1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]\right\} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 2)  $C_2 = \frac{C_0}{2} \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} \cdot x_2\right\} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$
- 3)  $C_2 = \frac{C_0}{2} \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} x_2\right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}$  since  $e^{a \cdot b} = (e^a)^b$
- 4) Likewise,  $C_2 = \frac{C_0}{2} \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} x_2\right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 5) And,  $C_3 = \frac{C_0}{2} \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} x_3\right\} \right]^{x_3} \{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 6)  $\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_0/2}{C_0/2} \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} x_1\right\} \right]^{x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} / \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} x_2\right\} \right]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 7)  $\frac{C_1}{C_2} = \frac{[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} x_1\right\}]^{x_1} \{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{[\exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} x_2\right\}]^{x_2} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}} = \left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} (x_1 - x_2)\right\} \right] \frac{\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}}{\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}$
- 8)  $\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = \ln\left[ \exp\left\{\frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} (x_1 - x_2)\right\} \right] + \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} - \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 9)  $\ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = (x_1 - x_2) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} \right\} + \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} - \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 10)  $(x_1 - x_2) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} \right\} = \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}$
- 11) Similarly,  $(x_1 - x_3) \left\{ \frac{[1 - \sqrt{1 + 4\lambda\alpha_4/\gamma}]}{2\alpha_4} \right\} = \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 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)  $N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) = N \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) - \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 14)  $N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) = -\ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} - N \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}$
- 15)  $\text{EXP}\left[ N \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right) - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) \right] = \text{EXP}\left[ -\ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} + N \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} + \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} - N \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} \right]$
- 16)  $\text{EXP}\left[ \ln\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^N - \ln\left(\frac{C_1}{C_3}\right) \right] = \text{EXP}\left[ \ln\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}^{N-1} + \ln\{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \} - \ln\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N \right]$
- 17)  $\frac{(C_1/C_2)^N}{(C_1/C_3)} = \frac{\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \}^{N-1} \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \}^N} = \frac{[\{ \text{erf } A1 - \text{erf } A2 \} \left( \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3} - \frac{y_1 - \gamma/2}{2\lambda_3 x_1} \right)] \{ \text{erf } A3 - \text{erf } A4 \}}{\{ \text{erf } A5 - \text{erf } A6 \} \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}}$

AND, VOILA, THE EQUATION:

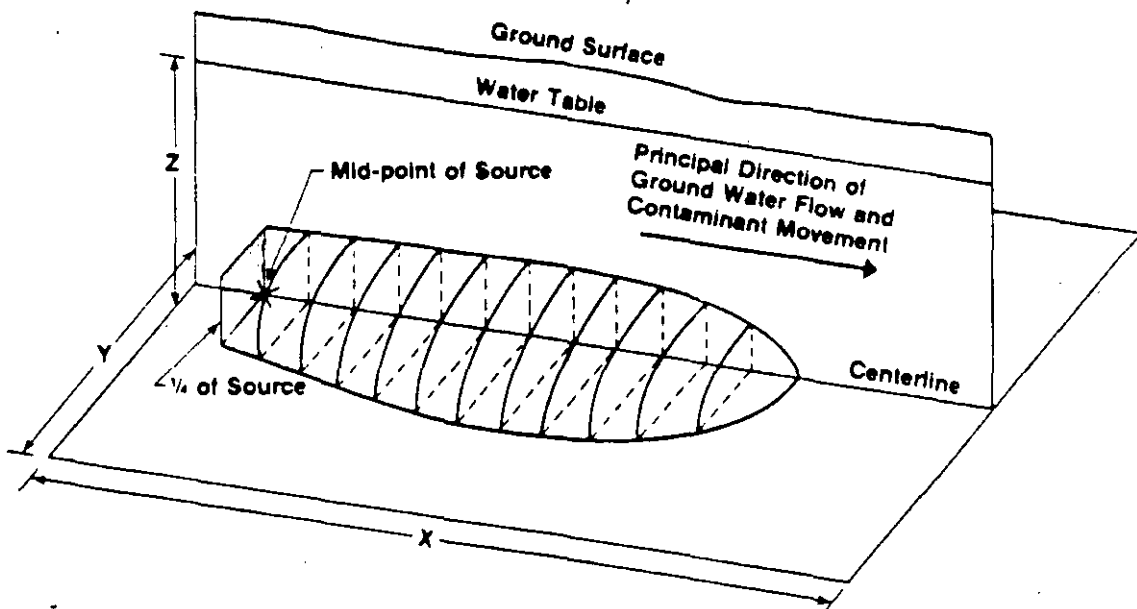
$$18) \left(\frac{C_2}{C_1}\right) \left(\frac{C_1}{C_3}\right)^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}} = \frac{\left\{ \text{erf } \frac{y_1 + \gamma/2}{2\lambda_3 x_1} - \text{erf } \frac{y_1 - \gamma/2}{2\lambda_3 x_1} \right\}^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}} \left\{ \text{erf } \frac{y_2 + \gamma/2}{2\lambda_3 x_2} - \text{erf } \frac{y_2 - \gamma/2}{2\lambda_3 x_2} \right\}}{\left\{ \text{erf } \frac{y_3 + \gamma/2}{2\lambda_3 x_3} - \text{erf } \frac{y_3 - \gamma/2}{2\lambda_3 x_3} \right\}^{\frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_3}}}$$

$x_1$  cannot equal  $x_2$  and  $C_1, C_3$  cannot equal zero

# Domenico and Robbins (1985)

- significant extension of earlier work
  - exact analytical solution
  - 3-D dispersion in 1-D velocity field
  - continuous, finite source

$$C(x,y,z,t) = (C_0/8) \operatorname{erfc} [(x-vt)/2(D_x t)^{1/2}] \\ \{ \operatorname{erf} [(y+Y/2)/2(D_y x/v)^{1/2}] - \operatorname{erf} [(y-Y/2)/2(D_y x/v)^{1/2}] \} \\ \{ \operatorname{erf} [(z+Z/2)/2D_z x/v)^{1/2}] - \operatorname{erf} [(z-Z/2)/2(D_z z/v)^{1/2}] \}$$



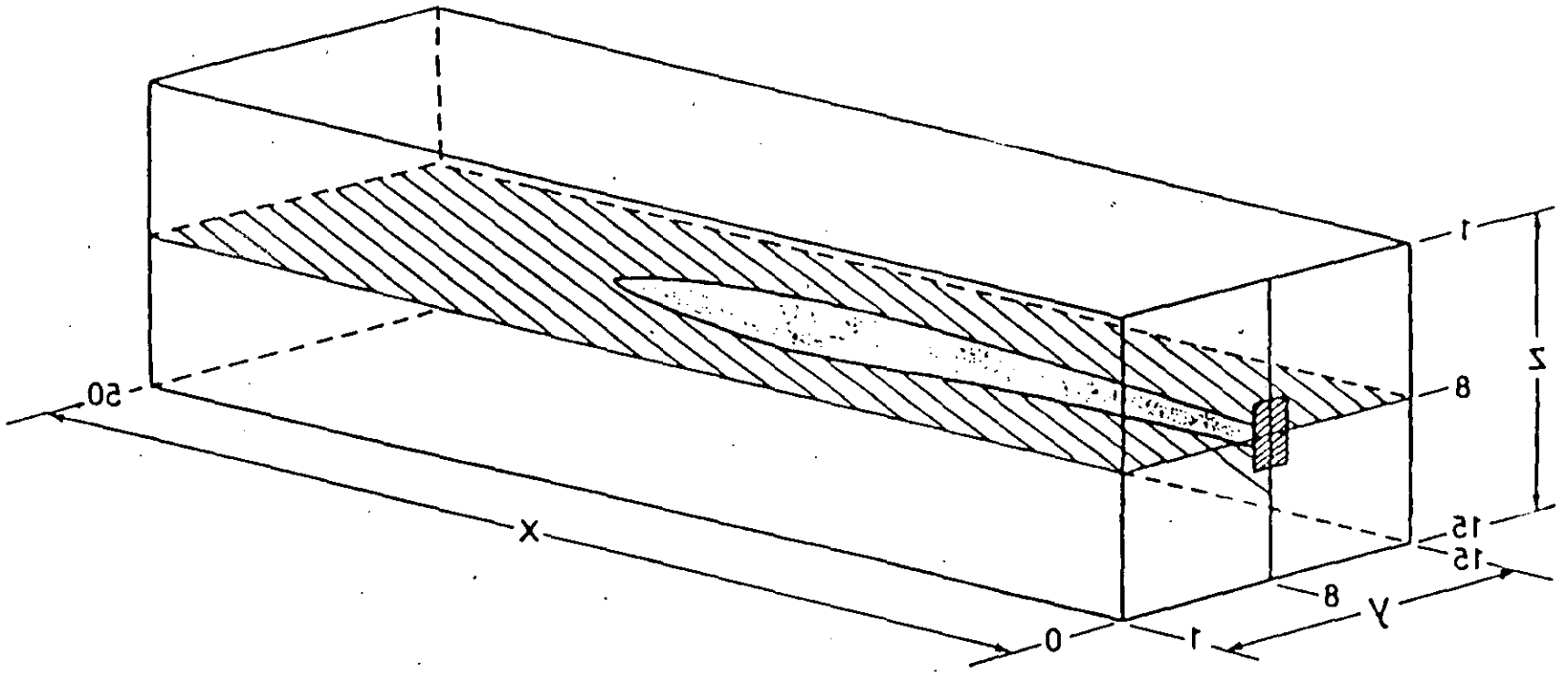
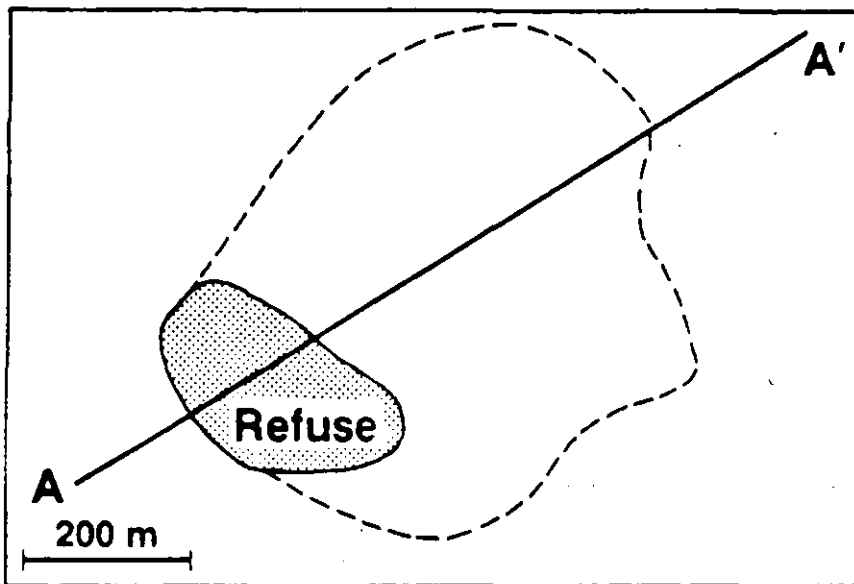


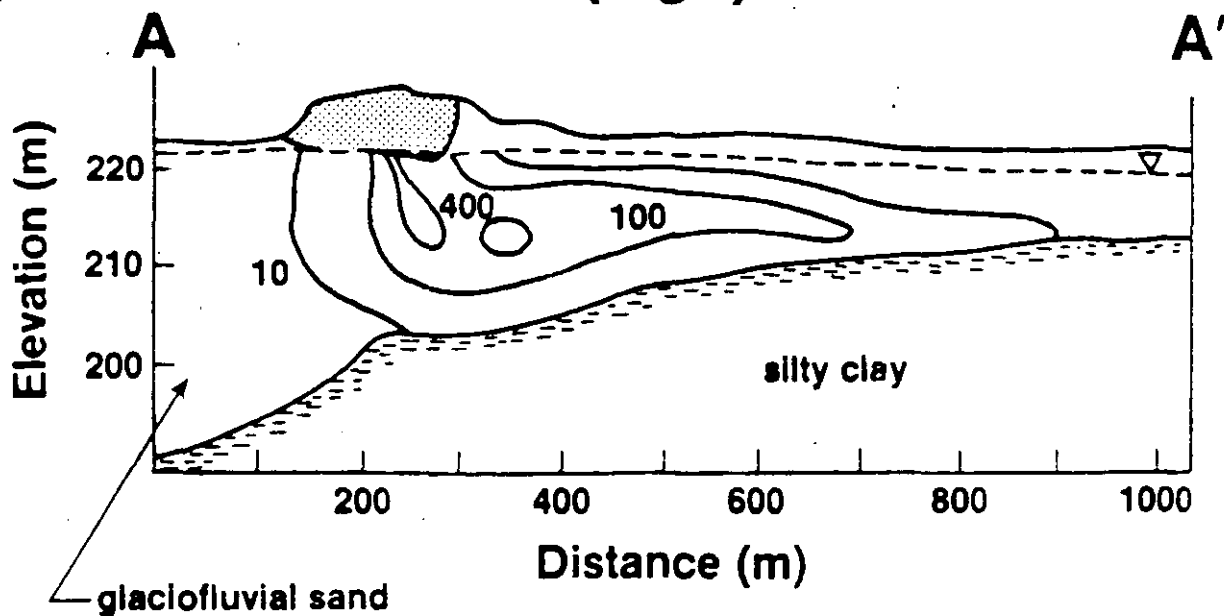
Figure 4 Example of an XY (Map View) films

# Example of a Boundary Value Problem: The Borden Plume Borden, Ontario

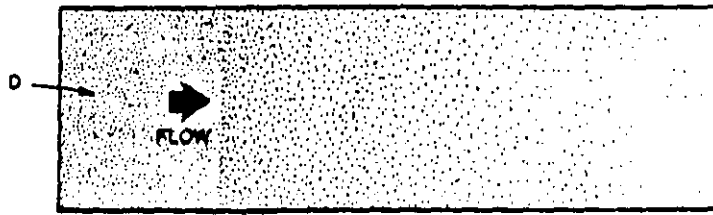


Areal Extent  
of Chloride  
Plume, 1979

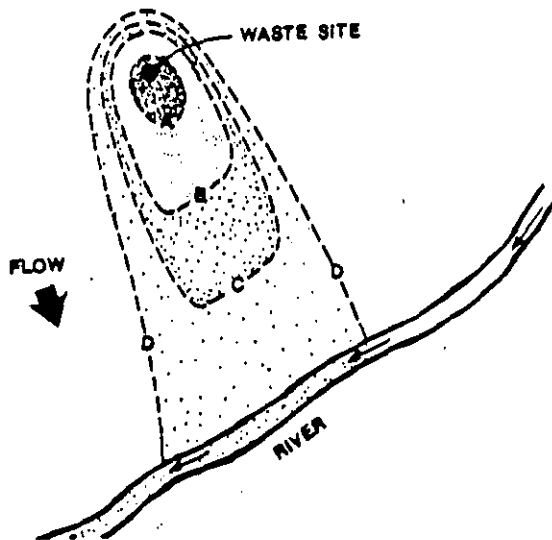
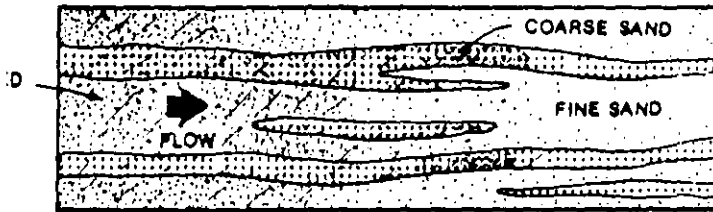
## Chloride Plume, 1979 (mg/l)

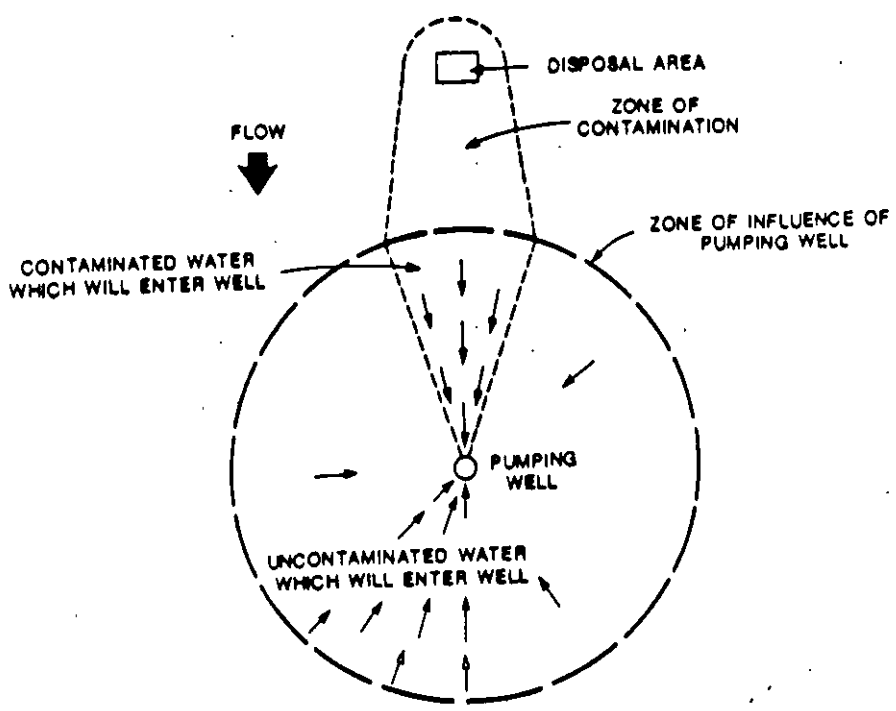
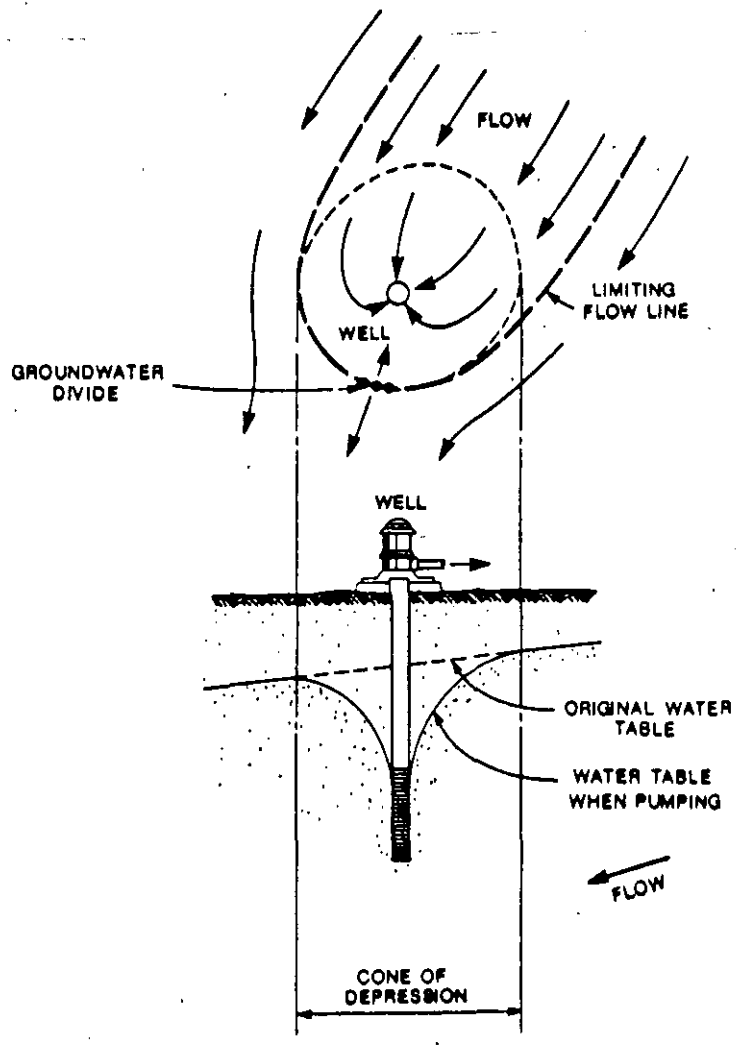


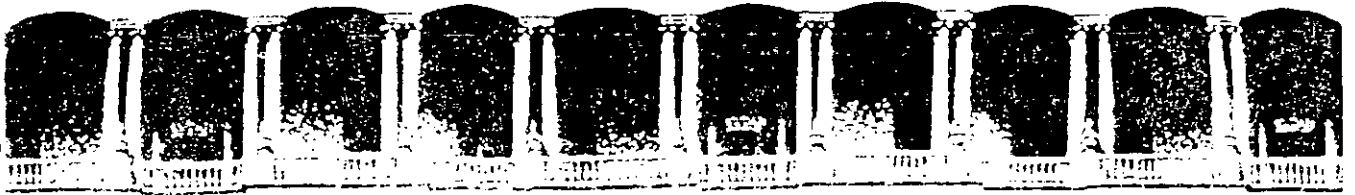
(after Cherry et al., 1983)



A) HOMOGENEOUS SAND LAYER







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

CURSOS ABIERTOS  
VI CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGIA Y CONTAMINACION DE  
ACUIFEROS

MODULO II  
HIDROGEOQUIMICA Y CONTAMINACION DE ACUIFEROS

CONTAMINACION DE SISTEMAS DE ACUIFEROS

DR. RAMIRO RODRIGUEZ  
CASTILLO



## 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 poluan-  
tes 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 contami-  
nante.

El estudio de estos procesos puede hacerse desde varios enfoques académicos.  
El más común es el geohidrológico que engloba los aspectos geológicos e hidrodiná-  
micos, tanto del flujo como del soluto . La modelación matemática y computacional  
comprende tópicos relacionados con el flujo y transporte de los contaminantes, efec-  
tuando 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 mo-  
nitoreo superficial de la extensión lateral de la pluma contaminante. La Isotopia Hi-  
droológica proporciona información sobre el origen del flujo su permanencia y circu-  
lación 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    |

- material ferroso y no

- desechos hospitalarios

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 mínimos 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
- Latón
- Desechos de ladrillería
- Bronce
- Calcio
- Desperdicios químicos
- Carbón
- Café
- Algodón
- Desperdicios de Fluoruro
- Residuos de frutas
- Vidrió
- Yeso
- Escoria de fluoruro de hidrógeno
- Plomo
- Cal
- Magnesio
- Mica
- Melazas
- Chatarra no ferrosa
- Desechos orgánicos
- Papel
- Salmuera
- Desechos de cerámica
- Escoria y desechos de pirita
- Espumas de sal
- Productos pesqueros comestibles
- Remolacha
- Azufre
- Tetractilo de plomo
- Estaño
- Tabaco
- Uranio
- Desperdicios de hortalizas
- Lana
- Aleación de circón
- Bismuto
- Desechos de cervecera, destilación y fermentación
- Cadmio
- Carburos
- Cromo (Cromatos)
- Cobalto
- Cobre
- Desperdicios de lechería
- Desechos de fundición
- Germanio
- Fibra de vidrio
- Cáñamo
- Residuos inorgánicos
- Hierro
- Desechos de curtido y manufactura de pieles
- Manganeseo
- Lana mineral
- Molibdeno
- Nylon
- Pintura
- Residuos de Petróleo
- Plásticos
- Metales preciosos
- Refractario
- Caucho
- Arena
- Sodio
- Almidón
- Fibras de caña de azúcar
- Tantalio
- Textiles
- Titanio
- Tungsteno
- Vanadio
- Desechos de madera
- Cinc
- 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 trastornos 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 y herbicidas                                   |
| - Bases industriales        | - Metales y sus derivados  |
| - Intermediarios químicos   | - Productos para la guerra química                                       |
| - Plastificantes compuestos | - Catalizadores y reactivos  |
| - Solventes                 | - Productos derivados del petróleo como acetonas, fenoles, ésteres, etc. |
| - Saborizantes y aromas     |  |
| - Cianuros                  |  |
| - Productos farmacéuticos   |  |

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  $1030 \text{ kg/m}^3$  según la salinidad y temperatura, siendo el valor más usual el de  $= 1025 \text{ kg/m}^3$  (para  $1900 \text{ ppm}$  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 Ben - 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.

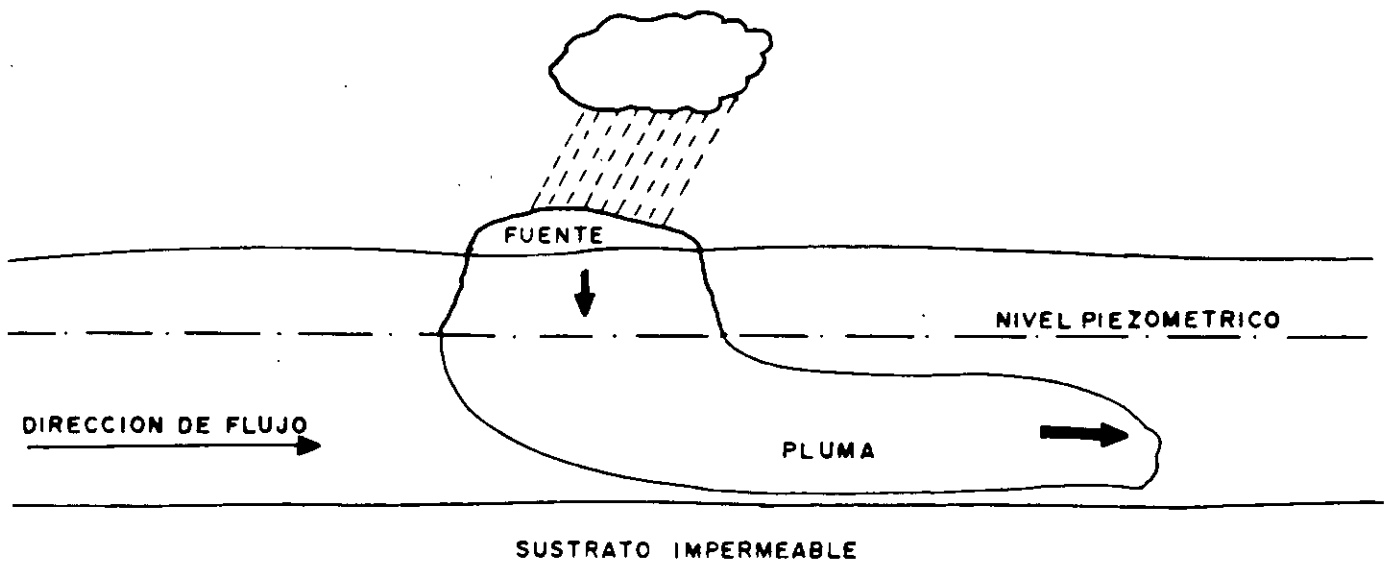
Las fuentes lineales son aquellas tales como derrames en sistemas de alcantarillado y tuberías, desperdicios mineros, salmuera, etc.

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 substancias 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.

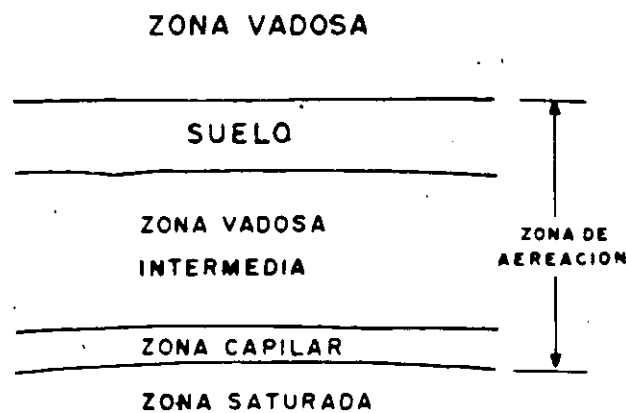
El establecimiento de un marco teórico adecuado requiere antes de la proposición de un modelo general hidrodinámico que conceptualiza el flujo de un poluante hacia un acuífero.



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 ( $\Psi$ ) y la fuerza de gravedad ( $Z$ ).

donde  $\Psi$  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  $\eta$  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  $\alpha$ , 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 microbológica 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,

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{S_r}{\eta} \frac{\partial S}{\partial t}$$

con  $S_r$  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  $\frac{S_r}{\eta} \frac{\partial S}{\partial t}$  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

$$\Rightarrow S = f(c)$$

$$\Rightarrow + \partial S / \partial t = \partial S / \partial c \cdot \partial c / \partial t$$

$$\Rightarrow \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial c} \cdot \frac{\partial c}{\partial t}$$

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 isoterma.

Si el soluto incluye especies radioactivas a la ecuación habría que agregar un termino más que incluya el decaimiento del soluto.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \bar{v} \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} - \lambda c$$

$$\text{con } C = C_0 e^{-\lambda t} \quad \text{y} \quad \lambda = \ln 2 / T_{1/2} \quad \text{con}$$

$T_{1/2}$  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 adveectivo, 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, da 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 radionúclidos, 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.

-Amoniaco. La presencia de amoniaco 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:

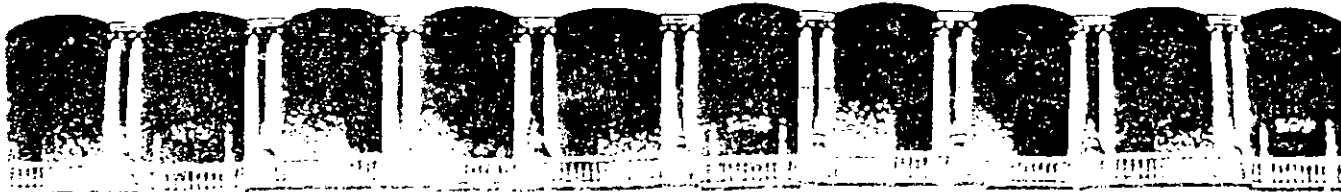
1. Naturales del agua En general no son patógenas; son típicas las pseudomonas, la serratia flavobacterium y choromobacterium.
2. Provenientes del suelo. No son patógenas y son frecuentes los bacillus y aerobacillus.
3. De origen intestinal o de aguas negras. Pueden ser o no patógenas; entre las no patógenas 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 volumen 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 volumen 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 procesos 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 ABIERTOS

VI CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGIA Y CONTAMINACION DE  
ACUIFEROS

MODULO II

HIDROGEOQUIMICA Y CONTAMINACION DE ACUIFEROS

DESECHOS MUNICIPALES

ING. JUAN MANUEL LESSER

SELECCION DE SITIOS PARA  
DISPOSICION DE DESECHOS SOLIDOS

ESTUDIOS PRELIMINARES

- DISTANCIA
- ZONAS HABITADAS, ESCUELAS
- DIRECCION DE LOS VIENTOS
- VIAS DE ACCESO
- SUBSUELO (ACUIFEROS)

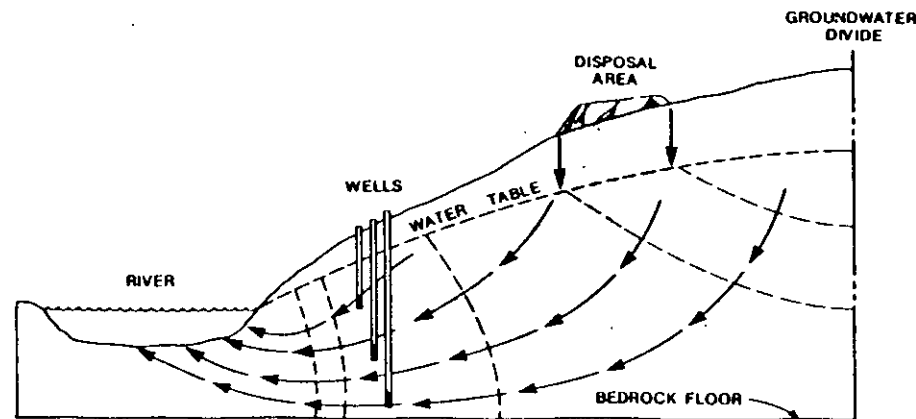


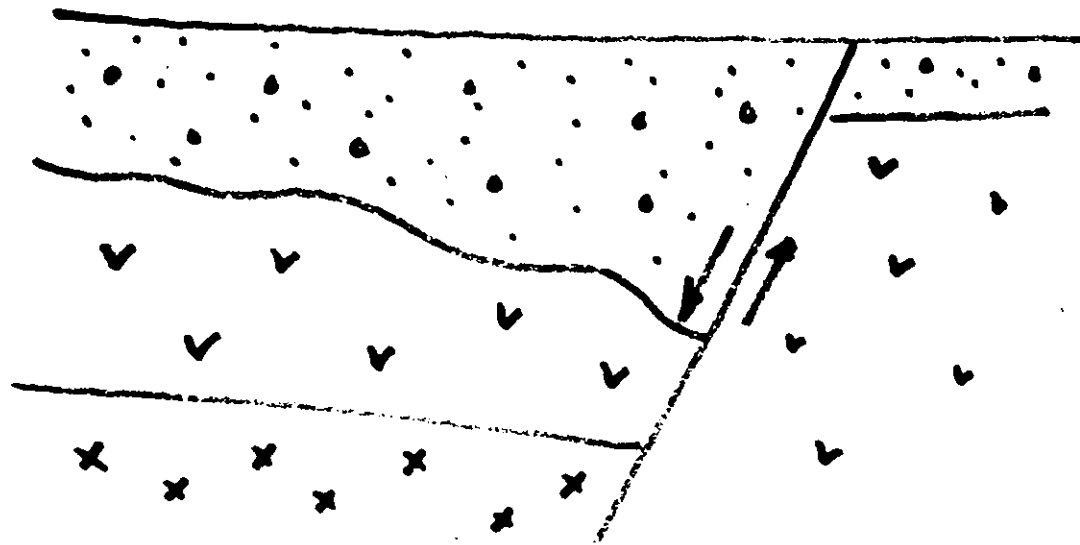
Figure 3-41. Relationship of screened zones to measuring the movement of contaminants in a regional flow system (adapted from Miller, USEPA, 1977).

# ESTUDIOS PRELIMINARES DEL SUBSUELO

- 1.- MARCO GEOLOGICO
- 2.- GEOHIDROLOGIA
- 3.- LIXIVIADOS
- 4.- MODELACION

# 1.- MARCO GEOLOGICO

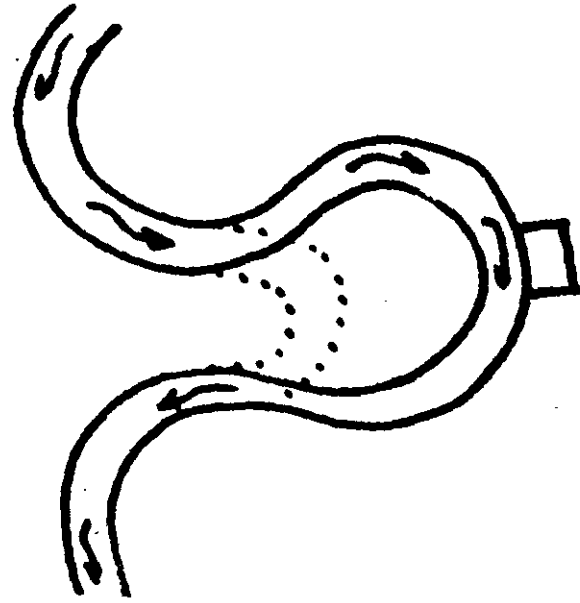
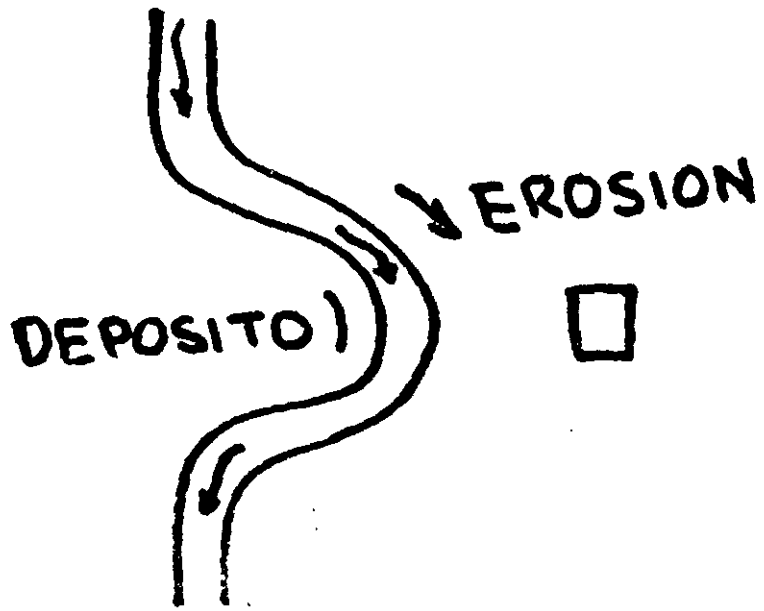
- GEOLOGIA DEL SUBSUELO
- SEDIMENTOLOGIA
- GEOLOGIA ESTRUCTURAL
- CORTES LITOLOGICOS
- GEOFISICA





# MOVIMIENTOS PROPIOS DE LA CORTEZA TERRESTRE

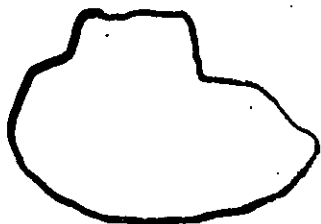
- SISMOS
- FALLAS ACTIVAS
- VULCANISMO
- EROSION
- MOVIMIENTOS DE TIERRA





CAVERNA

$t=1$



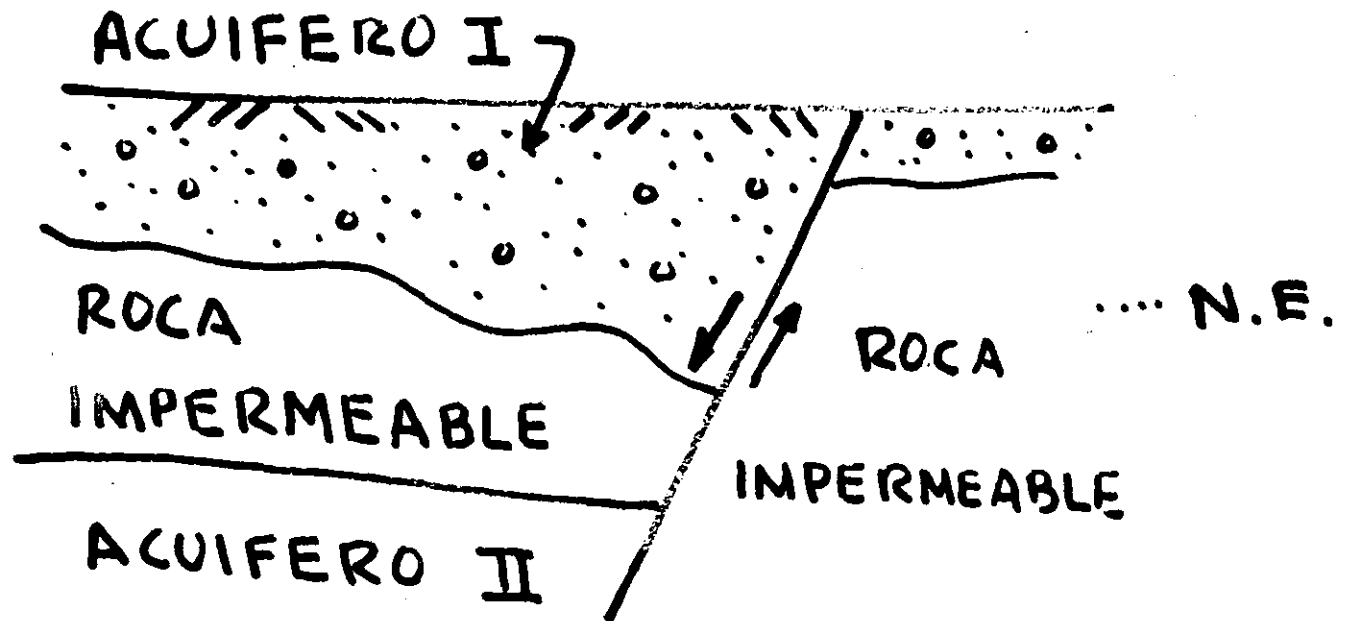
CAVERNA

$t=2$

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

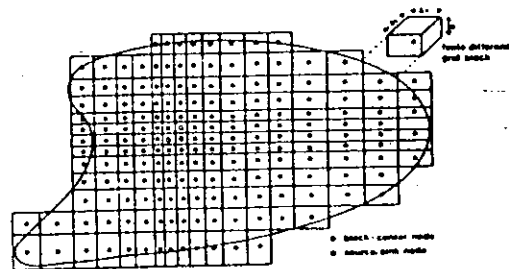
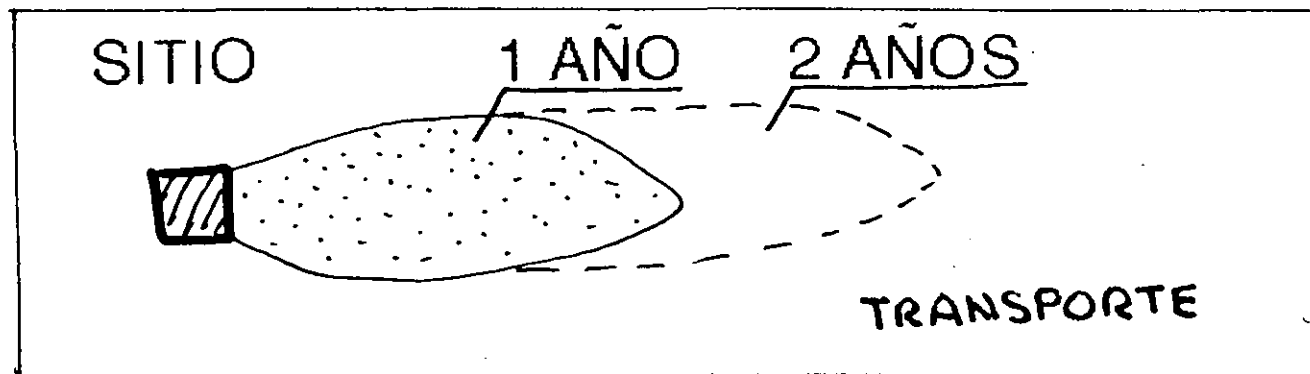
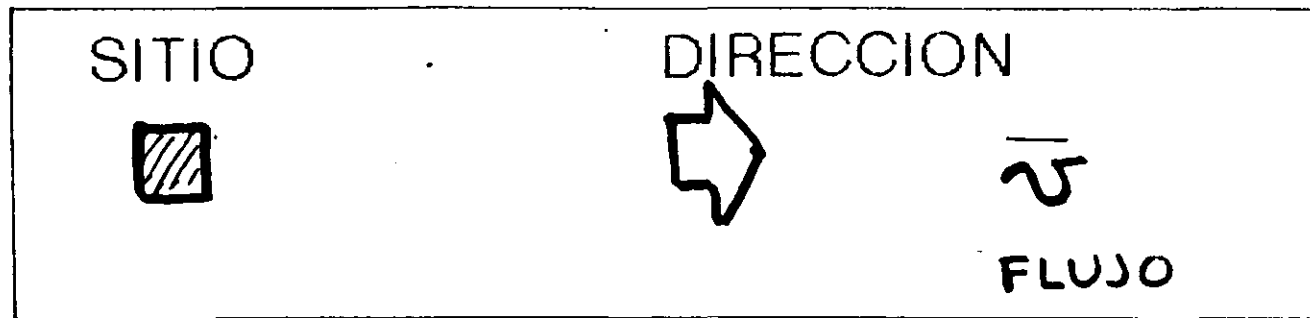
- CONDICIONES ANTERIORES A LA CONSTRUCCION DEL SITIO
- IDENTIFICACION DE LIXIVIADOS
- COMPOSICION DE ROCAS Y LIXIVIADOS
- PROCESOS FQB
- RETENCION, MOVILIDAD

# DETECCION DE LA PLUMA CONTAMINANTE

- PERMEABILIDAD
- DIRECCION DEL FLUJO
- REACCIONES QUIMICAS



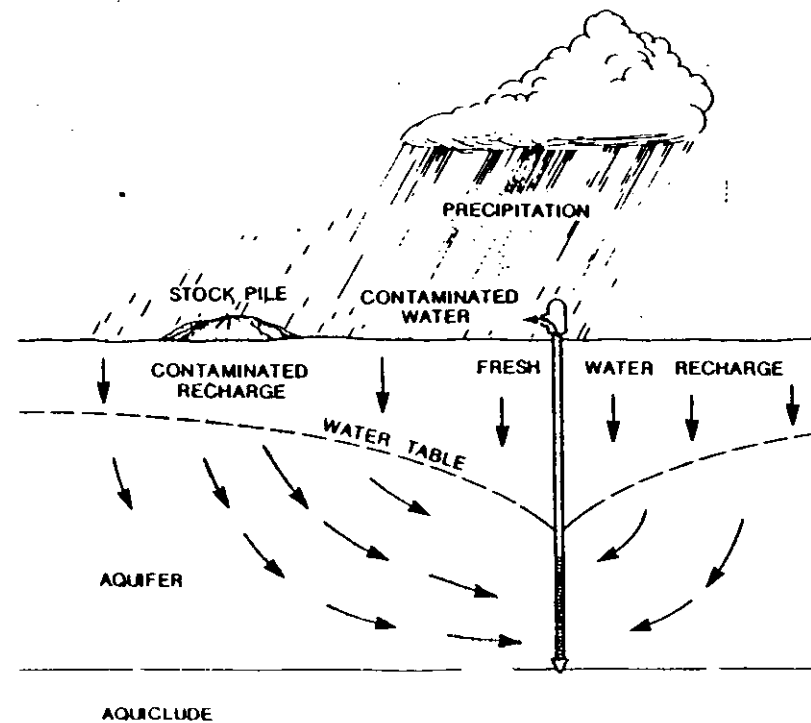
# 4- MODELACION DE FLUJO Y TRANSPORTE



# OTROS ESTUDIOS

- DIRECCION DE VIENTOS
- CLIMATOLOGIA
- CORRIENTES SUPERFICIALES

PRINCIPLES OF GROUNDWATER FLOW 87



# DISEÑO

- TOPOGRAFIA DE LA BASE
- TOPOGRAFIA DE LA CUBIERTA
- DRENES EXTERIORES
- DRENES INTERIORES (LIQUIDOS Y GASES)
- ETC.

# MONITOREO

- POZOS
- DRENES

# RESUMEN

## 1.-MARCO GEOHIDROLÓGICO

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.-



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

*VI CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGIA Y CONTAMINACION DE ACUIFEROS*  
*del 23 al 27 de agosto, 1993*

*MODULO II*  
*HIDROGEOQUIMICA Y CONTAMINACION*  
*DE ACUIFEROS*

*HIDROGEOQUIMICA DE LAS AGUAS NATURALES*

*ING. JUAN MANUEL LESSER*  
*ILLADES*

# C O N T E N I D O

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

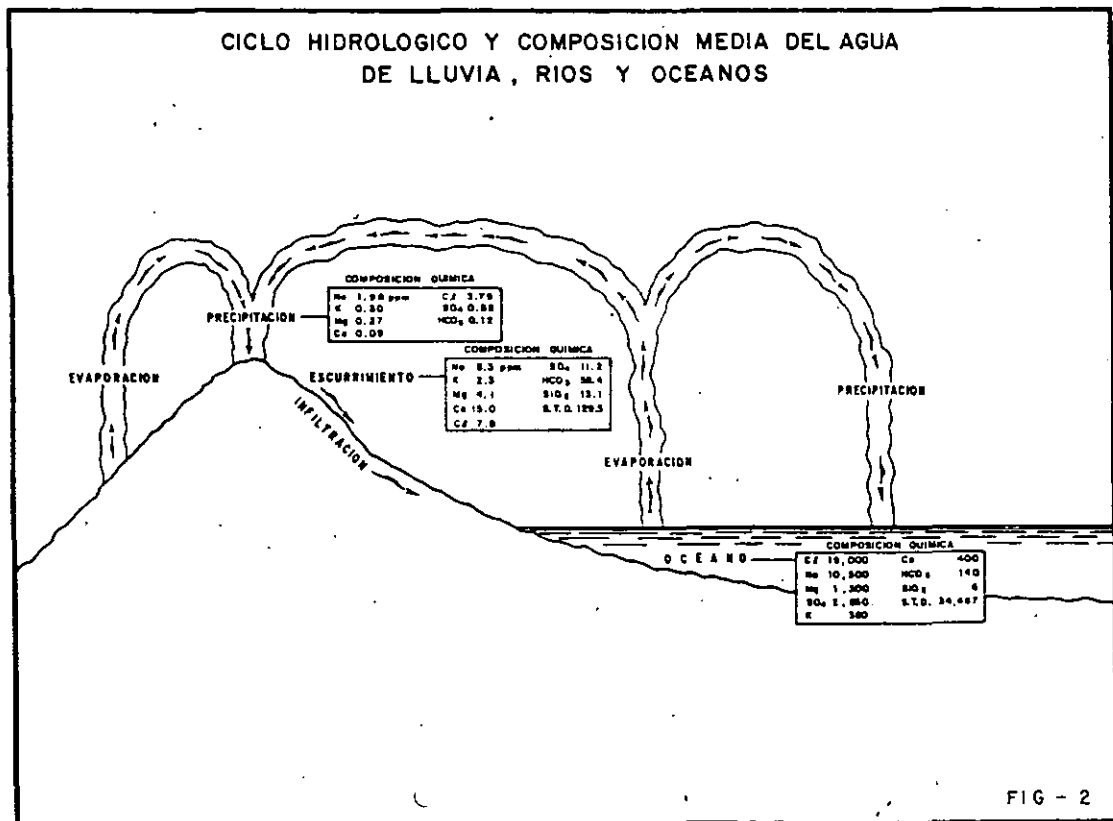
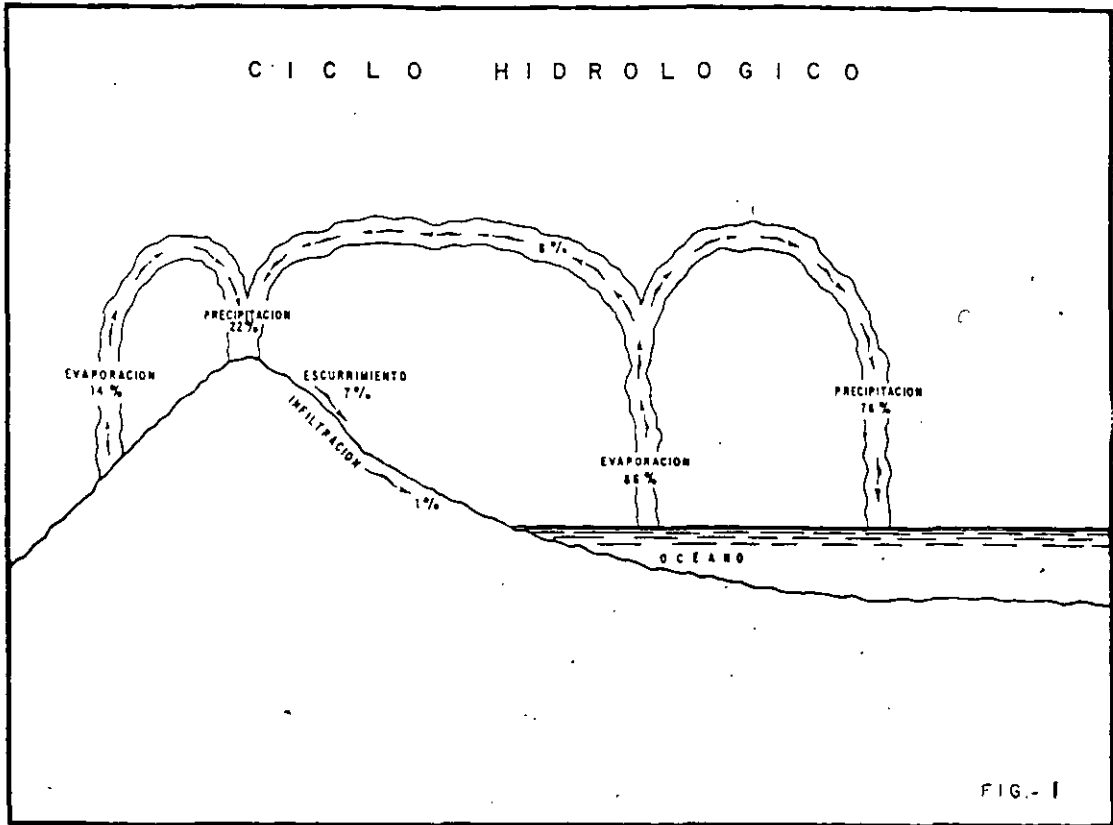
### 2.1. EL CICLO HIDROLOGICO

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 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.

### 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.)

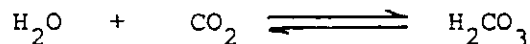
La composición química general del agua de lluvia, según Garrels y Mackenzie (1971), es la siguiente:

Na	1.98 ppm	Ca	0.09	HCO <sub>3</sub>	0.12
K	0.30	Cl	3.79		
Mg	0.27	SO <sub>4</sub>	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.

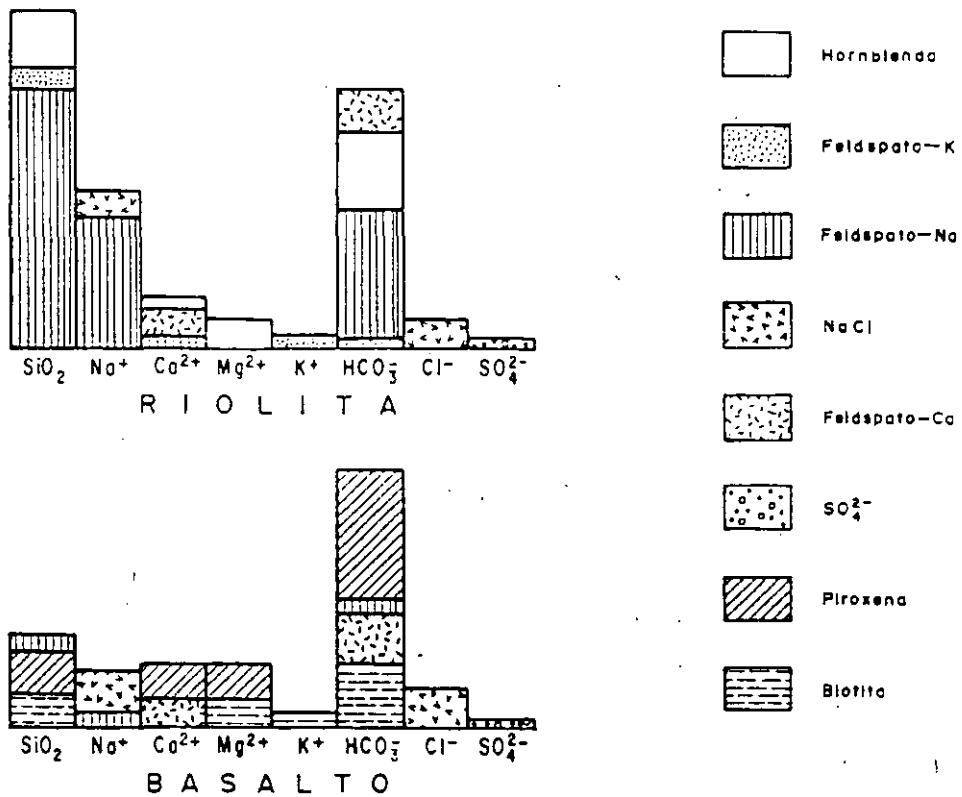
La composición promedio del agua de ríos, según Livingstone (1963), es la siguiente:

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

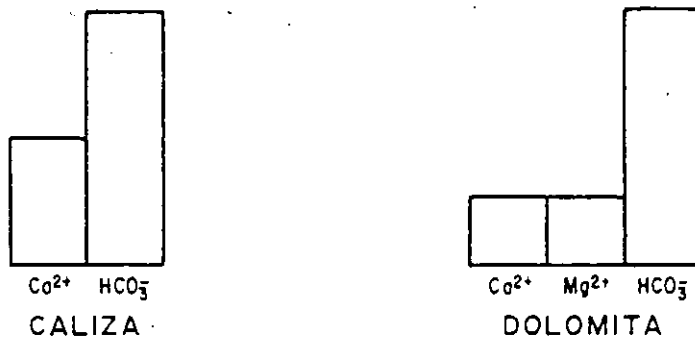
- c) Composición del agua de mar.- Los océanos constituyen los mayores depósitos de agua en el mundo, y se caracterizan por tener una gran cantidad de sales disueltas. Estas sales son producto de la erosión química efectuada por el agua durante el ciclo hidrológico, desde la formación de la tierra, hasta 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 <sub>3</sub>	140
Mg	1,300	SiO <sub>2</sub>	6
SO <sub>4</sub>	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.)

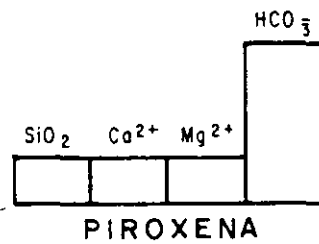
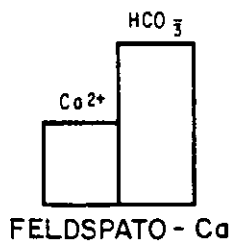
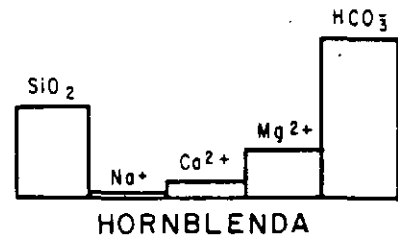
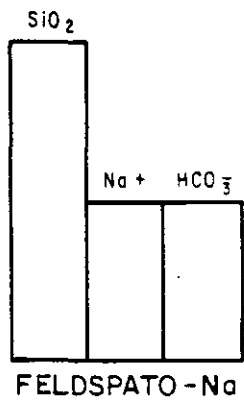
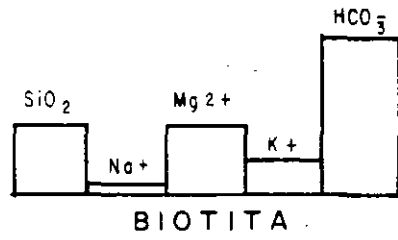
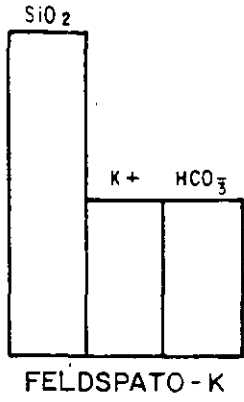
Así, tenemos que un agua que circula a través de rocas calizas, tendrá principalmente iones de calcio, carbonatos y bicarbonatos. Si circula por yesos y anhidritas, tendrá una gran cantidad de sólidos disueltos, debido a la fácil disolución de estas rocas, predominando la presencia de iones de calcio 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

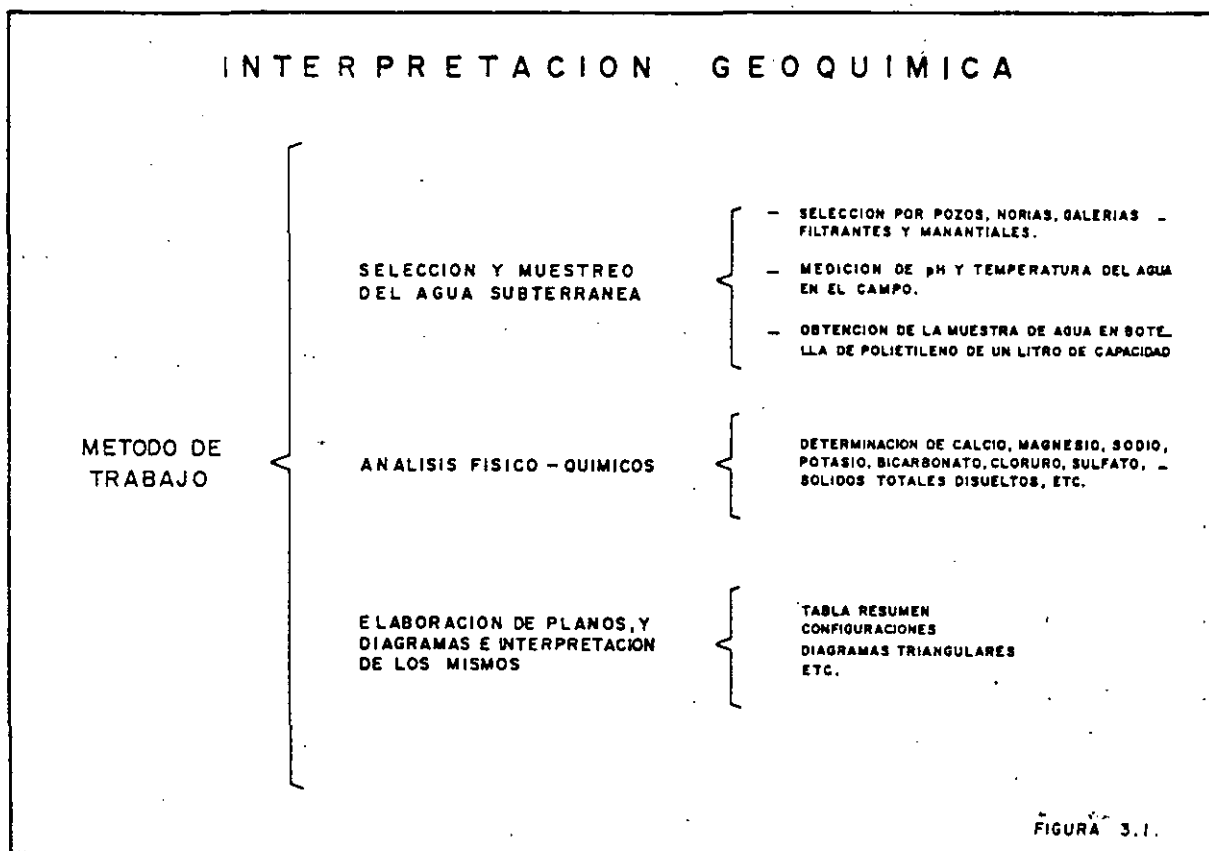


DIAGRAMAS DE BARRAS QUE MUESTRAN LA COMPOSICION DE ALGUNOS MINERALES CONSTITUYENTES DE LAS ROCAS IGNEAS

# 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 ( $\text{HCO}_3$ , Cl,  $\text{SO}_4$ ) 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,  $\text{SiO}_2$ , 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 - : - 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

- a) 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.
- b) 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-

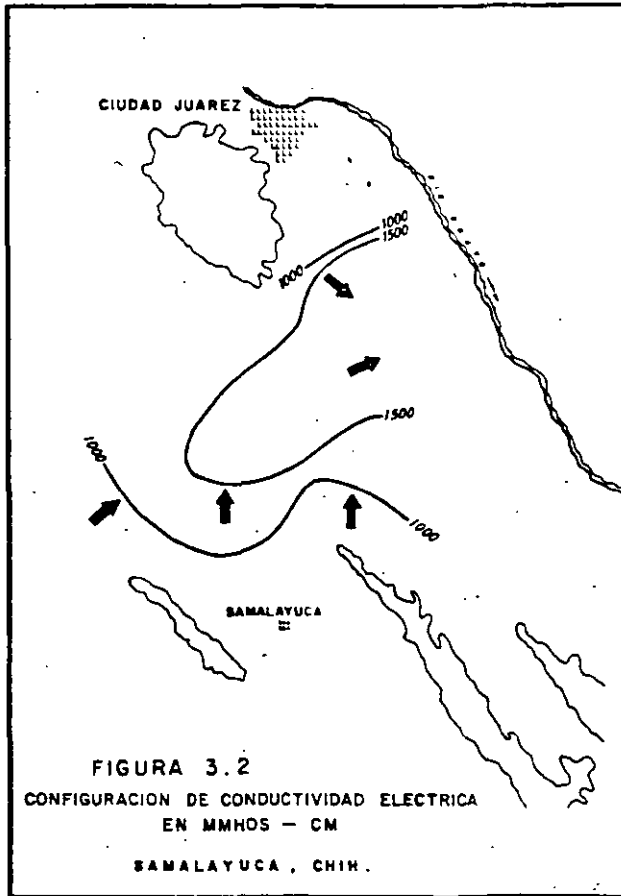
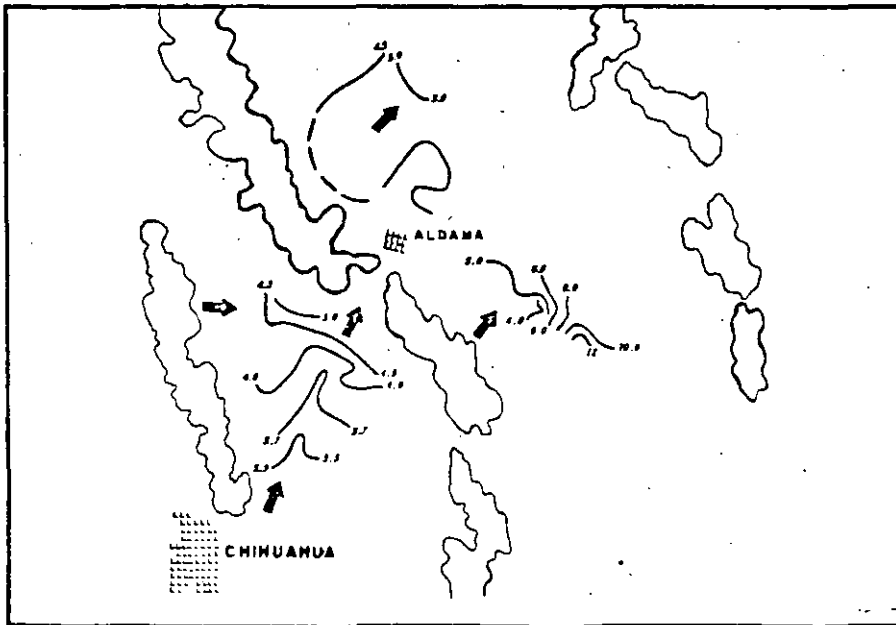
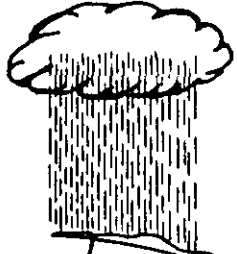


FIG. 3.3. CONFIGURACION DE SOLIDOS TOTALES EN ME/L; CHIHUAHUA-ALDAMA, CHIH.





ZONA DE  
RE C A R G A



MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRANEA

CURVAS DE IGUAL CONTENIDO DE  
SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

AGUA CALCICA  
CARBONATADA

DOLOMITAS

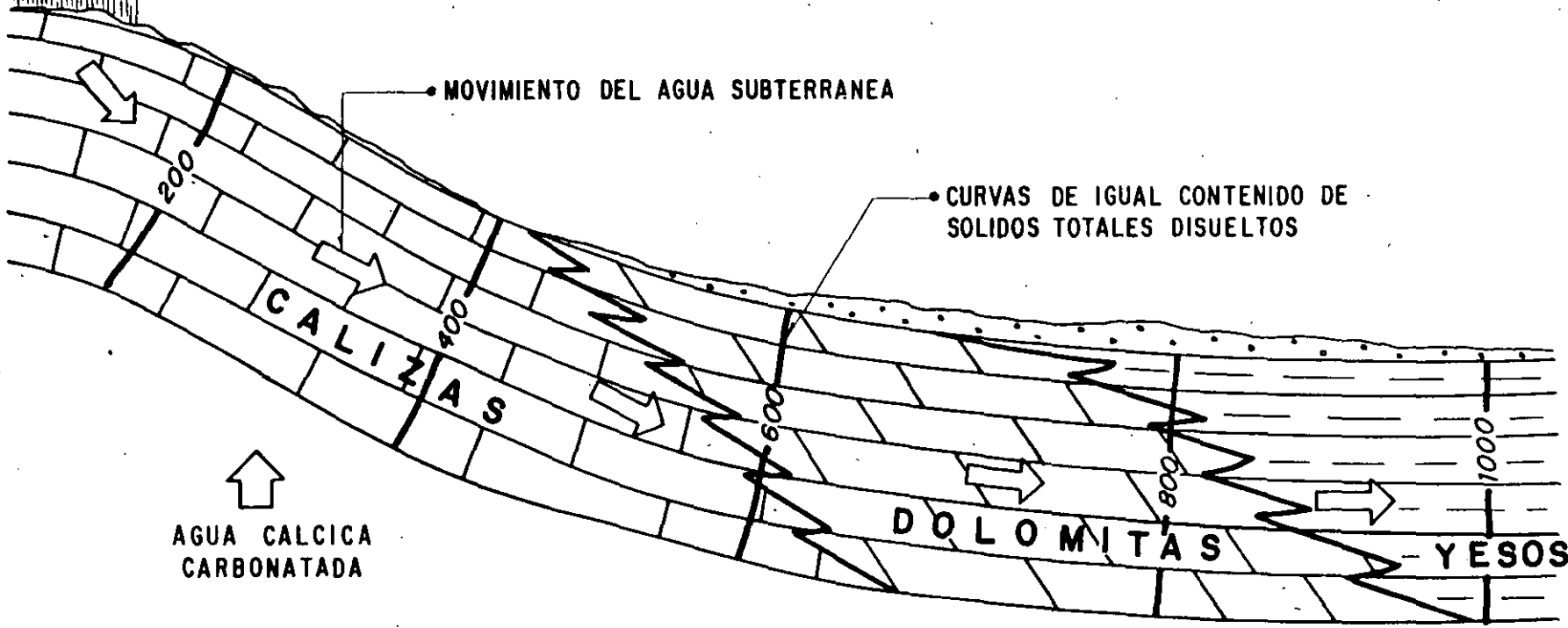
YESOS

AGUA CALCICA  
MAGNESIANA  
CARBONATADA

AGUA CALCICA  
SULFATADA

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 N° 3.4.



# DIAGRAMA TRIANGULAR

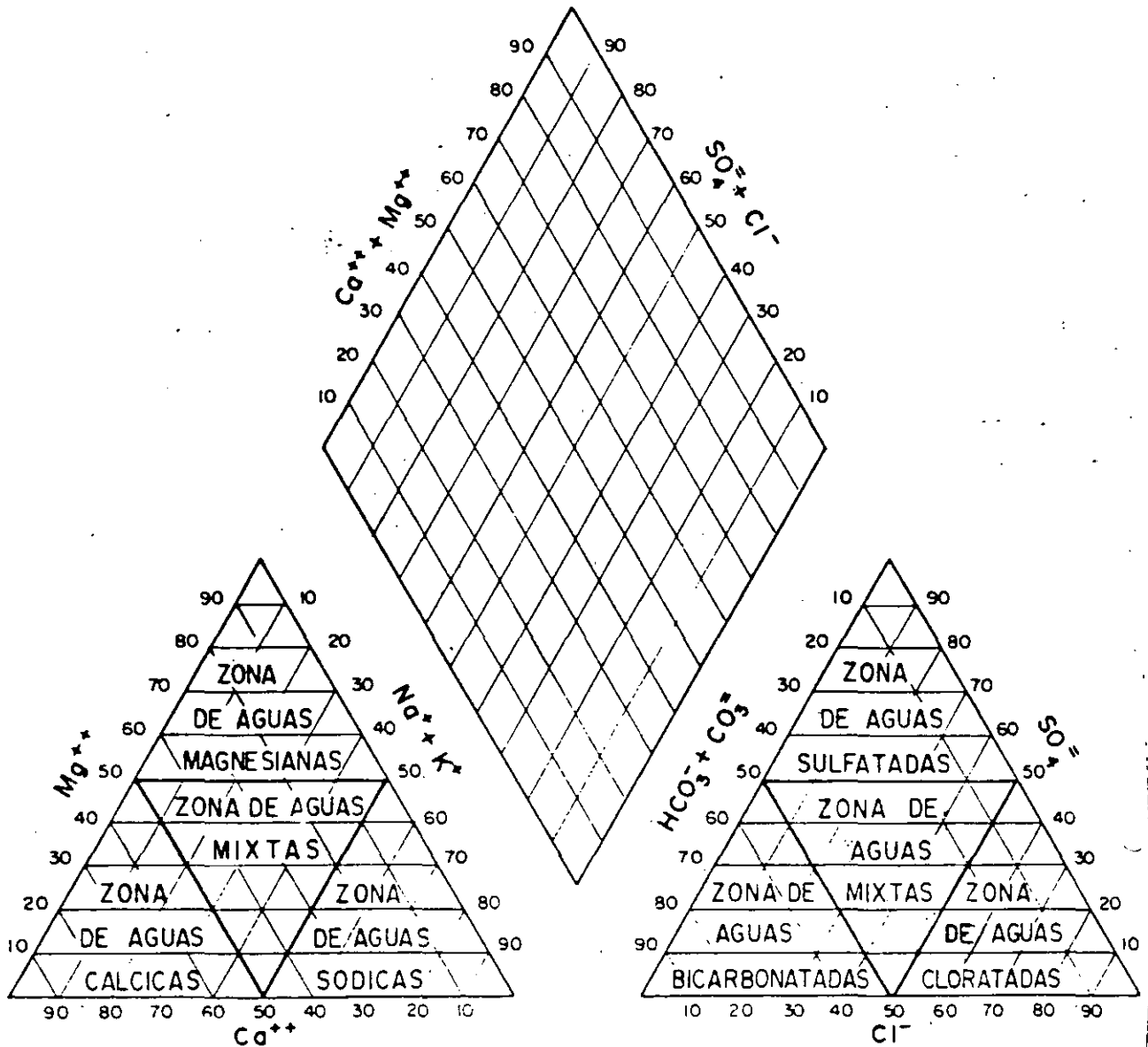


FIG. - 3.5.

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.

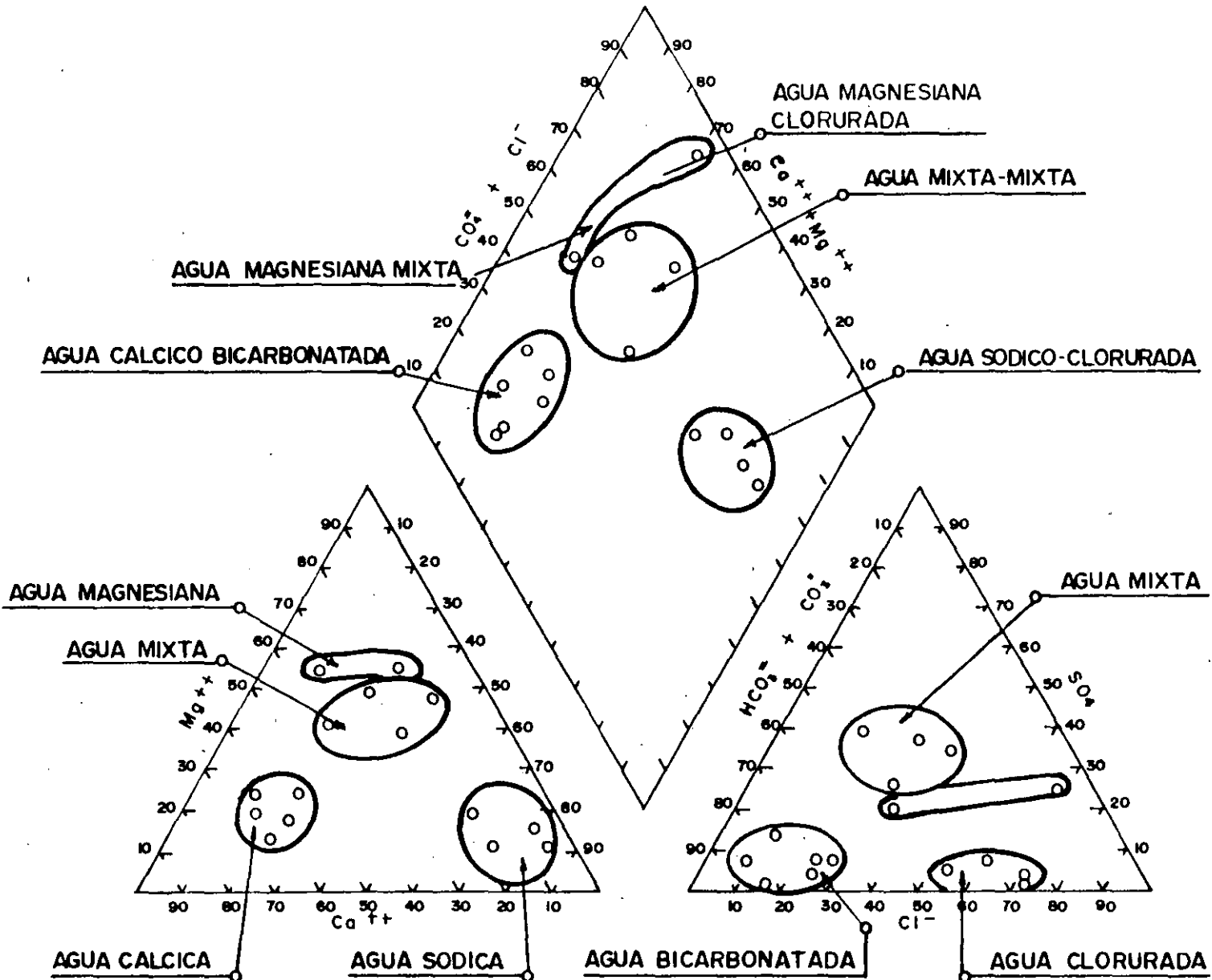


Fig.-

# ZONIFICACION DE TIPOS DE AGUA SEGUN SU COMPOSICION QUIMICA

## VALLE DE TECOMAN - MANZANILLO, COL.

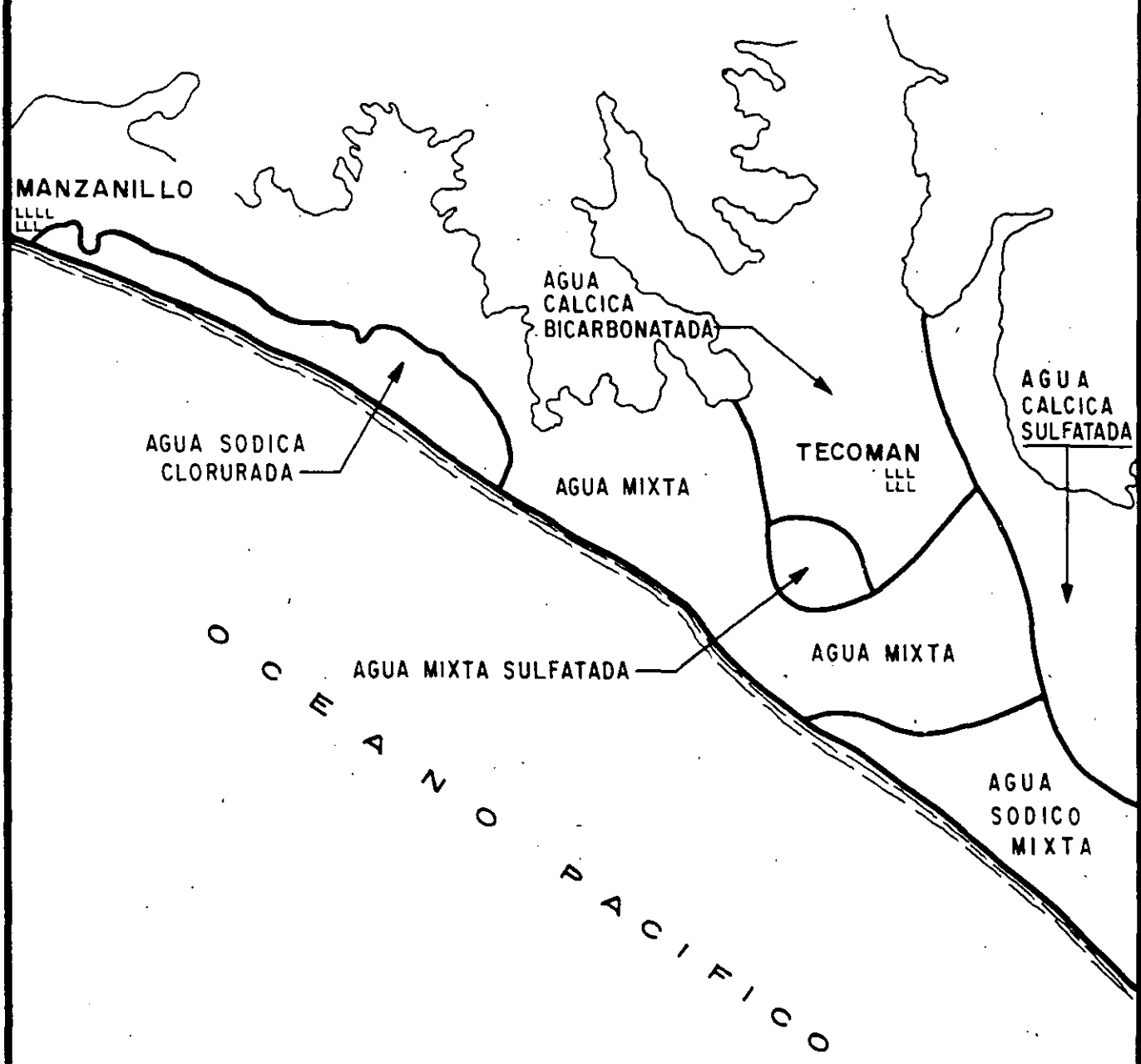


FIGURA 3.7.

GRAFICA DE RESISTIVIDAD - SOLIDOS TOTALES DISUELTOS

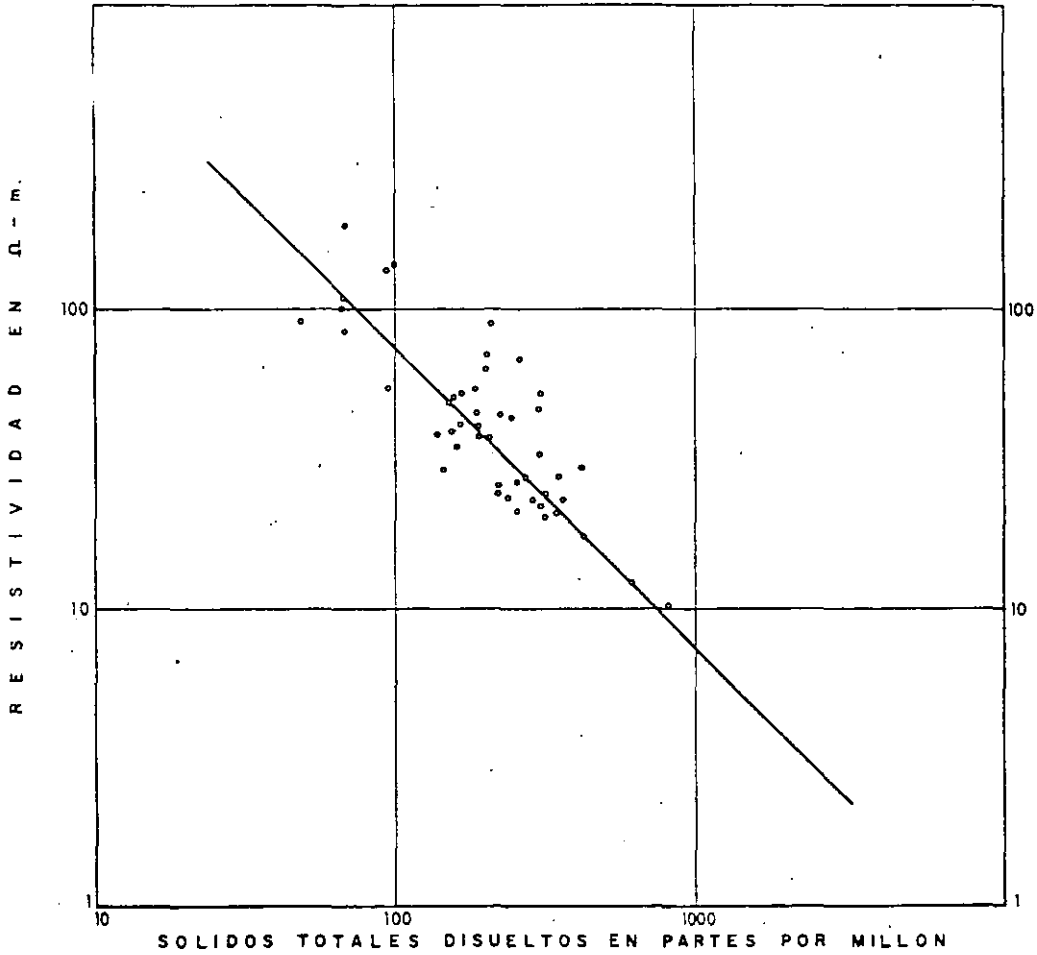


FIG. 13

FIGURA 3.8.





# CAPITULO 4

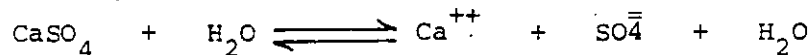
## GRADO DE SATURACION DEL AGUA RESPECTO A LOS MINERALES MAS COMUNES

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  $\text{CaCO}_3$ ; 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 (Kai) y se compara con la constante de equilibrio (Ke). Para valores de (Kai) mayores que (Ke), la muestra se encuentra sobresaturada y para valores de (Kai) menores que (Ke), la muestra no se encuentra sobresaturada.

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

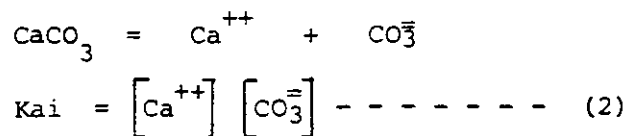


Aplicando la ley de Acción de Masas, obtenemos que la constante de actividad iónica es igual a las actividades de los productos entre los reactivos, o sea:

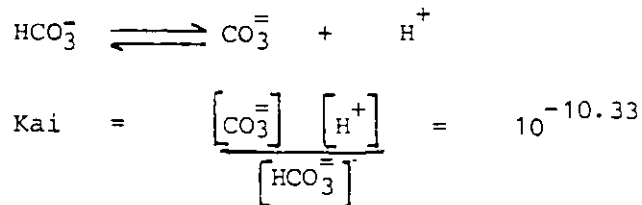
Donde los paréntesis indican la actividad iónica del ion que encierran. La actividad de los compuestos, es igual a 1.- por lo tanto:

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

De manera similar para la calcita se tiene:



Debido a que los análisis no reportan carbonato, ( $\text{CO}_3^{--}$ ), se utilizó la de terminación de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), 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):

$$K_{a1} = \frac{[\text{Ca}^{++}][\text{HCO}_3^-] \cdot 10^{-10.33}}{[\text{H}^+]} \quad \text{--- (3)}$$

Las actividades iónicas se obtienen multiplicando el coeficiente de activi- dad iónica  $\gamma$  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  $\gamma$  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 10<sup>8</sup>; (Klots, 1950); a<sub>i</sub> 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 (K<sub>a</sub>i), así obtenida, se compara con la constante de equilibrio (K<sub>e</sub>), para encontrar el grado de saturación del agua con respecto a yeso y calcita.

Los valores de K<sub>e</sub> 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. Langerwerff, 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 Chemical 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

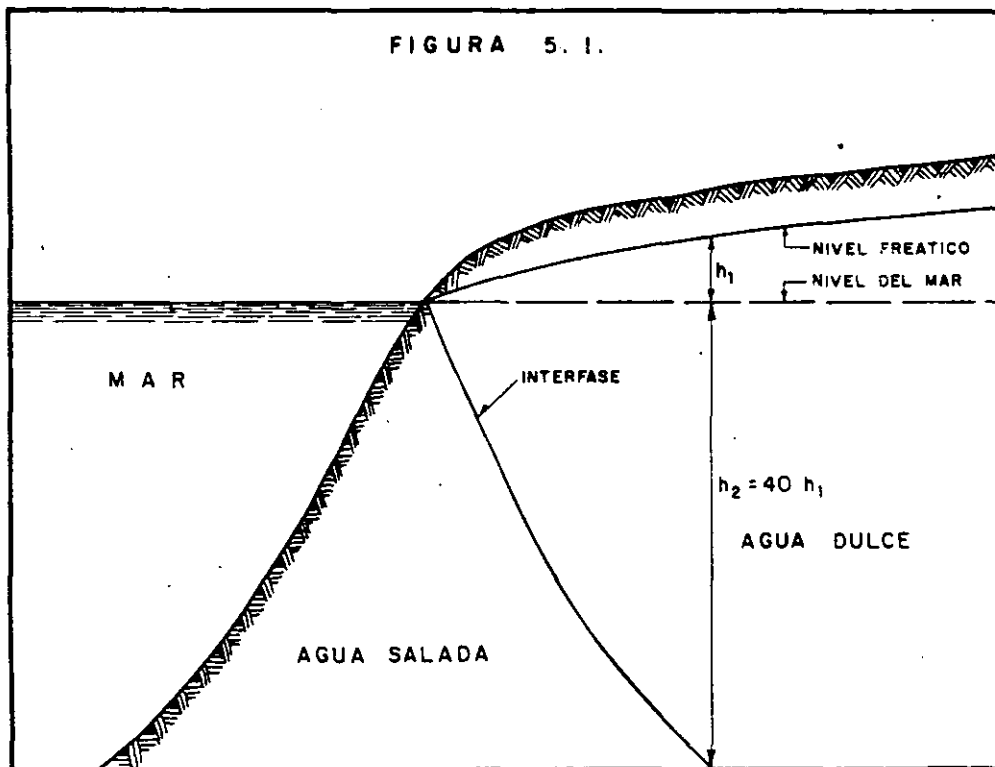
A lo largo de las líneas de costa el agua de los acuíferos se encuentra descansando sobre el agua de mar, debido a la diferencia de densidades de éstas. El contacto entre estas dos masas de agua (interfase salina) se encuentra en equilibrio dinámico, por lo cual las modificaciones en las con

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:

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

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

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 sobre-explotados, 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.).

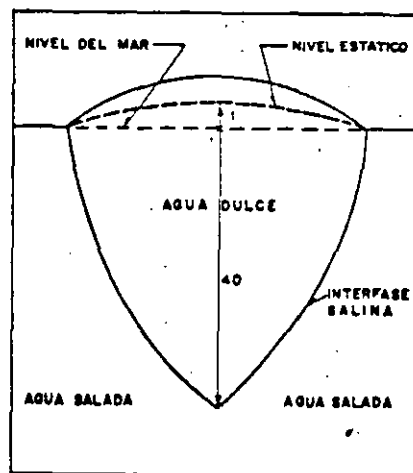
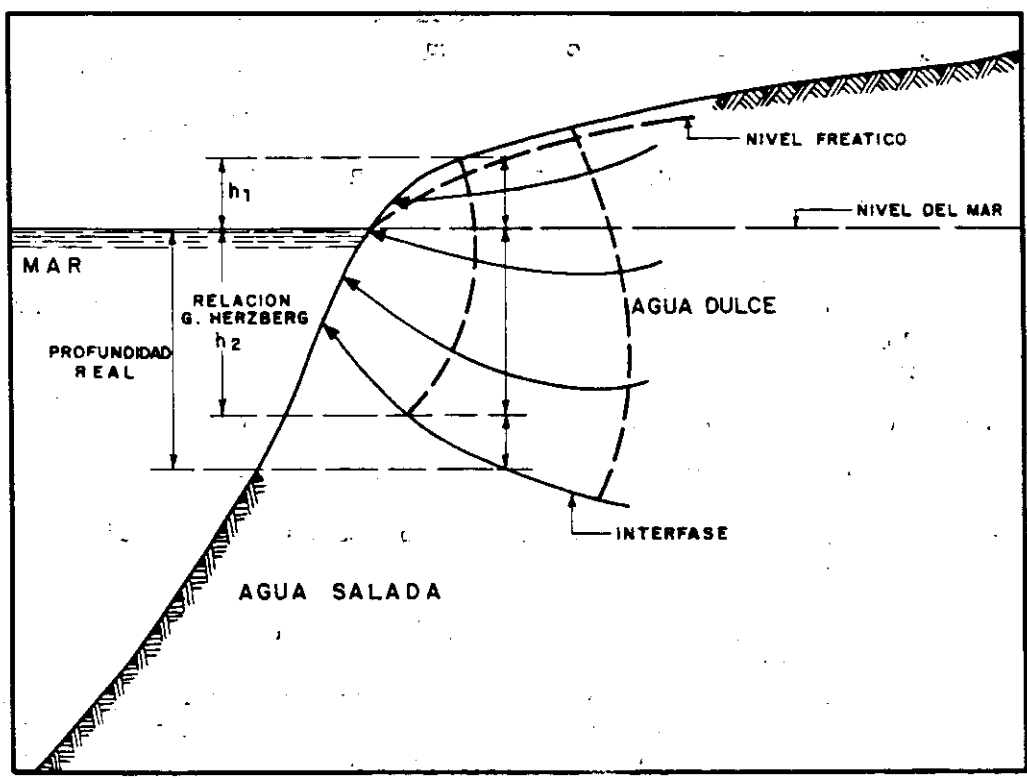


FIG : 5.2 POSICION DE LA INTERFASE SALINA EN UNA ISLA

FIGURA 5.3.





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<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup> y Mg<sup>++</sup> están dadas en equivalentes por litro. Con esta relación se obtiene el peligro que entraña el uso del-

# CLASIFICACION DE AGUAS PARA RIEGO

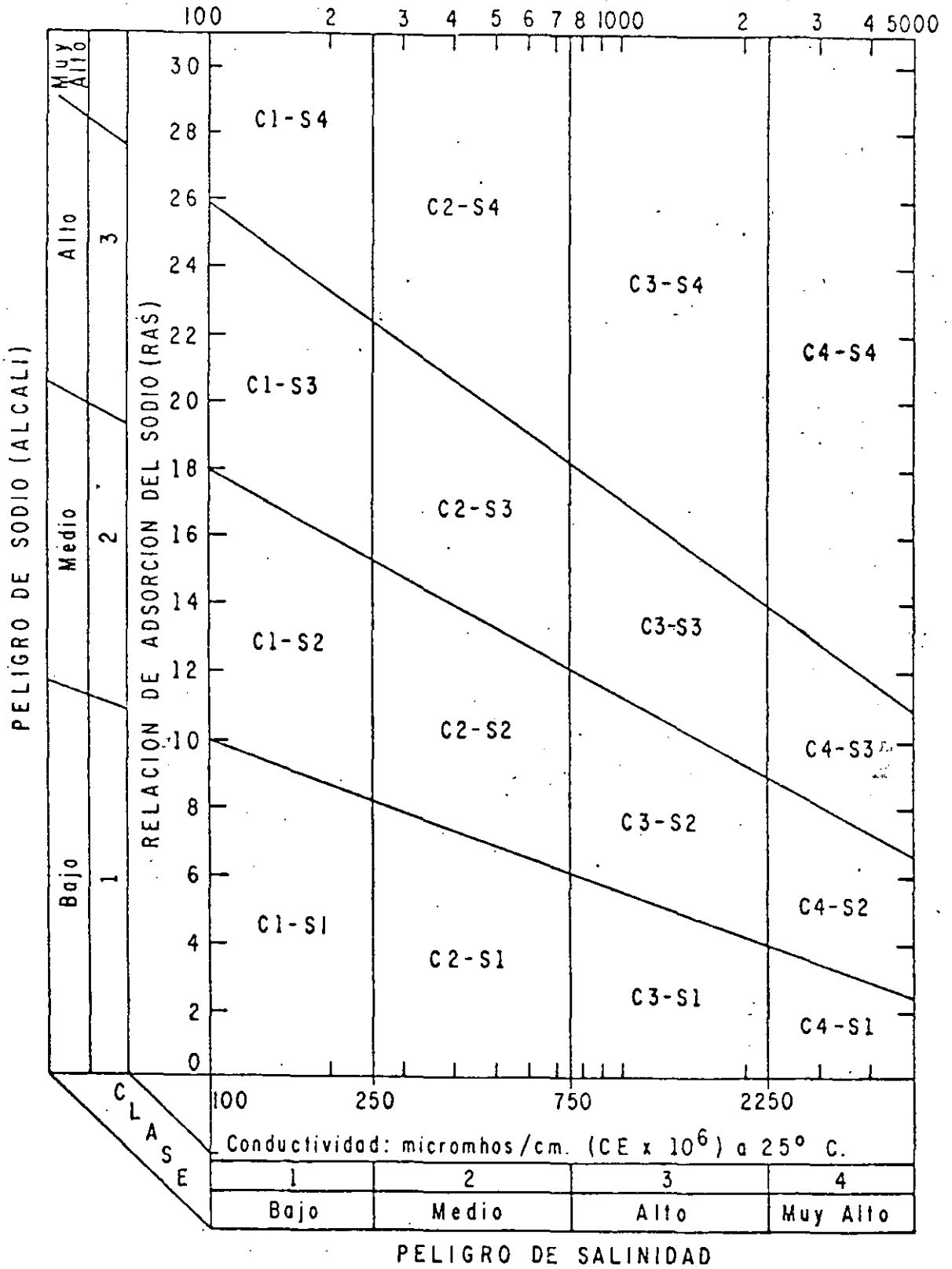


FIGURA 6.1.

agua para riego, el cual, como puede apreciarse en la formula, queda, supe-  
ditado a las concentraciones absoluta y relativa de los principales catio-  
nes.

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 pue--  
den 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 toleran--  
tes a las sales.
- C4 MUY ALTAMENTE SALINA.- No es apropiada para riego bajo condiciones ordi-  
narias aunque puede usarse, en ocasiones, bajo circunstancias muy espe-  
ciales. Los suelos deben ser permeables, el drenaje adecuado; el agua -  
para riego debe aplicarse en exeso con el fin de llevar a cabo un lava-  
do 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 perjudicia-  
les. 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 intercam-  
biable en la mayoría de los suelos por lo cual se requerirá de un mane-  
jo especial, buen drenaje, lavados fuertes y adiciones de materia orgá-  
nica. Los suelos yesíferos no desarrollarán niveles perjudiciales de so-  
dio 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  
FRUTALES

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

HORTALIZAS

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

Continua

Continuación

$CE_e \times 10^3 = 10$	<p>Papas Zanahoria Cebolla Chicharos Calabaza Pepinos</p> <p><math>CE_e \times 10^3 = 4</math></p>	$CE_e \times 10^3 = 3$
-------------------------	--	------------------------

PLANTAS FORRAJERAS

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

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

(En orden descendiente de más a menos Tolerante).

(De: Suelos Salinos y Sódicos, 1954)

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

CONTINUA TABLA 6.3.

CULTIVOS COMUNES

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

(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. LIMITES MAXIMOS 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 ( $\text{Ca CO}_3$ ).

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 $\text{CaCO}_3$ .	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 papeleras, 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 <sub>2</sub>	- -	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 <sub>4</sub>	- -	- -	- -	- -
Zn	- -	- -	- -	- -
HCO <sub>3</sub>	- -	- -	- -	- -
SO <sub>4</sub>	- -	- -	- -	500
Cl	- -	200	300	500
F	- -	- -	- -	- -
NO <sub>3</sub>	- -	- -	- -	- -
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 ( $\text{HCO}_3$ )    CARBONATO ( $\text{CO}_3$ )

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 contener 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<sub>3</sub>

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 consume 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 relativas 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 hierro, 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<sub>3</sub>), NITRITO (NO<sub>2</sub>), NITRATO (NO<sub>3</sub>)

FUENTE O CAUSA DE ORIGEN.- Se encuentra en el agua como NH<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, y NO<sub>3</sub>, - 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.

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

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 ( $\text{SiSO}_2$ )

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 ( $\text{SO}_4$ )

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<sub>3</sub>. 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  $1 \times 10^{-2}$  y  $2 \times 10^{-6}$  ppm son medidas con espectrofluorómetro.

La intensidad máxima de fluorescencia se detecta a una longitud de onda de  $515 \times 10^{-9}$  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 fluoresceína. Para concentraciones menores a  $2 \times 10^{-6}$  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

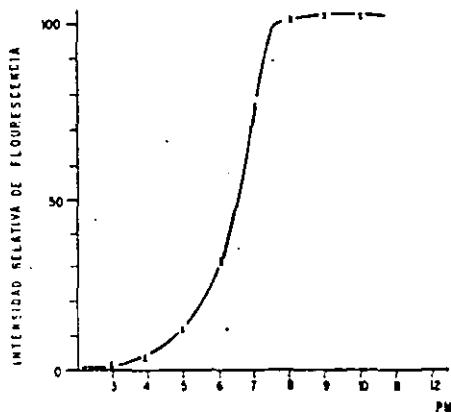


FIGURA 8.1.

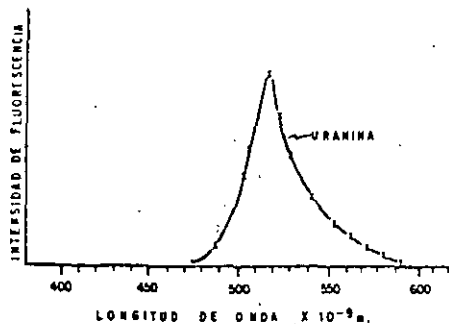


FIGURA 8.2.

- 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 diluído al 15% en agua destilada.

Ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF), dos partes de agua destilada y una gota de  $\text{NH}_3$ .

Por último, la uranina es resistente a la absorción por arcillas 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  $535 \times 10^{-9}$  m.
- Cuando se presentan valores mayores de 0.01 ppm es visible al ojo humano. Entre 0.01 y  $50 \times 10^{-6}$  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) AMINOHODAMINA G EXTRA.- Conocida anteriormente como sulforhodamina G extra, presenta una fluorescencia naranja-rosa en soluciones concentradas, que cambia a verde al ser diluída. Su mayor intensidad se presenta a una longitud de onda de  $554 \times 10^{-9}$  m.- Es visible en concentraciones mayores de 0.01 ppm y con espectrofluorómetro pueden detectarse hasta  $6 \times 10^{-3}$  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  $578 \times 10^{-9}$  m. Es visible al ojo humano en concentraciones mayores de - 0.01 ppm. Con espectrofluorómetro se detectan hasta  $10 \times 10^{-3}$  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  $430 \times 10^{-9}$  m. Es visible solamente en concentraciones mayores de - 1 ppm. Con espectrofluorómetro se pueden detectar hasta  $440 \times 10^{-3}$  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  $32 \text{ mg/m}^3$ , 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 sólo 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.

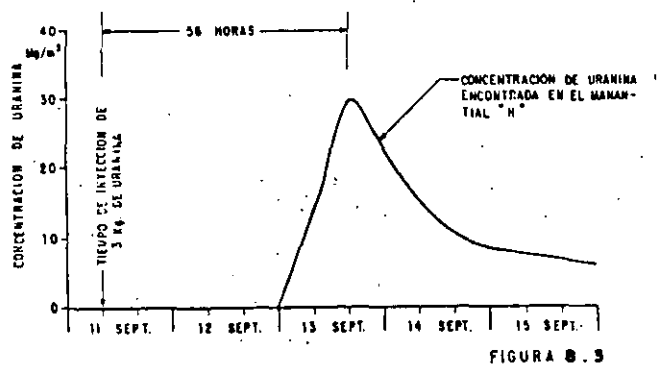


FIGURA 8.3

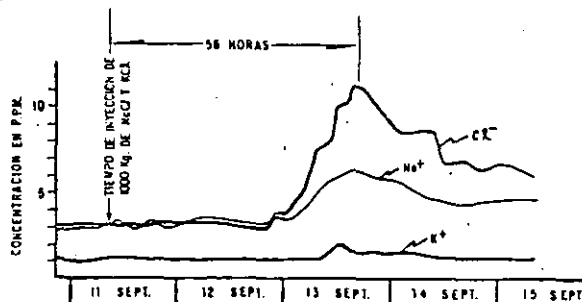


FIGURA 8.4

#### 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. Kassl. 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 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.

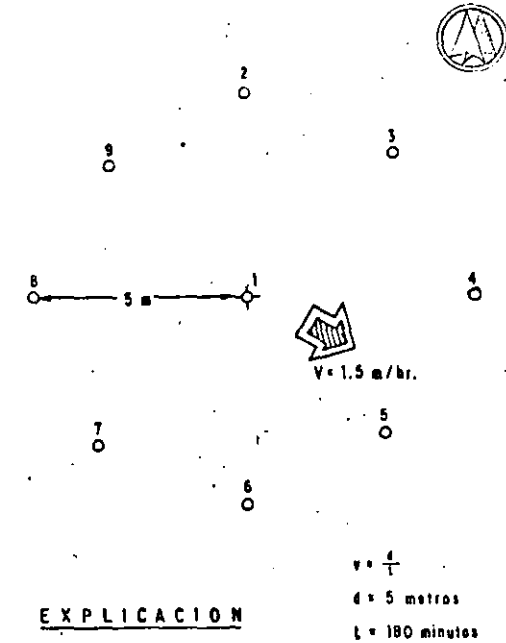
Al igual que en los resultados obtenidos para la fluoresceína (párrafos anteriores), en el manantial "S", no se detectó incremento alguno en su contenido salino, por lo cual se concluyó que este manantial no tiene conexión con el agua de infiltración de la dolina.

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 infiltró en la dolina.



**EXPLICACION**

- ⊕ POZO DE INYECCION
- POZOS DE MUESTREO
- ➔ DIRECCION Y VELOCIDAD DEL FLUJO DEL AGUA SUBTERRANEA OBTENIDO POR MEDIO DE TRAZADORES

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 detectarse 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 Färbung 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 protones que el elemento original y diferente número de neutrones, son conocidos 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 ( $^1\text{H}$ ) en su forma natural tiene un protón y un electrón; cuando además de lo anterior llega a presentar un neutrón, se convierte en un isótopo del hidrógeno denominado deuterio ( $^2\text{H}$ ). Cuando presenta dos neutrones dentro del núcleo, forma otro isótopo ( $^3\text{H}$ ) 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 atmósfera y pueden provenir de la mayor parte de los elementos. Los de mayor aplicación en geohidrología son el deuterio ( $^2\text{H}$ ), el oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ), el tritio ( $^3\text{H}$ ), el carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ) y las relaciones carbono 12/13 y azufre 32/34.

Los tres primeros son los de mayor importancia en geohidrología ya que forman parte de la molécula del agua.

Se encuentran en diferentes combinaciones de las cuales tres son las más comunes y de mayor interés para los estudios geohidrológicos, que corresponden a:  $\text{H}_2^1\text{O}$ ,  $\text{H}_2^2\text{O}$  y  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ .

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	<sup>18</sup> O		
AZUFRE 34	<sup>34</sup> S		
CARBONO 13	<sup>13</sup> C		
CARBONO 14	<sup>14</sup> C	5730	500 - 40,000 años
NITROGENO 15	<sup>15</sup> N		
<u>MENOS COMUNES</u>			
COLORO 37	<sup>37</sup> C		
ESTRONCIO 86	<sup>86</sup> Sr		
BORO 10	<sup>10</sup> B		
SILICIO 32	<sup>32</sup> Si	103	50 - 100 años
ARGON 39	<sup>39</sup> Ar	269	100 - 1,000 años
KRYPTON 85	<sup>85</sup> 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  $\delta$  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.

$$\delta_D = \frac{H^2/H^1 \text{ Muestra} - H^2/H^1 \text{ SMOW}}{H^2/H^1 \text{ SMOW}} \times 1000$$

$$\delta_{O^{18}} = \frac{O^{18}/O^{16} \text{ MUESTRA} - O^{18}/O^{16} \text{ SMOW}}{O^{18}/O^{16} \text{ SMOW}} \times 1000$$

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.

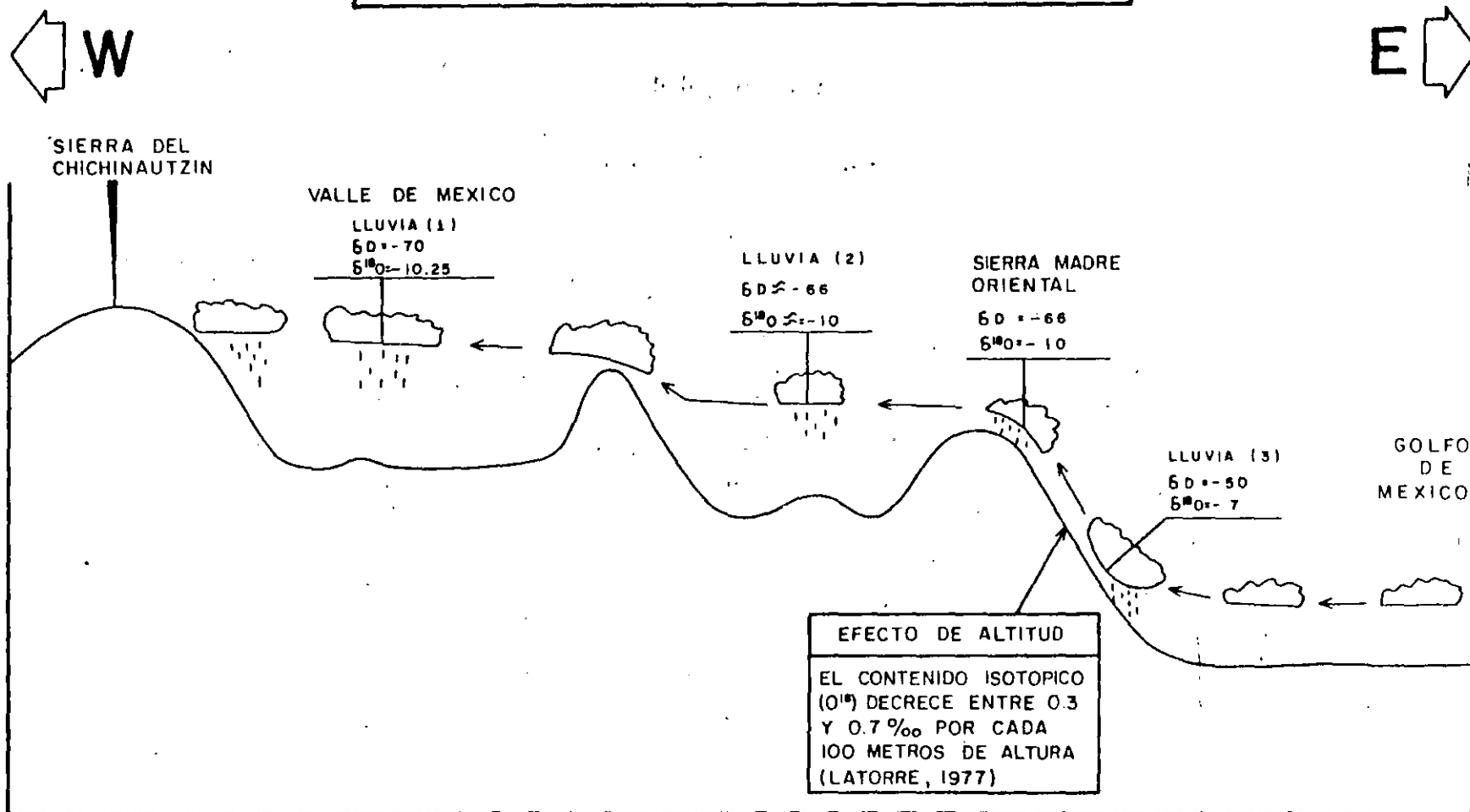
El deuterio y el oxígeno 18 de la atmósfera pasan a formar parte de la molécula del agua que se precipita en forma de lluvia, donde presenta una concentración isotópica característica. La mayor parte de las masas que forman las nubes provienen de los océanos y son transportadas hacia los continentes, 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)

(3) VALORES INFERIDOS DE ACUERDO A DATOS DE AGUA SUBTERRANEA EN VERACRUZ (LESSER, 1980)

FIGURA 9:1

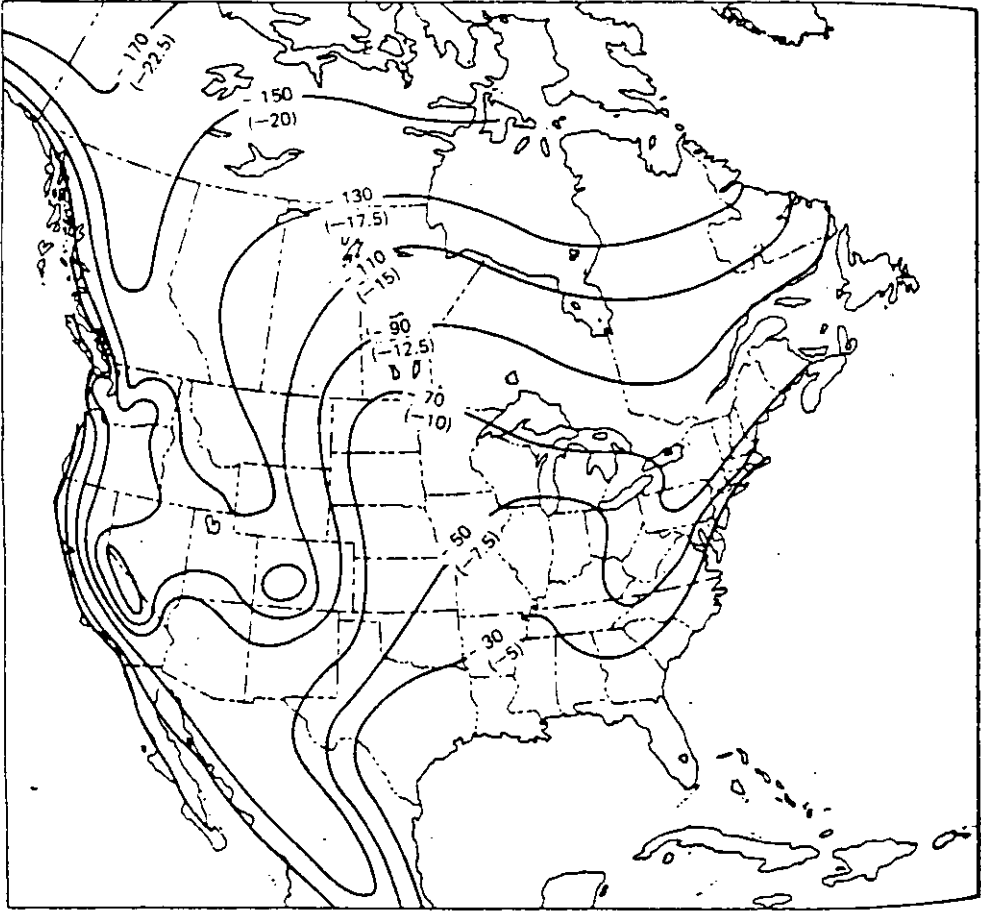


FIGURA 9.2. DISTRIBUCION DEL DEUTERIO Y OXIGENO 18 EN AGUA PLUVIAL PARA NORTEAMERICA. (DE: DREVER, 1988)

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:

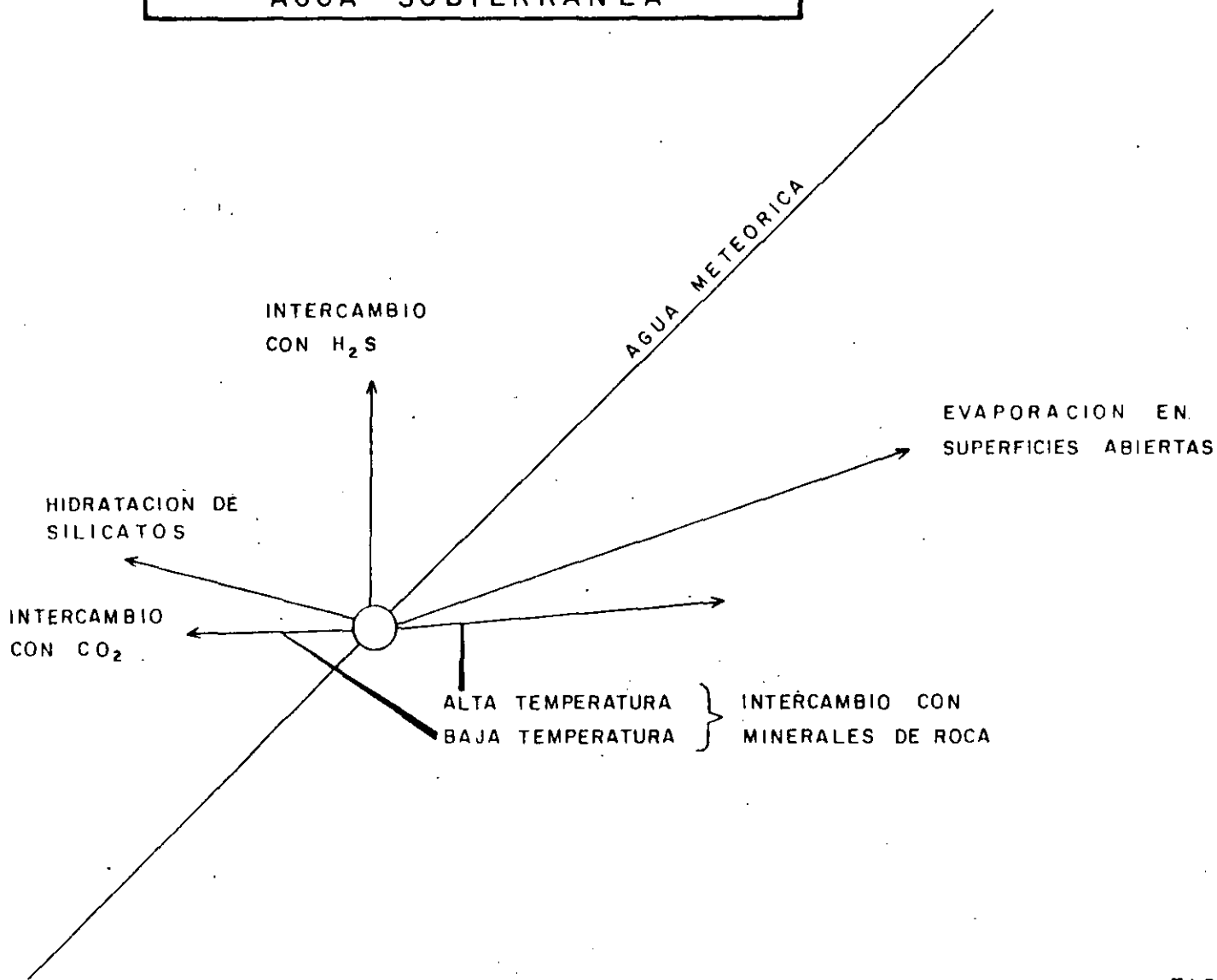
#### 9.4.1. VARIACION ESTACIONAL

Para el deuterio y el oxígeno 18 se presentan variaciones estacionales, que -



PROCESOS QUE PUEDEN MODIFICAR  
LA COMPOSICION ISOTOPICA DEL  
AGUA SUBTERRANEA

$\delta D\text{‰}$



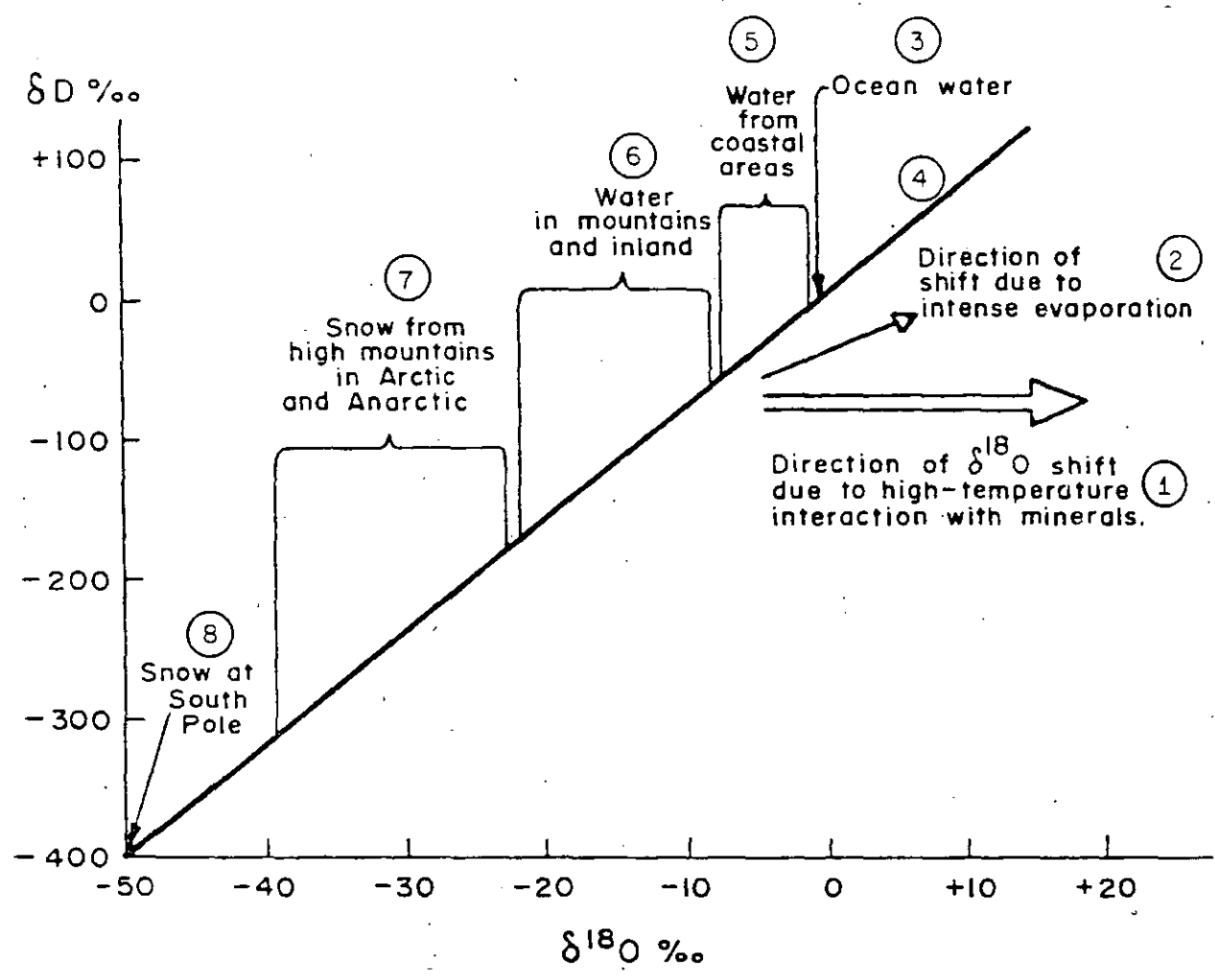


FIGURA 9.4 .

DATOS DE : FERRONSKY Y POLYAKOV, 1962

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.

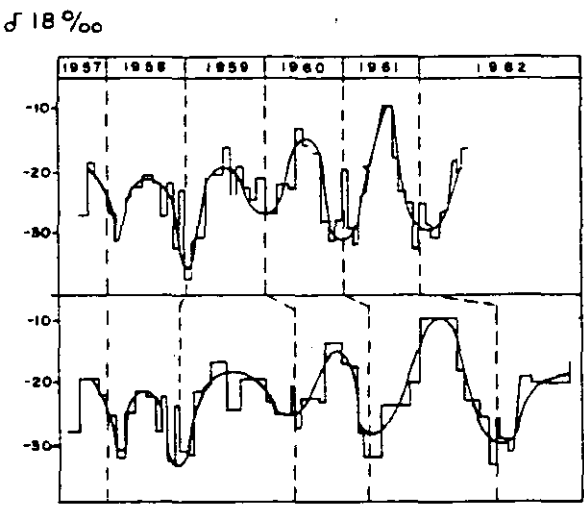


FIGURA 9.5. VARIACION ESTACIONAL DEL OXIGENO 18. (MODIFICADA DE FONTES, J.C., 1966)

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  $\delta^{18}O = 0.69 TA - 13.16\%$ , y  $\delta D = 5.6 TA - 100\%$ . Aunque esto se cumple exclusivamente para estas 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.

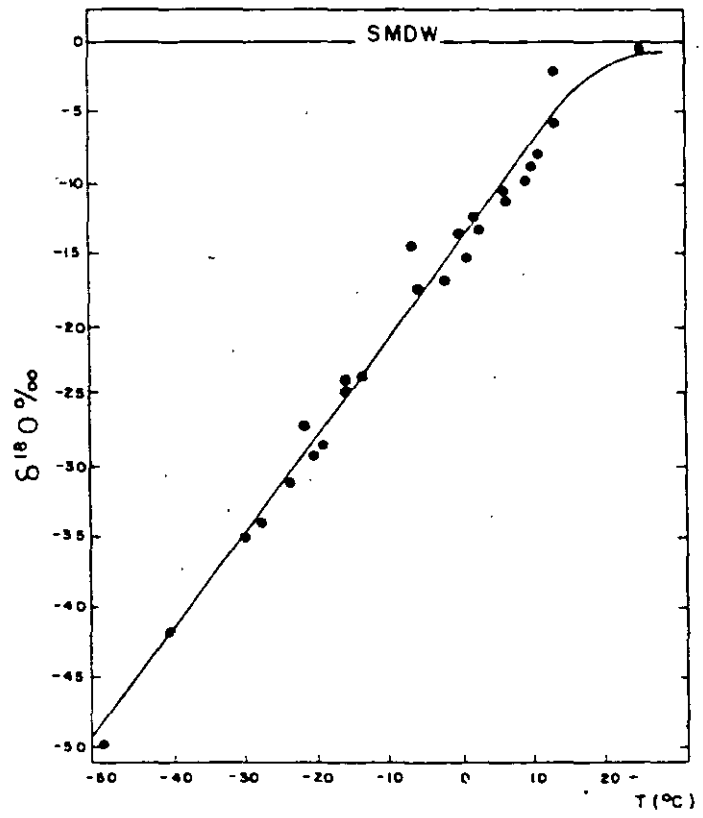


FIGURA 9.6. OXIGENO 18 CONTRA TEMPERATURA MEDIA ANUAL A DIFERENTES LATITUDES. (FONTES, J.C., 1976)

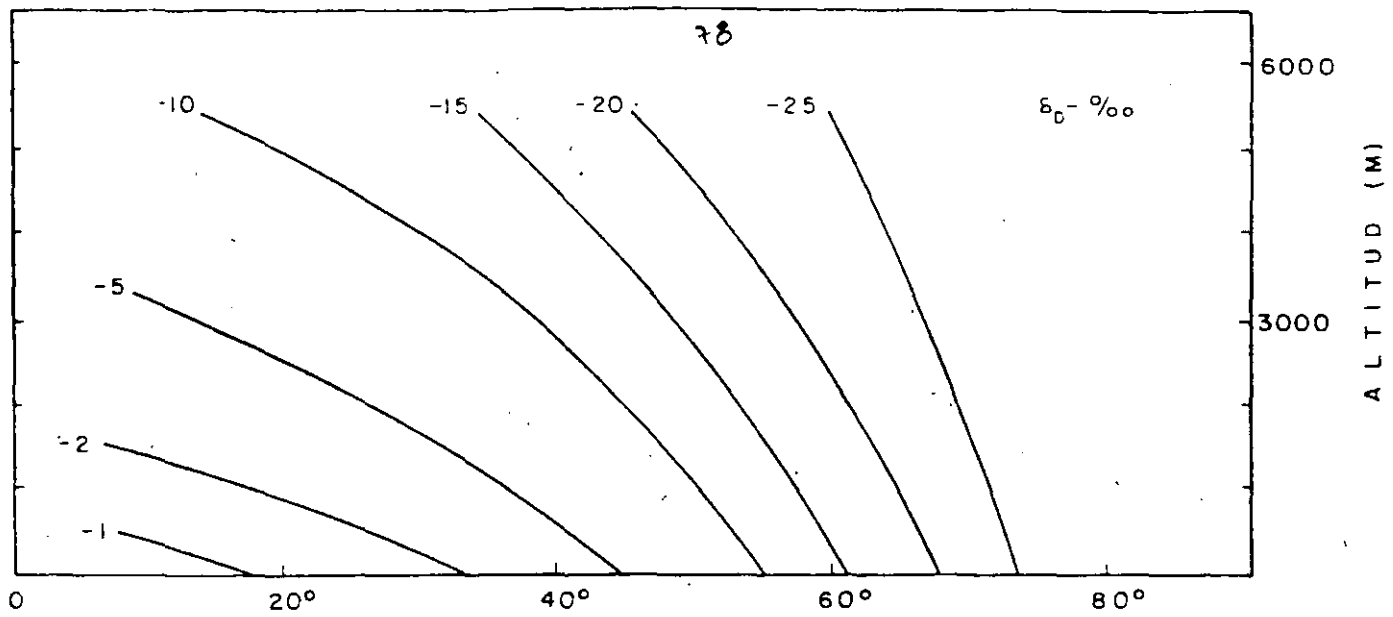


FIGURA 9.7 LATITUD, NORTE  
 CONCENTRACION DE DEUTERIO EN  
 FUNCION DE LA LATITUD Y ALTITUD  
 (DANSGAARD, 1964)

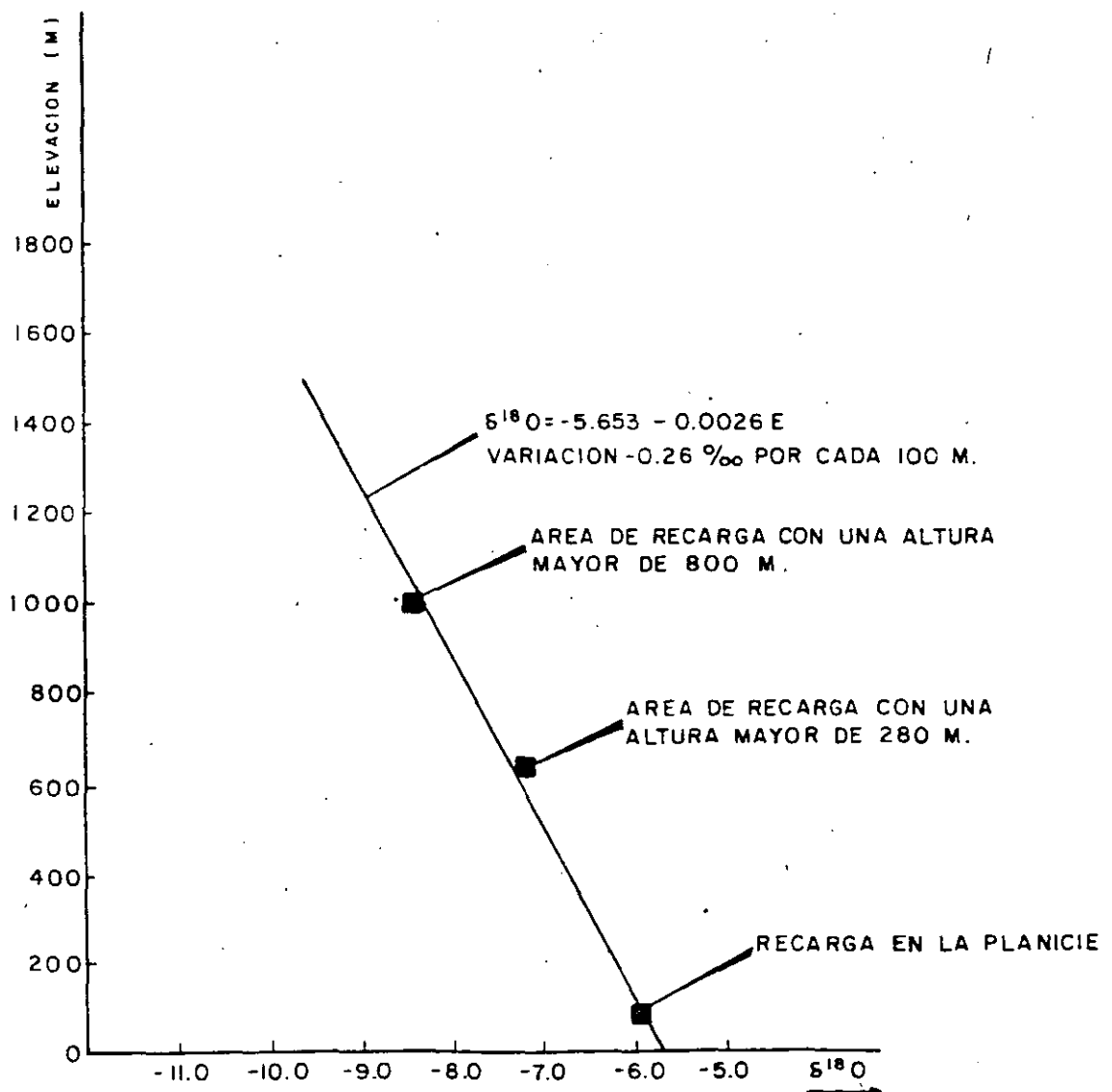


FIGURA 9.8. ALTURA DE RECARGA -vs- OXÍGENO 18  
 (DE : PAYNE AND YURTSEVER, 1974)

#### 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  $t$ ;  $\lambda$  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.

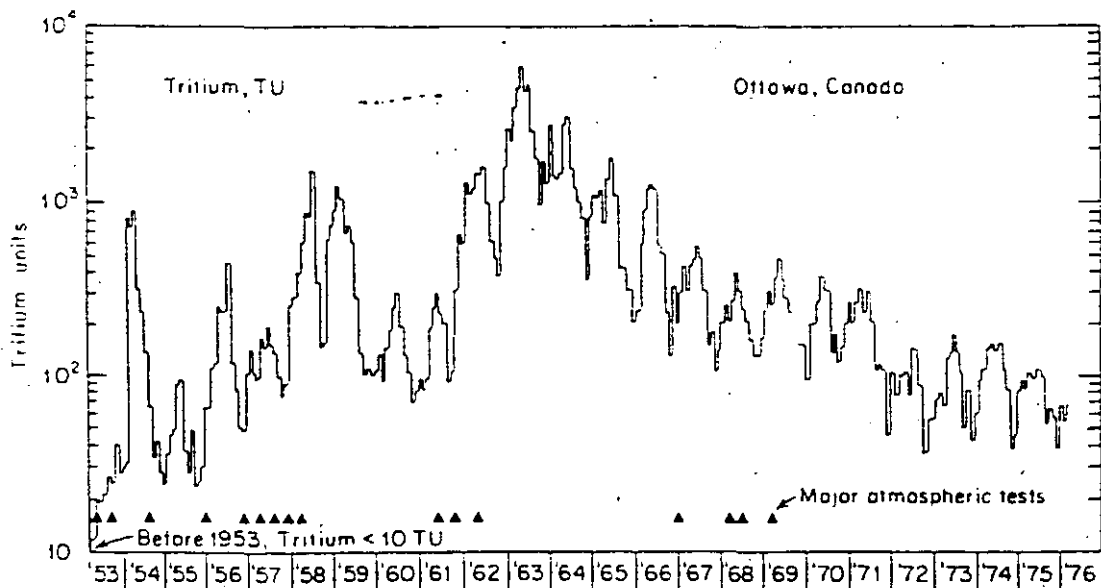


Fig. 9.9. De: Freeze and Cherry, 1979

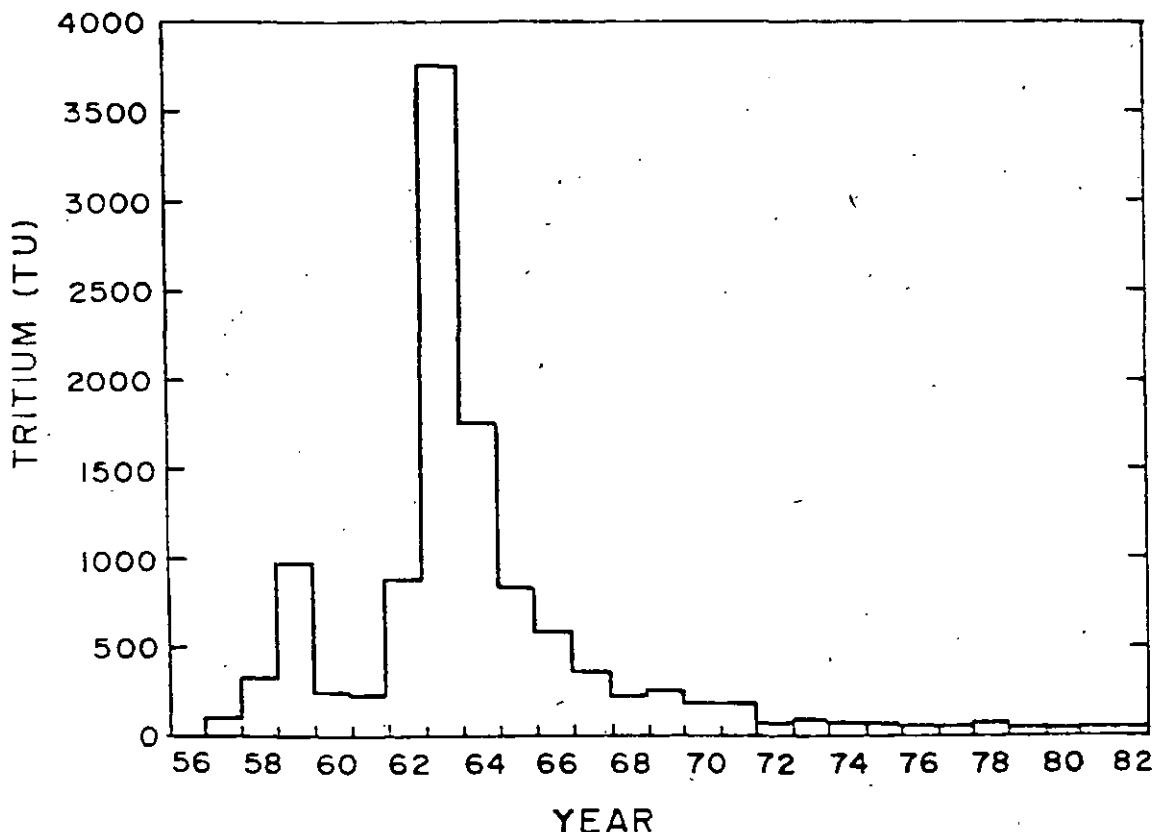
Antes de las explosiones atómicas de principios de la década de los 50's, la cantidad de tritio en el agua de lluvia era de 5 a 15 U.T.; debido al decaimiento radioactivo, el agua que se infiltró en esa fecha, contiene ahora, teóricamente de 0.6 a 2 U.T. (el límite de detección del tritio es de  $\pm 0.2$  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).





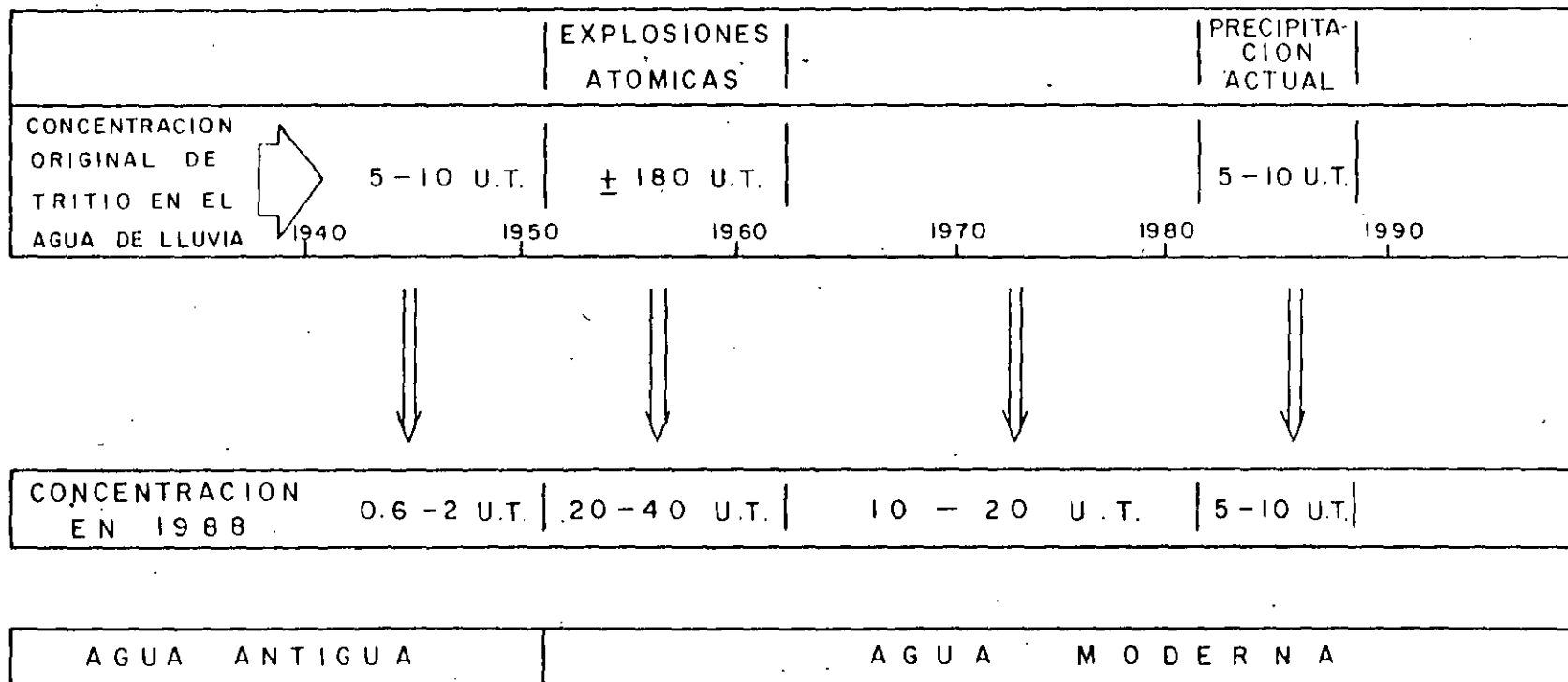


FIGURA 9.12. CONCENTRACION ACTUAL DEL TRITIO EN AGUAS INFILTRADAS EN LOS ULTIMOS 40 AÑOS.

35

## R E F E R E N C I A S

- 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.
- Gonfiatini, 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 Groundwater 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. DGCOH.-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 Ambien-  
tales 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 Ciró, 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 Con-  
tinua, 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 Cientí-  
fica 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 Méxi-  
co, Vol. I, Número 4.
- Lesser, J.M. 1987. Dictámen Geohidrológico-Isotópico para definir el fun-  
cionamiento y zonas de recarga del campo de pozos del área deno-  
minada Ojo de Agua de Patagalana, Municipio de Parras, Coah. Se-  
minario 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 Hidrogeoquí-  
mico 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.

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 ( $Zn^{+2}$ )	.03060	.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."

# DIAGRAMA TRIANGULAR

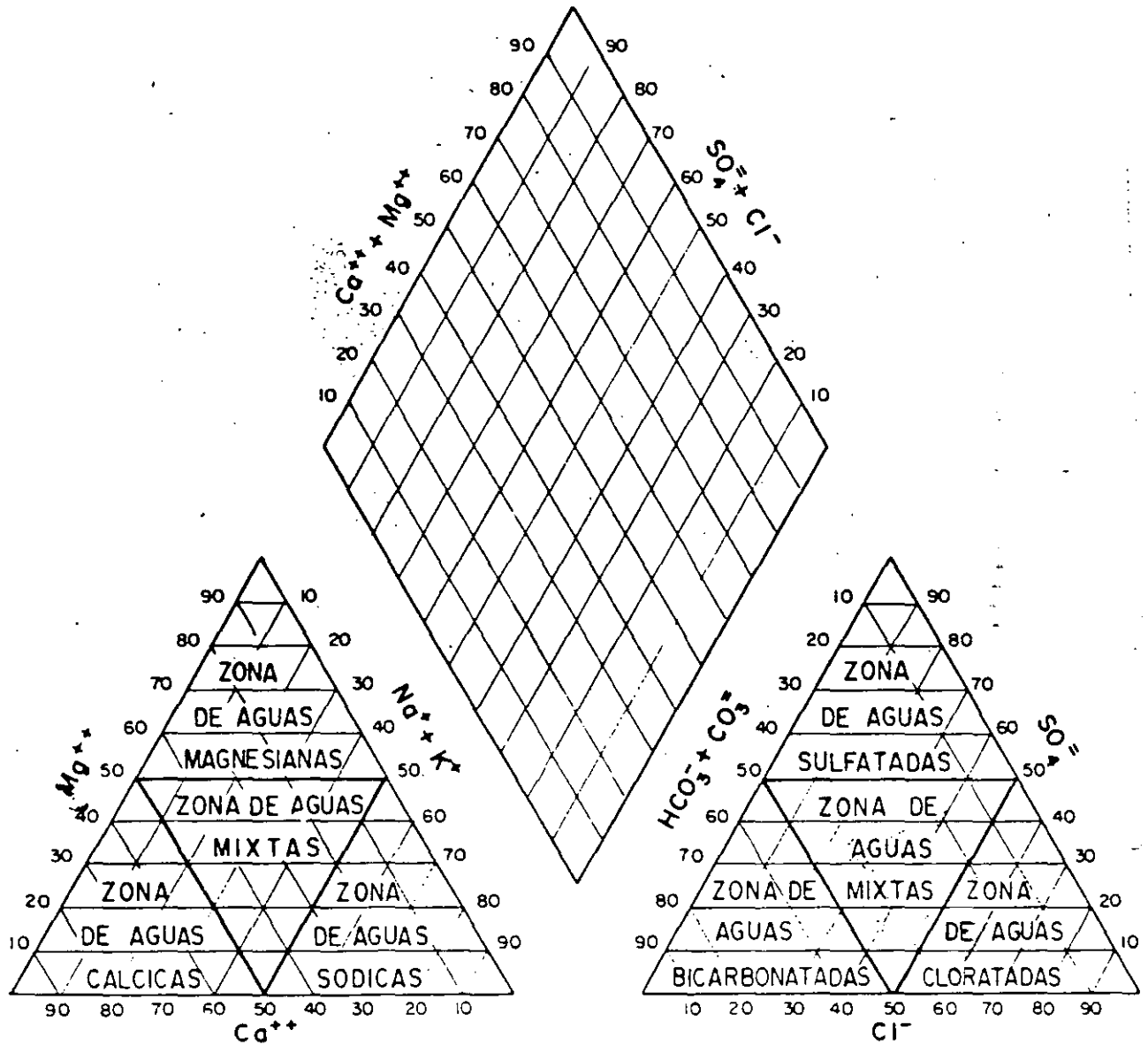


FIG. - 3.5.

12/4/11

me/l

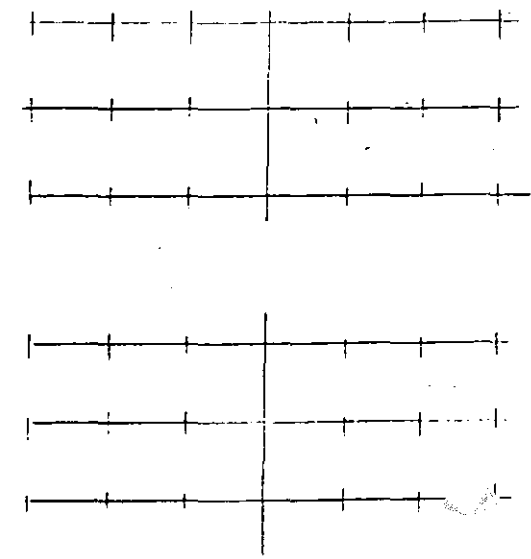
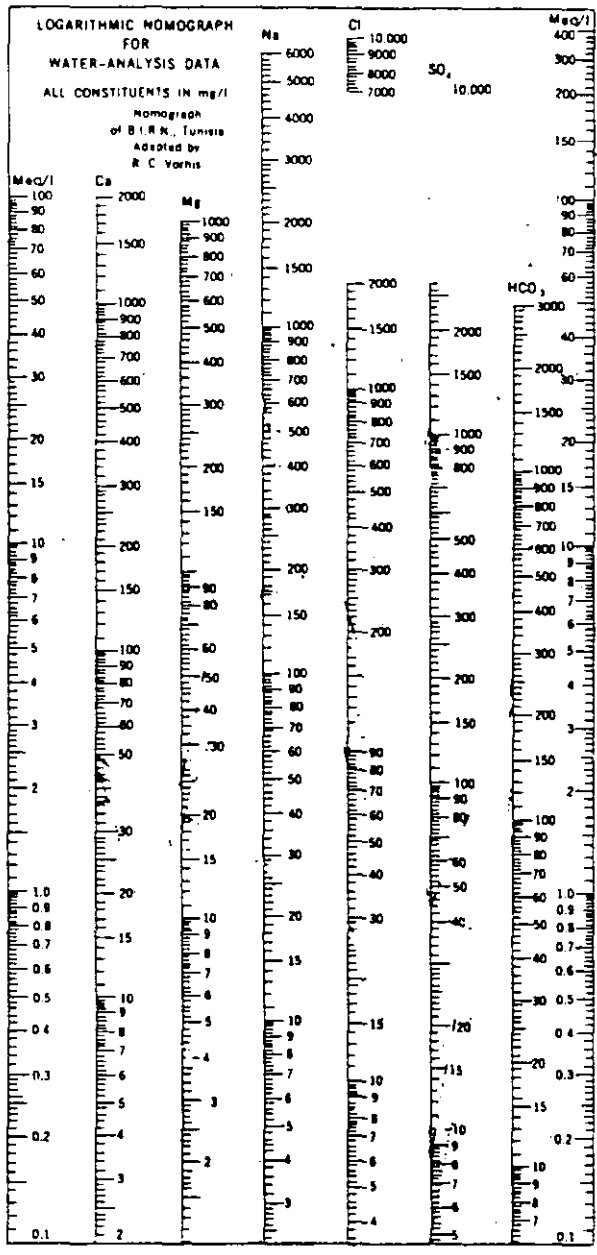
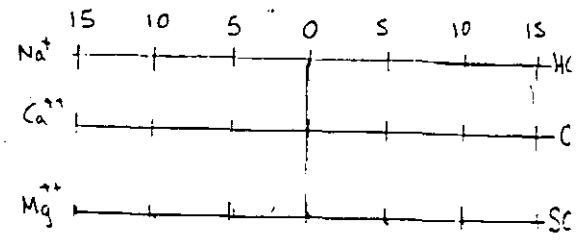
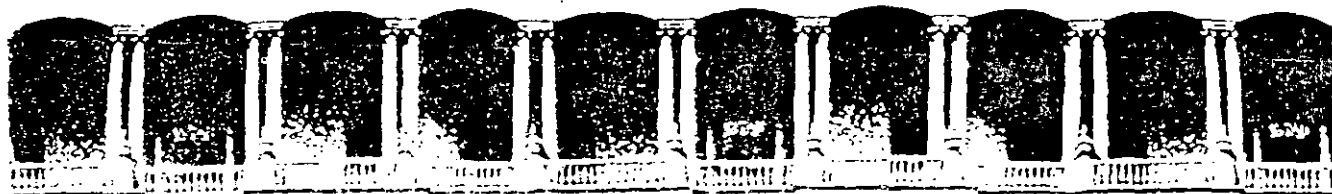


FIGURE 35.—Analyses represented by logarithmic plotting of concentration in milligrams per liter.



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
CURSOS ABIERTOS

VI CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGIA Y CONTAMINACION DE  
ACUIFEROS

M O D U L O II

HIDROGEOQUIMICA Y CONTAMIANCION DE  
ACUIFEROS

ASPECTOS GEOHIDROLOGICOS DE LA CIUDAD DE MEXICO

ING. JUAN MANUEL LESSER  
ILLADES

# Aspectos geohidrológicos de la ciudad de México'

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 m<sup>3</sup> 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 constituidas 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.



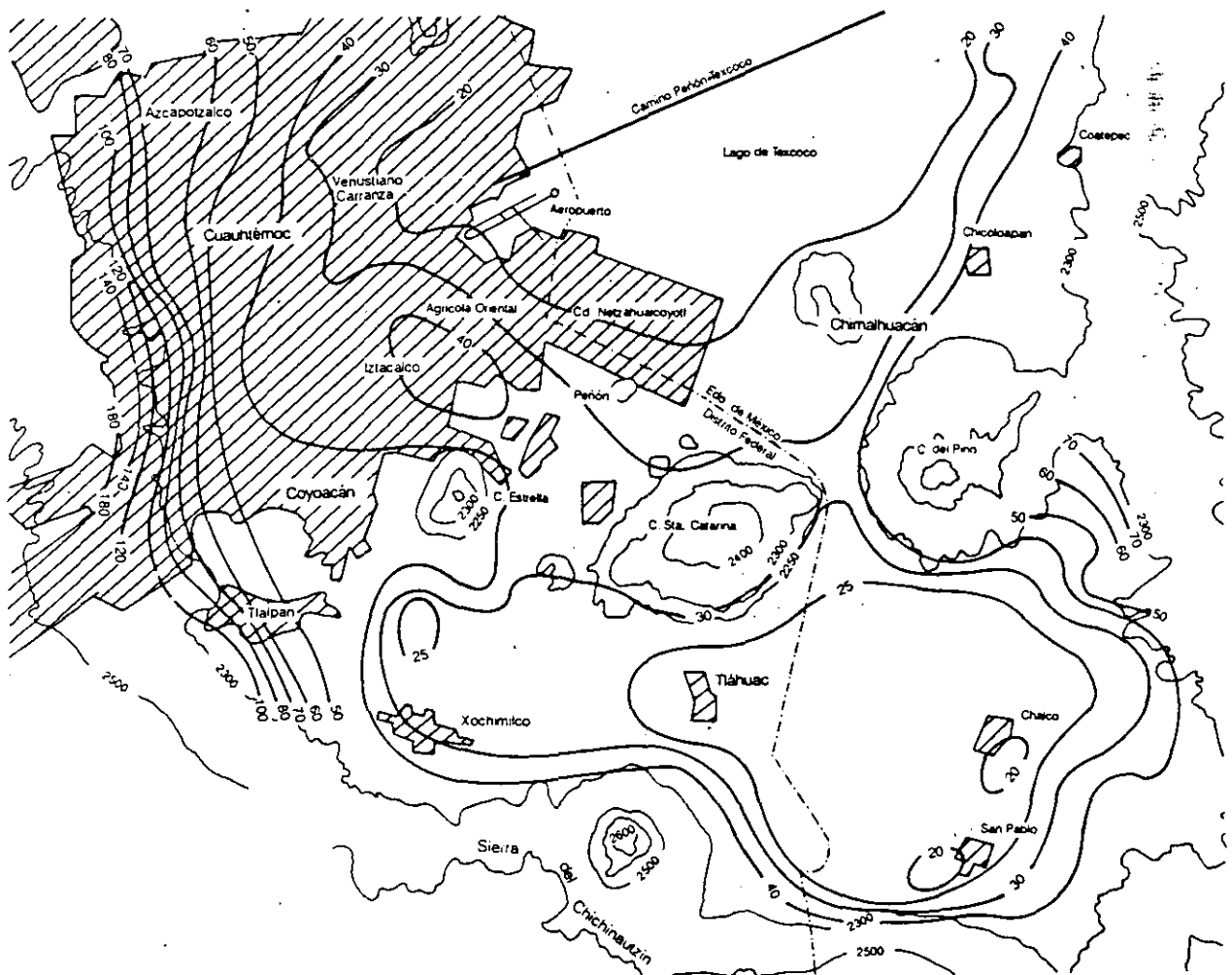
Los principales cambios en las configuraciones, de agosto de 1985 a marzo de 1987, se detectaron en el área de Tlalpan-Xotepingo, donde se observa la aparición de un nuevo cono piezométrico ocasionado por la extracción de agua subterránea en volúmenes mayores a la alimentación natural que recibe el acuífero. 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.

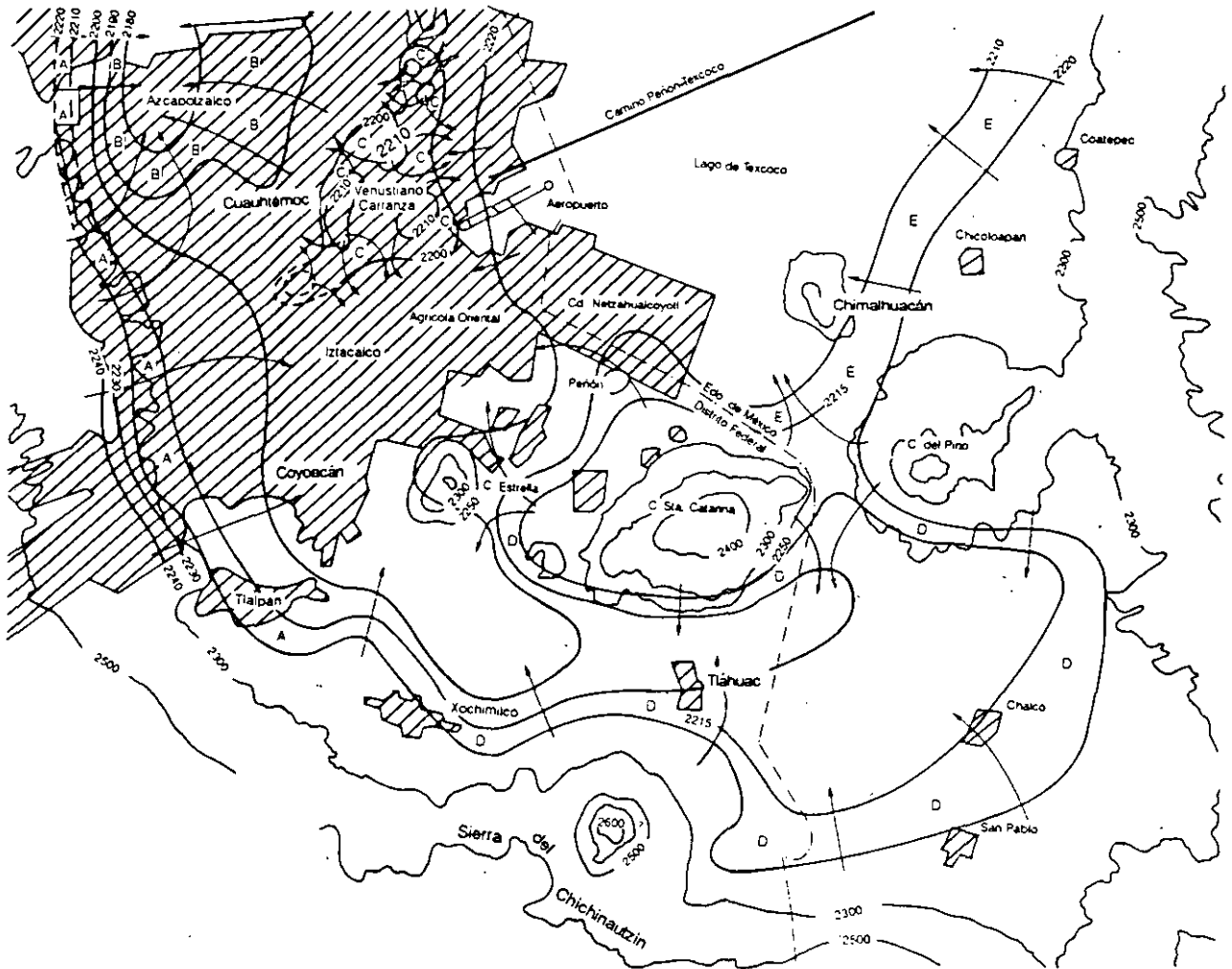
En la parte B, hacia la zona del cono piezométrico, el acuífero está sujeto a una fuerte extracción de agua subterránea; el abatimiento anual de la superficie piezométrica es de hasta 4 m y los asentamientos del terreno son moderados. Hacia la zona donde se ha detectado el domo piezométrico, la extracción 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)



2. Elevación del nivel estático en metros (octubre-1985)



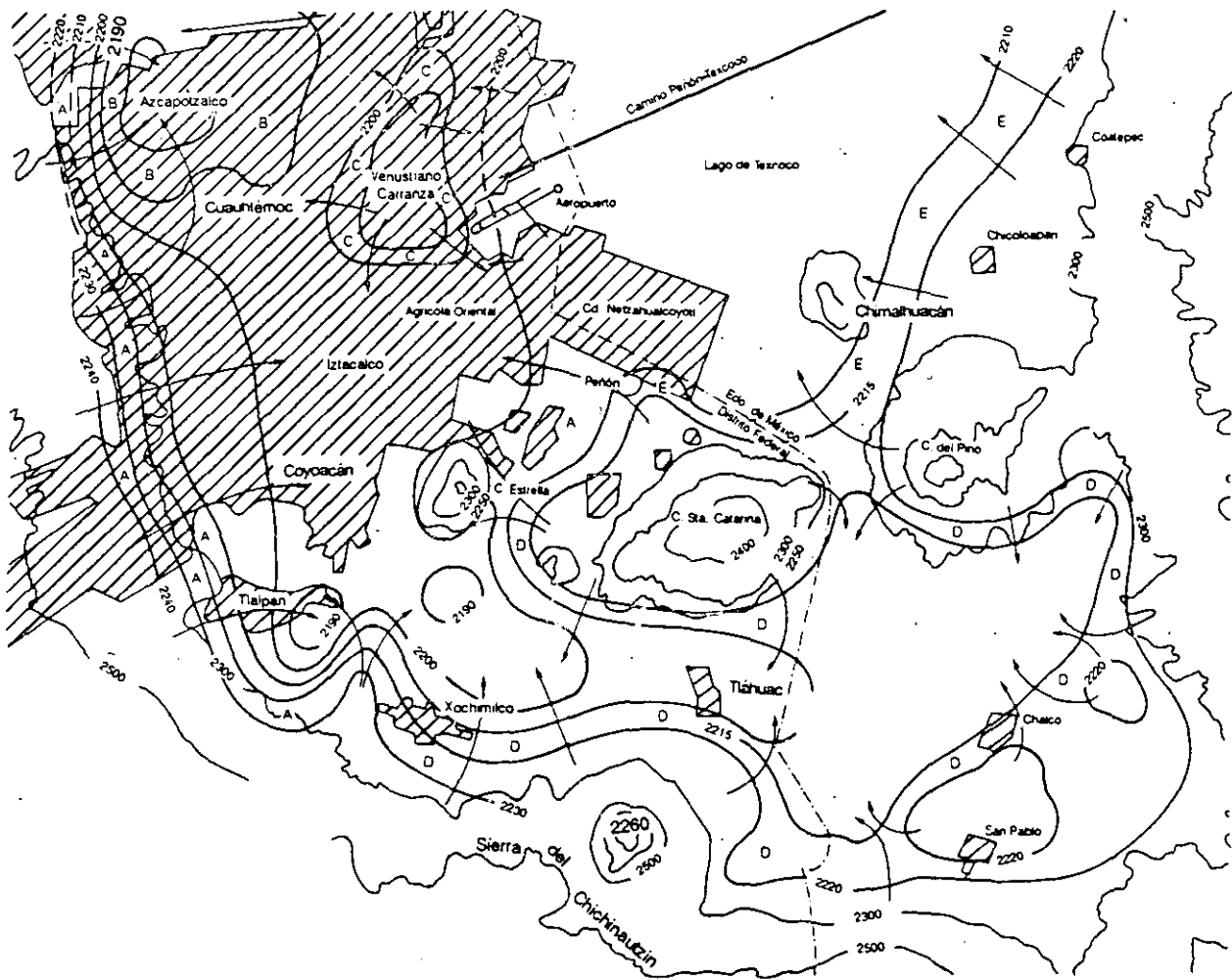
sección a lo largo del cono y el domo piezométrico. Se marcó el probable nivel freático de las arcillas (acuitardo) y la zona saturada dentro de ésta, que aportan agua al acuífero en forma de goteo.

Conforme a los datos sobre la química del agua, los análisis efectuados de 1955 a 1987 indican un incremento salino del poniente al oriente, o sea, hacia el cono piezométrico y, posteriormente, una disminución de la salinidad hacia la zona donde se ubica el domo piezométrico. La única posibilidad para lograr una disminución salina a lo largo de un flujo subterráneo es mediante la dilución o mezcla con otro tipo de agua. Si la zona central del área metropolitana es recargada por el flujo proveniente del poniente, debería presentar entre 300 y 400 ppm de sales, ya que el agua aumenta su contenido salino conforme circula en el subsuelo. Sin embargo, la presencia en el domo de concentraciones salinas

bajas, menores de 200 ppm, indica la existencia de una recarga o alimentación al acuífero con agua de muy buena calidad.

Por otra parte, el análisis de la variación respecto al tiempo de los diferentes parámetros químicos, indica que éstos se han mantenido constantes desde 1955 hasta 1987, con excepción de los cloruros, los cuales en la zona del domo, presentan un incremento paulatino. Aparentemente, la formación del domo piezométrico 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 de las redes de distribución de agua potable y la presencia de grietas que facilitan el paso del agua al acuífero. La posible existencia de material con permeabilidad menor en el área del domo y mayor hacia los flancos, podría ser una causa de la distribución de la actual superficie

## 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

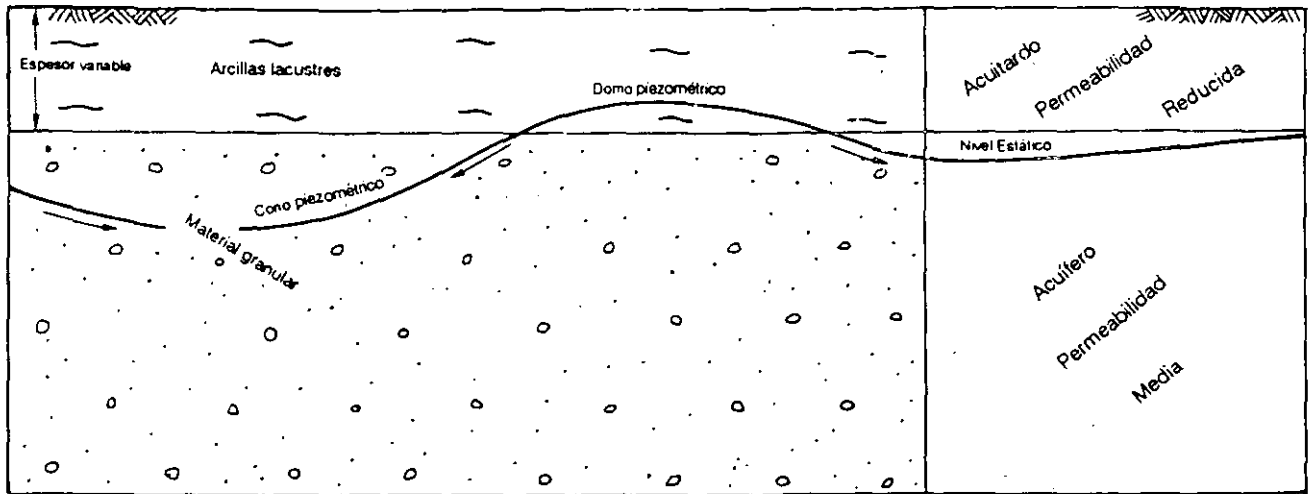
los últimos 20 años. Por otro lado, se sabe de la existencia de grietas dentro de las arcillas lacustres, que se han formado por el abatimiento de los niveles piezométricos y los asentamientos del terreno. Estas grietas podrían constituir conductos preferentes de circulación de agua a través de las arcillas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

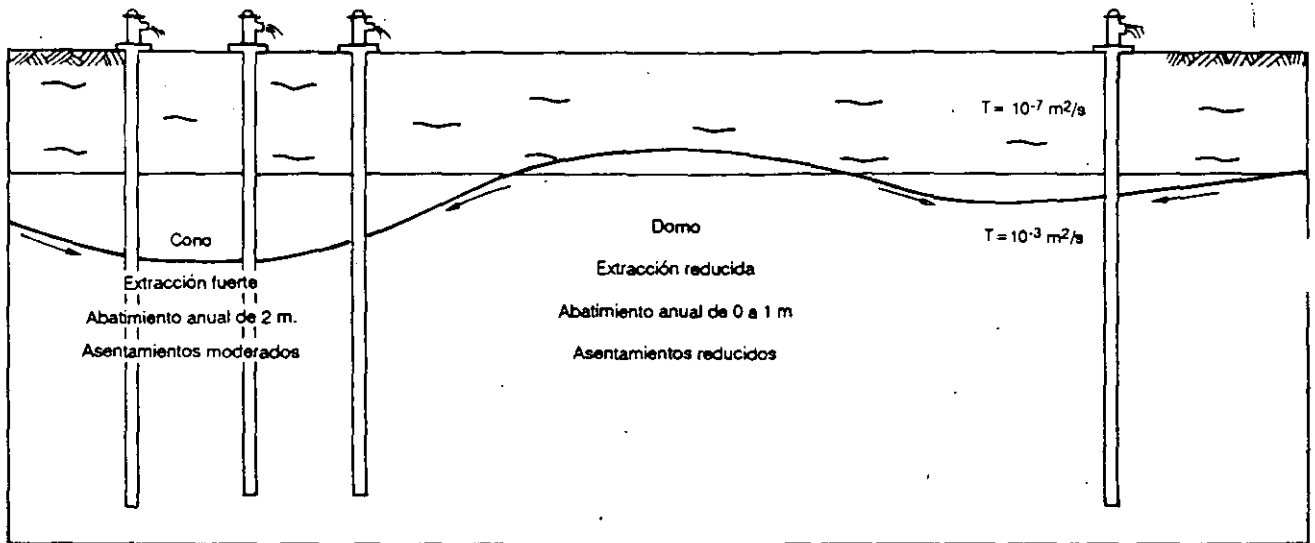
Por lo que se refiere al subsistema acuífero del Vaso del Lago de Texcoco, se detectó un flujo piezométrico del este al oeste. Existen datos

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

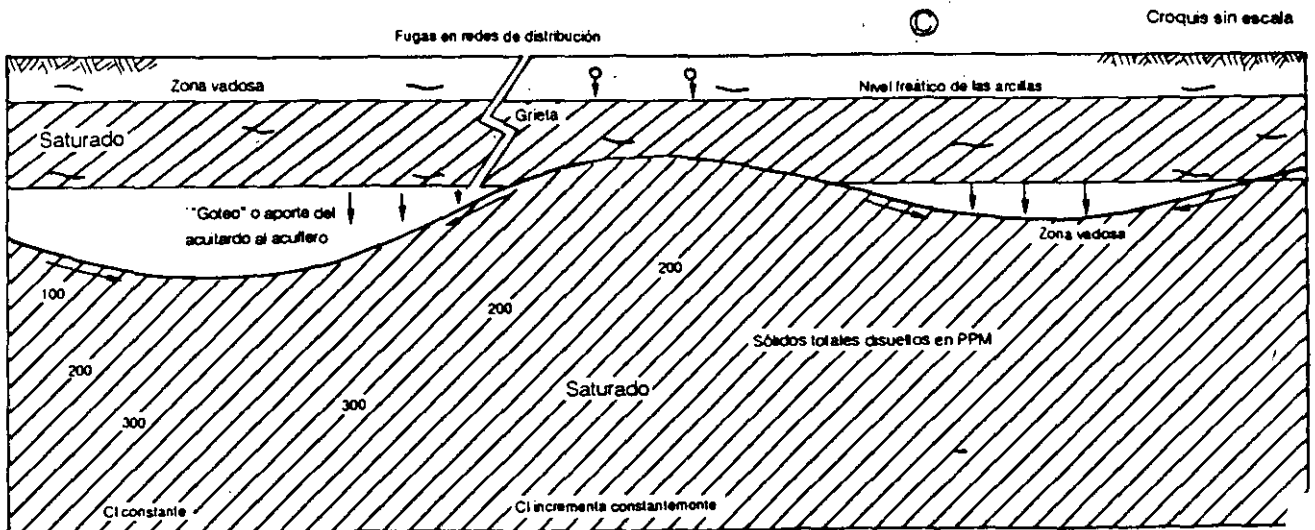
Ⓐ



Ⓑ



Ⓒ



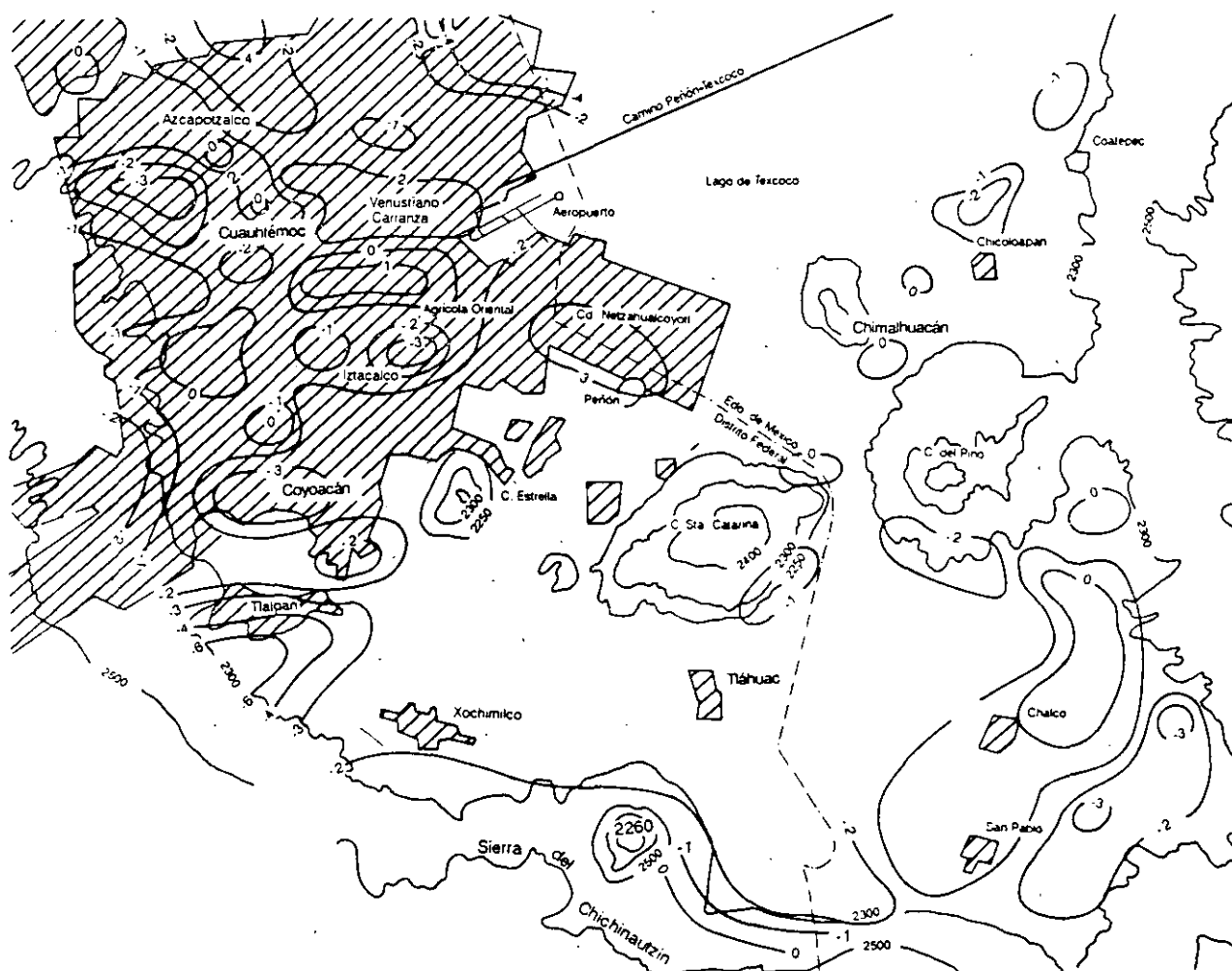
piezométricos en los alrededores de Chicoloapan; sin embargo, hacia el poniente la información geohidrológica es escasa. Se lograron detectar las curvas 2210 en la porción oriental y 2200 metros sobre el nivel del mar en la porción occidental, a la altura del Aeropuerto Internacional, o sea una variación 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	Extracción x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> anuales. La extracción por bombeo es de 195 millones de m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup> 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

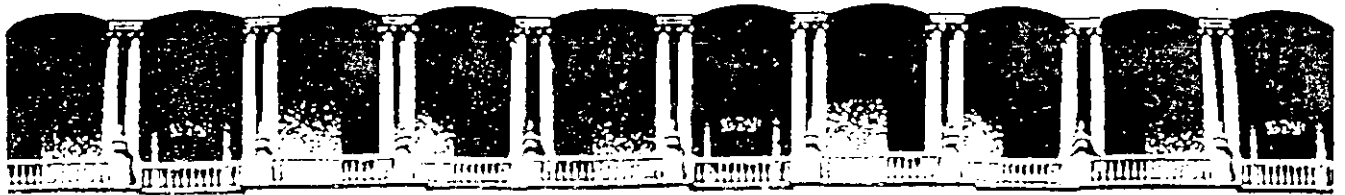
- En la zona metropolitana, el subsuelo corresponde a material granular de permeabilidad media y baja, cuya recarga proviene de la Sierra de Las Cruces; se descarga por medio de bombeo.
- En el área de Xochimilco-Chalco predominan los materiales volcánicos, principalmente lavas y escorias basálticas 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 m<sup>3</sup> 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.

<sup>1</sup> 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.



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

*CURSOS ABIERTOS*  
*VI CURSO INTERNACIONAL DE GEOHIDROLOGIA Y CONTAMINACION*  
*DE ACUIFEROS*  
**DEL 23 AL 27 DE AGOSTO DE 1993**

*MODULO II*

*HIDROGEOQUIMICA DEL ACUIFERO DE LA  
CIUDAD DE MEXICO*

*ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES*

*PALACIO DE MINERIA*



# Hidrogeoquímica del acuífero de la ciudad de México

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 hidrógeno, 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.

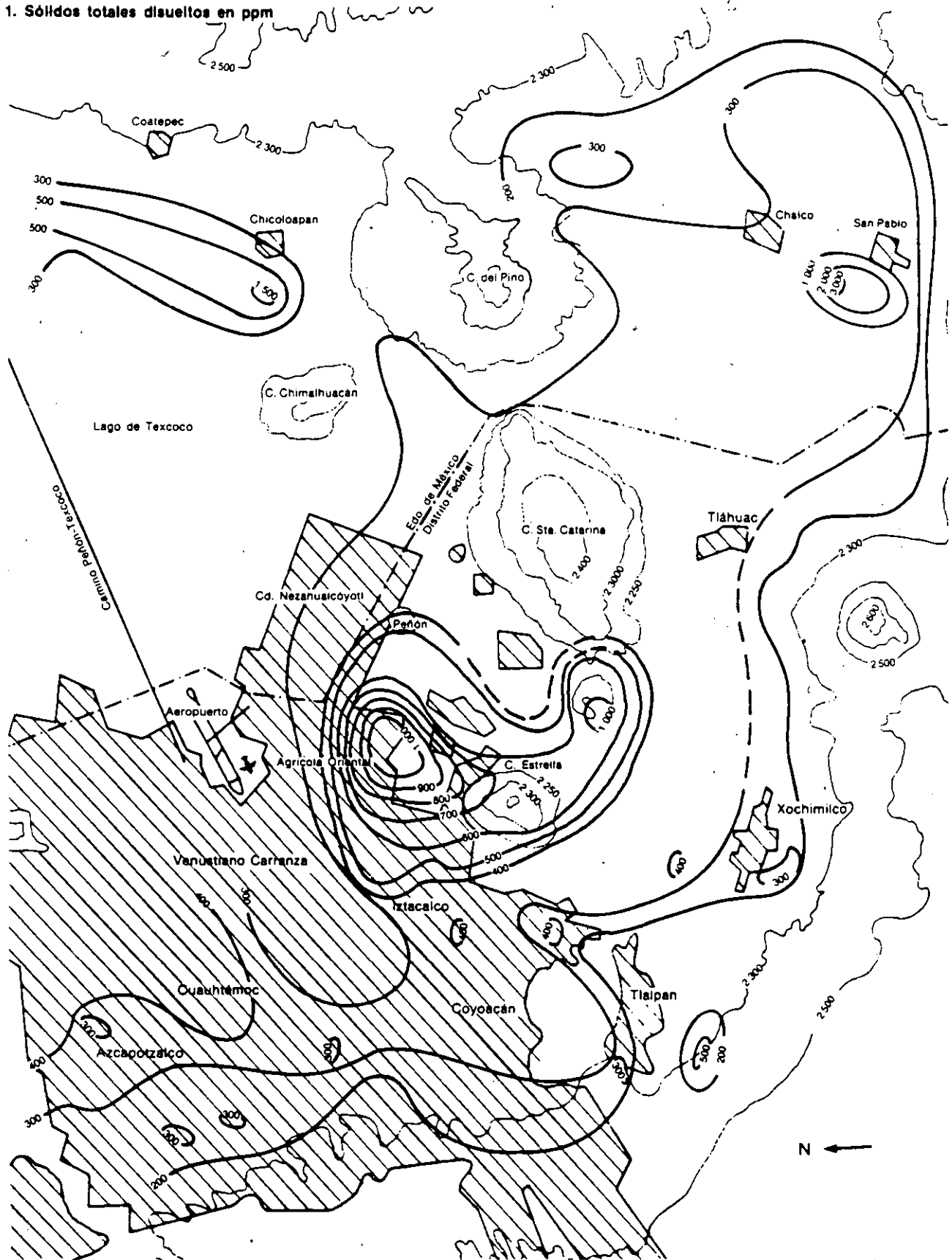
Cuando la lluvia se precipita sobre la corteza terrestre, arrastra una cierta cantidad de partículas que se encuentran suspendidas en la atmósfe-

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).

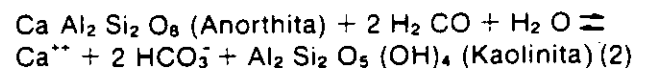
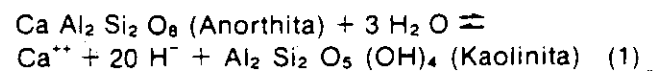
Pero, en contraste con lo anterior, el estudio demostró un incremento notable del contenido salino entre la colonia Agrícola Oriental, el Cerro de La Estrella y la Sierra de Santa Catarina; en los pozos de la colonia mencionada se detectaron hasta 1 200 ppm de sales disueltas —fueron los puntos con mayor 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

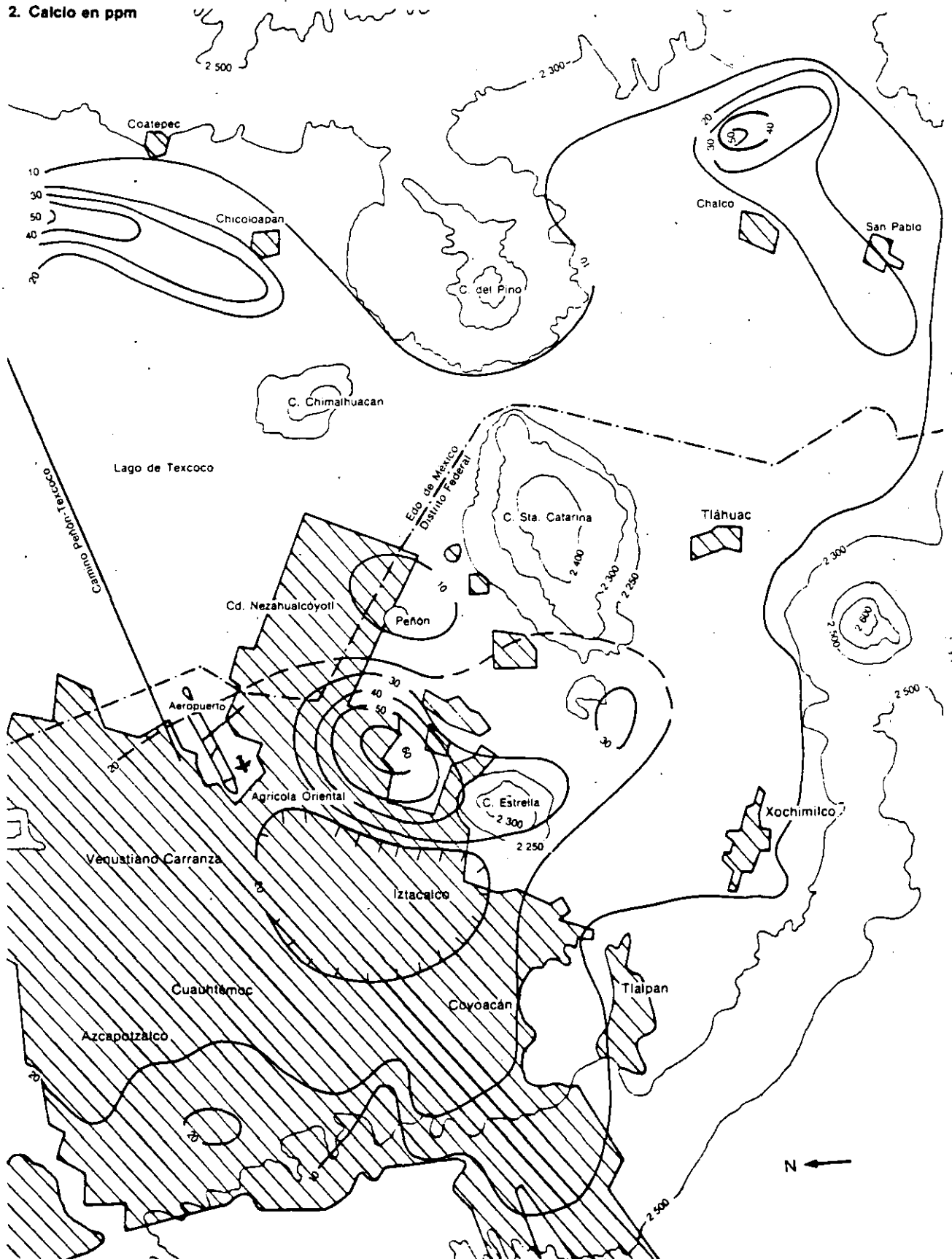
El calcio es un ión divalente de carga positiva que forma parte de la mayoría de las rocas que constituyen la corteza terrestre, por lo que es común encontrarlo disuelto en el agua. Dentro del área estudiada se considera que este elemento proviene de la disolución de los feldespatos cálcicos que conforman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

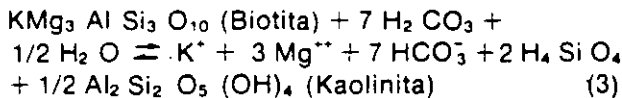


Chalco, donde existen algunos aprovechamientos que incrementan ligeramente su contenido salino a 20 ppm.

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:

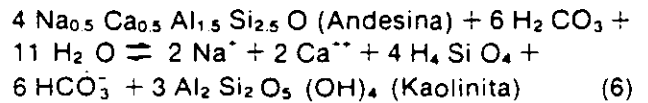
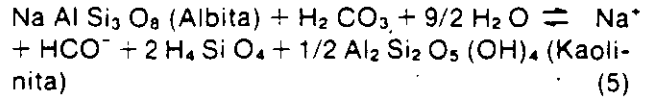
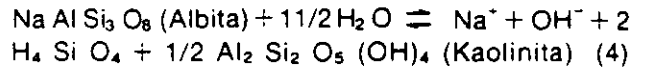


Los valores más bajos de magnesio, menores a 10 ppm, se localizan al pie de las sierras, así como en la porción nororiental del área de trabajo; esto corrobora la existencia de zonas de recarga hacia las estribaciones de las elevaciones topográficas, y se incrementan hacia la porción central, con lo 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-

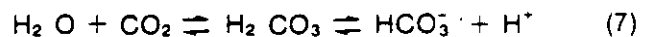
yente de las formaciones volcánicas. A continuación se muestra la reacción de la disolución de la albita y la andesina por el agua.



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 aquellas con un pH bajo contienen más fierro que las alcalinas. La concentración alta 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 ( $\text{HCO}_3$ )<sub>2</sub>, 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).

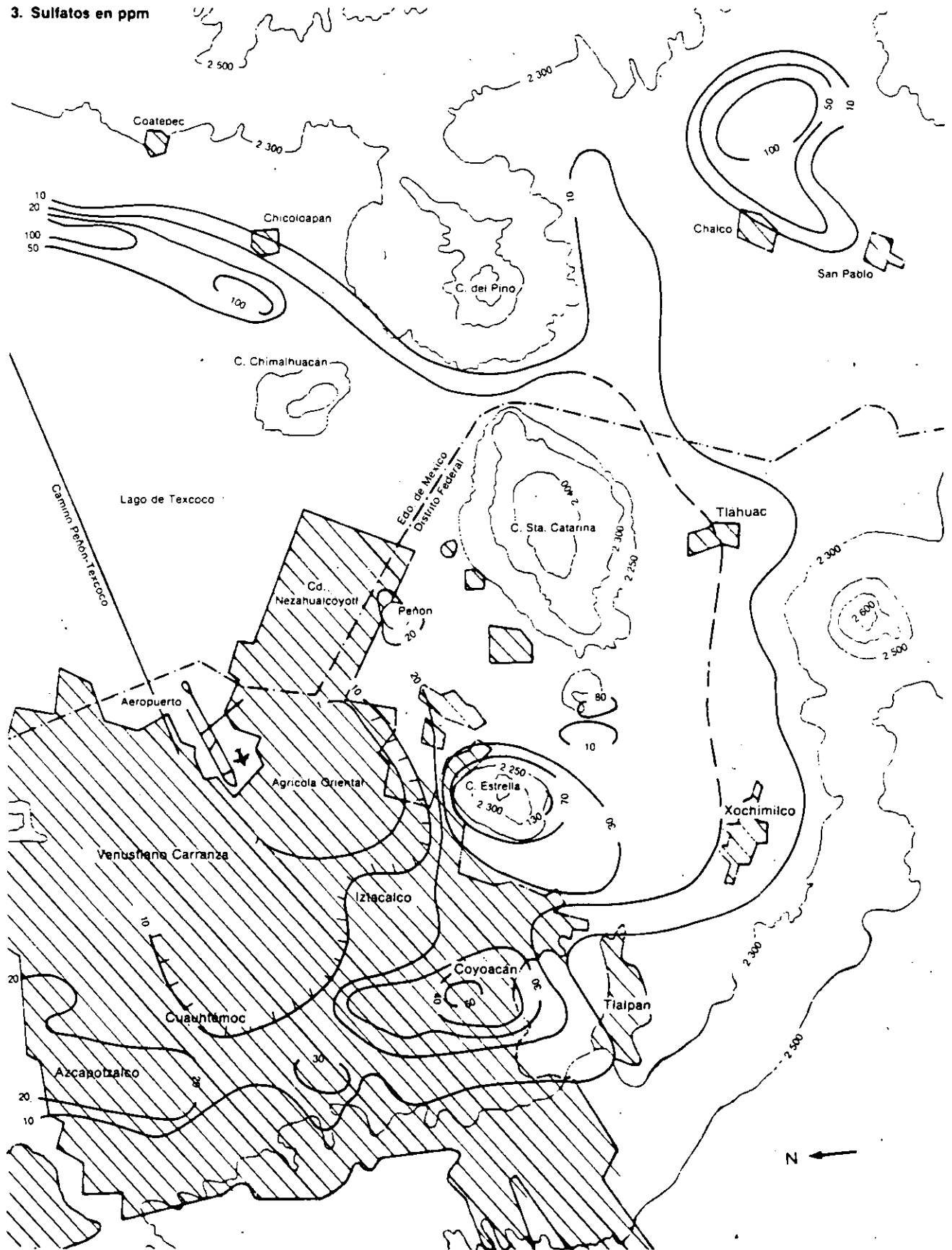
Existen otros compuestos del fierro que actúan como corrosivos incluso cuando no existe oxígeno, como en los acuíferos de cierta profundidad cuya agua ha circulado grandes distancias, como el óxido de fierro ( $\text{FeO}$ ), de color amarillo y con un pH bajo.

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.

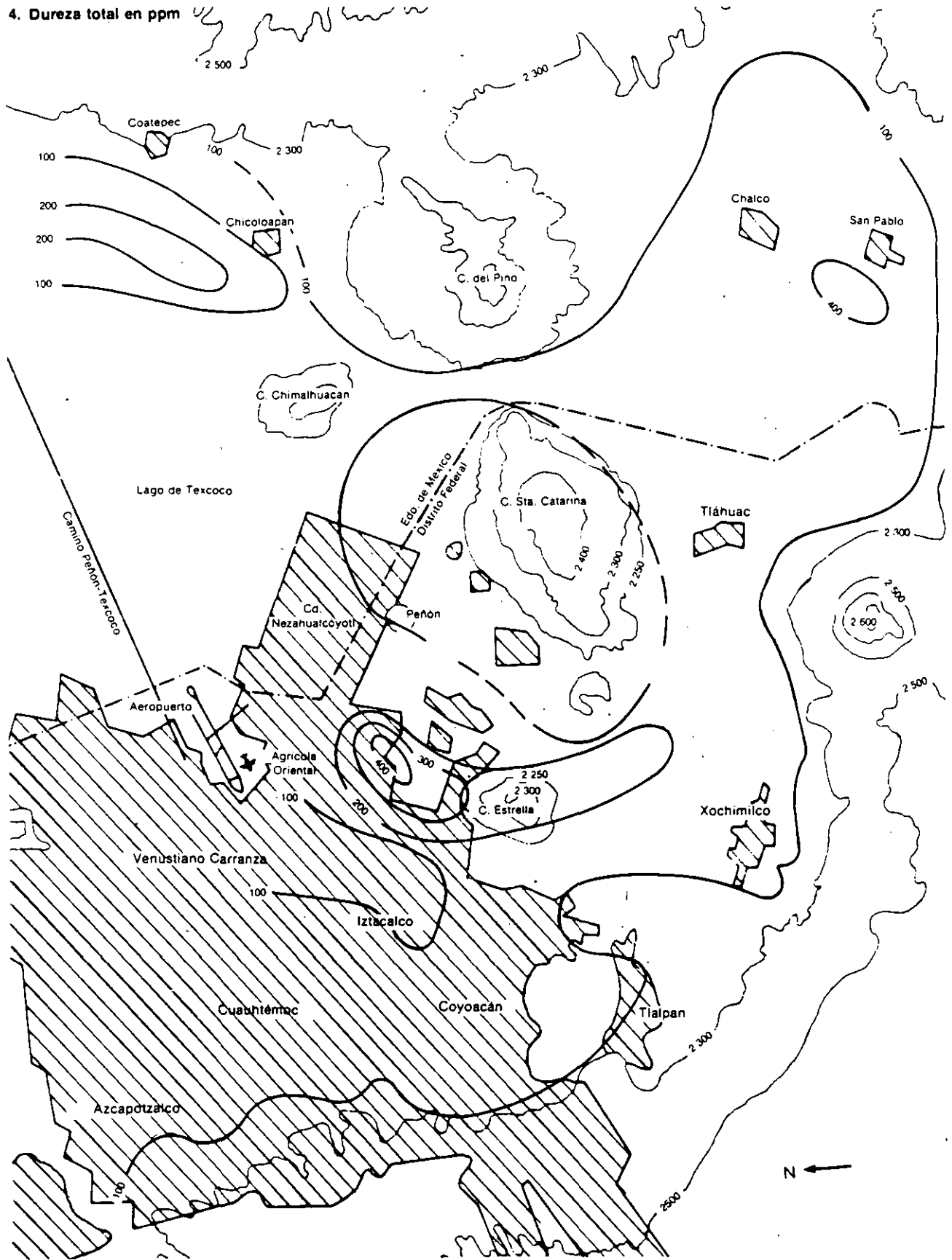
En los análisis químicos del agua se acostumbra reportar al fierro junto al manganeso por las semejanzas que hay entre ellos, pero tienen también grandes diferencias; el segundo también forma parte de rocas y suelos, pero además se encuentra en la materia orgánica ya que es uno de los nutrientes de las 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

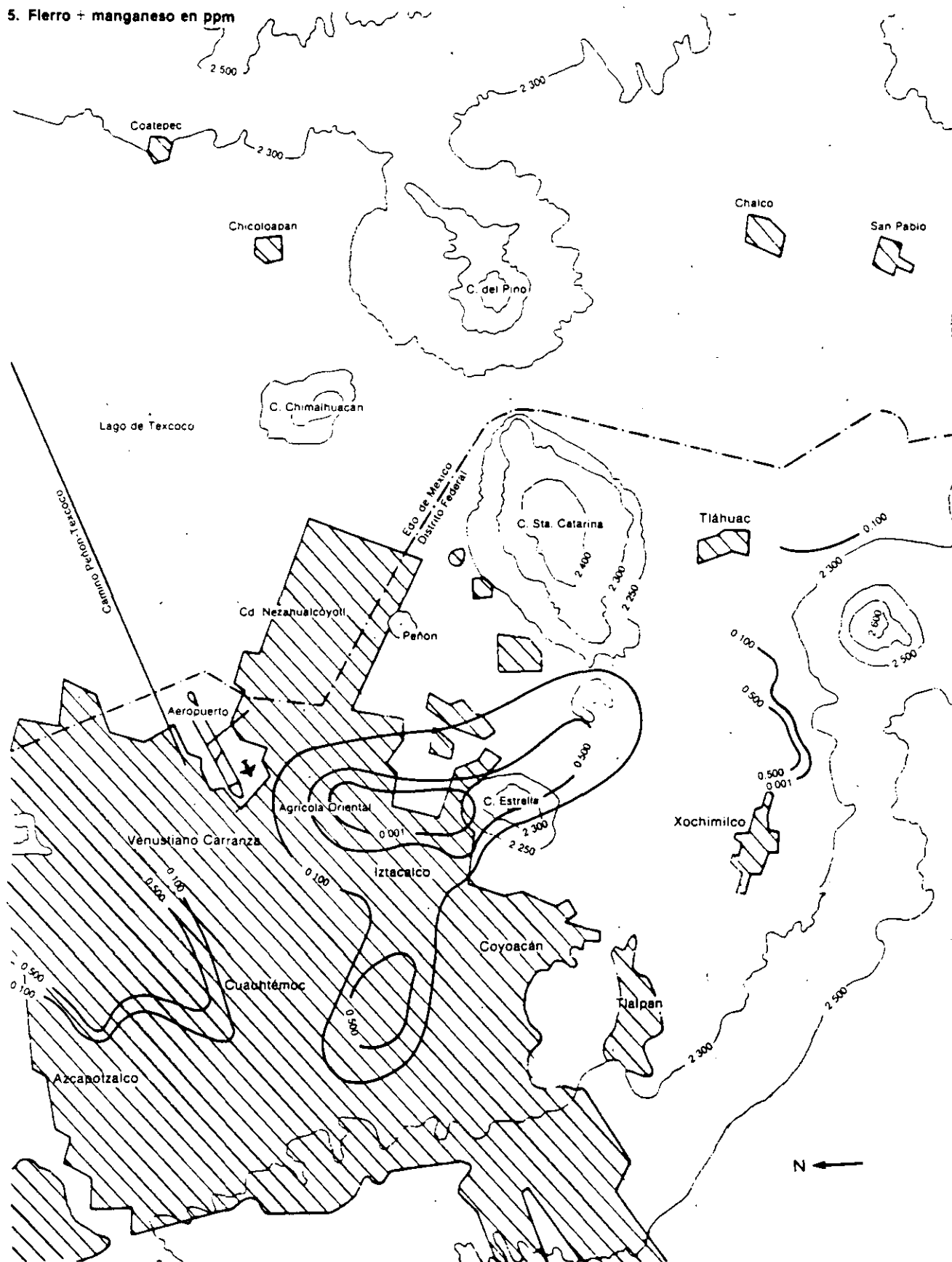


4. Dureza total en ppm





5. Hierro + 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**

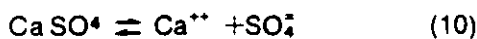
Se utilizaron aquellos recursos que sirven para evaluar las condiciones químicas del agua respecto al equilibrio químico, o sea su capacidad para precipitar o disolver una sal. El trabajo fue complejo y requirió de un largo tiempo, tanto por el índice de muestras de agua como por la cantidad de reacciones 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 *Kai* es igual a las actividades de los productos entre la de los reactantes:

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

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

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:

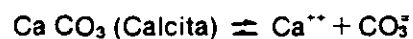
$$-\log \gamma_i = \frac{Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + Ba_i \sqrt{I}} \quad (15)$$

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 × 10<sup>-9</sup>); *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 *Kai*, con la constante de equilibrio *Ke*. Para valores de *Kai* mayores que *Ke*, la muestra se encuentra sobresaturada y para valores de *Kai* menores que *Ke*, 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.

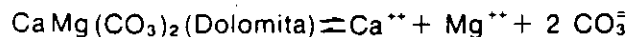
En párrafos anteriores se mostró la reacción química y la constante de actividad iónica de la anhidrita. A continuación se presentan las reacciones de disolución de la calcita, el yeso y la dolomita, por ser las que ocurren en la naturaleza con más frecuencia:



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



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



$$\text{Kai (Dolomita)} = [\text{Ca}^{++}] [\text{Mg}^{++}] [\text{CO}_3^-]_2 \quad (19)$$

Las constantes de equilibrio  $K_e$  de los minerales anteriores son las siguientes:

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

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

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

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

## Resultados

El valor de la presión del bióxido de carbono ( $\text{PCO}_2$ ) en el agua que se encuentra en contacto con la atmósfera y en equilibrio es de  $0.316 \times 10^{-3}$ , 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 ( $K_e$ ). Para ello se dividió Kai/ $K_e$ , 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 1000 milésimas (que en algunos casos llegan incluso a las 5000 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 1000 milésimas, excepto en algunas puntas locales (véase ilustración 6).

## Variación de la salinidad respecto al tiempo

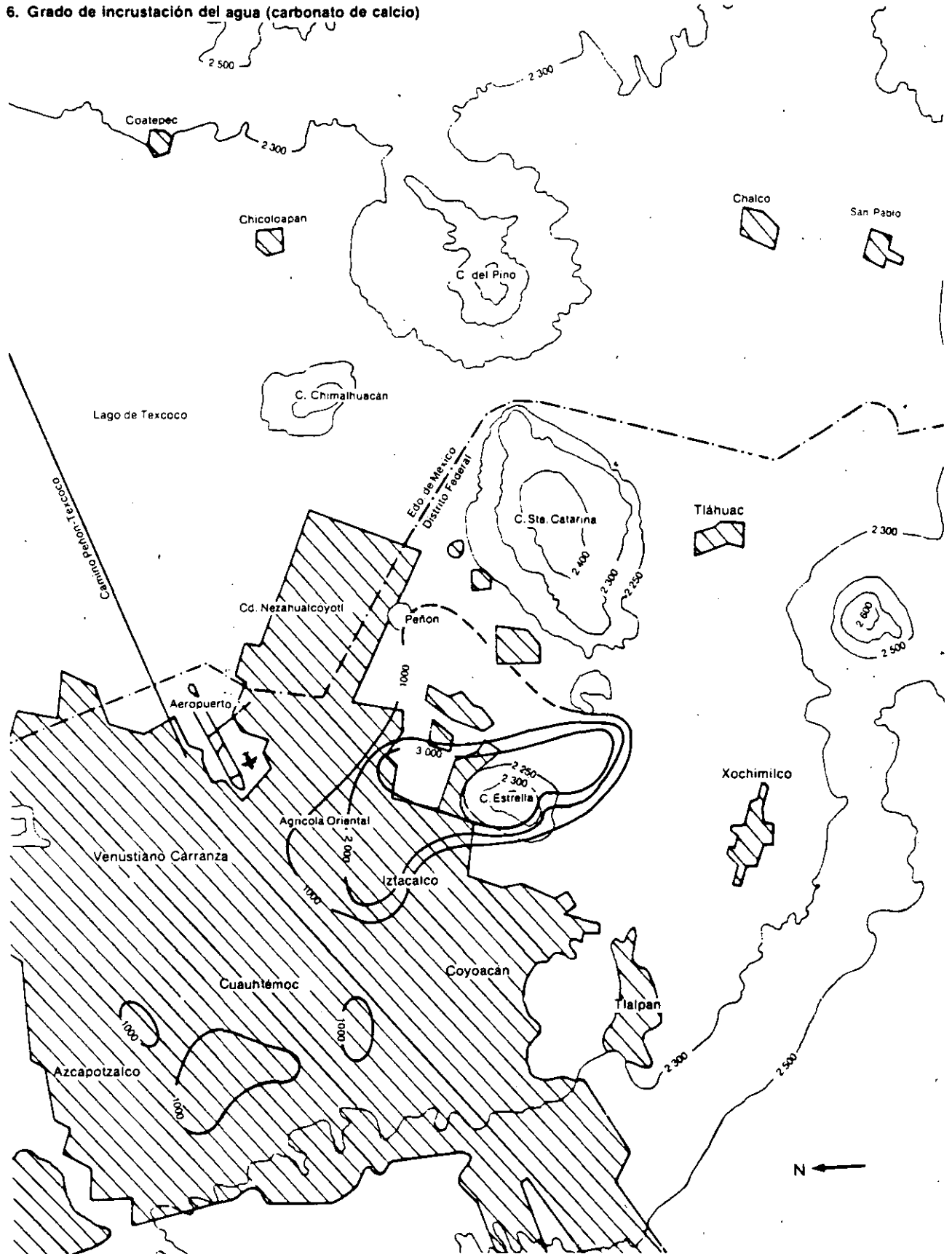
### Información disponible

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.

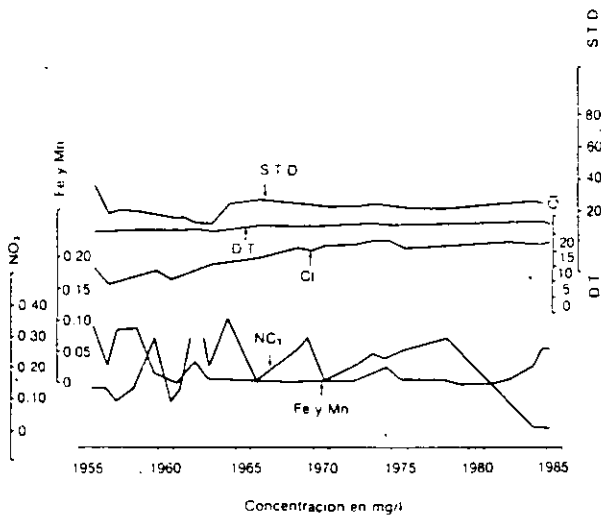
El estudio de la variación de la salinidad respecto al tiempo se efectuó en 100 pozos distribuidos en toda la zona metropolitana, de los cuales 30 no mostraron cambio alguno. A continuación se describen los principales efectos observados:

- 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).

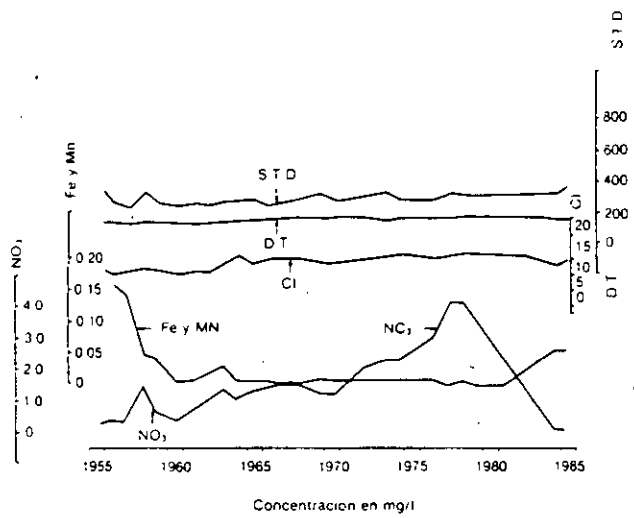
6. Grado de incrustación del agua (carbonato de calcio)



7. Pozo 15 (Albert y Berlin)



9. Pozo 26 (Axotla)



Familias de agua

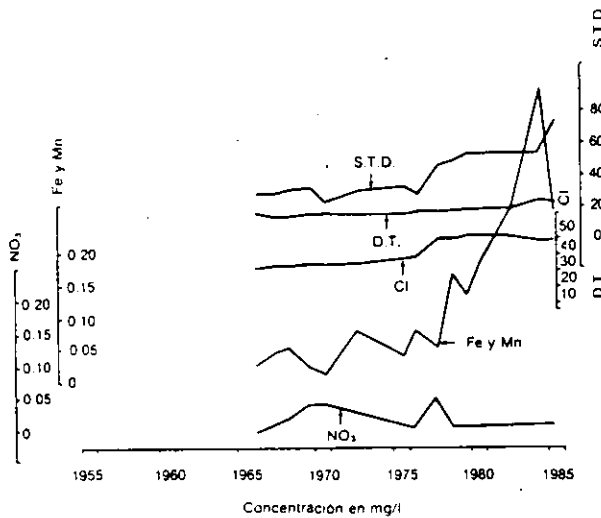
Se denomina familia de agua a la composición química representada por el principal catión y el principal anión en solución. Existen varios métodos para deducir la familia de agua a que pertenece una muestra. En este trabajo se utilizó el denominado de Piper o de Diagramas Triangulares, que consiste en 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,

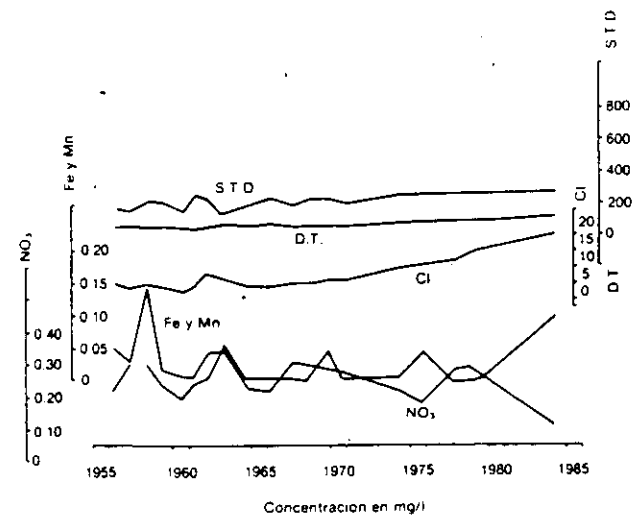
que no permiten la incorporación de cantidades significativas de sales que pudieran modificar su composición química. Esta familia se encontró al poniente, tanto al pie de la Sierra de Las Cruces como en la parte baja.

- 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.

- <sup>1</sup> 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 ABIERTOS  
VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
MODULO II: CONTAMINACION DE ACUIFEROS**

**PROSPECCION DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
POR HIDROCARBUROS**

**ING. J. MANUEL LESSER I.**

## 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

### RESUMEN

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-Nonaqueos 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 cancerígenos, 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, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 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
<b>ALCANOS</b>			
n-PENTANO	0.33	0.44	1.12
n-HEXANO	8.44	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
<b>CICLOALCANOS</b>			
CICLOPENTANO	0.96	1.76	0.67
METILCICLOPENTANO	6.51	10.29	5.01
CICLOHEXANO	10.40	7.63	7.13
METILCICLOHEXANO	22.00	14.55	18.07
ETILCICLOPENTANO	2.03	4.38	2.34
TRIMENTILCICLOPENTANO	3.64	8.12	4.18
<b>AROMATICOS</b>			
BENCENO	3.27	2.22	3.61
TOLUENO	16.19	7.94	12.02



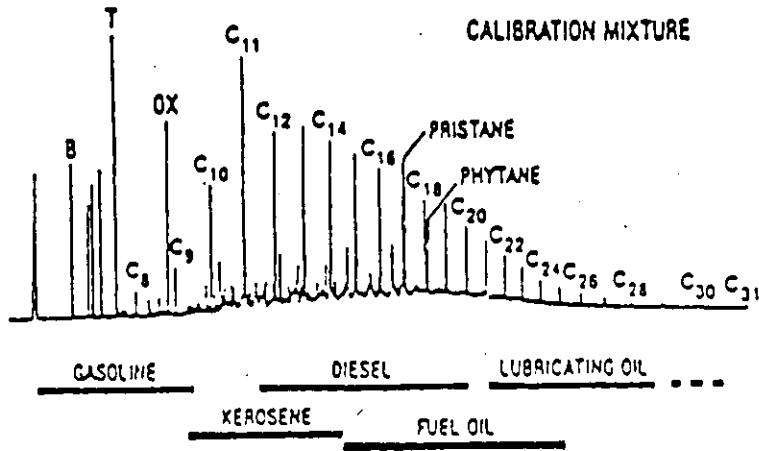


FIGURA 1. CROMATOGRAMA DE MEZCLA DE HIDROCARBUROS (MODIFICADA DE SENN AND JOHNSON, 1985)

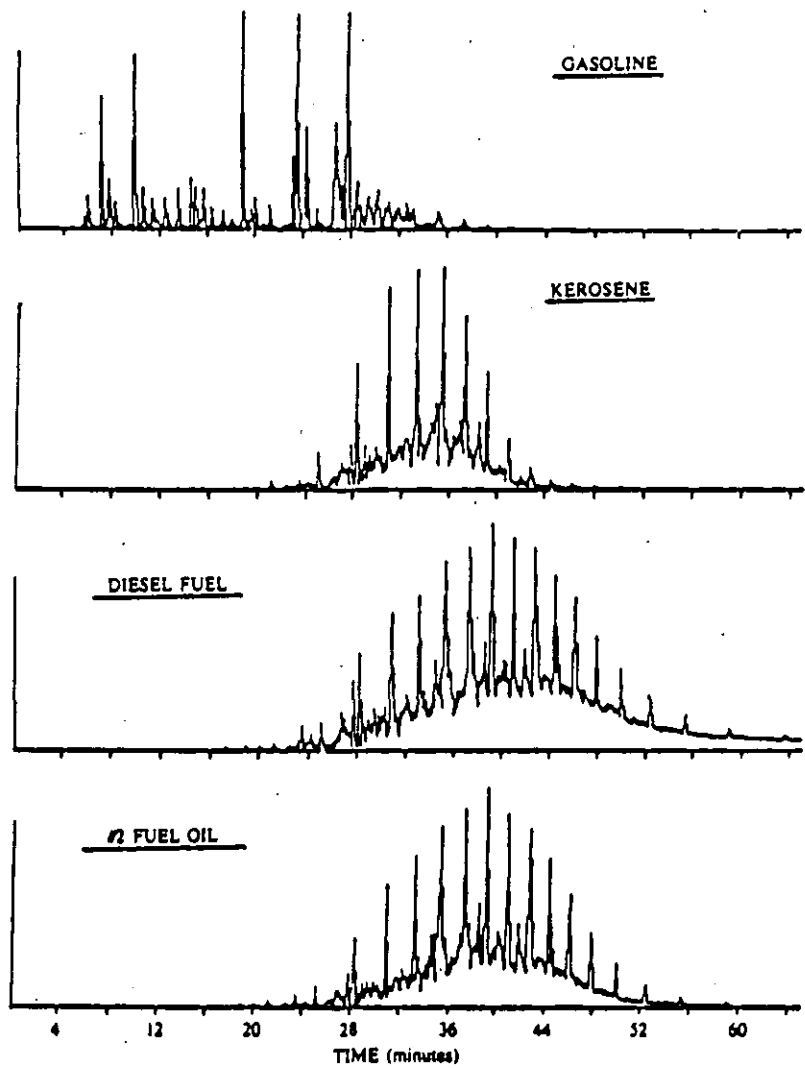
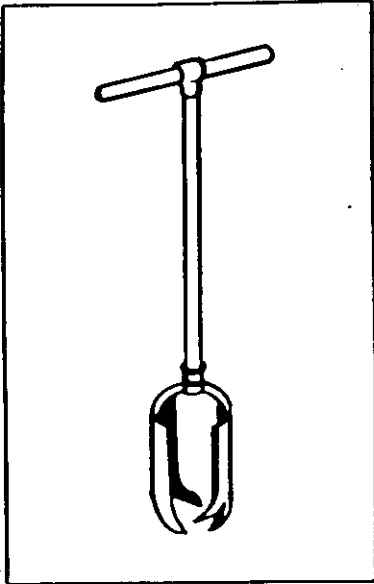
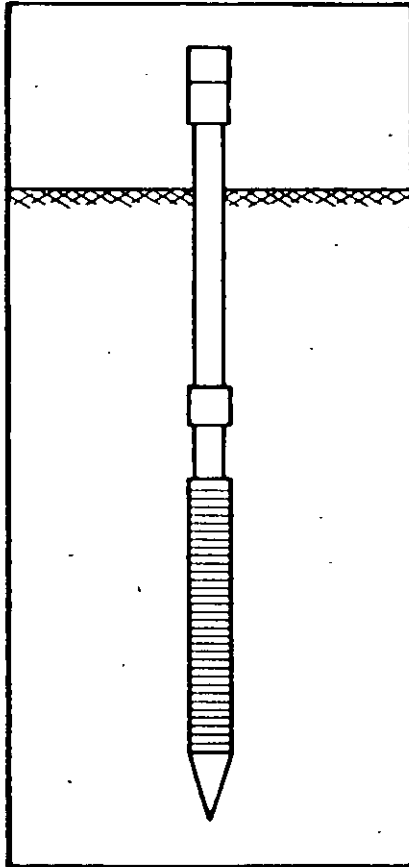


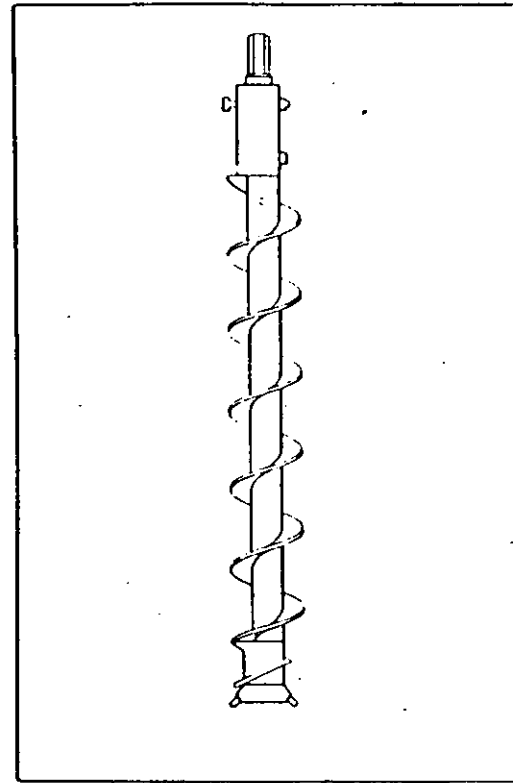
FIGURA 2. CROMATOGRAMAS DE DIFERENTES HIDROCARBUROS (DE CALABRESE Y KOSTECKY, 1989)



MUESTREADOR MANUAL



MUESTREADOR MEDIANTE  
INCADO DE TUBERIA



MUESTREADOR DE MAQUINA ROTARIA

# 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

## RESUMEN

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 hidrocarburos fresco de otro antiguo.

## REFERENCIAS

CALABRESE, E.J. AND P.T. Kostecki. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 2. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assesment Analytical Methodologies. Lewis Publishers, Inc. 515 p.

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.

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.

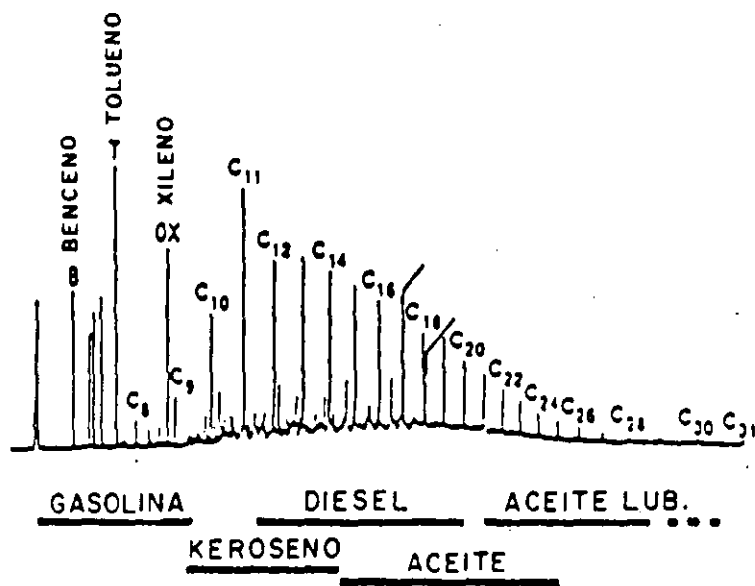
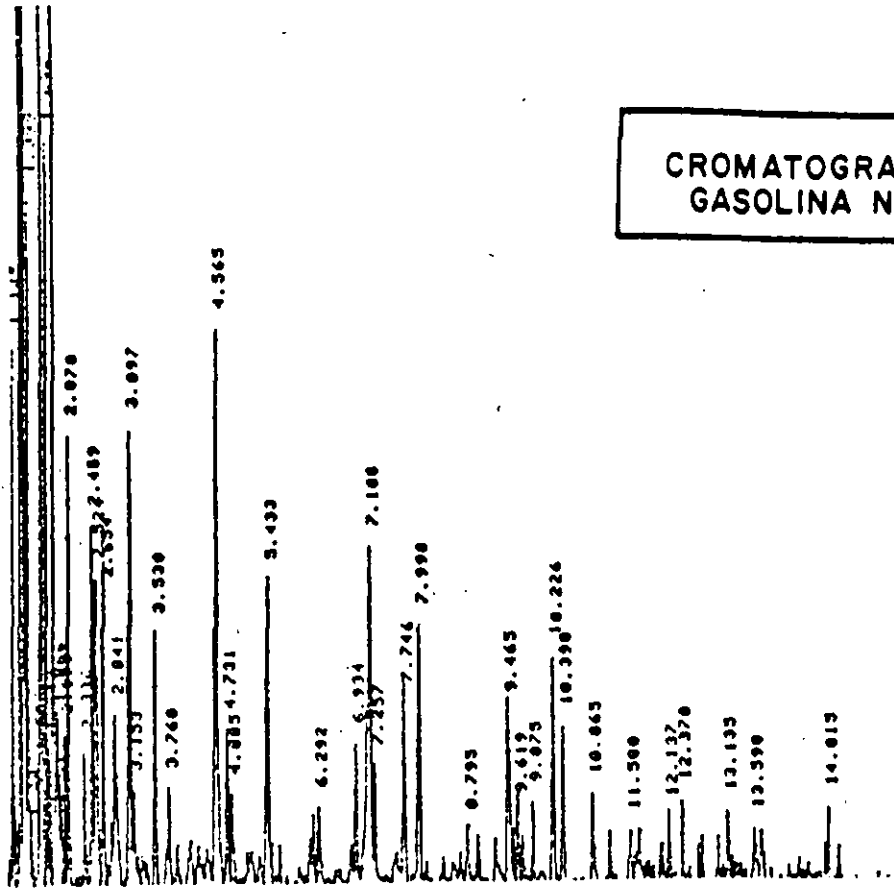


FIGURA 1 CROMATOGRAMA DE UNA MEZCLA DE  
 HIDROCARBUROS.  
 (MODIFICADA DE SENN AND JOHNSON 1985)

1.422  
1.815

CROMATOGRAMA DE GASOLINA NOVA



CROMATOGRAMA DE DIESEL

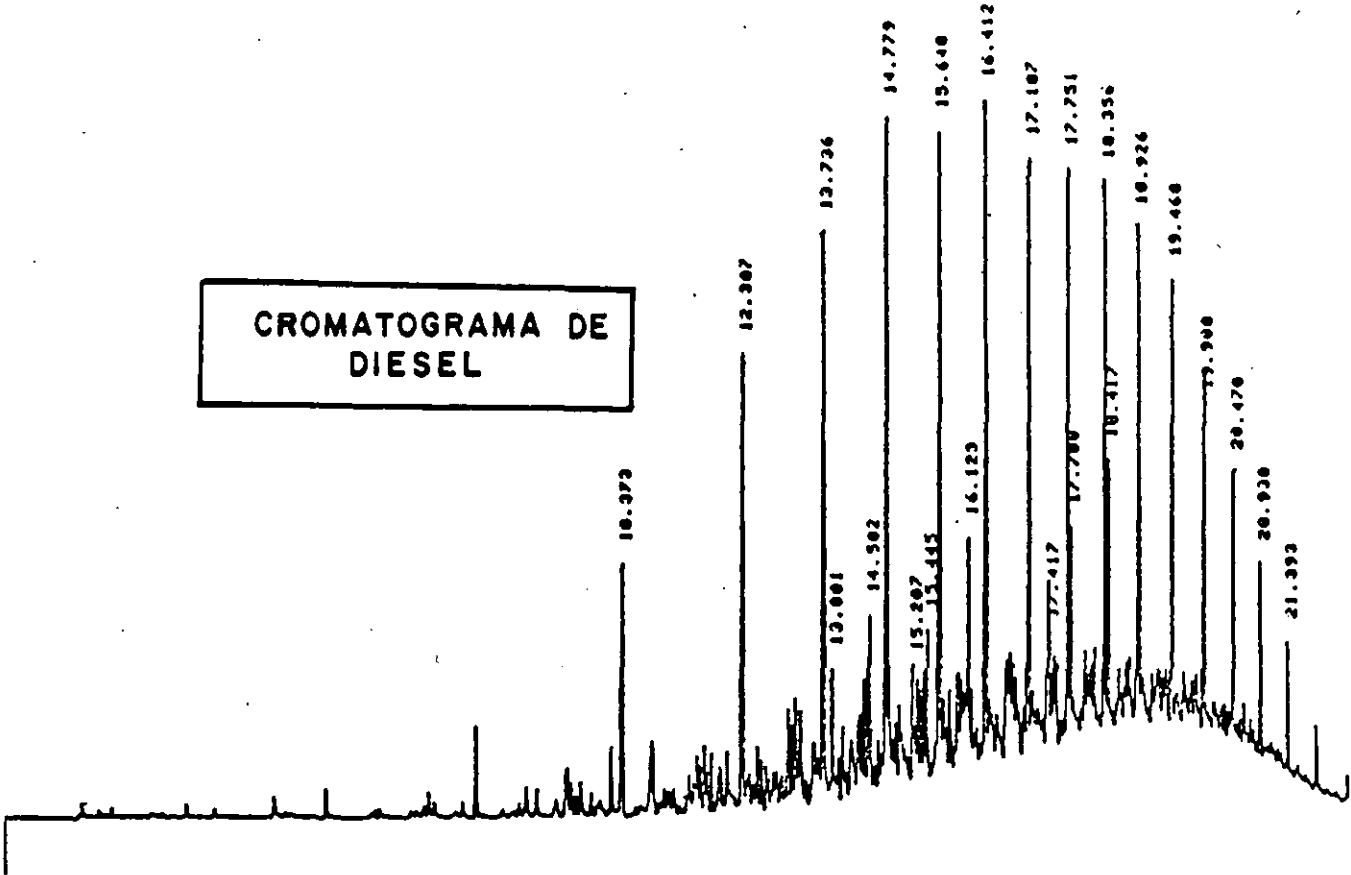


FIGURA 2.- CROMATOGRAMAS TÍPICOS DE GASOLINA NOVA Y DIESEL

FIGURA 3a  
GASOLINA NOVA FRESCA

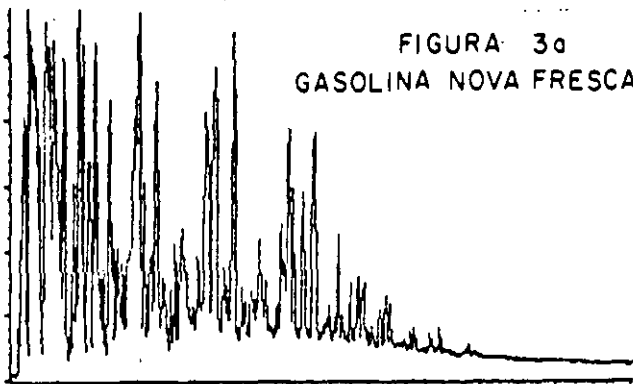


FIGURA 3b  
GASOLINA NOVA  
INTEMPERIZADA

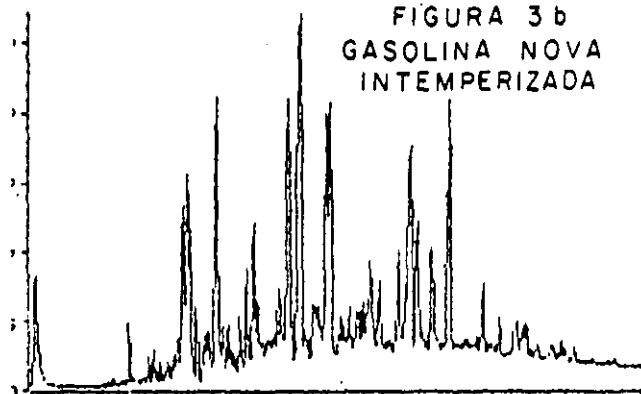


FIGURA 4a  
DIESEL FRESCO

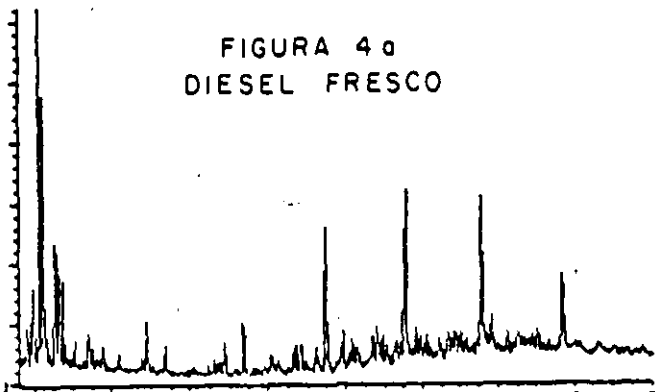


FIGURA 4b  
DIESEL INTEMPERIZADO

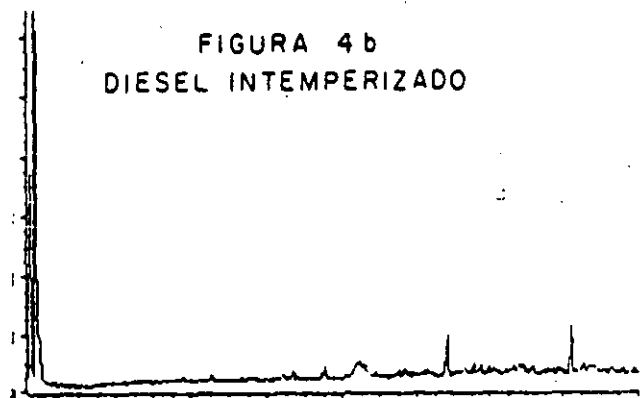


FIGURA 5a  
PETROLEO FRESCO

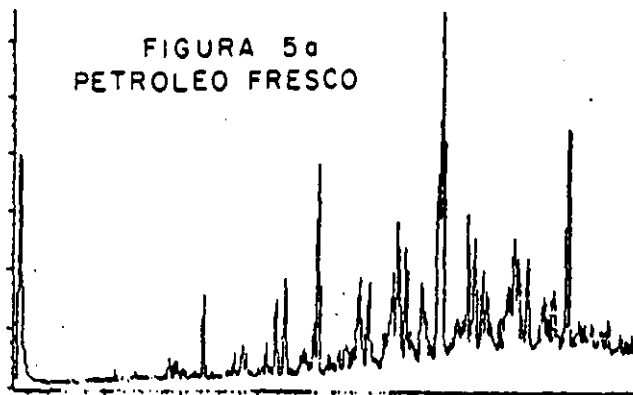
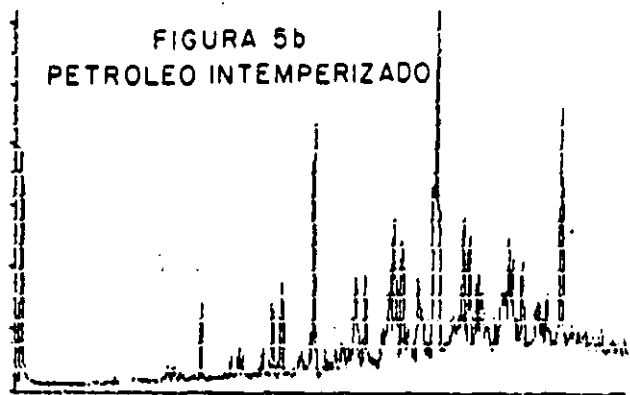


FIGURA 5b  
PETROLEO INTEMPERIZADO





# COMPORTAMIENTO DE HIDROCARBUROS A LA INTEMPERIE, RESPECTO AL TIEMPO

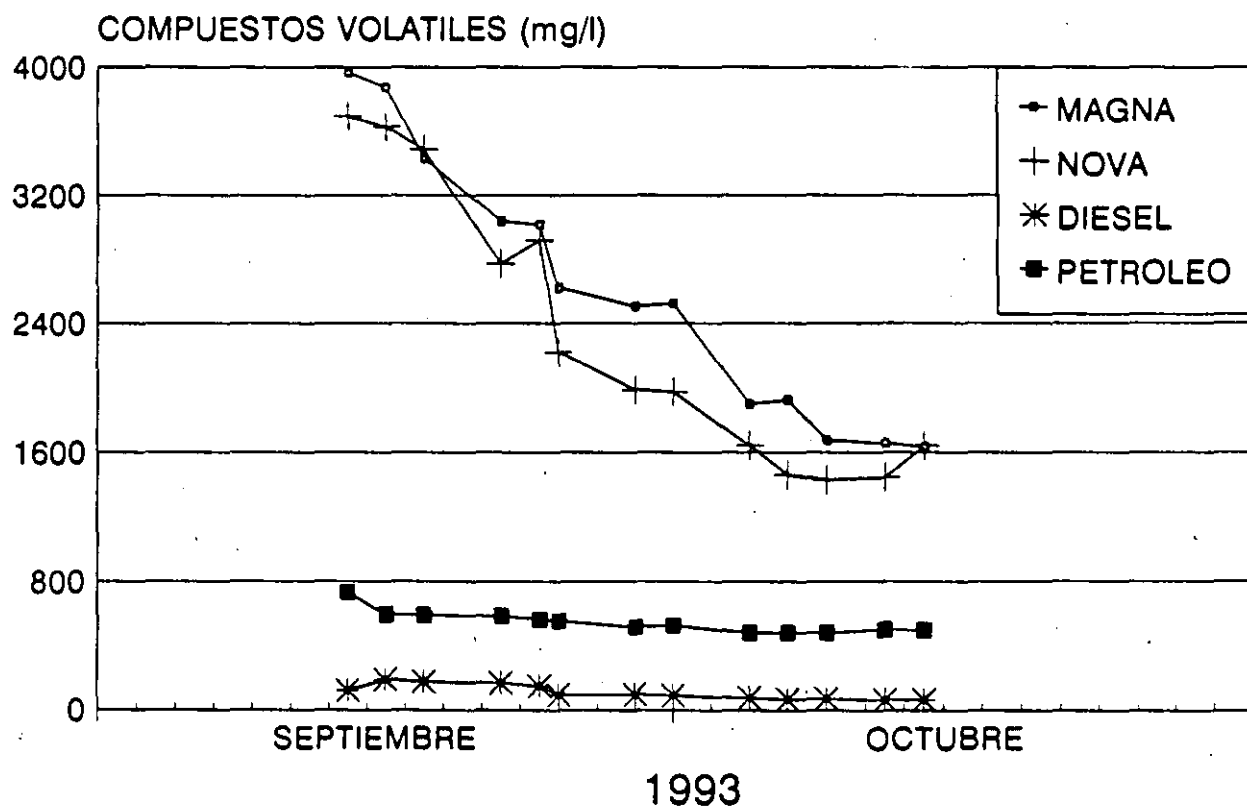


FIGURA 6

## **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 lá 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) bideogradación 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 taque 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 1. 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. 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.

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.

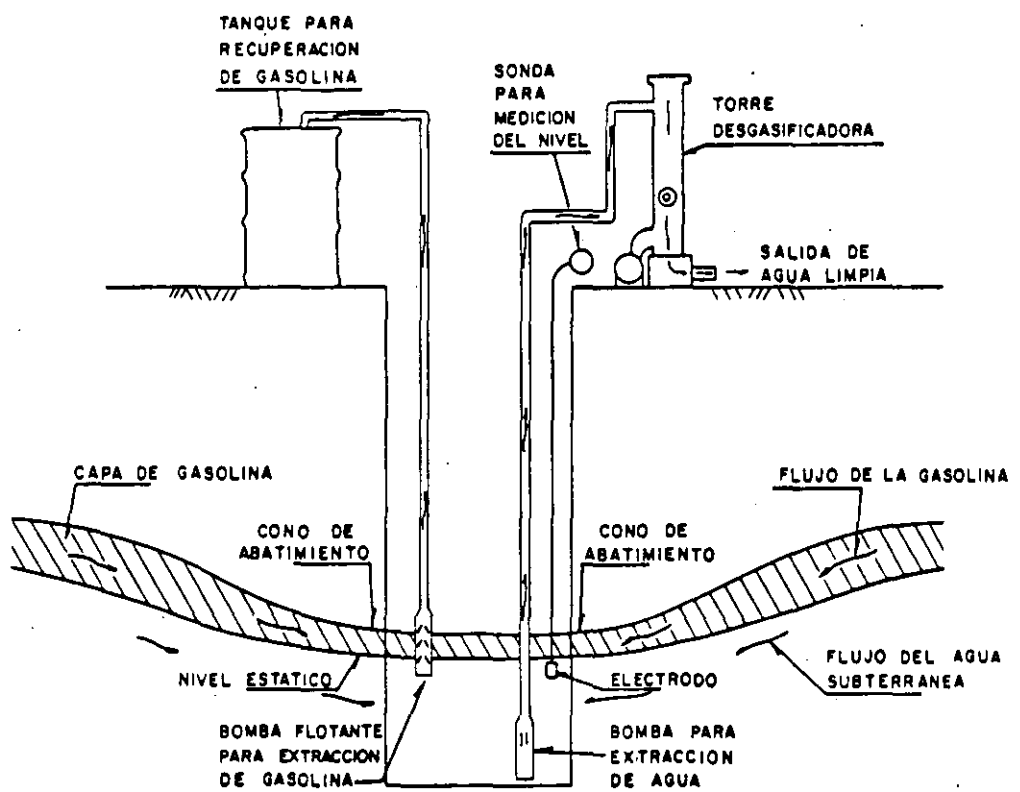


FIGURA 1.- EXTRACCION DE HIDROCARBUROS POR BOMBEO  
 Y TRATAMIENTO EN SUPERFICIE

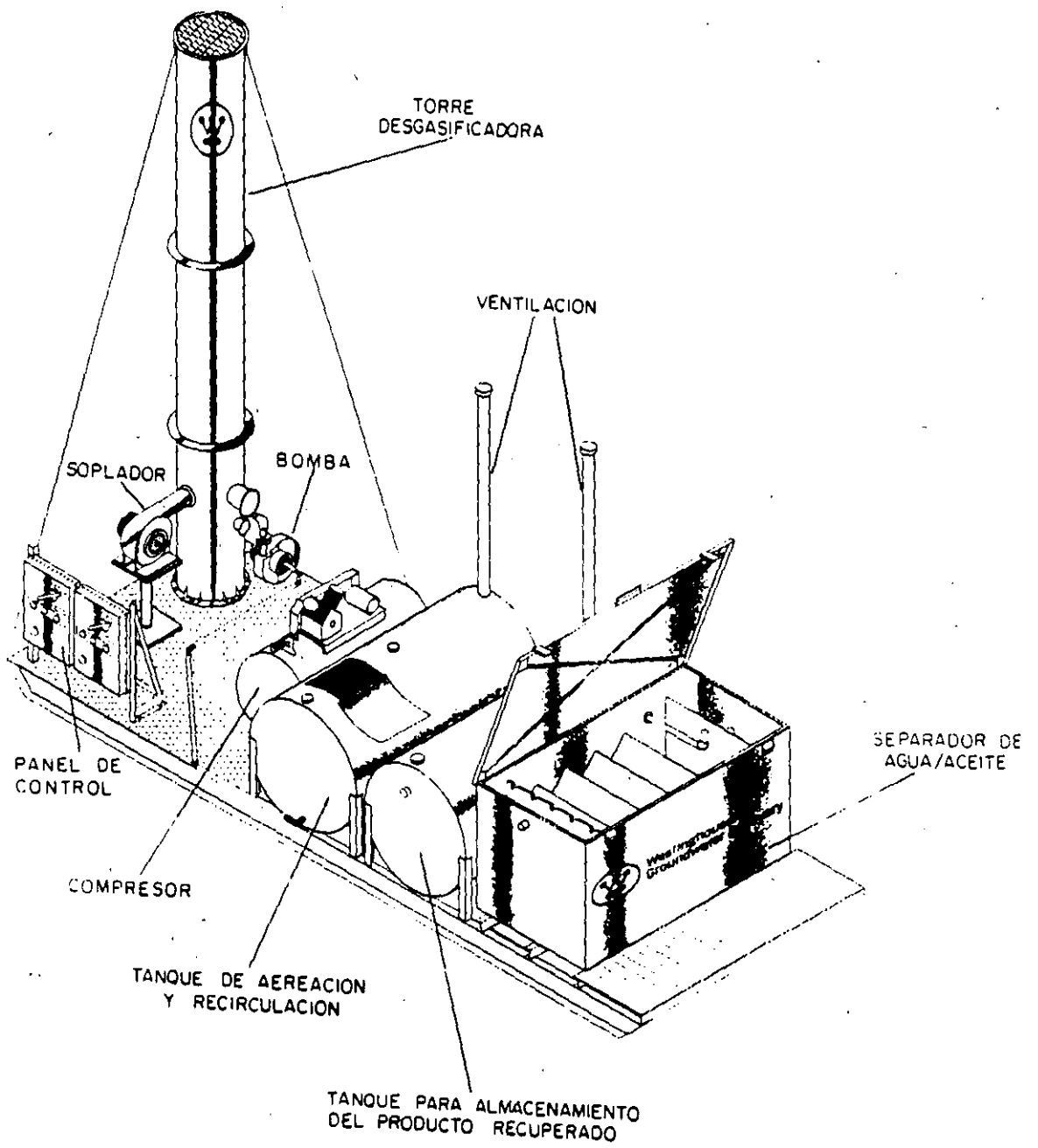
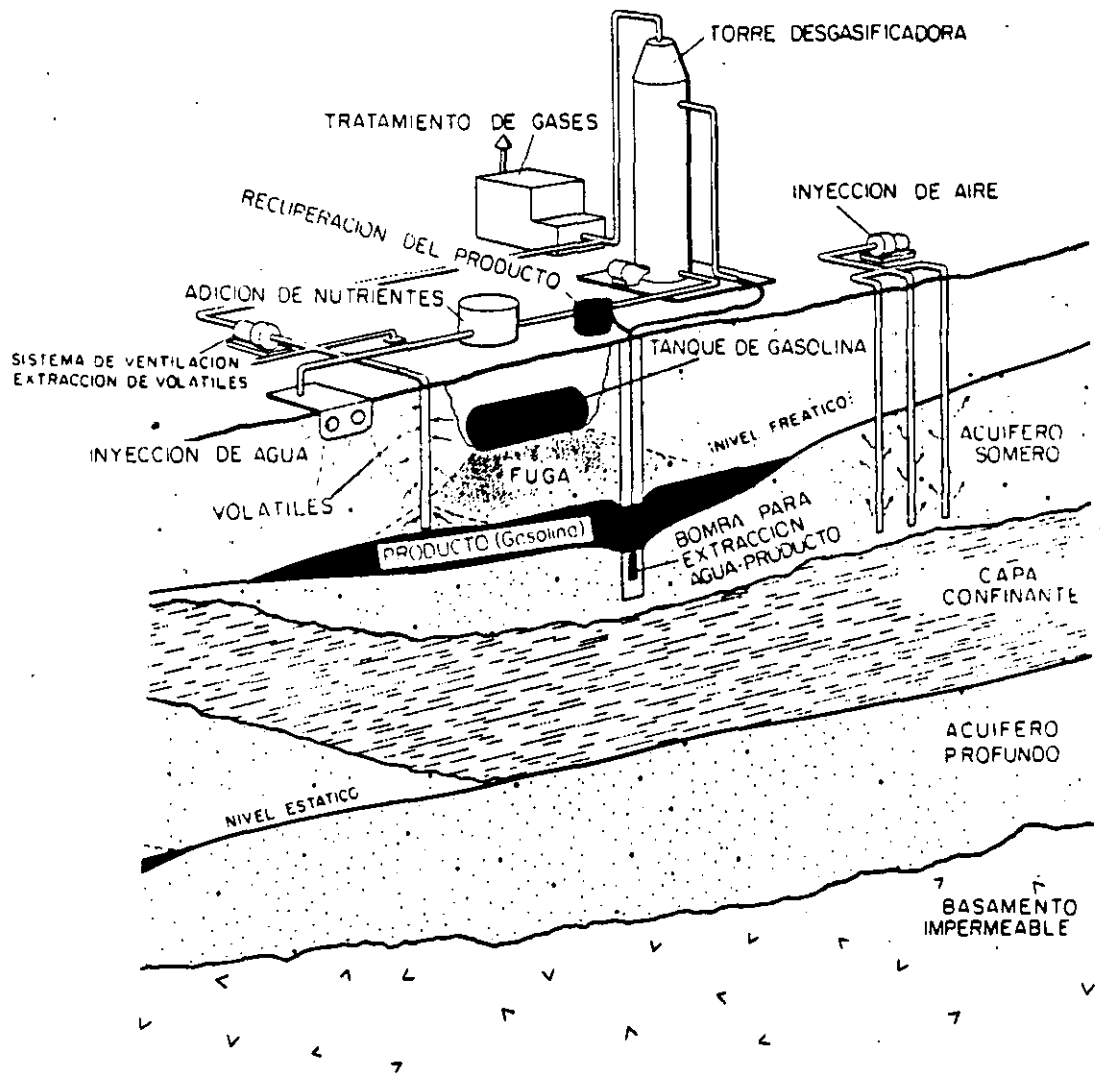


FIGURA 2.- EQUIPO WESTINGHOUSE PARA EL TRATAMIENTO DE  
 HIDROCARBUROS Y AGUA



DE: ORS ENVIRONMENTAL EQUIPMENT CATALOG

FIGURA 3.- SISTEMA ORS/ENVIRONMENTAL EQUIPMENT PARA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL

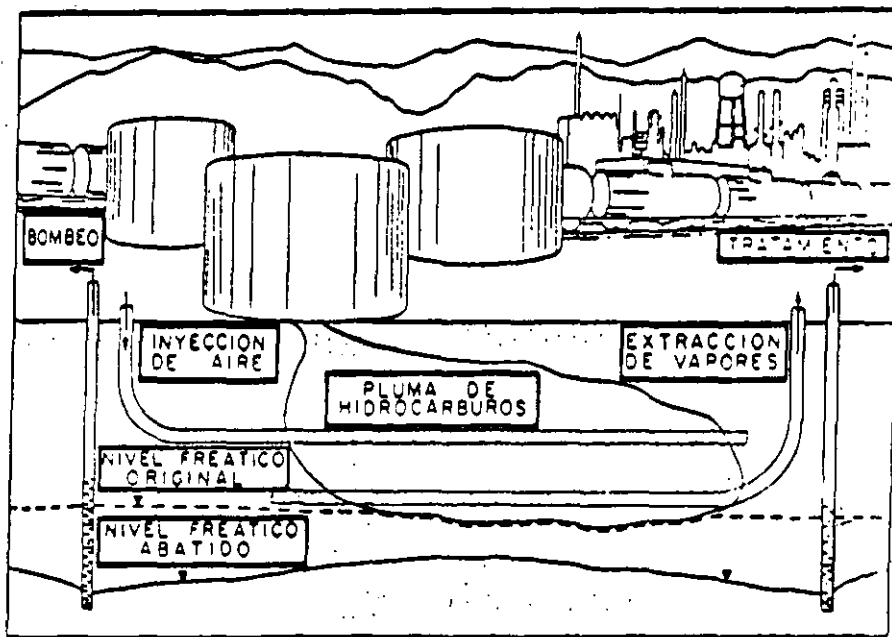


FIGURA 4 . SANEAMIENTO DE HIDROCARBUROS DEL SUBSUELO  
MEDIANTE POZOS DIRECCIONALES (DE ENGINEERING-SCIENCE, INC.)

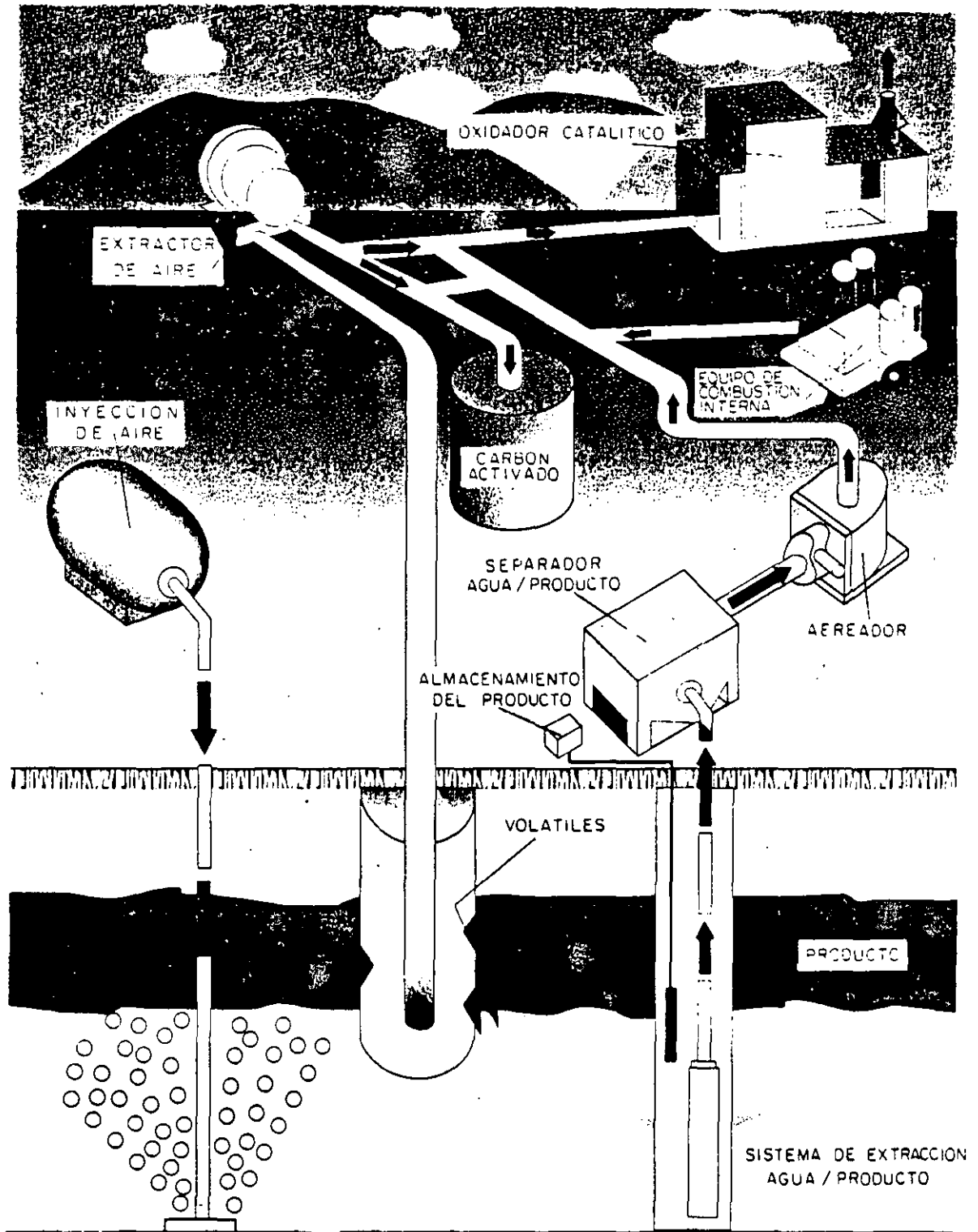
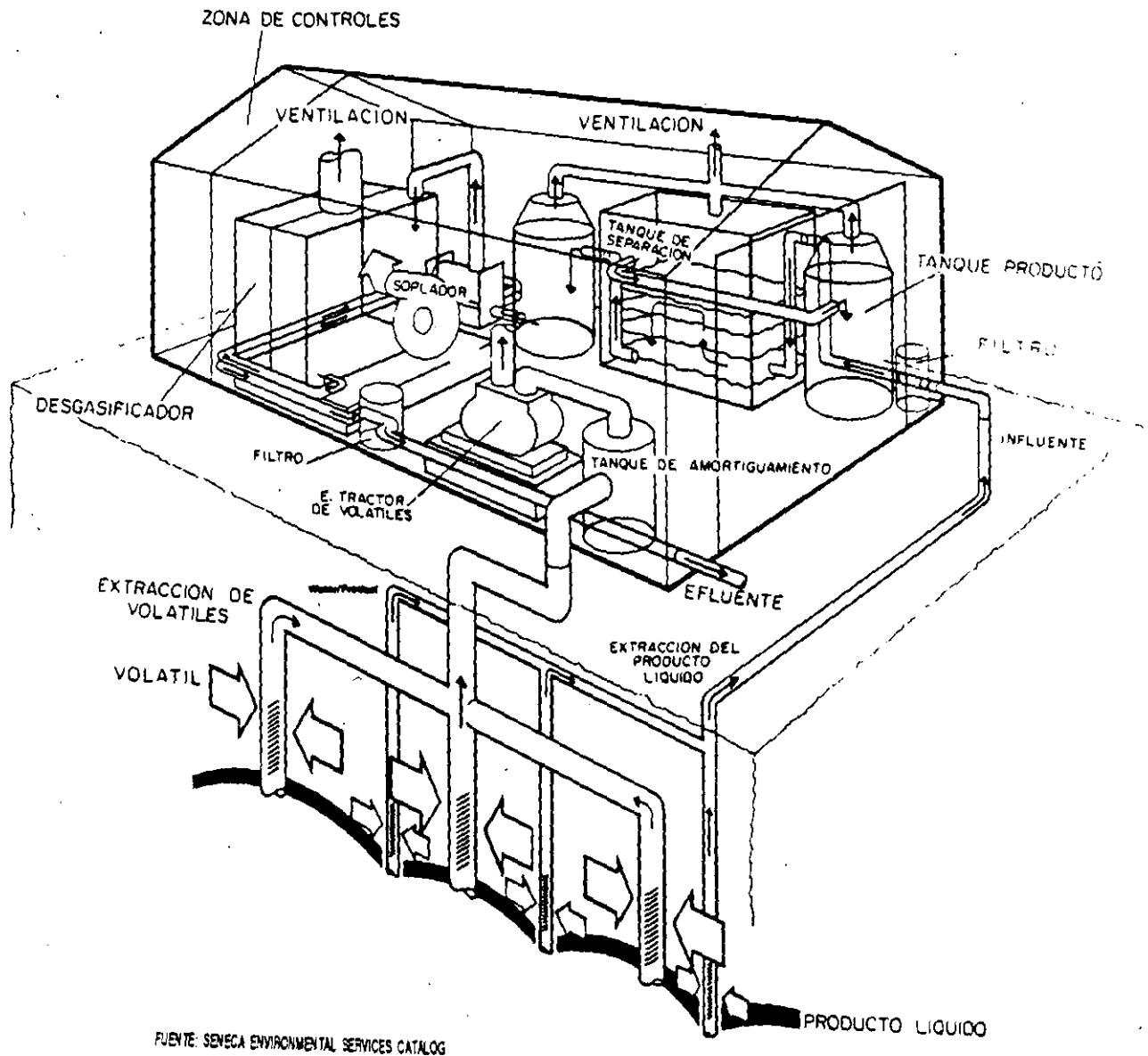


FIGURA 5.- SISTEMA ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS PARA LA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL.



FUENTE: SENECA ENVIRONMENTAL SERVICES CATALOG

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 ABIERTOS  
VI VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
MODULO II: CONTAMINACION DE ACUIFEROS**

**CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR HIDROCARBUROS  
PROSPECCION Y SANEAMIENTO**

**ING. J. MANUEL LESSER I.**



CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR HIDROCARBUROS  
PROSPECCION Y SANEAMIENTO

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

Son comunes las fugas a partir de los tanques y conductos subterráneos de hidrocarburos. Estas fugas, son consecuencia de la corrosión y de los movimientos del terreno por asentamientos y fallas que producen dislocaciones en las tuberías de interconexión. Al infiltrarse al subsuelo, los hidrocarburos tiende a avanzar hasta el nivel freático o estático, sobre el cual se acumulan. Algunos de los componentes de los hidrocarburos se disuelven en el agua del acuífero; otros flotan sobre el nivel freático y otra parte se volatiliza. 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 cromatográficos de gases y líquidos, 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 agua.

Existen diversos métodos de saneamiento del subsuelo contaminado por hidrocarburos, destacando entre ellos la extracción del contaminante y la biodegradación. Un método de saneamiento común consiste en la extracción por bombeo del producto líquido y agua del acuífero; una vez en la superficie el producto es almacenado en tanques y el agua extraída debe ser tratada a fin de eliminar los volátiles que contenga. La porción volátil es extraída 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

General behaviour of hydrocarbons (HC) contamination, monitoring and remediation is given. HC leakages are found in three phases; vapor, dissolved in the groundwater and free product floating over the phreatic level. Gas chromatography is of special interest in groundwater quality control due to its high solubility and low recommended concentration for drinking water. Remediation of HC contamination involves different methods. The most common is the recovery by pumping of free product, pumping of groundwater and vapor-phase extraction. The HC free-phase is storage on the surface. Vapor is removed from water. The vapor-phase is treated via carbon absorption or incineration.

## INTRODUCCION

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 líneas de conducción, así como el manejo y disposición inadecuada, 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.

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 con subsuelos de alta permeabilidad como es el caso de Guadalajara, donde la alta permeabilidad del subsuelo permite la libre circulación del contaminante.

A manera de ilustración, a continuación se comentan las características de los subsuelos de las ciudad de México y Guadalajara.

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 el subsuelo.

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 (Light-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.

La solubilidad de los alcanos decrece rápidamente al incrementarse el número de carbonos presentes en el compuesto. Así, se observa que el pentano con una cadena de 5 carbonos tiene una solubilidad de 360 ppm, el hexano con 6 carbonos tiene una solubilidad de 13 ppm y el decano con 10 carbonos tiene una solubilidad de solamente 0.009 ppm.

La presión de vapor decrece conforme el número de carbonos se incrementa. Presiones de vapor altas, indican que un compuesto se puede fácilmente volatilizar. Las bajas presiones de vapor se asocian con hidrocarburos que son semivolátiles o gases como el metano, etano, propano y butano (1, 2, 3 y 4 carbonos). La presión de vapor disminuye con un mayor número de carbonos.

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 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.

## DEFINICIONES

- GASOLINA.-** Es un agregado de cientos de diferentes compuestos de hidrocarburos en varias proporciones, principalmente de las cadenas del C5 al C9, con un punto de ebullición entre los 40 y 205°C. Los principales tipos de hidrocarburos que constituyen a las gasolinas, son parafinas-plefinas, cicloparafinas y aromáticos.
- KEROSENO.-** Se le da el nombre de keroseno a la porción del petróleo o hidrocarburos que tiene su punto de ebullición entre 175 y 325°C. Puede ser usado como gasavión. Consisten de una mezcla de alrededor de 10 hidrocarburos conteniendo entre 10 y 16 carbonos..
- DIESEL.-** El diesel es una fracción de los hidrocarburos que destilan después del keroseno (ver figura 1). Consiste en una mezcla de hidrocarburos que contienen entre 11 y 20 carbonos.

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.

Los hidrocarburos se pueden encontrar en diferentes formas en el subsuelo como son: fase líquida; fase volátil; fase disuelta en el agua y; fase absorbida por el suelo. Estudios recientes han adoptado el BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) 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, en donde 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 de perforación y muestreo de suelo, denominadas "augers".

#### **MEDICIONES INSITU**

Una vez perforados los pozos someros, se pueden realizar mediciones insitu de hidrocarburos (HC) volátiles, oxígeno, explosividad y bióxido de carbono.

Cuando la perforación alcanza el nivel freático, se puede medir el espesor de hidrocarburos líquidos que se encuentran flotando sobre el nivel freático.

#### **MUESTREO DE HIDROCARBUROS**

#### **MUESTRA DE SUELOS**

Con el objeto de definir la litología del subsuelo y extraer muestras de suelo e hidrocarburos, se perforan pozos con obtención de muestras de suelo inalterado, a partir de la superficie y hasta la profundidad total.

Los núcleos son enviados al laboratorio para efectuarles un análisis de cromatografía. Existen varias formas de realizar el muestreo de núcleos de suelo. Generalmente 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.

#### MUESTRA 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 y al tiempo en que se considera que el bombeo arroja el gas representativo del subsuelo, se obtiene una muestra por medio de una hipodérmica o en bolsas especiales, fabricadas con materiales que no reaccionan con el hidrocarburo.

#### MUESTREO 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 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 mostró 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

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 donde se observó una clara volatilización en las gasolinas (fig. 6). 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.

## **SANEAMIENTO**

El hidrocarburo 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..

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 considerar inicialmente la extracción del HC líquido y el volátil, lo cual permite disminuir el grado de contaminación y de riesgo. Como segundo paso se considera la limpieza del suelo y acuífero contaminado, los cuales tienen un mayor costo.

Para la extracción de producto líquido y volátil, su diseño y operación es "relativamente" sencillo. En relación a acuíferos contaminados se pueden realizar tratamientos del agua en la superficie. La "remediación" o saneamiento del suelo y acuífero incluye técnicas sofisticadas de alto costo y largo tiempo de ejecución. A continuación se describen los métodos de saneamiento más comunes.

Existen en el mercado un gran número de sistemas diseñados para la extracción de producto líquido y volátil del subsuelo. Estos, en general, tienden a trabajar automatizados. En la figura 7 se incluye el método de extracción y tratamiento. Consiste en una bomba cuyo objetivo es abatir el nivel estático y provocar una mayor acumulación de producto (HC líquido) sobre el pozo. El agua extraída es depositada dentro de un tanque que separa al agua del HC volátil que pueda contener, mediante un soplador y una torre de aereación. Dentro del pozo se coloca,



además de la bomba anterior, otra para la extracción del HC líquido, el cual es almacenado en un tanque. Todo el proceso puede estar automatizado.

En la figura No. 8 se muestra un equipo Westinghouse para el tratamiento de hidrocarburos y agua subterránea extraídos del subsuelo. Consta de 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. 9 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 líquidos), 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. 10 se muestra la perforación de pozos direccionales para el saneamiento del subsuelo bajo infraestructura como edificios y tanques de almacenamiento.

En la figura No. 11 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 12 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.

#### REFERENCIAS

ABDUL, S.A. 1988. Migration of Petroleum Products Through Sandy Hydrogeologic Systems. In: GWMR.

ABDUL, S.A. 1989. Limitations of Monitoring Wells for the Detection and Quantification of Petroleum Products in Soil and Aquifers In: GWMR.

CALABRESE, E.J. AND P.T. Kostecki. 1989. Petroleum Contaminated Soils. Volume 2. Remediation Techniques Environmental Fate Risk Assesment Analytical Methodologies. Lewis Publishers, Inc. 515 p.

CANTER L.W AND R.C. KNOX. 1985. Ground Water Pollution Control. Lewis Publishers, Inc. 526 p.

CHEREMISINOFF, P.N. 1992. A Guide to Under Ground Storage Tanks. Evaluation, Site Assessment and Remediation. Prentice Hall. Inc. 367 p.

BAKER, J. F. AND R. DICKHOUT. 1988. An Evaluation of Some Systems for Sampling Gas-Charged Ground Water for Volatile Organic Analysis. In: GWMR.

DEVITT, D.A., ET. AL. 1987. Soil Gas Sensing for Detection and Mapping of Volatile Organics, Publisher National Water Well Association. 270 p.

DOMENICO, P.A. AND F.W. SCHWARTS. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley and Sons. 824 p.

FETTER, C.W. 1993. Contaminant Hydrogeology. Macmillan Publishing Company. 458 p.

HAYES, D., E. C. HERNRY AND S. M. TESTA. 1989. A Practical Approach to Shallow Petroleum Hydrocarbon Recovery.

HERZOG, B.L. 1989. Investigations of Failfure Mechanisms and Migration of Organic Chemicals at Wilsonville, Wilsonville, Illinois. In: GWMR.

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. 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. 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.

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.

NIELSEN, D. M. 1991. Practical Handbook of Ground-Water Monitoring. National Water Well Association. 717 p.

NYER, E. K. 1989. Relatign the Physical and Chemical Properties of Petroleum Hydrocarbons to Soil an Aquifer Remediation. Inc: GWMR.

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 Oganic Compound Cleanups: An Anthology.

NWWA. 1991. Ground Water and Soil Venting.

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
<b>ALCANOS</b>			
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	2.56	3.47
2,3-DIMETILHEXANO	0.22	1.30	2.39
<b>CICLOALCANOS</b>			
CICLOPENTANO	0.96	1.76	0.67
METILCICLOPENTANO	6.51	10.29	5.01
CICLOHEXANO	10.40	7.63	7.13
METILCICLOHEXANO	22.00	14.55	13.07
ETILCICLOPENTANO	2.03	4.38	2.34
TRIMENTILCICLOPENTANO	3.64	8.12	4.18
<b>AROMATICOS</b>			
BENCENO	3.27	2.22	3.61
TOLUENO	16.19	7.94	12.02

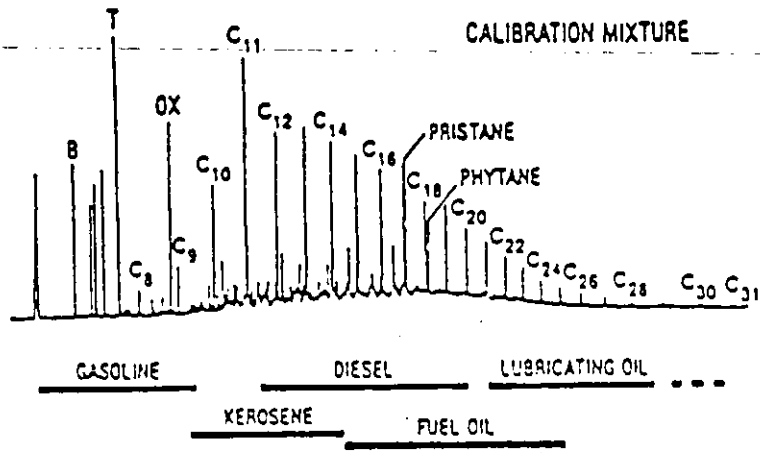


FIGURA 1. CROMATOGRAMA DE MEZCLA DE HIDROCARBUROS (MODIFICADA DE SENN AND JOHNSON, 1985)

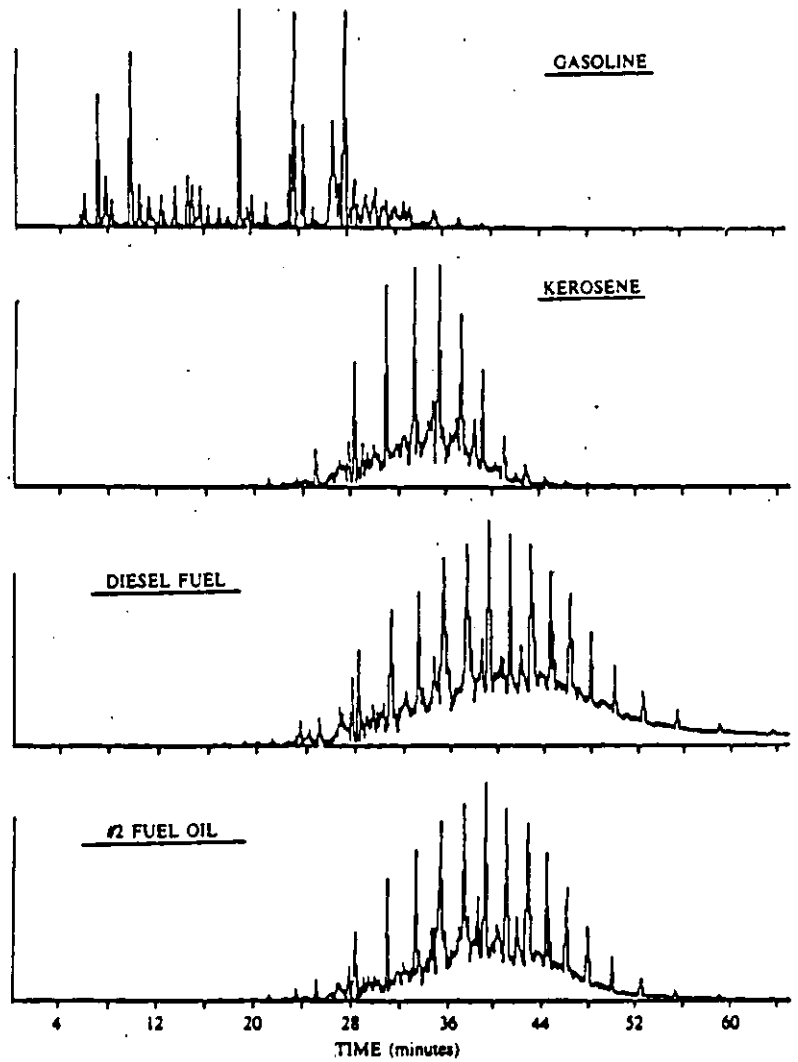
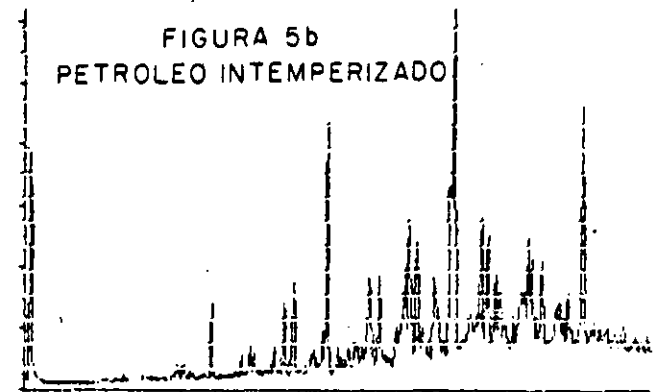
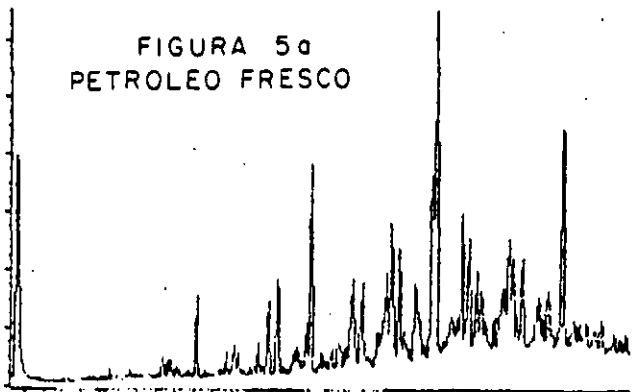
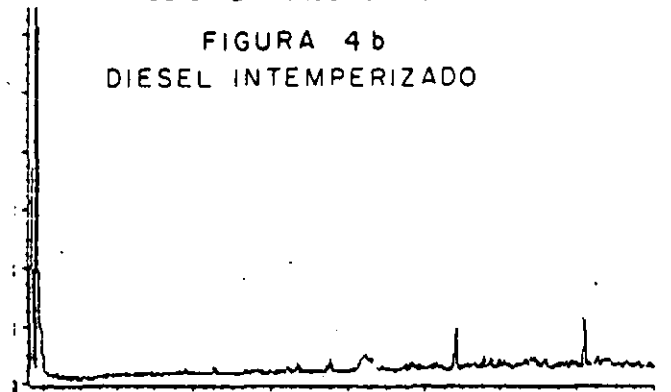
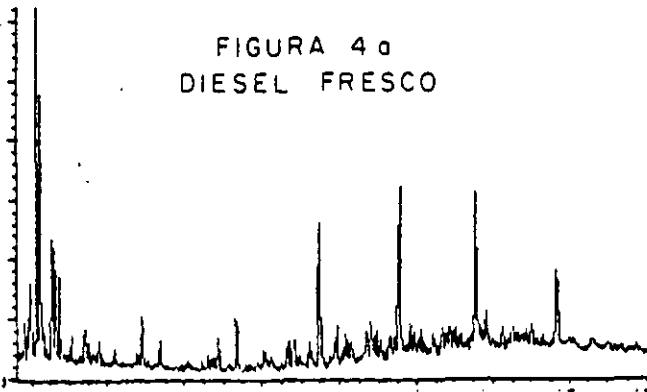
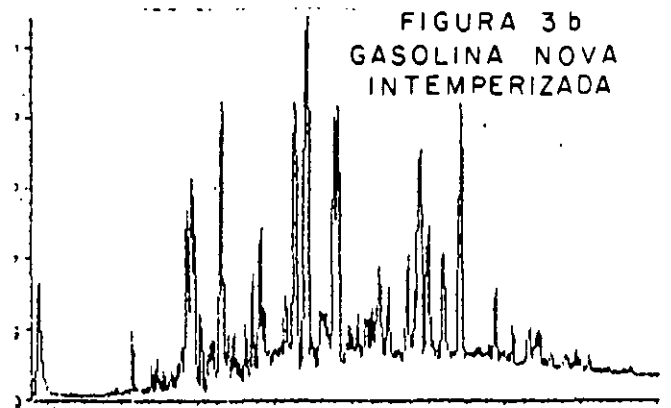
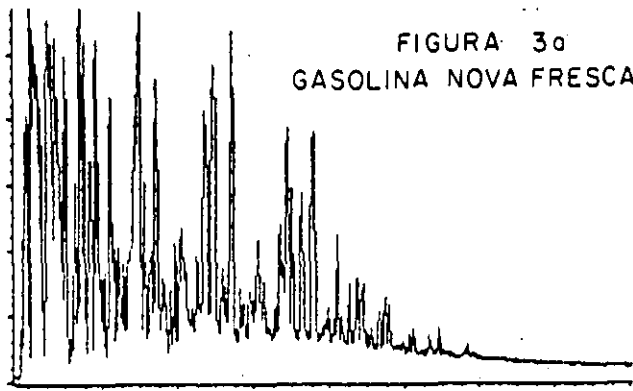


FIGURA 2. CROMATOGRAMAS DE DIFERENTES HIDROCARBUROS (DE CALABRESE Y KOSTECKI, 1989)



COMPORTAMIENTO DE HIDROCARBUROS A LA INTEMPERIE, RESPECTO AL TIEMPO

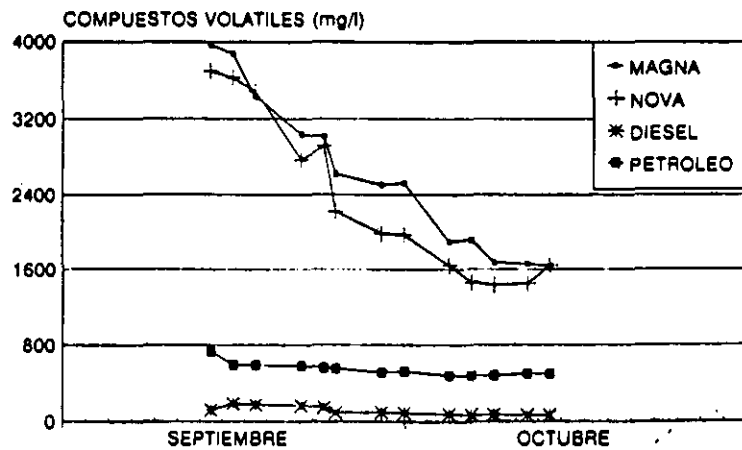


FIGURA 6

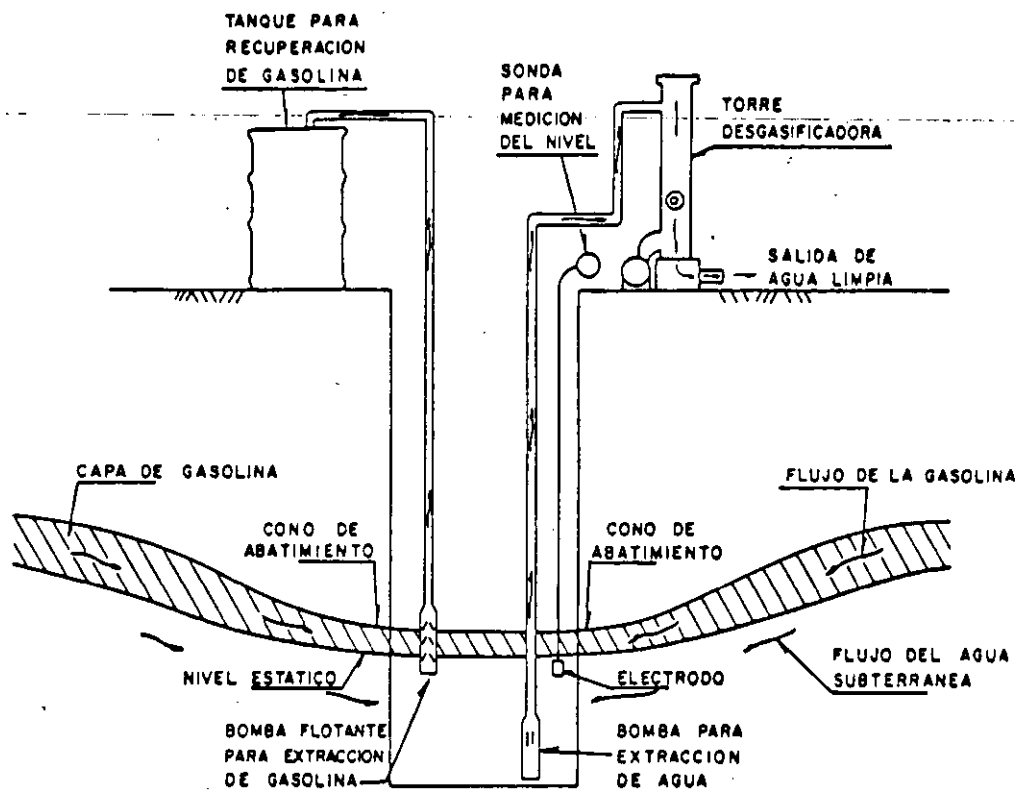


FIGURA 7 METODO PARA RECUPERACION DE GASOLINAS

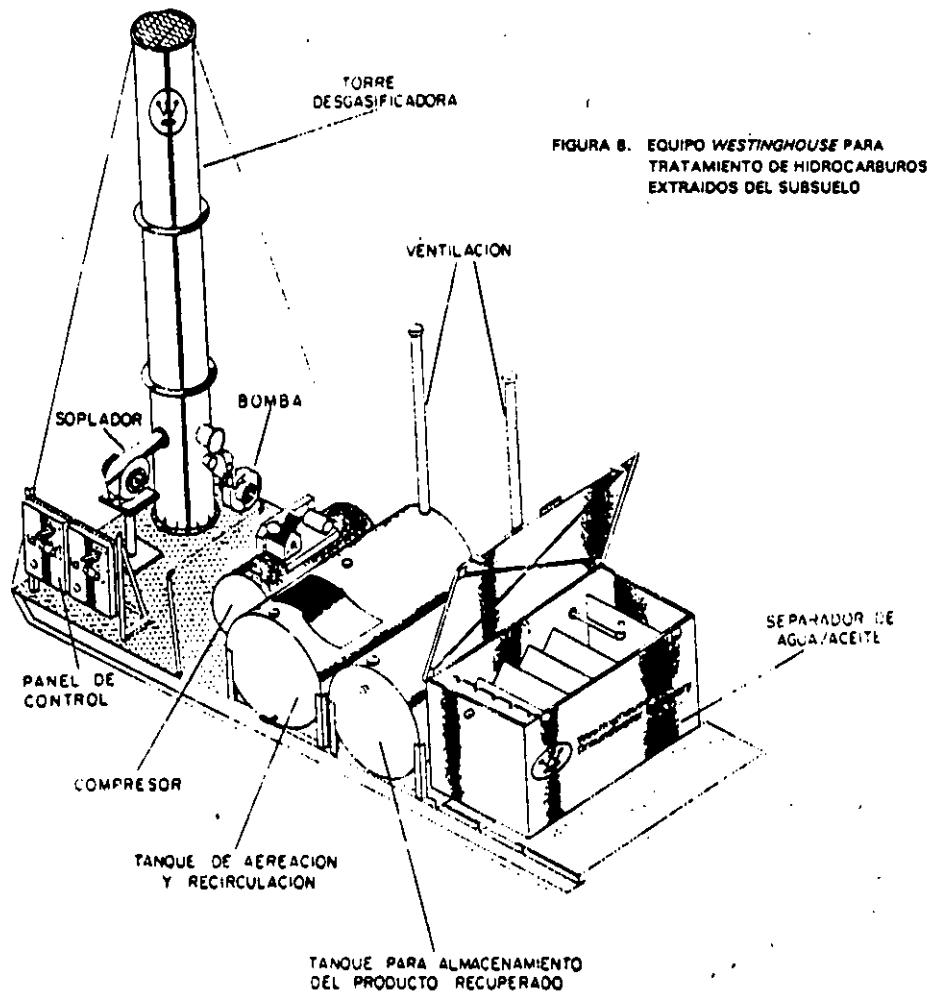


FIGURA 8. EQUIPO WESTINGHOUSE PARA TRATAMIENTO DE HIDROCARBUROS EXTRAIDOS DEL SUBSUELO

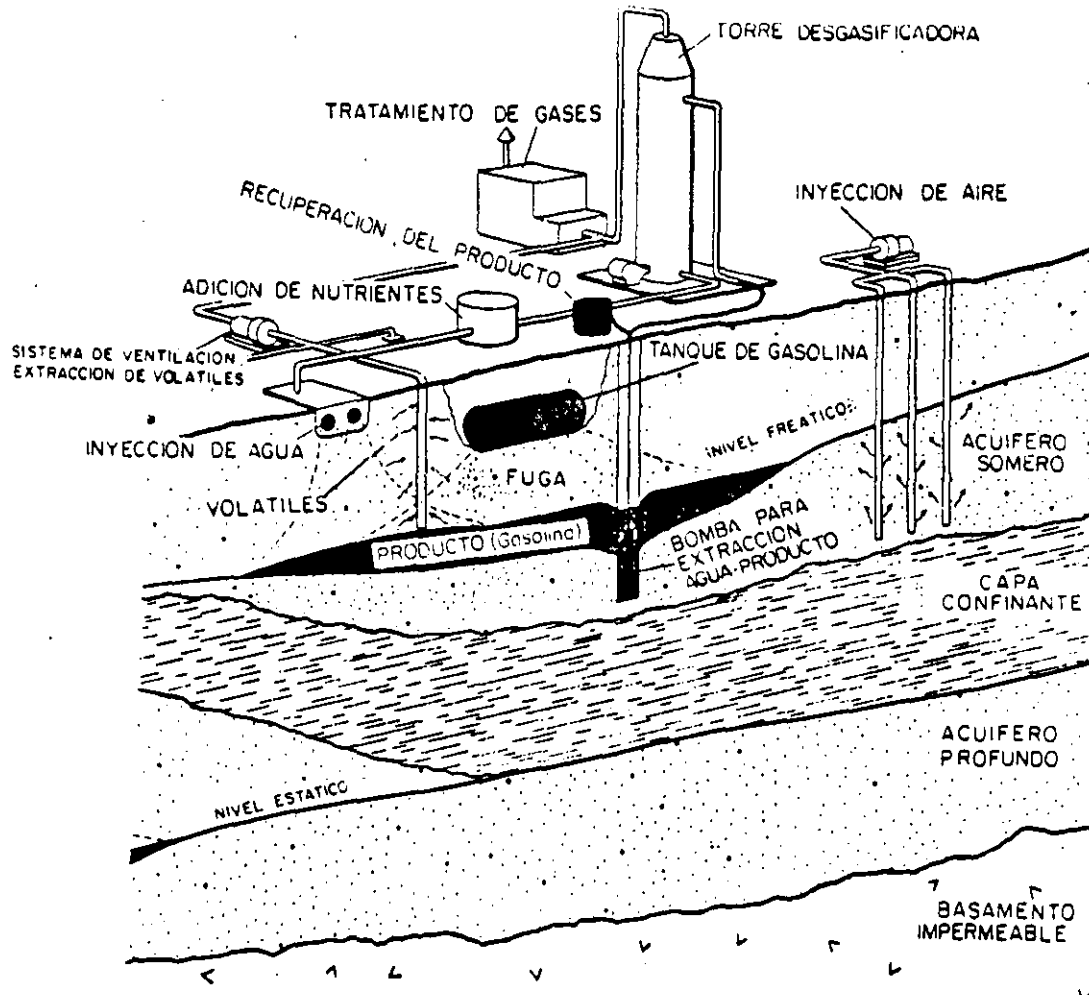


FIGURA 9. SISTEMA ORS/ENVIRONMENTAL EQUIPMENT PARA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE PRODUCTO LIQUIDO Y VOLATIL

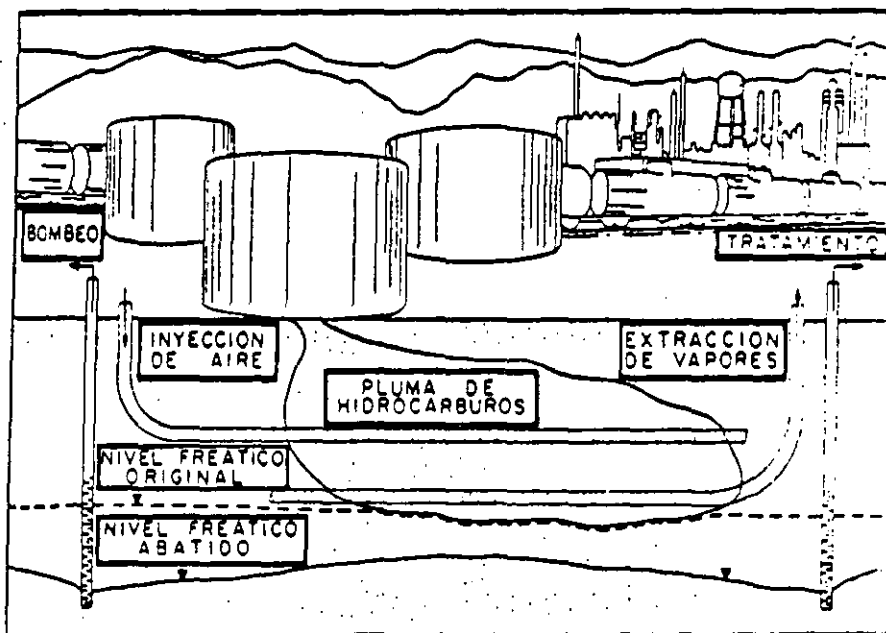
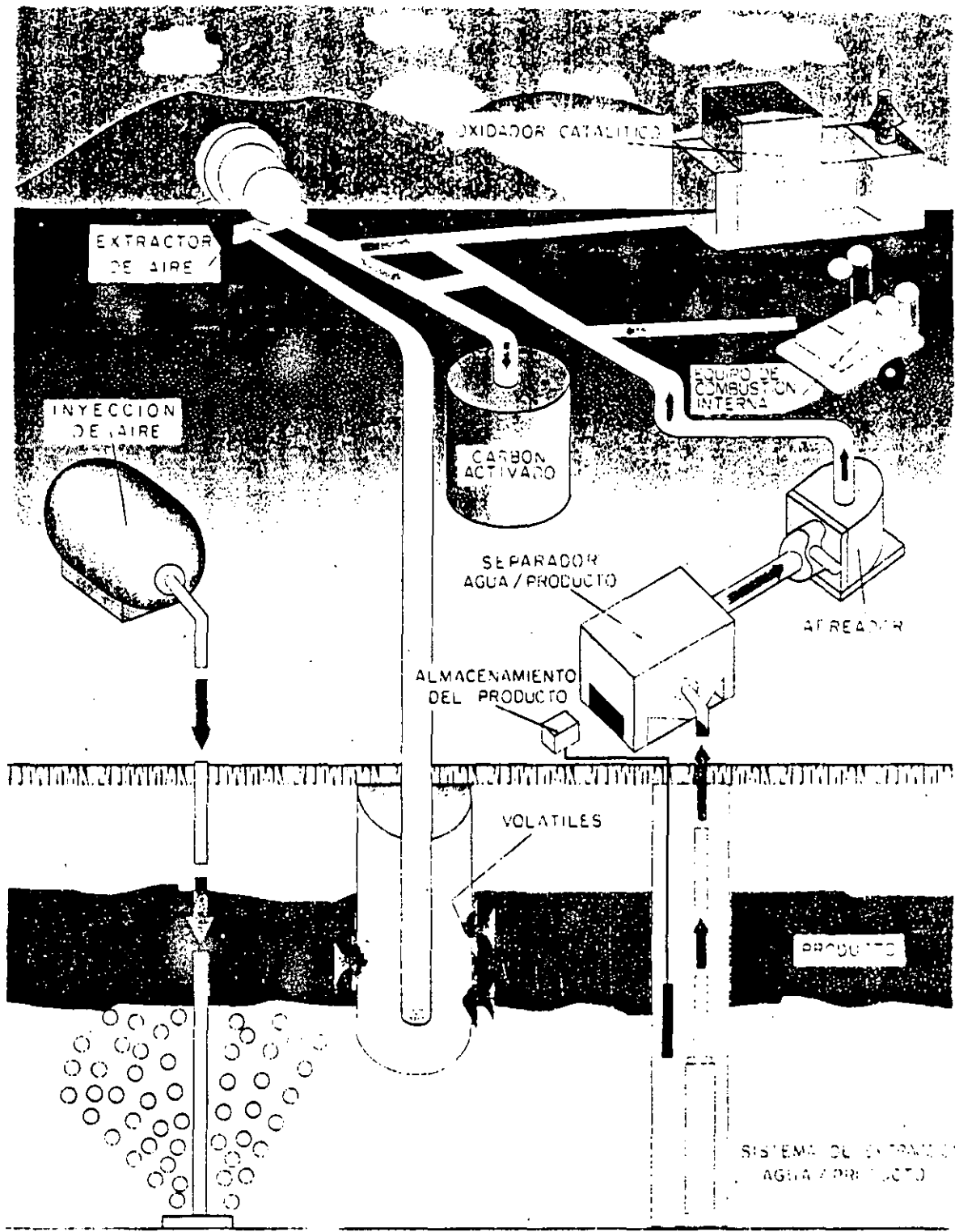


FIGURA 10. SANEAMIENTO DE HIDROCARBUROS DEL SUBSUELO MEDIANTE POZOS DIRECCIONALES (DE ENGINEERING-SCIENCE, INC.)





**FIGURA 11. SISTEMA ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS PARA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE HC LIQUIDO Y VOLATIL**

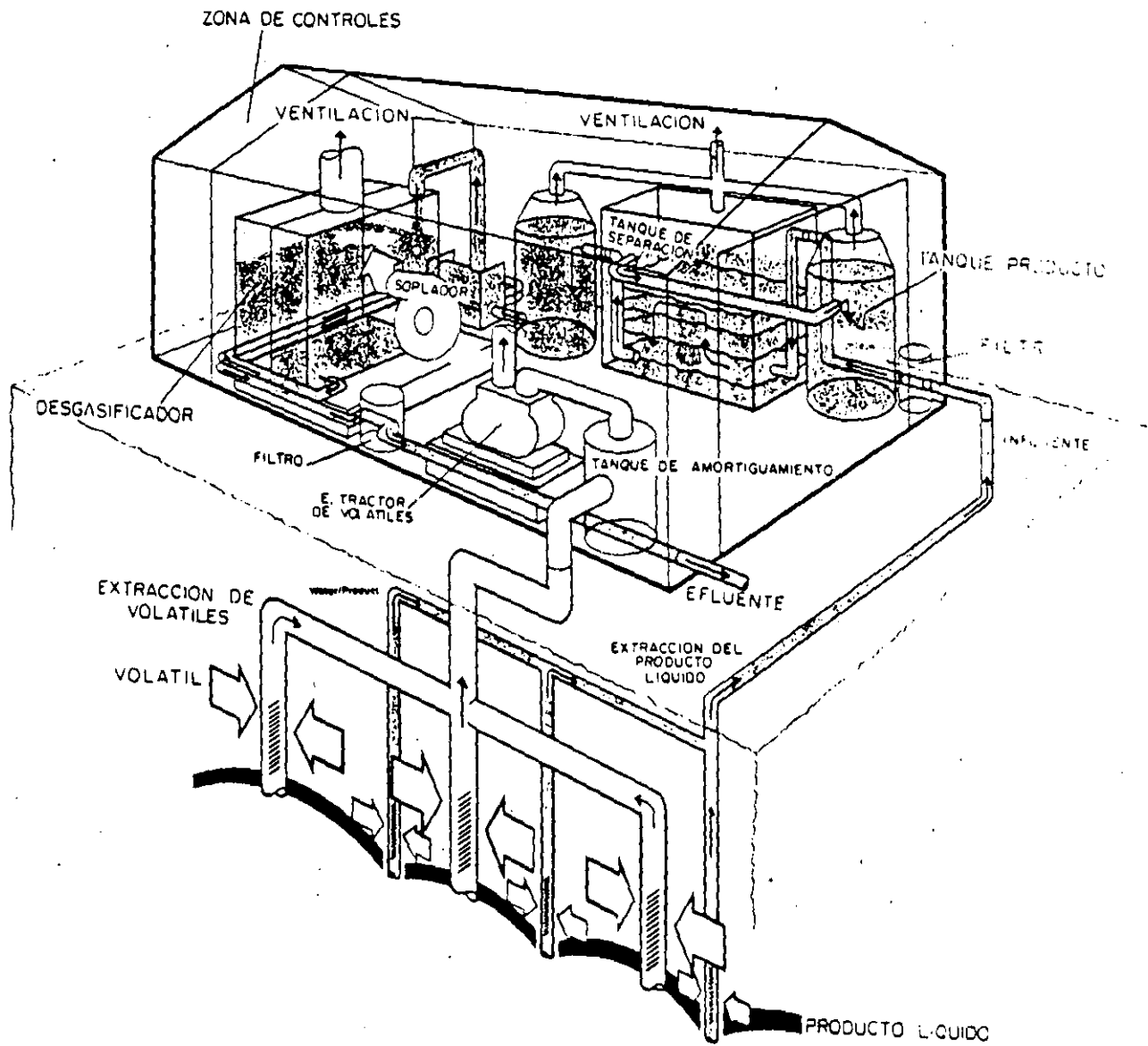


FIGURA 12. SISTEM SENECA PARA LA EXTRACCION Y TRATAMIENTO DE HC LIQUIDO Y VOLATIL

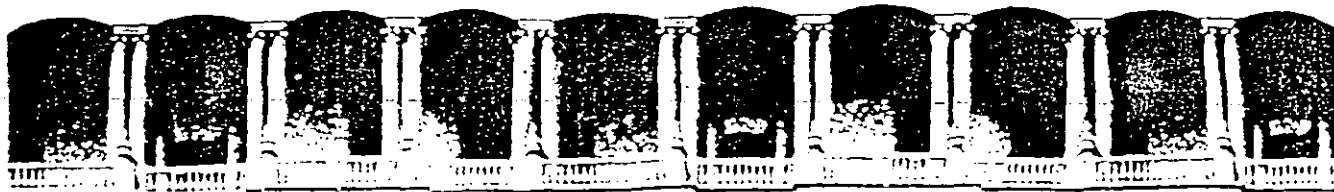


**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS  
VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
MODULO II: CONTAMINACION DE ACUIFEROS**

**FRACCIONAMIENTO ISOTOPICO**

**FIS. ALEJANDRA CORTES SILVA**



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

**V CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION**

**DE ACUIFEROS  
MODULO I I**

# **HIDROLOGIA ISOTOPICA**

**Fis. Alejandra Cortes Silva**

**Instituto de Geofísica, UNAM**

**Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, México D.F., Tels: (5) 550 5415, 550 5404, 550 5215 (Ext. 4658), Fax: (5) 550 2486**

## **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 Fluoriceínas, 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 practicamente 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 raccionan entre sí 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/ ISÓTPOS	ABUNDANCIA (%)	ESTANDAR /UNIDADES	VIDA MEDIA (AÑOS)	TIPO DE ANÁLISIS
<b>HIDROGENO</b>				
<sup>1</sup> H	99.984			
<sup>2</sup> H	0.015	V-SMOW%		E.M. <sup>***</sup>
<sup>3</sup> H	10 <sup>-14</sup> - <sup>-16</sup>	(U.T.)	12.35	C.C.L. <sup>****</sup>
<b>OXIGENO</b>				
<sup>16</sup> O	99.76			
<sup>17</sup> O	0.037*			
<sup>18</sup> O	0.1**	V-SMOW%		E.M. <sup>***</sup>
<b>CARBON</b>				
<sup>12</sup> C	98.89			
<sup>13</sup> C	1.11	PDB%		E.M. <sup>***</sup>
<sup>14</sup> C	10 <sup>-10</sup>	A.Ox. (pmc)	5730	C.C.L. <sup>****</sup>
<b>AZUFRE</b>				
<sup>32</sup> S	95.02			
<sup>33</sup> S	0.75*			
<sup>34</sup> S	4.21	CDT		E.M. <sup>***</sup>
<sup>36</sup> 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.

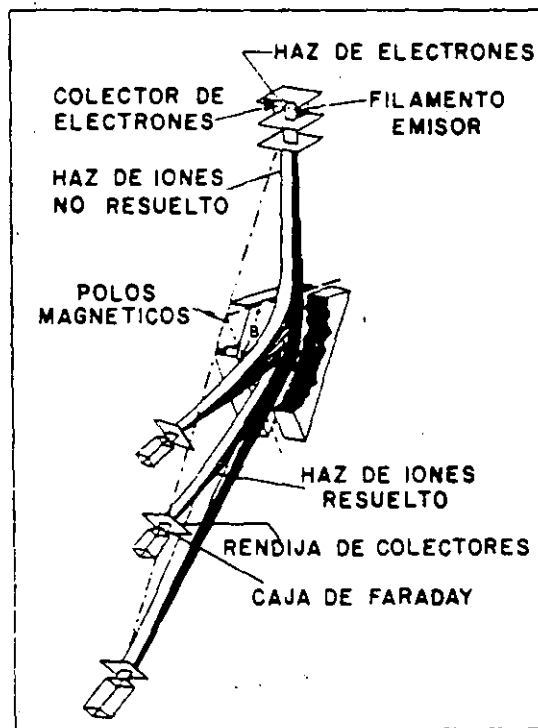


DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN ESPECTROMETRO DE MASAS TIPO NIER.

- 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:

1) 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.

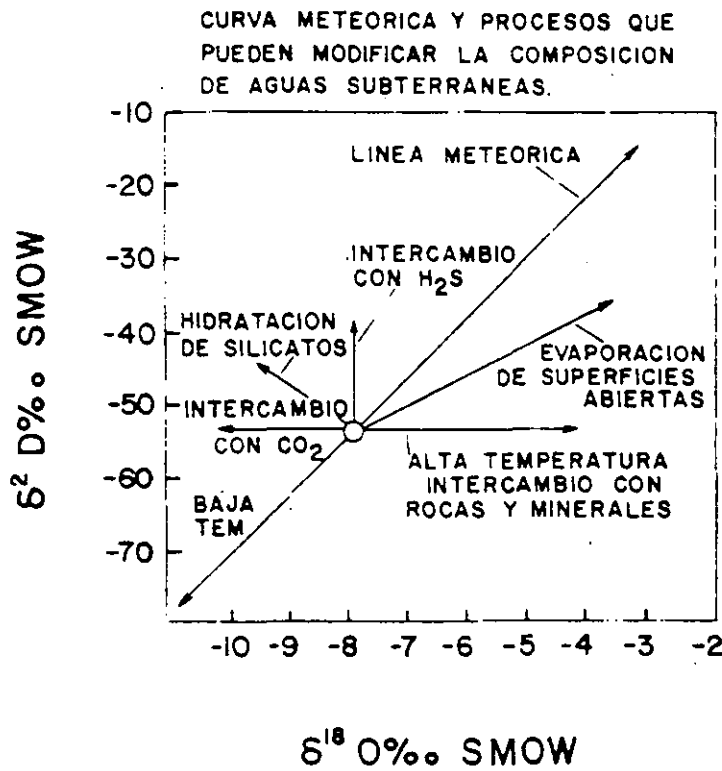
ii) Para agua dulce los valores contra SMOW, representan la evaluación del fraccionamiento isotópico, desde su evaporación en los océanos hasta el momento de la recolección de la muestra, siendo éste el resultado de los procesos físico-químicos que reflejan la historia hidrológica de cada agua.

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.

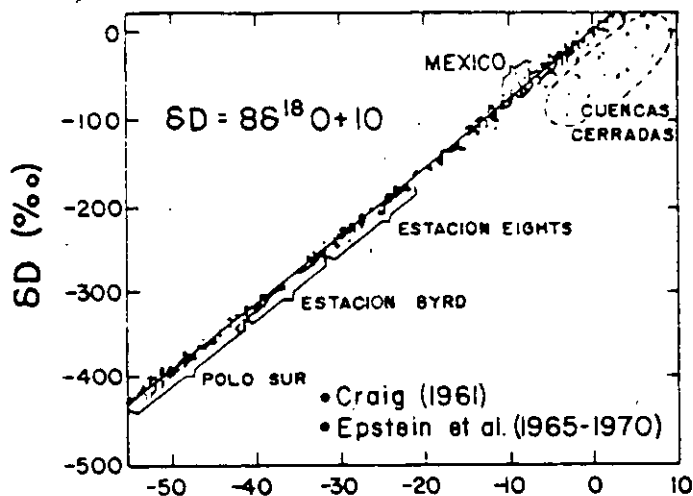


A pesar de los factores que pueden influir en la composición isotópica de aguas meteorológicas, la composición media anual de las precipitaciones se mantiene aproximadamente constante dentro de una misma región. Esto se debe a que los factores que deciden el fraccionamiento, actúan de forma reproducible 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 meteorológico, 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  $^{18}\text{O}$  y D en las precipitaciones. (IAEA, 1981):

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

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:

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

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).

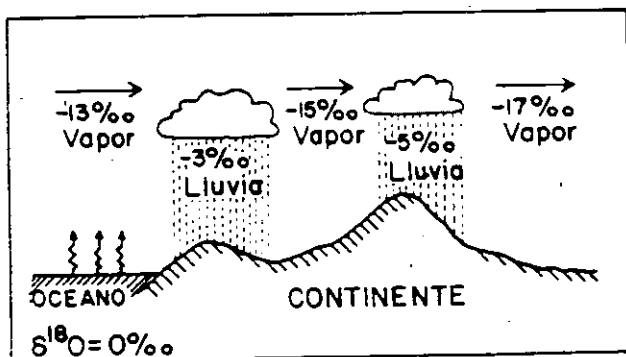
## LOS ISÓTOPOS AMBIENTALES COMO TRAZADORES

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  $\delta\text{D}$  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.

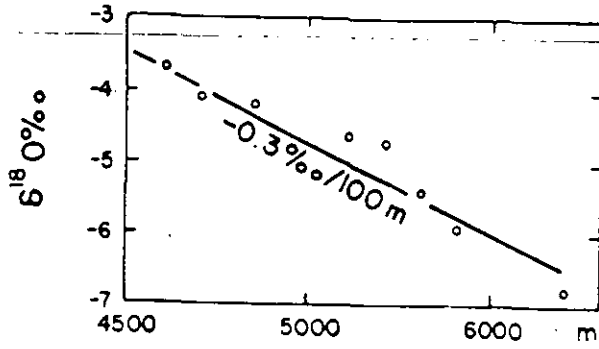
## CARACTERISTICAS ISOTOPICAS DEL AGUA SUBTERRANEA Y SUPERFICIAL

### Agua Subterránea

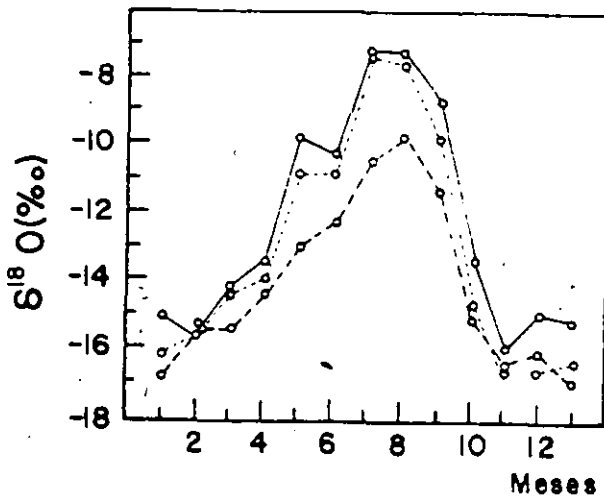
La forma de determinar el origen geográfico de la recarga y los procesos que pueden sufrir el agua subterránea de alguna región bajo estudio se encuentra en el hecho de que el contenido isotópico del agua infiltrada se conserva y que se puede relacionar con la composición

Figura 5.

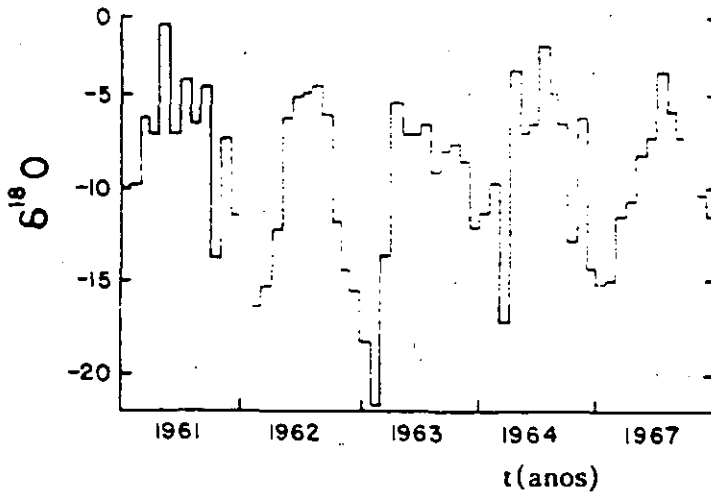
### EFFECTO DE ALTITUD



### EFFECTO TEMPORAL



### EFFECTO ESTACIONAL





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 periodo 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 0-18 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  $\beta$ ; 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  $^{14}\text{C}$  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  $^{14}\text{C}$  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  $^{14}\text{C}$  de la capa de humus efectiva que produce el  $\text{CO}_2$  del suelo, y otras.

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

#### Fechaamiento de Aguas Subterráneas con $^{14}\text{C}$

Uno de los problemas básicos en el fechaamiento de aguas subterráneas radica en el desconocimiento que se tiene de la actividad inicial del  $^{14}\text{C}$  que recargó el acuífero. El contenido de  $^{14}\text{C}$  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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> acuoso y el mineral (Fritz y Mozeto, 1980).

*-Modelos de Fechamiento*

- a) Aproximación de A<sub>0</sub> promedio.
- b) Modelo Exponencial
- c) Aproximación Geoquímica
- d) Mezcla Isotópica del <sup>13</sup>C
- 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 <sup>14</sup>C se refieren a un estándar que corresponde a una madera que creció durante 1890 en un ambiente libre de CO<sub>2</sub> fósil, es decir, para CO<sub>2</sub> atmosférico anterior al inicio de la combustión masiva de carbono fósil. El contenido de <sup>14</sup>C se define como la actividad (A) que representa el carbono moderno, por lo que todas las muestras medidas se expresan en porcentaje 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 Acido Oxálico distribuido por el National Bureau of Standards (NBS) cuya relación con la actividad del carbon moderno es:

<sup>14</sup>C ACTIVIDAD DEL CARBONO MODERNO = 0.95 <sup>14</sup>C 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  $\text{BaCl}_2$  saturado (500 g  $\text{BaCl}_2$ /l). La adición de estos componentes produce una reacción química que cambia a los compuestos inorgánicos en solución a  $\text{BaCO}_3$ . Se necesitan por lo menos 80 g de  $\text{BaCO}_3$  precipitado. En el laboratorio este precipitado se acidifica para producir  $\text{CO}_2$  y convertirlo luego a Benceno o Metano, (Arizabalo, 1989).

Los análisis de CARBONO-13 se realizan con el  $\text{CO}_2$  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 Association.

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.

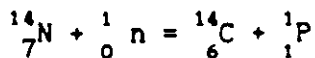
ACTIVIDAD ESPECIFICA: Actividad de un radioisótopo expresado en dpm o en Bq por unidad de masa (gramo) del elemento correspondiente.

BECQUEREL (BQ): La unidad para expresar la radiactividad. El becquerel corresponde a una desintegración por segundo y es equivalente a  $2.7 \times 10^{-11}$  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  $^{12}\text{C}$  (abundancia promedio 98.89%) y  $^{13}\text{C}$  (1.11%). El tercer isótopo,  $^{14}\text{C}$  es radiactivo (abundancia,  $10^{-10}\%$ ). El contenido de  $\text{C}^{13}$  en compuestos naturales varia, 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 ( $^{14}\text{C}$ ): 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/cm<sup>2</sup>.s. El <sup>14</sup>C producido es rápidamente oxidado a CO<sub>2</sub> 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 <sup>14</sup>C son los reactores nucleares.

CICLOS DE CALVIN Y HATCH-SLACK: (C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub>) 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 (C<sub>3</sub>) y de Hatch-Slack (C<sub>4</sub>). Sin embargo, las plantas con metabolismo tipo crasuláceo, son capaces de fijar el CO<sub>2</sub> 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 C<sub>3</sub>, con un contenido de <sup>13</sup>C entre -37 y -24 ‰, y un valor medio aproximado de -27 ‰ b) Plantas que siguen el proceso Hatch-Slack ó C<sub>4</sub>, presentan valores de δ<sup>13</sup>C 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 <sup>13</sup>C e incluyen los procesos C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub>.

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 <sup>14</sup>C se forman por la interacción de los rayos cósmicos con la atmósfera. Otros isótopos formados por rayos cósmicos son: <sup>10</sup>Be (vida media 2.7 x 10<sup>6</sup>a), <sup>7</sup>Be (53.6 d), <sup>32</sup>Si (100 a) <sup>36</sup>Cl(300,000 a), <sup>39</sup>Ar (2269 a), <sup>81</sup>Kr(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  $\alpha$ ,  $\beta$  ó  $\gamma$  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  $^{14}\text{C}$ . 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  $^{14}\text{C}$  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- $\gamma$  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  $^{14}\text{C}$ . En estos contadores el líquido centellea por la interacción con una partícula- $\beta$  que se mezcla con el líquido bajo investigación (comunmente agua en el caso de tritio y benceno en el caso de  $^{14}\text{C}$ ).

CURIE (Ci): Unidad para expresar radiactividad. Corresponde a la cantidad de cualquier isótopo radiactivo que sufre  $3.7 \times 10^{10}$  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:

$$R_{p-x} = \{(R_m - R_p)/R_p\} \times 1000$$

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  $m$ , 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 comúnmente, 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 diagrama ( $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$ ), 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 ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) se grafican a la derecha de la línea meteórica, la intersección de las dos líneas da los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  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  $\lambda$  es la constante característica de decaimiento del isótopo.

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

Las variaciones en los valores  $\delta\text{D}$  en compuestos naturales son amplias, debido a la gran diferencia de masa (100%) entre D e H. En aguas naturales los valores de  $\delta\text{D}$  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:

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

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

$^{18}\text{O}$ : 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 raduactivos.

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 ISITOPICO: Es la diferencia entre el factor de fraccionamiento  $\alpha$  (ver abajo) y la unidad, indicando con  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \alpha - 1$$

En general,  $\epsilon$  está en  $\text{‰}$ , y es por tanto comparable con los valores  $\delta$ . Algunas veces, el término factor de enriquecimiento se usa en vez del factor de fraccionamiento indicado por  $\alpha$ .

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  $\text{CaCO}_3$  sólido en el acuífero, el cual puede modificar los contenidos de  $^{13}\text{C}$  y  $^{14}\text{C}$  del bicarbonato usado para la determinación de la edad por  $^{14}\text{C}$ . 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  $\alpha$ , está definido por:

$$\alpha = R_A/R_B$$

donde  $R_A$  y  $R_B$  representa la razón isotópica para los diferentes elementos,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $\text{D}/\text{H}$ ,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ , etc. Si A y B están en equilibrio termodinámico entonces  $\alpha$  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  $\alpha$  tiende a 1 cuando la temperatura se incrementa. En ciertos casos, cuando la temperatura se eleva  $\alpha$  puede pasar desde un valor  $> 1$  a un valor  $< 1$  y viceversa; sin embargo, el valor asintótico de  $\alpha$  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-existent, 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  $\tau$  de un átomo radiactivo:

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

**LÍNEA DE AGUA METEÓRICA (ISÓTOPOS ESTABLES):** En un diagrama ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ), la línea de la ecuación

$$\delta\text{D} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10; \text{ en } \delta_0/\text{‰}$$

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  $\delta\text{D}$  está desplazada, generalmente con la misma pendiente 8 pero un valor diferente de la intersección con el eje  $\delta\text{D}$  (línea de agua meteórica regional).

Las aguas subterráneas y superficiales siguen en la mayoría de los casos la misma relación  $\delta^{18}\text{O} - \delta\text{D}$  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  $^{14}\text{N}$  y  $^{15}\text{N}$ . La abundancia del  $^{15}\text{N}$  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:  $^{16}\text{O}$  (abundancia promedio en material terrestre es 99.76%),  $^{17}\text{O}$  (0.04%),  $^{18}\text{O}$  (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  $+40$  CO<sub>2</sub> atmosférico a  $-60$ ‰ (hielo polar), contra SMOW.

PDB: Es el CaCO<sub>3</sub> 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 CaCO<sub>3</sub>, cuya composición isotópica con respecto al PDB es conocida, está 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 desaimiento 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  $\lambda$  es la constante de decaimiento característico de cada isótopo. Por integración obtenemos:

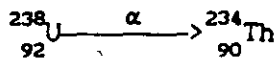
$$C = C_0 e^{-\lambda t}$$

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

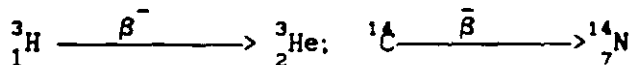
$$t = 1/\lambda \ln \frac{C_0}{C}$$

**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- $\alpha$ :** Una partícula- $\alpha$ , 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:

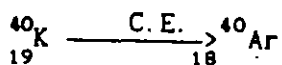


2.- **Decaimiento- $\beta$ :** Un electrón es emitido por el núcleo del isótopo padre el cual es transformado en un isótopo de un elemento diferente que tiene el mismo número de masa y un número atómico por 1 unidad. Ejemplo:



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  $\gamma$  (radiaciones electromagnéticas de energía bien definida). Esas radiaciones, y especialmente los rayos- $\gamma$ , 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:  $\text{H}_2^{16}\text{O} = 99.73 \%$ ;  $\text{HD}^{16}\text{O} = 0.031 \%$ ;  $\text{H}_2^{18}\text{O} = 0.200 \%$ .

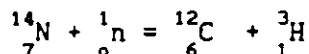
Las ventajas de usar SMOW como patrón de referencia para análisis isotópicos de agua son:

- 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  $\delta\text{D}$  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  $\text{H}_2\text{O}$  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  ${}^3\text{He}$  por pura emisión  $\beta^-$  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 PEQUENAS 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 <sup>1</sup> H <sup>2</sup> H <sup>3</sup> H	99.984 0.015 10 <sup>-14, -16</sup>	V-SMOW % (U.T.)	12.35	Espectrome- tría de masa Contador de centelleo liq.
Oxígeno <sup>16</sup> O <sup>17</sup> O <sup>18</sup> O	99.76 0.037* 0.1**	V-SMOW %		Espectrome-
Carbon <sup>12</sup> C <sup>13</sup> C <sup>14</sup> C	98.89 1.11 10 <sup>-10</sup>	PDB % A. Ox.(pmc)	5730	Espectrome- tría de masa Contador de centelleo liq. de benceno o contador prop. de gas metano
Azufre <sup>32</sup> S <sup>33</sup> S <sup>34</sup> S <sup>36</sup> 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 PEQUENAS 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

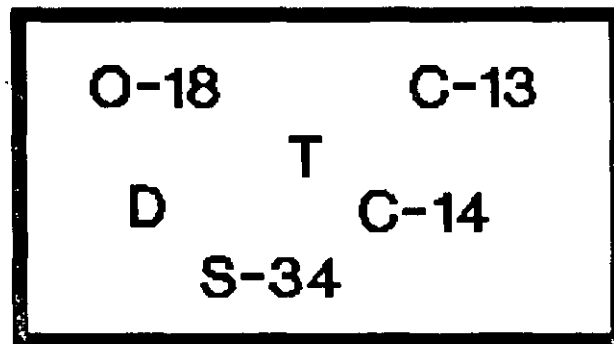
RESIDENCIA

CONTAMINACION

RECARGA

MEZCLA

ORIGEN



# ISOTOPOS

SISTEMAS CONSERVATIVOS EN ACUIFEROS  
CONFINADOS HASTA POR CIENTOS DE ANOS

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 INTERCONECCION 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
=====		
TOTAL	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:**

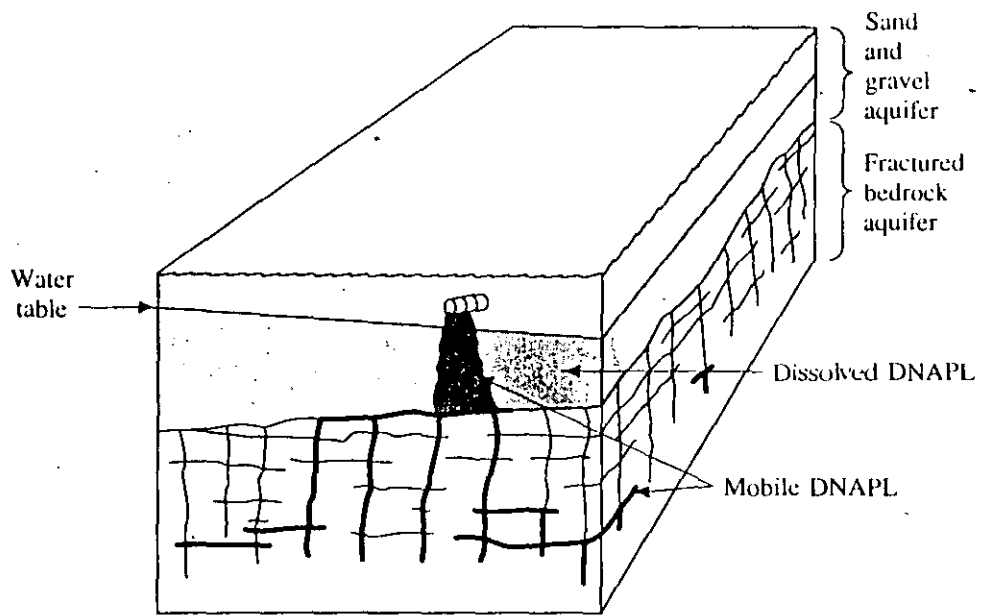
- 1. TRATAMIENTO EN PLANTAS POTABILIZADORAS**
- 2. DESINFECCION EN DISTINTOS PUNTOS DE LA RED DE DISTRIBUCION**
- 3. CONTAMINACION POR "CONEXIONES CRUZADAS" EN LA RED**
- 4. CONTAMINACION EN DEPOSITOS DOMICILIARIOS (CISTERNAS Y TINACOS) ABIERTOS O SUCIOS**
- 5. CONTAMINACION POR METALES (PLOMO, COBRE) 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**

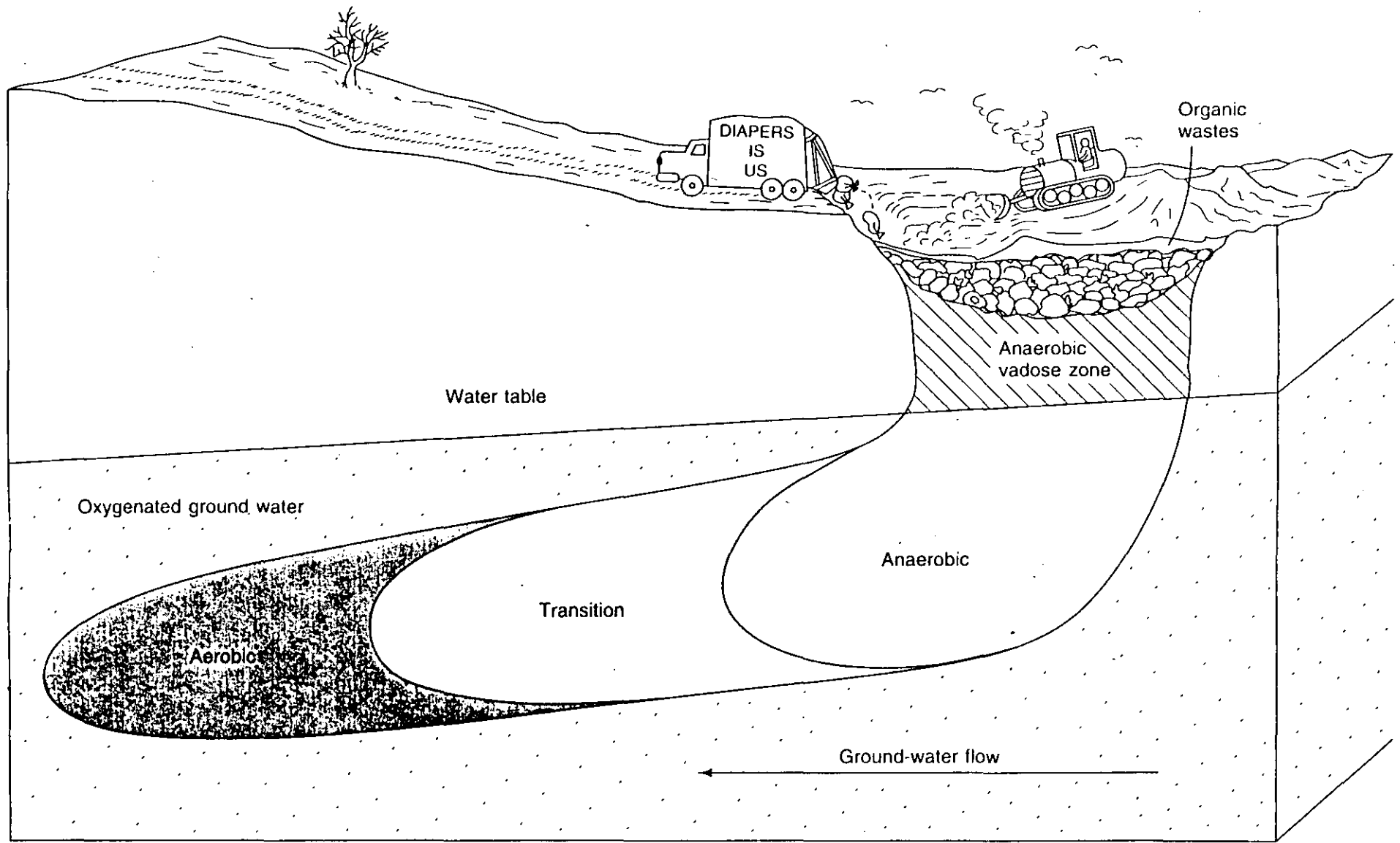
**EN SU ARTICULO 209, DEL REGLAMENTO DE CONTROL SANITARIO, (18-1-88), DEFINE AL AGUA POTABLE COMO TODA AQUELLA CUYA INGESTION NO CAUSE EFECTOS NOCIVOS PARA LA SALUD Y SE ENCUENTRE LIBRE DE GERMENES PATOGENOS Y DE SUSTANCIAS TOXICAS, Y CUMPLA, ADEMAS CON LOS REQUISITOS QUE SE SEÑALAN EN EL ARTICULO 210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

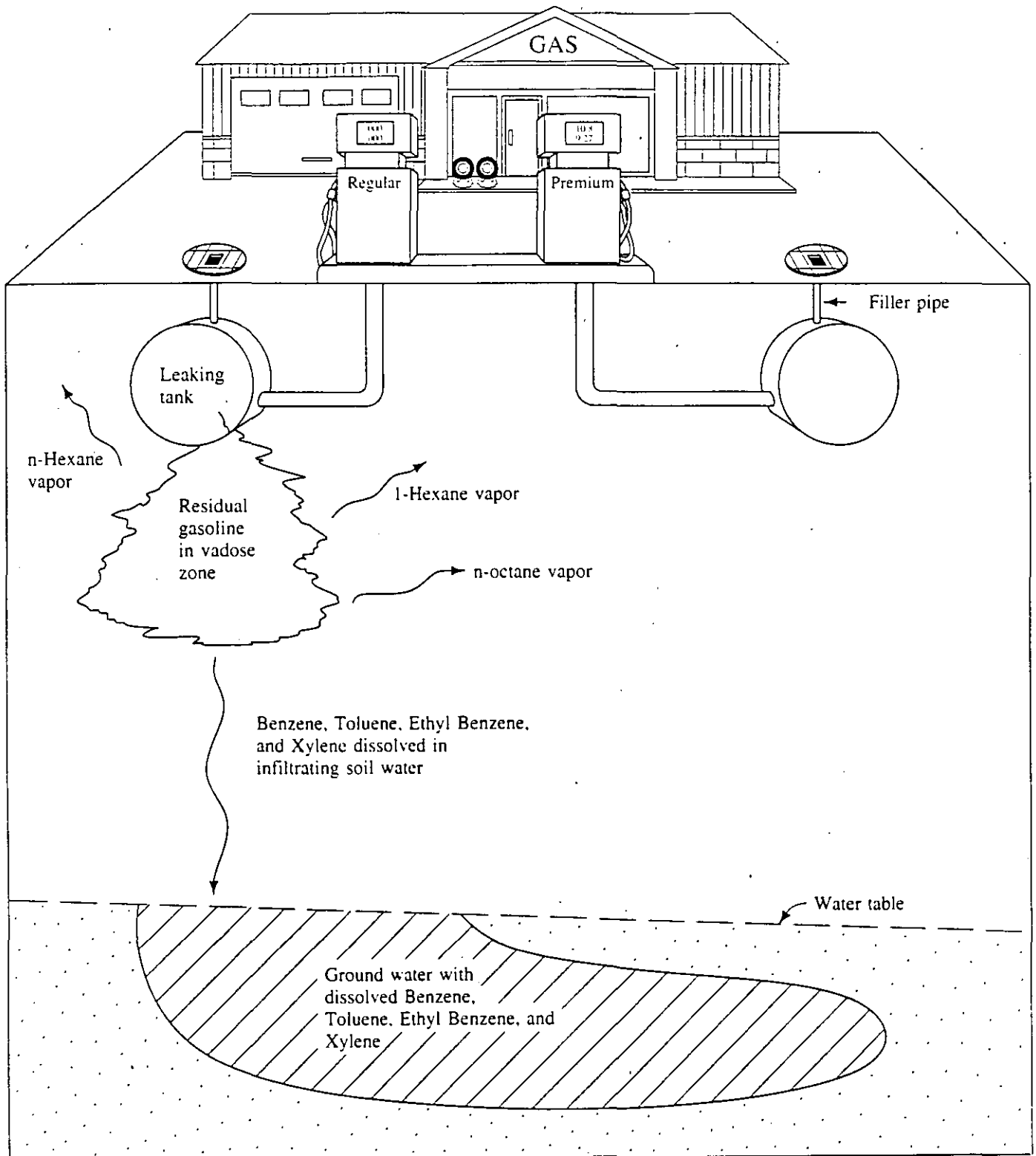
**2. NO DEBERA CONTENER ORGANISMOS FECALES**



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



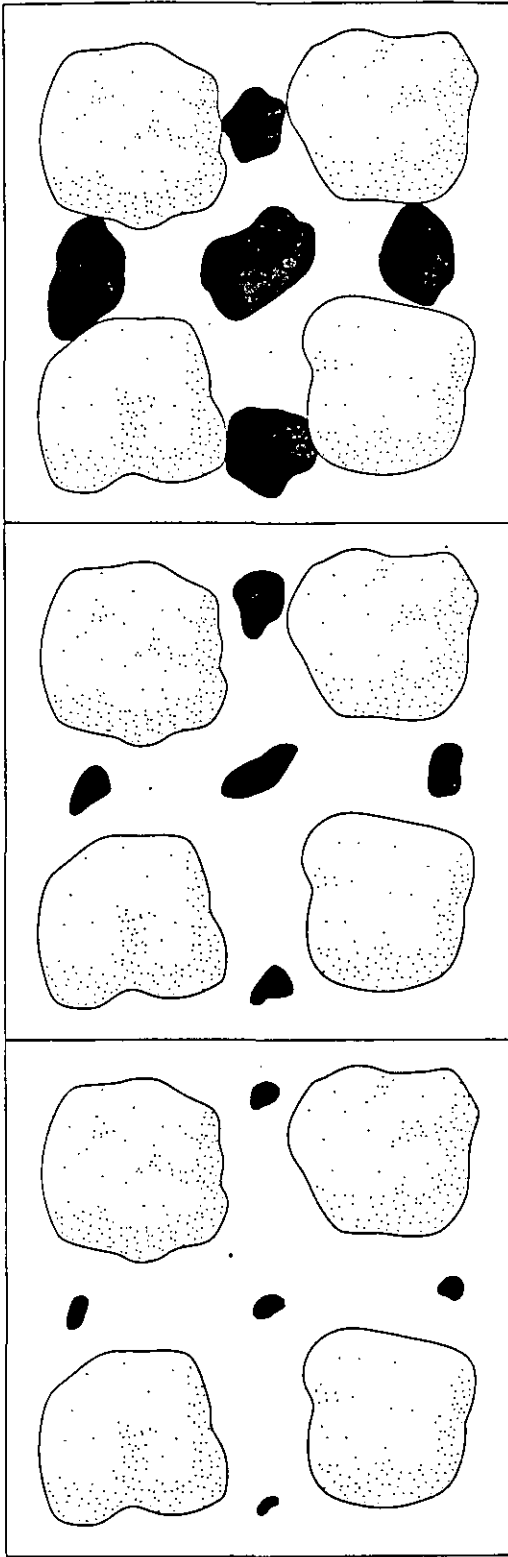
**FIGURE 6.15** Geochemical zonation of the leachate plume from a landfill receiving organic waste.



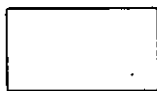
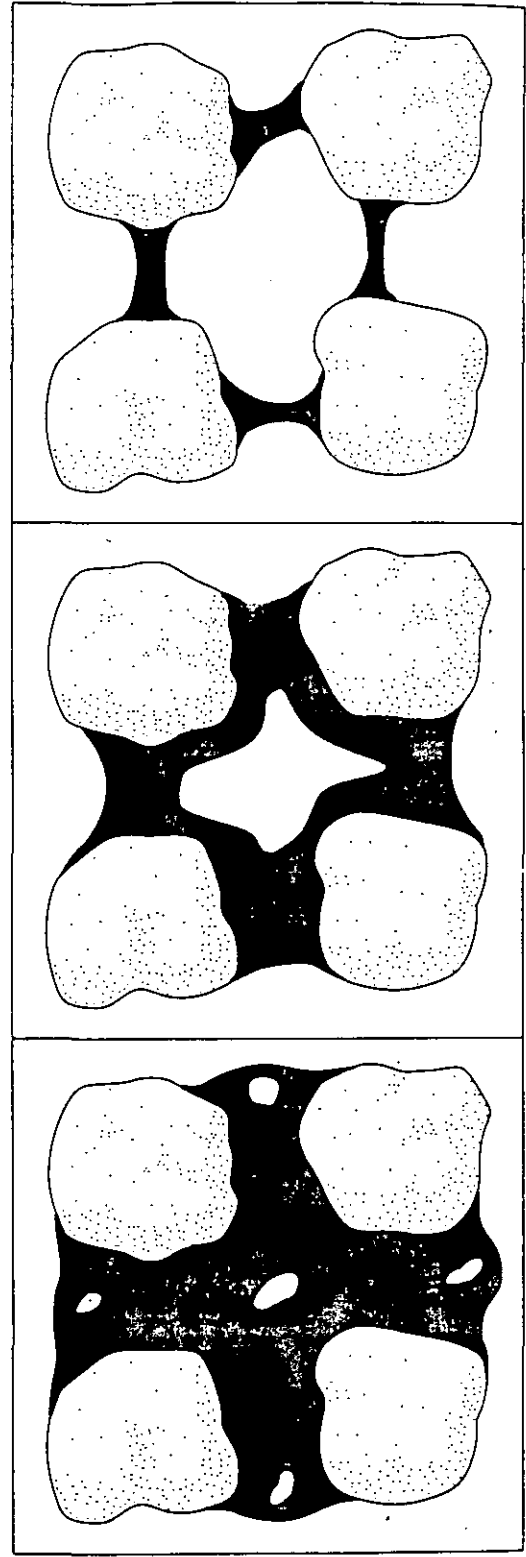
**FIGURE 5.18** Process of ground water being contaminated by gasoline constituents from residual gasoline in the vadose zone.



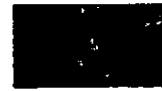
Water wet sand



Oil wet sand

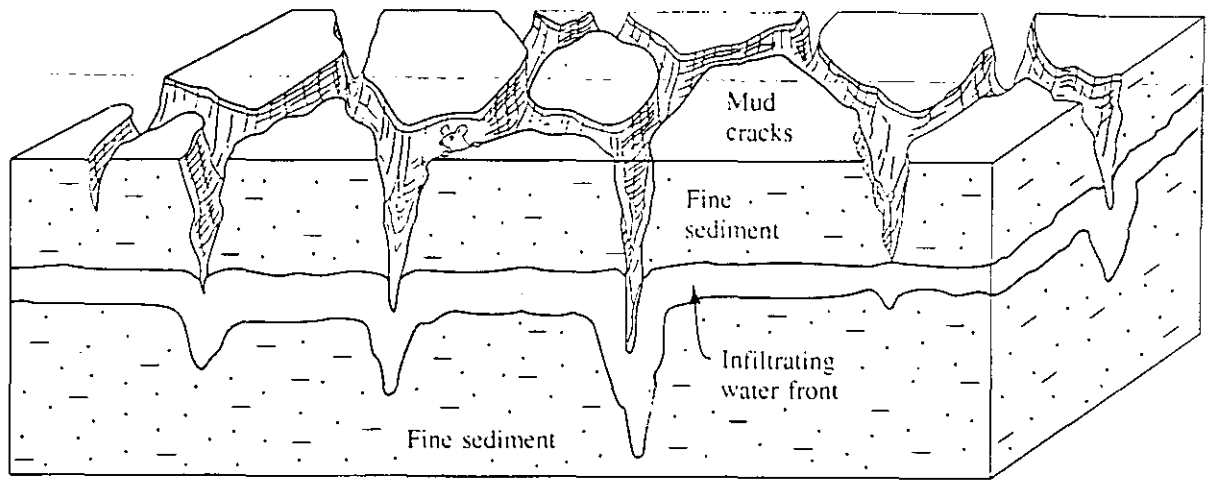


Water

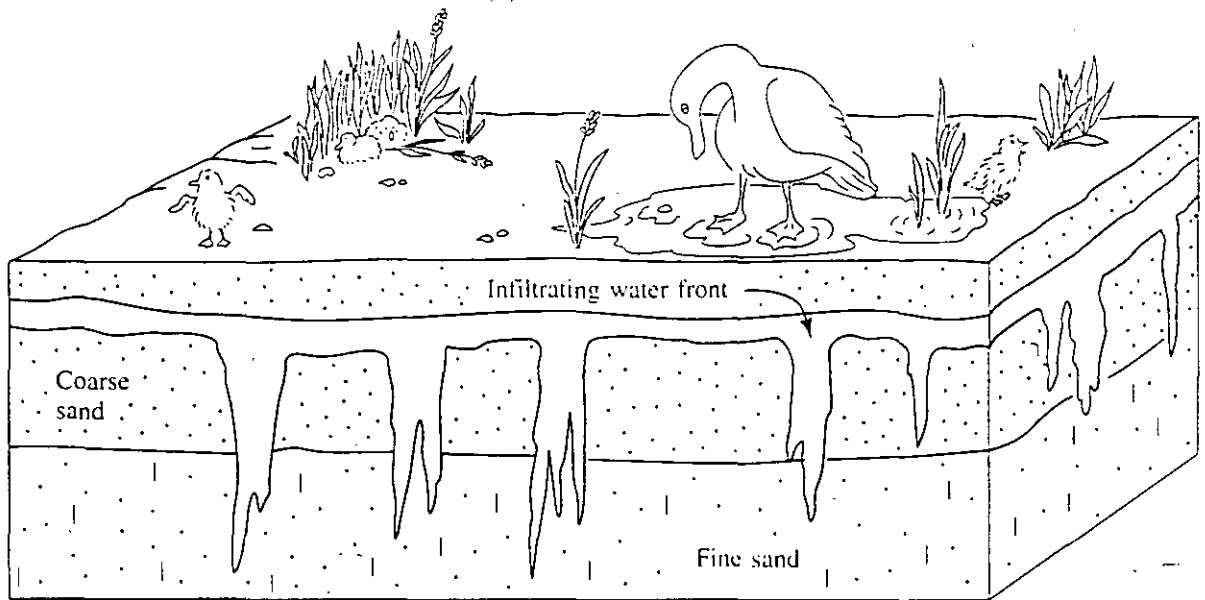


Oil

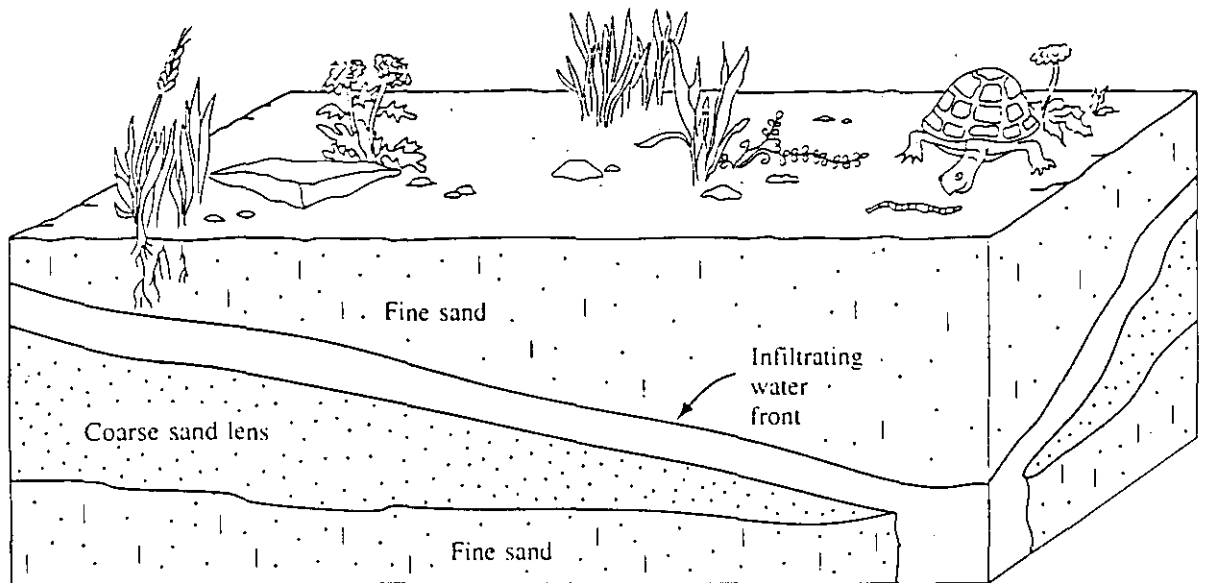
**FIGURE 5.5** Different fluid saturation states for a porous media that contains water and oil.



(a)

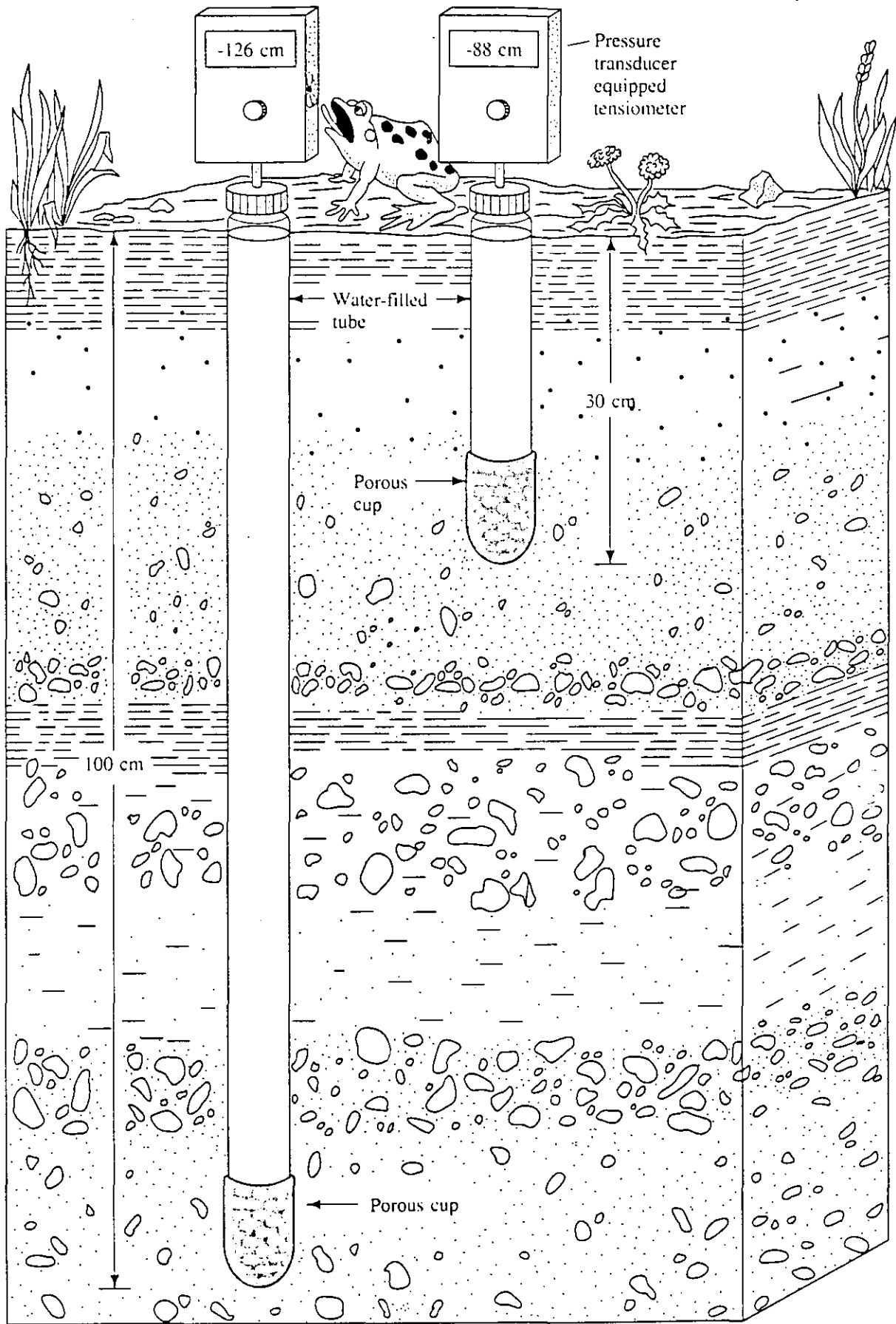


(b)

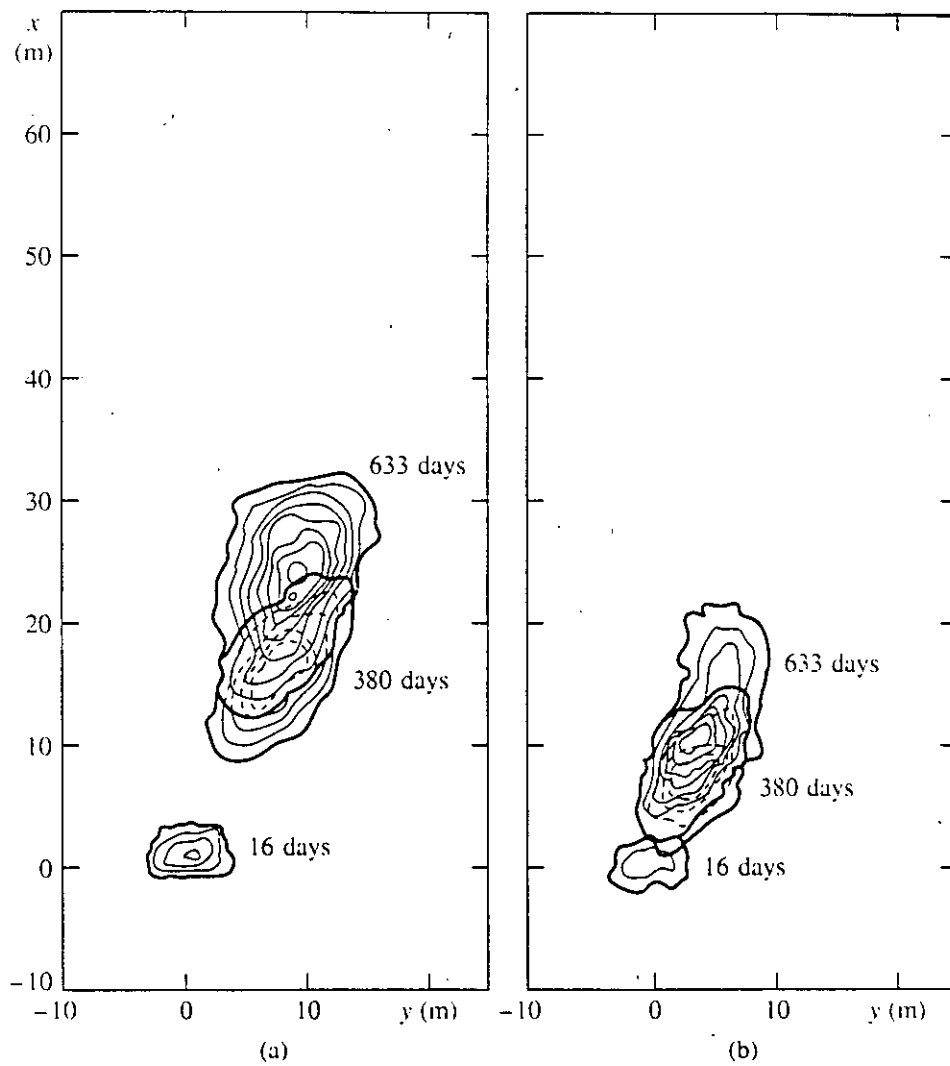


(c)

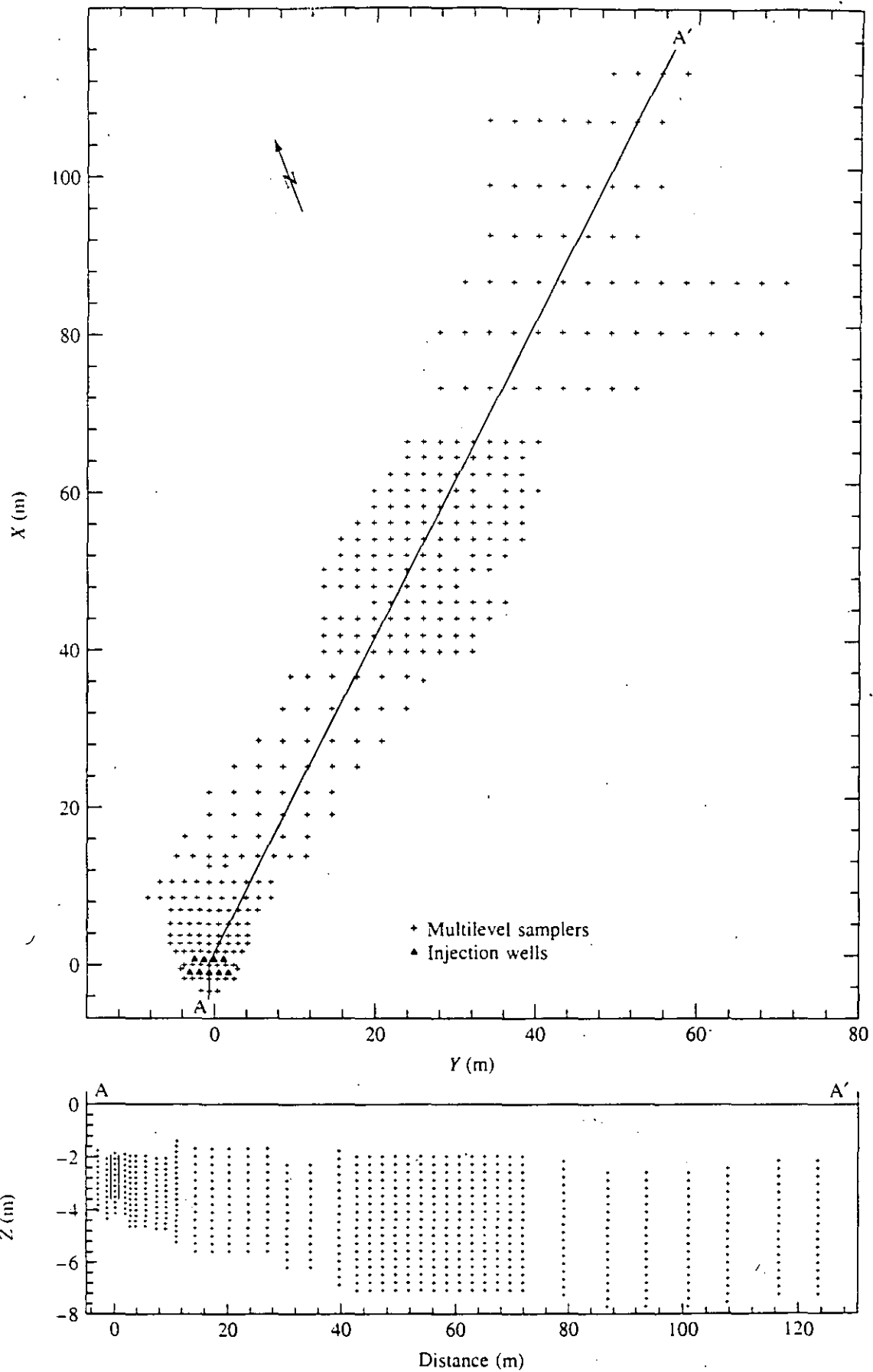
**FIGURE 4.18** Preferential water movement in the vadose zone due to (a) short circuiting, (b) fingering, and (c) funneling.



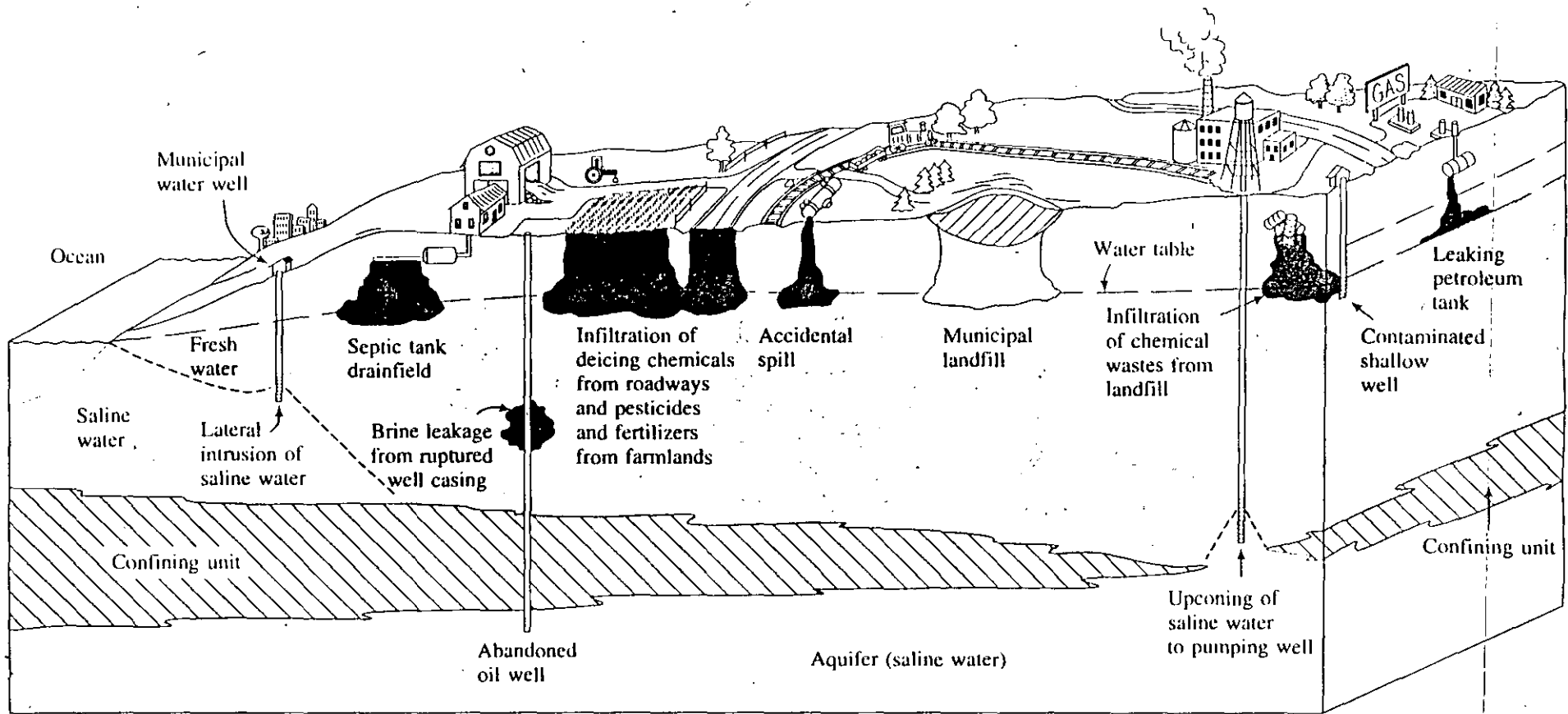
4.10 Tensiometer used to measure soil-water potential in the field.



**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
<b>Aromatic hydrocarbons</b>	
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 <sup>a</sup>
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
Naphthalene	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
<b>Oxygenated hydrocarbons</b>	
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

Source: Office of Technology Assessment, *Protecting The Nation's Groundwater from Contamination*, 1984, pp. 23-31.

Contaminant	Examples of uses
<b>Hydrocarbons with specific elements (cont'd)</b>	
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
Heptachlorepoide	Degradation product of heptachlor, also acts as an insecticide
Hexachlorobicycloheptadiene	NA
Hexachlorobutadiene	Solvent, transformer and hydraulic fluid, heat-transfer liquid
$\alpha$ -Hexachlorocyclohexane (= Benzenehexachloride, or $\alpha$ -BHC)	Insecticides
$\beta$ -Hexachlorocyclohexane ( $\beta$ -BHC)	Insecticides
$\gamma$ -Hexachlorocyclohexane ( $\gamma$ -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
<b>Oxygenated hydrocarbons (cont'd)</b>	
Di-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., <i>p</i> -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
<b>Hydrocarbons with specific elements (e.g., with N, P, S, Cl, Br, I, F)</b>	
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
<b>Hydrocarbons with specific elements</b>	
<b>(cont'd)</b>	
RDX (Cyclonite)	Explosives
Simazine	Herbicides
Tetrachlorobenzene	NA <sup>a</sup>
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
<b>Other hydrocarbons</b>	
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
<b>Metals and cations</b>	
Aluminum	Alloys, foundry, paints, protective coatings, electrical industry, packaging, building and construction, machinery and equipment
Antimony	Hardening alloys, solders, sheet and pipe, pyrotechnics

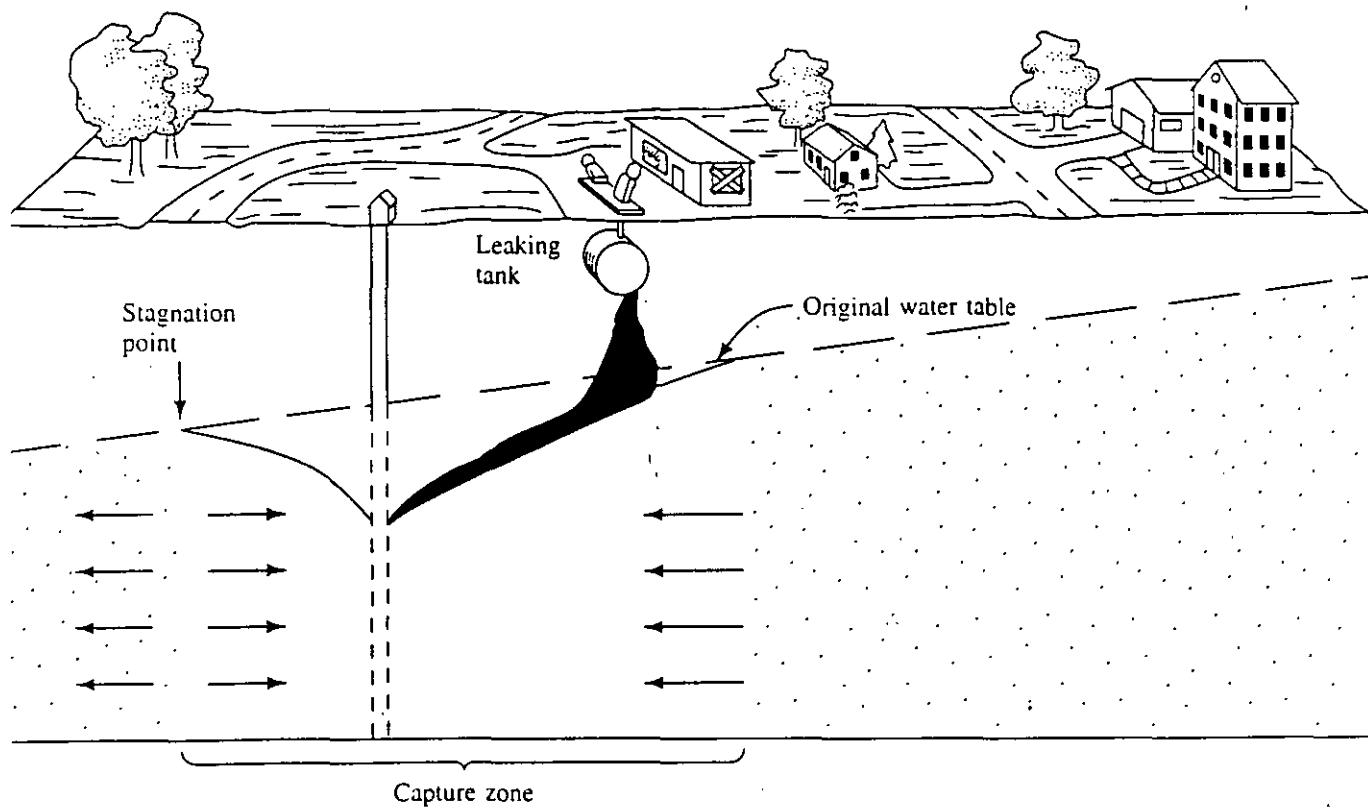
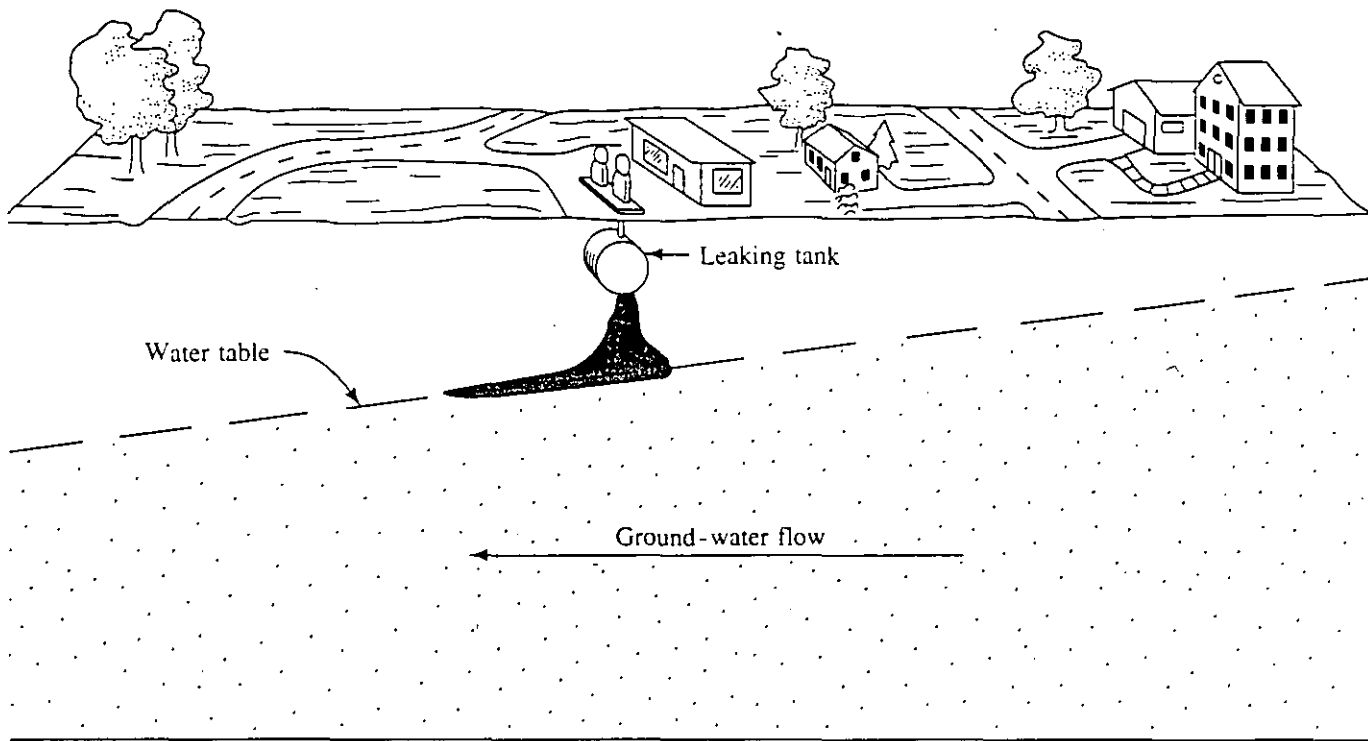
Contaminant	Examples of uses
<b>Metals and cations (cont'd)</b>	
Arsenic	Alloys, dyestuffs, medicine, solders, electronic devices, insecticides, rodenticides, herbicide, preservative
Barium	Alloys, lubricant
Beryllium	Structural material in space technology, inertial guidance systems, additive to rocket 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
<b>Nonmetals and anions</b>	
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
<b>Nonmetals and anions (cont'd)</b>	
Phosphates	Detergents, fertilizers, food additives
Sulfates	Fertilizers, pesticides
Sulfites	Pulp production and processing, food preservatives
<b>Microorganisms</b>	
Bacteria (coliform)	
Giardia	
Viruses	
<b>Radionuclides</b>	
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

72

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

73



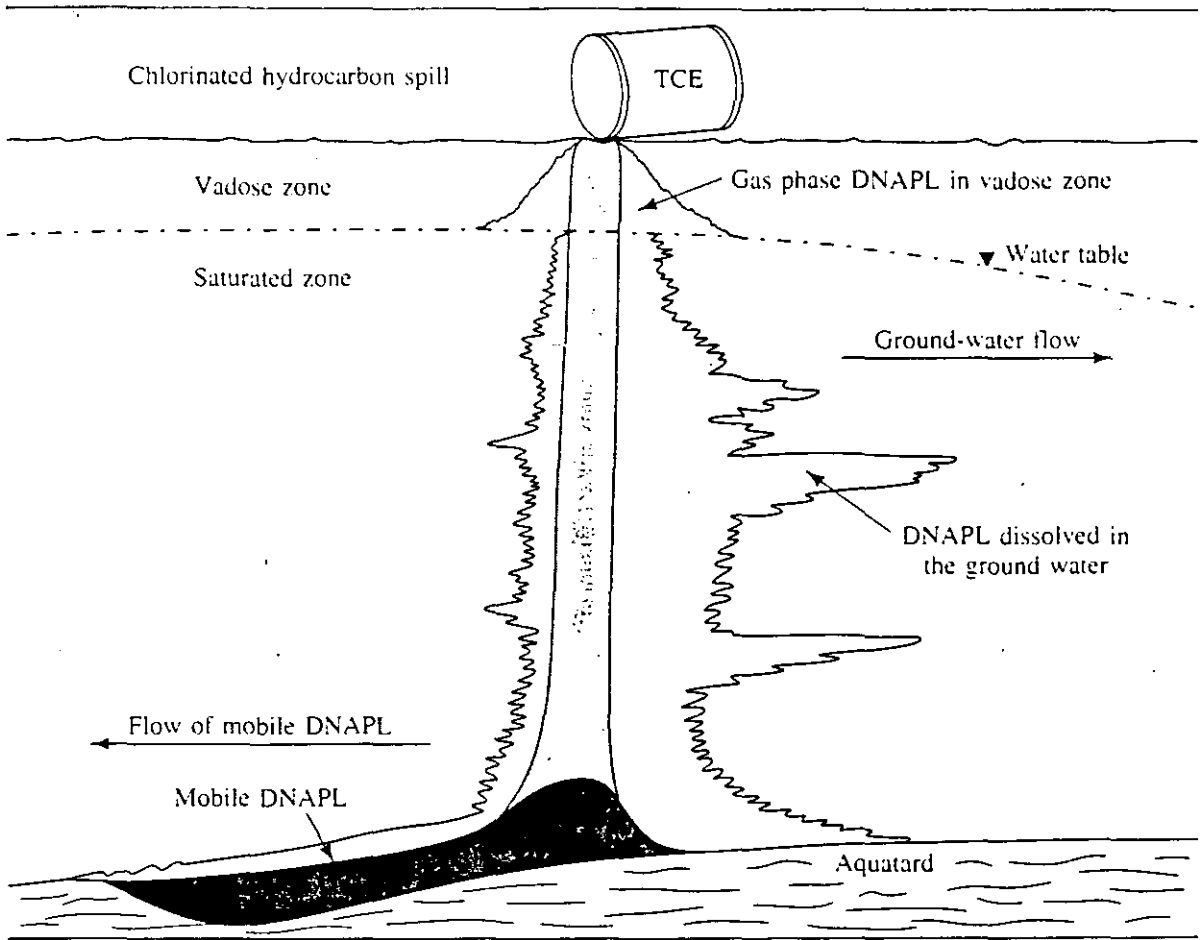


FIGURE 5.25 Distribution of a dense nonaqueous phase liquid in the vadose and saturated zone.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.  
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
CURSOS ABIERTOS  
VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
MODULO II: CONTAMINACION DE ACUIFEROS**

**CALIDAD DEL AGUA**

**QFB. BEATRIZ SANTAMARIA**



## **CALIDAD DEL AGUA**

1. PARAMETROS FISICOS, QUIMICOS Y BIOLOGICOS.
2. FUENTES DE CONTAMINACION.
3. NORMATIVIDAD MEXICANA PARA AGUA POTABLE.
4. PROGRAMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA POTABLE

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 considera 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 $\text{CaCO}_3$ .....	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- $\text{CaCO}_3$ .....	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 protéico.....	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 organizarán, de confor-

midad con los requisitos que fije la Secretaría, la autorización de responsable de control de calidad sanitaria del agua.

**ARTICULO 218.**—Los propietarios u organismos y entidades responsables de sistemas de abastecimiento, deberán cumplir con las disposiciones que emita la Secretaría sobre potabilidad, agua y control de la misma y con los requisitos sanitarios que establezca para los propios sistemas de abastecimiento.

**ARTICULO 219.**—El responsable de control de calidad sanitaria del agua deberá cumplir con lo señalado en el artículo 101 de este Reglamento.

**ARTICULO 220.**—La autoridad sanitaria, en el ámbito de su competencia, vigilará la potabilidad y otorgará "Certificado de Condición Sanitaria de Agua" a los sistemas de abastecimiento en operación, sean públicos o privados, que reúnan los requisitos sanitarios y mantengan la condición del agua abastecida dentro de los límites permisibles.

Dicho certificado tendrá vigencia de un año, pudiendo prorrogarse por períodos iguales, pero se cancelará si el agua resultara no apta para el consumo humano y hasta en tanto se alcancen de nuevo los límites permisibles autorizados.

**ARTICULO 221.**—Los sistemas privados de abastecimiento a establecimientos, deberán disponer del Certificado de Condición Sanitaria de Agua dentro de los 15 días iniciales de su operación.

**ARTICULO 222.**—Cuando el agua de algún sistema de abastecimiento no reúna las características de potabilidad, la autoridad sanitaria a fin de proteger la salud de los usuarios, procederá a ordenar que el consumo se suspenda o se condicione, hasta que se le dé al agua el tratamiento adecuado o, en su caso, se localice otra fuente apropiada.

**ARTICULO 223.**—Queda prohibido contaminar o modificar la composición bacteriológica y físico-química del agua de un sistema de abastecimiento, haciéndola impropia para consumo humano.

**ARTICULO 224.**—Corresponde a la Secretaría y a los gobiernos de las entidades federativas, en sus respectivos ámbitos de competencia, vigilar la potabilidad del agua cuando se destine para uso y consumo humano.

**ARTICULO 225.**—La Secretaría determinará las características y restricciones sanitarias de uso de los equipos y aparatos purificadores de agua de tipo doméstico. Al efecto, se incorporarán en la norma correspondiente, los métodos de prueba a que deberán someterse previamente a su autorización.

**ARTICULO 226.**—La autoridad sanitaria divulgará la información necesaria para que la población atienda eficazmente a la conservación intradomiciliaria de la potabilidad del agua.

**ARTICULO 227.**—En materia de agua para uso humano, la Secretaría vigilará y en su caso establecerá:

I. Sus características acordes con el tipo de uso y, en su caso, las restricciones de uso correspondiente;

II. Las normas a que deberá sujetarse su tratamiento para evitar riesgos y daños a la salud pública.

III. Los criterios sanitarios que deben satisfacer las construcciones, instalaciones y equipos para su conducción, tratamiento y distribución, en su caso;

IV. El tipo, contenido, métodos y periodicidad de los análisis y exámenes necesarios para determinar y vigilar sus características, y

V. Los demás aspectos, condiciones, requisitos y características que la Secretaría juzgue necesarios para que el agua pueda ser destinada para uso humano.

## CAPITULO II

### Hielo para consumo humano y para refrigerar

**ARTICULO 228.**—Se entiende por hielo para consumo humano, el producto obtenido por congelación de agua potable, por lo que deberá cumplir con los requisitos que se establecen para ésta, en el presente ordenamiento.

**ARTICULO 229.**—Los propietarios o encargados de las fábricas de hielo para consumo humano, verificarán semanalmente la calidad del producto para asegurar su potabilidad. Los resultados de las determinaciones físicas, químicas y bacteriológicas, debidamente fechadas, se mantendrán por lo menos durante un año, a disposición de la autoridad sanitaria que los requiera.

**ARTICULO 230.**—El hielo que se destine para ser ingerido o para la refrigeración directa de alimentos, bebidas y en general de todos aquellos productos de que trata este

**PROYECTO de Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Salud.- Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario.

MERCEDES JUAN LOPEZ, Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en el artículo 39 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; artículos 38 fracción II, 45, 46 fracción II y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; artículos 116 y 118 de la Ley General de Salud, me permito ordenar la publicación en el Diario Oficial de la Federación del proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, "Agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización".

El presente proyecto de Norma Oficial Mexicana se publica a efecto de que los interesados dentro de los siguientes 90 días naturales, contados a partir de la fecha de su publicación presenten sus comentarios ante el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, sito en Lieja número 7, 1er. piso, colonia Juárez, código postal 06696, México, D.F.

Durante el plazo mencionado, los análisis que sirvieron de base para la elaboración del proyecto de Norma estarán a disposición del público para su consulta en el domicilio del Comité.

México, Distrito Federal, a 21 de junio de mil novecientos noventa y cuatro.

### INDICE

#### 0 INTRODUCCION

#### 1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

#### 2 REFERENCIAS

#### 3 DEFINICIONES

#### 4 LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DE AGUA

#### 5 TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACION DEL AGUA

#### 6 BIBLIOGRAFIA

#### 7 OBSERVANCIA DE LA NORMA

### AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO - LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION.

#### 0 INTRODUCCION

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características biológicas, físicas, organolépticas, químicas y elementos radiactivos.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización.

#### 1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

#### 2 REFERENCIAS

NOM-008-SCF1-1993 "Sistema General de Unidades de Medida"

#### 3 DEFINICIONES

**3.1 Ablandamiento.-** Proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua.

**3.2 Adsorción.-** Remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución.

**3.3 Agua para uso y consumo humano.-** Aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano.

**3.4 Características bacteriológicas :-** Son aquellas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales.

**3.5 Características físicas y organolépticas.-** Son aquéllas 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 aquéllas 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 Limite 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 LÍMITES 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**

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>LÍMITE PERMISIBLE</b>
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 <sup>-</sup> )	0.07
Cloro residual libre	0.5-1.00 (después de un tiempo de contacto mínimo de 30 min)
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Hierro	0.30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Fosfatos (como PO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	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.

5.3.9 Nitratos y nitritos.- Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos.

5.3.10 pH (potencial de hidrógeno).- Neutralización.

5.3.11 Plaguicidas.- Adsorción con carbón activado granular.

5.3.12 Trihalometanos.- Preozonización y adsorción con carbón activado granular.

5.3.13 Sulfatos.- Intercambio iónico u ósmosis inversa.

5.3.14 En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias contempladas o no contempladas en el apartado 4, se deben coordinar con la autoridad sanitaria competente, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas involucrados en la contingencia, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

## 6 BIBLIOGRAFIA

6.1 NOM-Z-13 "Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas".

6.2 Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios. Diario Oficial de la Federación. Enero de 1988.

6.3 Desinfección del Agua. Oscar Cáceres López. Lima, Perú. Ministerio de Salud. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1990.

6.4 Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud. Organización Mundial de la Salud. 1985.

6.5 Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 2. Criterios relativos a la salud y otra información de base. Organización Panamericana de la Salud. 1987.

6.6 Ingeniería Sanitaria Aplicada a la Salud Pública. Francisco Unda Opazo. UTEHA 1969.

6.7 Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Gordon M. Fair, John C. Geyer, Daniel A. Okun. Limusa Wiley. 1971.

6.8 Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano. Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupacional. Secretaría de Salud. 1987.

6.9 Integrated Design of Water Treatment Facilities. Susumu Kawamura. John Willey and Sons, Inc. 1991.

6.10 Normas Técnicas para el Proyecto de Plantas Potabilizadoras. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas. 1979.

6.11 Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. IPS. International Programme on Chemical Safety. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1991.

6.12 WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 1. Recommendations. World Health Organization. 1992.

6.13 WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information. Chapter 1: Microbiological Aspects. United Nations Environment Programme. International Labour Organization. World Health Organization. 1992.

## 7 OBSERVANCIA DE LA NORMA

7.1 Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que distribuya agua para uso y consumo humano.

7.2 La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud y a los gobiernos de las entidades federativas en coordinación con la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

**NORMA Oficial Mexicana NOM-012-SSA1-1993, Requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Salud.

**NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM 012-SSA1-1993. "REQUISITOS SANITARIOS QUE DEBEN CUMPLIR LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO PUBLICOS Y PRIVADOS".**

FILIBERTO PEREZ DUARTE, Director General de Salud Ambiental, por acuerdo del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en los artículos 39 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 38, fracción II, 45, 46 fracción II y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 8o. fracción IV y 25 fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Salud.

**CONSIDERANDO**

Que con fecha 5 de octubre de 1993, en cumplimiento de lo previsto en el artículo 46 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Dirección General de Salud Ambiental presentó al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, el anteproyecto de la presente Norma Oficial Mexicana.

Que con fecha 12 de noviembre de 1993, en cumplimiento del acuerdo del Comité y de lo previsto en el artículo 47 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó en el **Diario Oficial de la Federación** el proyecto de la presente Norma Oficial Mexicana a efecto que dentro de los siguientes noventa días naturales posteriores a dicha publicación, los interesados presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario.

Que en fecha previa 27 de abril de 1994, fueron publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** las respuestas a los comentarios recibidos por el mencionado Comité, en términos del artículo 47 fracción III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Que en atención a las anteriores consideraciones, contando con la aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, se expide la siguiente:

**NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM-012-SSA1-1993. "REQUISITOS SANITARIOS QUE DEBEN CUMPLIR LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO PUBLICOS Y PRIVADOS".**

**Indice**

0 Introducción

1 Objetivo y Campo de Aplicación

2 Referencias

3 Definiciones

4 Disposiciones Especificas

5 Control Sanitario y Medidas Preventivas

6 Bibliografía

7 Observancia de la Norma

8. Vigencia

## 0 Introducción

El control de la calidad del agua es la clave para reducir los riesgos de transmisión de enfermedades gastrointestinales a la población por su consumo; este control se ejerce evaluando los parámetros de calidad del agua y por otra parte vigilando que las características de las construcciones, instalaciones y equipos de las obras de captación, conducción, plantas de potabilización, redes de distribución, tanques de almacenamiento o regulación y tomas domiciliarias protejan el agua de contaminación.

### 1 Objetivo y Campo de Aplicación

Esta Norma Oficial Mexicana establece los requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano públicos y privados para preservar su calidad.

### 2 Referencias

NOM-AA-108 "Determinación de Cloro Libre y Cloro Total Método Volumétrico de la DPD Ferrosa"

NOM-AA-111 "Determinación de Cloro Libre y Cloro Total, Método Colorimétrico".

NOM-Z-1 "Sistema General de Unidades de Medida - Sistema Internacional de Unidades (SI)".

NOM-Z-13 "Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas".

### 3 Definiciones

**3.1 Agua subterránea.-** Aquélla que fluye bajo la superficie del terreno, incluyendo el agua de afloramiento natural (manantiales).

**3.2 Agua superficial.-** Aquélla que fluye sobre la superficie del terreno, o se almacena en cauces o embalses, sean naturales o artificiales.

**3.3 Bitácora.-** Libro registro foliado.

**3.4 Canal de desviación.-** Cauce artificial que se construye para desviar y conducir el agua a un punto específico.

**3.5 Cárcamo de bombeo.-** Estructura para almacenar agua con fines de bombeo.

**3.6 Contracuneta.-** Extensión de talud de la cuneta revestida de concreto, la cual se construye para proteger a ésta de deslaves.

**3.7 Cuneta.-** Zanja de desagüe de la precipitación pluvial, revestida de concreto.

**3.8 Estación de bombeo o rebombeo.-** Conjunto de estructuras y equipos de bombeo que sirven para aumentar la presión del agua con el fin de elevarla a niveles más altos o para mantener uniforme la presión en las redes de distribución.

**3.9 Línea de conducción e interconexión.-** Tuberías y accesorios para llevar el agua desde captaciones, estaciones de bombeo o plantas de potabilización hasta los tanques o redes de distribución.

**3.10 Obra de captación.-** Estructura que sirve para extraer el agua de las fuentes de abastecimiento superficiales o subterráneas.

**3.11 Organismo operador.-** Instancia responsable de operar, mantener y administrar el sistema de abastecimiento.

**3.12 Planta de potabilización.-** Conjunto de estructuras, instalaciones, procesos y operaciones que sirven para mejorar la calidad del agua, haciéndola apta para uso y consumo humano.

**3.13 Red de distribución.-** Conjunto de tuberías que sirve para llevar el agua hasta el usuario.

**3.14 Registro.-** Abertura con tapa que permite la entrada de personal para acciones de limpieza y mantenimiento.

**3.15 Requisitos sanitarios de los sistemas de abastecimiento.-** Características que deben cumplir las construcciones, instalaciones y equipos que los integran, para proteger el agua de contaminación.

**3.16 Sistema de abastecimiento.-** El 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.

**3.17 Tanque de almacenamiento o regulación.-** Depósito superficial o elevado que sirve para almacenar el agua o regular su distribución.

#### **4 Disposiciones Específicas**

**4.1** Las obras de captación, tanques de almacenamiento o regulación, plantas potabilizadoras y estaciones de bombeo, deben protegerse mediante cercas de mallas de alambre o muros con la altura y distancia suficiente que impida la disposición de desechos sólidos, líquidos o excretas y el paso de animales. Permitiéndose el acceso sólo a personal autorizado.

**4.2** Las obras de captación, almacenamiento, regulación y estaciones de bombeo, deben protegerse de contaminación exterior debida a escurrimientos o infiltraciones de agua u otros vectores, mediante lo siguiente:

**4.2.1** Losa de concreto, cunetas, contracunetas o canales de desviación con la capacidad suficiente, ubicadas en el perímetro de la instalación,

**4.2.2** Sellos impermeables en juntas y uniones de instalaciones, equipos y estructuras, así como en fisuras o fracturas cuando éstas se presenten, y

**4.2.3** Con tela tipo mosquitero o similar, deben protegerse los dispositivos de ventilación de cualquier estructura que contenga o almacene agua, sean rejillas, tubos u otros ductos.

**4.3** Las áreas interiores de estaciones de bombeo y plantas potabilizadoras en sus diferentes edificios de dosificación de reactivos, laboratorios, máquinas, almacenes, etc., deben mantenerse siempre aseadas y pintadas de acuerdo con los códigos de colores correspondientes. Los pisos, lambrines y paredes, deben ser recubiertos con materiales que permitan fácil limpieza.

**4.4** Los edificios o casetas destinados al almacenamiento y aplicación de desinfectantes, sea cloro, compuesto de cloro u otros productos químicos deben mantener el piso seco y ventilación adecuada que permita circulación cruzada del aire.

**4.5** Los tanques y cárcamos para abastecer agua directamente a la red de distribución, deben estar cubiertos y contar con los siguientes dispositivos:

**4.5.1** Ductos de ventilación en forma de codo invertido,

**4.5.2** Pendiente mínima de 1% tanto en la cubierta como el piso y caja colectora de sedimentos. Este requisito debe ser cumplido por las instalaciones que se proyecten a partir de la publicación de la Norma,

**4.5.3** Registros de acceso, y

**4.5.4** Tubos para desfogue.

**4.6** Los tanques de almacenamiento o regulación, los cárcamos de bombeo, las cajas colectoras o repartidoras y en general las estructuras que contengan agua para uso y consumo humano, deben limpiarse, dependiendo del estado de conservación interior de los mismos. La limpieza debe incluir:

**4.6.1** Remoción y extracción de sólidos sedimentados e incrustados,

**4.6.2** Lavado y desinfección de pisos y muros, y

**4.6.3** Resane e impermeabilización de fisuras.

**4.7** En las redes de distribución, sus extremos terminales o muertos, deben drenarse y desinfectarse sin suspender el servicio cada seis meses o antes dependiendo del azolve.

En nuevos proyectos de redes de distribución deben eliminarse los extremos terminales o muertos.

4.8 Las tuberías de las redes de distribución, deben ubicarse longitudinalmente en la calle, en los extremos laterales de la misma a un nivel superior al del alcantarillado y a la máxima distancia posible de éste.

### 5 Control Sanitario y Medidas Preventivas

5.1 No deben construirse obras de captación en fuentes de abastecimiento cuyas cargas de contaminantes por su magnitud y peligrosidad pongan en riesgo la salud humana.

5.2 Debe preservarse la calidad bacteriológica del agua en cualquier parte del sistema hasta en los puntos más alejados de la red de distribución, mediante la desinfección continua y permanente del agua que garantice la existencia de cloro residual libre entre 0.5 a 1.0 mg/l.

5.3 Cuando se presenten interrupciones prolongadas del servicio, debidas a fallas mecánicas, eléctricas, por mantenimiento o de cualquier otra causa, al restablecimiento del servicio se debe reforzar la desinfección durante las seis horas siguientes, garantizando la existencia de cloro residual libre entre 1.0 a 1.5 mg/l.

5.4 En los casos de obra nueva de almacenamiento, conducción y distribución, mantenimiento de tanques de almacenamiento y regulación, reparación o cambio de tuberías, deben limpiarse y desinfectarse antes de iniciar su operación.

5.5 Las acciones de limpieza, drenado y desinfección y determinación de cloro residual libre, deben registrarse en una bitácora y estar disponibles cuando la autoridad sanitaria competente los requiera.

5.6 La evaluación de las condiciones sanitarias de las instalaciones de los sistemas de abastecimiento de agua para uso y consumo humano, la efectúa la autoridad sanitaria competente mediante las visitas de verificación sanitaria que establezca el Programa de Vigilancia y Certificación de la Calidad del Agua para Uso y Consumo Humano de la Secretaría de Salud.

### 6 Bibliografía

6.1 Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano. Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupacional. Secretaría de Salud. 1987.

6.2 Ingeniería Sanitaria Aplicada a la Salud Pública. Francisco Unda Opazo. UTEHA. 1969.

6.3 Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios. Enero, 1988.

6.4 Ley de Aguas Nacionales. Diciembre, 1992.

### 7 Observancia de la Norma

7.1 Esta Norma es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que distribuyan agua para uso y consumo humano.

7.2 La vigilancia del cumplimiento de esta Norma corresponde a la Secretaría de Salud y a los gobiernos de las entidades federativas en sus respectivos ámbitos de competencia, en coordinación con la Comisión Nacional del Agua.

### 8 Vigencia

8.1 La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor con su carácter de obligatorio, al día siguiente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

Sufragio Efectivo. No Reelección.

México, D.F. a 3 de junio de 1994.- El Director General de Salud Ambiental.- Filiberto Pérez Duarte.- Rúbrica.

**NORMA Oficial Mexicana NOM-013-SSA1-1993, Requisitos sanitarios que debe cumplir la cisterna de un vehículo para el transporte y distribución de agua para uso y consumo humano.**

Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Salud.

**NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM 013-SSA1-1993. "REQUISITOS SANITARIOS QUE DEBE CUMPLIR LA CISTERNA DE UN VEHICULO PARA EL TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO".**

FILIBERTO PEREZ DUARTE, Director General de Salud Ambiental, por acuerdo del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, con fundamento en los artículos 39 de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 38, fracción II, 45, 46 fracción II y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 80 fracción IV y 25 fracción V del Reglamento Interior de la Secretaría de Salud.

**CONSIDERANDO**

Que con fecha 5 de octubre de 1993, en cumplimiento de lo previsto en el artículo 46 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, la Dirección General de Salud Ambiental presentó al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, el anteproyecto de la presente Norma Oficial Mexicana:

Que con fecha 12 de noviembre de 1993, en cumplimiento del acuerdo del Comité y de lo previsto en el artículo 47 fracción I de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, se publicó en el Diario Oficial de la Federación el proyecto de la presente Norma Oficial Mexicana a efecto que dentro de los siguientes noventa días naturales posteriores a dicha publicación, los interesados presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario.

Que en fecha previa 27 de abril de 1994, fueron publicadas en el Diario Oficial de la Federación las respuestas a los comentarios recibidos por el mencionado Comité, en términos del artículo 47 fracción III de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización.

Que en atención a las anteriores consideraciones, contando con la aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización de Regulación y Fomento Sanitario, se expide la siguiente:

**NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM 013-SSA1-1993. "REQUISITOS SANITARIOS QUE DEBE CUMPLIR LA CISTERNA DE UN VEHICULO PARA EL TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DE AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO".**

**INDICE**

- 1 Objetivo y campo de aplicación
- 2 Referencias
- 3 Definiciones
- 4 Disposiciones específicas
- 5 Control sanitario
- 6 Bibliografía
- 7 Observancia de la norma
- 8 Vigencia
- 1 Objetivo y Campo de Aplicación

Esta Norma Oficial establece los requisitos sanitarios que debe cumplir la cisterna de un vehículo para el transporte y distribución de agua para uso y consumo humano, pública o privada.

**2 Referencias**

- NOM-AA-108 "Determinación de Cloro Libre y Cloro Total - Método Volumétrico de la DPD Ferrosa".
- NOM-AA-111 "Determinación de Cloro Libre y Cloro Total - Método Colorimétrico".
- NOM-Z-1 "Sistema General de Unidades de Medida - Sistema Internacional de Unidades (SI)".
- NOM-Z-13 "Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas".

**3 Definiciones**

- 3.1 Bitácora.- Libro registro foliado.



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

VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
de septiembre 19 a octubre 14

MODULO II.  
TEMA: RELLENOS SANITARIOS.  
IMPACTO AMBIENTAL, DISEÑO Y OPERACION.

ING. FRANCISCO SUZAN COLOMBRES.



**ASPECTOS GENERALES DEL SUBSECTOR DE ASEO URBANO Y  
ALGUNAS CARACTERISTICAS DEL RELLENO SANITARIO**

**OCTUBRE 3 DE 1994.**

**FRANCISCO SUZAN COLOMBRES**

## **INDICE**

### **CAPITULO I**

#### **1.DEFINICION Y MARCO LEGAL**

1.1 Definición de los Residuos Sólidos Municipales

1.2 Legislación

### **CAPITULO II**

#### **1.PROBLEMÁTICA**

1. Características Generales

1.1 Generación

1.2 Recolección y Disposición

1.3 Tratamiento y Reciclaje

1.4 Administración y Comercialización

1.5 Organización

1.6 Recursos Humanos y Participación

#### **2.PROBLEMÁTICA**

2.1 Indicadores y Costos del Servicio

#### **3.VIABILIDAD DE RECUPERACION DE LOS COSTOS**

3.1 Valor de recuperación de los subproductos

3.2 Requerimientos de Inversión

3.3 Estimación de Ingresos

3.4 Estimación de Egresos

3.5 Análisis de Resultados

3.6 Centros de Acopio

#### **4.COMENTARIOS**

### **CAPITULO III**

### **3.RELLENO SANITARIO**

#### **3.1 Definición**

#### **3.2 Tipos de Terreno**

#### **3.3 Métodos de Disposición Final**

### **4.SELECCION DE TERRENOS APTOS**

#### **4.1 Geohidrología**

#### **4.2 Ciclo Hidrológico**

#### **4.3 Precipitación Pluvial**

#### **4.4 Evapotranspiración**

### **5.MECANICA DE SUELOS**

#### **5.1 Parámetros**

#### **5.2 Granulometría**

### **6.ESTUDIO TOPOGRAFICO**

### **7. VIDA UTIL**

#### **7.1 Generación de Residuos Sólidos**

### **8.DISEÑO DE CELDA DIARIA**

### **9.DISEÑO DE FRANJAS**

### **10.DISEÑO DE CAPAS**

### **11.DRENAJE DEL LIQUIDO PERCOLADO**

### **12.DRENAJE DE AGUA DE LLUVIA**

### **13.SISTEMA DE CAPTACION DE BIOGAS**

**14.OBRAS COMPLEMENTARIAS**

**15.SELECCION DE MAQUINARIA**

**15.1 Tipos de Maquinaria**

**16.COSTO DE INVERSION Y OPERACION**

**BIBLIOGRAFIA.**

# ***CAPITULO I***

## **1.- DEFINICIONES Y MARCO LEGAL**

### **1.1 Definición de Residuos Sólidos Municipales.**

Técnicamente, a los residuos sólidos municipales se les denomina residuos sólidos no peligrosos y son aquellos que provienen de las actividades desarrolladas en casa-habitación (residuos domésticos) y también los que se generan en sitios y servicios públicos y privados como son establecimientos y centros comerciales, calles, parques públicos, construcciones y demoliciones, etcétera (residuos no domésticos).

Por lo tanto, aquí no se incluyen residuos industriales y tampoco los residuos de hospitales, clínicas, sanatorios y laboratorios, los cuales deben ser sujetos a un manejo de confinamiento y/o incineración especial.

### **1.2 Legislación.**

La Constitución Política de nuestro país (Art. 115), la Constitución Política estatal y la Ley Orgánica del Municipio, establecen como facultad de los ayuntamientos, la prestación del servicio de limpia pública, su administración, la concesión parcial o total y establecimiento de cuotas y tarifas por prestación del servicio público.

Desde el punto de vista ambiental, la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente define que los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se aplicarán en la operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios (Arts. 134 y 135).

A esta misma Ley General (Art. 136) y la Ley Estatal de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, establecen que en el manejo y disposición de los residuos sólidos peligrosos se debiera prevenir:

- A) LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO.**
- B) Las alteraciones en el proceso biológico de los suelos.**
- C) Las alteraciones en el suelo que afecten su aprovechamiento, uso o explotación.**
- D) Los riesgos de daños a la salud.**

Se señala asimismo que las facultades de manejo y disposición de residuos sólidos no peligrosos, el control de las instalaciones y la operación de los confinamientos o depósitos y la promoción del reuso o reciclaje, son de competencia municipal.

*Síntesis de las regulaciones actuales en materia ambiental.*

<b>ORDEN</b>	<b>LEYES</b>	<b>REGLAMENTOS</b>
<b>FEDERAL</b>	<p><b>.LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCIÓN AL AMBIENTE</b></p> <p><b>.LEY DE AGUAS NACIONALES</b></p> <p><b>.LEY FEDERAL DE OBRA PÚBLICA</b></p>	<p><b>.EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL</b></p> <p><b>.EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS</b></p> <p><b>.EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.</b></p> <p><b>.EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA</b></p> <p><b>.REGLAMENTO DE OBRA PÚBLICA.</b></p>
<b>ESTATAL</b>	<p><b>.LEYES ESTATALES DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y PROTECCIÓN AL AMBIENTE</b> (Todos los Edo. excepto Campeche y Tlaxcala.)</p>	<p><b>.REGLAMENTOS EN MATERIA DE IMPACTO AMBIENTAL.</b></p> <p><b>.REGLAMENTOS EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.</b></p> <p><b>.REGLAMENTOS EN MATERIA DE PREVENCIÓN Y CONTROL DEL AGUA.</b></p>
<b>MUNICIPAL</b>	<p><b>.REGULACIONES MUNICIPALES</b></p>	<p><b>.REGLAMENTOS DE POLICÍA Y BUEN GOBIERNO.</b></p> <p><b>.REGLAMENTOS MUNICIPALES DE LIMPIEZA.</b></p> <p><b>.BANDOS MUNICIPALES</b></p>

## Normas Oficiales Mexicanas con relación a Residuos Sólidos.

NUM. NORMA	TITULO
- NOM-AA-15-85	Residuos sólidos municipales- muestreo- método de cuarteo. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-16-84.	Residuos sólidos municipales. Determinación de humedad en desechos sólidos. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-18-84.	Residuos sólidos municipales. Determinación de cenizas. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-19-85	Residuos sólidos municipales. Peso volumétrico in situ. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-21-85.	Residuos sólidos municipales. Determinación de materia orgánica en desechos sólidos. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-22-85	Residuos sólidos municipales. Selección y cuantificación de subproductos. SECOFI.
- NOM-AA-24-84.	Residuos sólidos municipales. Determinación de nitrógeno total. Cancela NOM-AA-22-75. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-25-84.	Residuos sólidos municipales. Determinación de pH método potenciométrico. Cancela NOM-AA-25-75. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-31-76.	Residuos sólidos municipales. Determinación de azufre en desechos sólidos. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-32-76	Residuos sólidos municipales. Determinación fósforo total en desechos sólidos. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-33-85.	Residuos sólidos municipales. Determinación del poder calorífico superior. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-52-85.	Residuos sólidos municipales. Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-61-85.	Residuos sólidos municipales. Determinación de la generación. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-67-85.	Residuos sólidos municipales. Determinación de la relación carbono-nitrógeno. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-68-85.	Residuos sólidos municipales. Determinación de hidrógeno partir de la materia orgánica. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-80-88	Residuos sólidos municipales. Determinación del porcentaje de oxígeno en materia orgánica.
- NOM-AA-91-85	Residuos sólidos municipales. Terminología de residuos sólidos. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-92-84.	Residuos sólidos municipales. Determinación de azufre. SECOFI. Dirección General de Normas.
- NOM-AA-94-85.	Residuos sólidos municipales. Determinación del fósforo total. SECOFI. Dirección General de Normas.



## ***CAPITULO II***

## 1. CARACTERISTICAS GENERALES

Los residuos que se vierten sin control provenientes de las actividades productivas, están ocasionando el deterioro del medio ambiente contaminando el agua, aire y suelo. Aunado a las altas tasas de crecimiento demográfico y los problemas de concentración y dispersión de la población en México, ha dificultado atender en forma oportuna las demandas del servicio de aseo urbano.

Una de las principales fuentes de contaminación del suelo, así como del medio ambiente, es la provocada por la disposición no sanitaria de los residuos sólidos municipales e industriales.

### 1.1. Generación

La generación de basura domiciliaria varía de 0.3 a 0.6 kg/hab/día, correspondiendo el menor valor a zonas rurales, sin embargo, si se incluyen los residuos sólidos que se generan en mercados, comercios y servicios de una localidad la generación per cápita puede llegar hasta 1.0 kg/hab/día. (Cuadro 1)

Se estima, que los residuos sólidos municipales que generan aproximadamente 81 millones de habitantes en la República Mexicana, es del orden de 60,000 toneladas al día, de los cuales el 94% de la basura total proviene de las zonas urbanas y el 16% de zonas rurales. (Cuadro 2)

Respecto a los residuos sólidos industriales, se genera en el país más de 400 mil toneladas al día (146 millones/año) y el 4% del total son de características altamente peligrosas.

La industria petroquímica, en sus procesos de refinación y petroquímica primaria, genera anualmente a nivel nacional 1,710,448 tons., de residuos industriales, de los cuales, el 90.15% son semisólidos, 9.6% líquidos y .25% sólidos. Del total el 13% se consideran peligrosos (222,358 tons.,) y el 87% no peligrosos. Actualmente, se está reciclando el 1% de los residuos siendo susceptibles de reciclar 188,149 Tons. (11%).

### 1.2 Recolección y Disposición

A nivel nacional se recolectan 72,000 Tn/día, es decir, 70% del total generado; las 18,000 toneladas restantes quedan tiradas en lotes baldíos, calles, barrancas, ríos, creando las condiciones propicias para la proliferación de la fauna nociva, quemas a cielo abierto y posibilitando la contaminación de los cuerpos de agua. (Cuadro 3 y Fig.1)

**CUADRO No. 1**

**GENERACION PER CAPITA EN ALGUNOS PAISES Y CIUDADES**

<b>PAISES</b>		<b>CIUDADES</b>	
CANADA	1,900 kg/h/d	MEXICO, D.F.	1.00 kg/h/d
E.U.A.	1,500 kg/h/d	RIO DE JANEIRO	0.90 kg/h/d
HOLANDA	1,300 kg/h/d	BUENOS AIRES	0.80 kg/h/d
SUIZA	1,200 kg/h/d	SAN JOSE	0.74 kg/h/d
JAPON	1,000 kg/h/d	SAN SALVADOR	0.68 kg/h/d
EUROPA(OTROS)	0.900 kg/h/d	TEGUCIGALPA	0.52 kg/h/d
INDIA	0.400 kg/h/d	LIMA	0.50 kg/h/d
MEXICO	0.640 kg/h/d		

**CUADRO No. 2**  
**CARACTERISTICAS GENERALES SOBRE ASEO URBANO EN**  
**MEXICO Y AMERICA LATINA**

<b>INDICADOR</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>MEXICO 1990</b>	<b>LATINOAMERICA 1990*</b>
TOTAL POBLACION URBANA	MILLONES DE HAB. MILLONES DE HAB.	81.2 59.2	367 266
CIUDADES CON MAS DE 1,000,000 HAB.	ADIMENSIONAL	6	36
GENERACION PERCAPITA	KG/HAB/DIA	0.64	0.54
GENERACION TOTAL DE BASURA	MILES DE TONELADAS/DIA	52	198
COBERTURA DE RECOLECCION	POR CIENTO	75	82 (1)
COBERTURA DE DISPOSICION SANITARIA	POR CIENTO	40	30
FORMALES TRABAJADORES INFORMALES	MILES DE PERSONAS MILES DE PERSONAS	N.D. N.D.	250 100

\* OPS/OMS

SITUACION REGIONAL DEL ASEO URBANO  
 JUNIO 1991

N.D. NO DISPONIBLE

1) PAISES CON CIUDADES MAYORES DE UN MILLON  
 DE HABITANTES

ARCH.FSC1.WK1

CUADRO No. 3

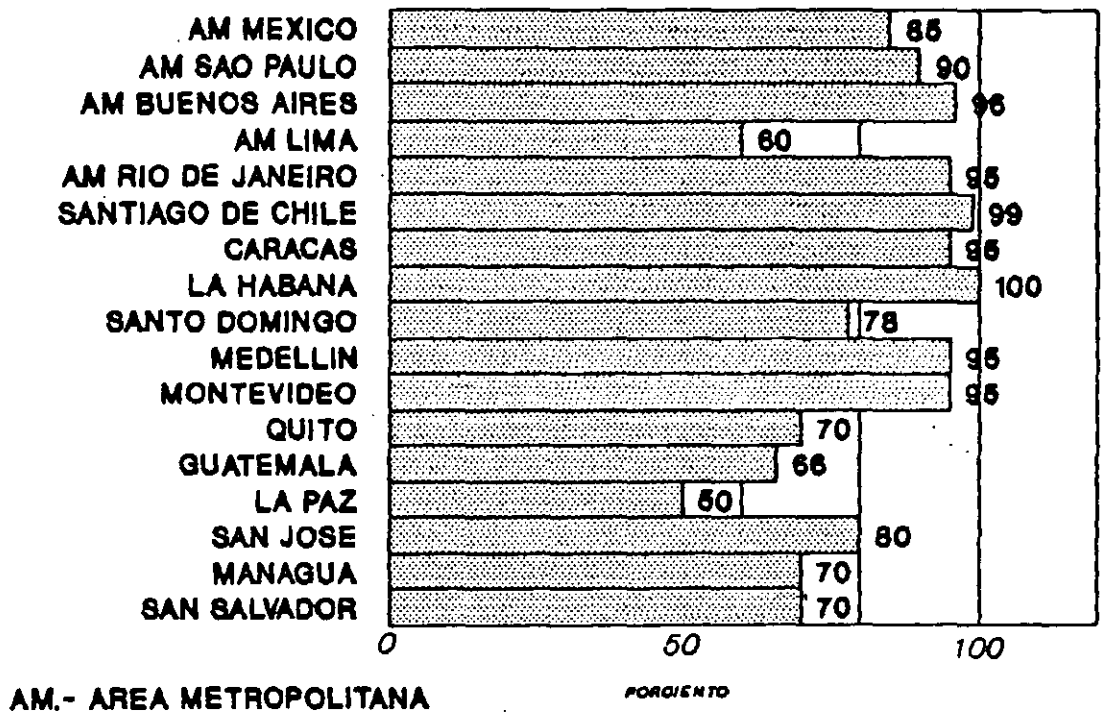
GENERACION Y RECOLECCION EN ALGUNAS LOCALIDADES

GENERACION DE BASURA		
CIUDADES	TON/DIA	%
AM MEXICO	11,000	20.0
AM SAO PAULO	10,000	19.0
AM BUENOS AIRES	8,000	15.0
AM LIMA	3,500	6.0
AM RIO DE JANEIRO	5,000	9.0
SANTIAGO DE CHILE	3,200	6.0
CARACAS	4,000	7.0
LA HABANA	1,400	3.0
SANTO DOMINGO	1,250	2.0
MEDELLIN	750	2.0
MONTEVIDEO	900	2.0
QUITO	900	2.0
GUATEMALA	940	2.0
LA PAZ	600	1.0
SAN JOSE	800	2.0
MANAGUA	600	1.0
SAN SALVADOR	650	1.0
<b>TOTAL:</b>	<b>53,490</b>	<b>100.0</b>

RECOLECCION DE BASURA	
CIUDADES	TON/DIA
AM MEXICO	9,400
AM SAO PAULO	9,000
AM BUENOS AIRES	7,680
AM LIMA	2,100
AM RIO DE JANEIRO	4,750
SANTIAGO DE CHILE	3,168
CARACAS	3,800
LA HABANA	1,400
SANTO DOMINGO	975
MEDELLIN	713
MONTEVIDEO	855
QUITO	630
GUATEMALA	620
LA PAZ	300
SAN JOSE	640
MANAGUA	420
SAN SALVADOR	455
<b>TOTAL:</b>	<b>46,906</b>

ARCH.JLG1.WK1

**FIGURA NUM. 1  
COBERTURA DE RECOLECCION**



De la basura recolectada, únicamente, el 45% se deposita en 34 rellenos sanitarios controlados, beneficiando a más de 20 millones de habitantes, el resto es vertida en tiraderos a cielo abierto.

La infraestructura con que se cuenta para el reciclaje, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos industriales, aún es muy reducida; se estima en un 30%, que comprende 3 confinamientos de servicios públicos; 4 particulares y 12 empresas autorizadas para reciclar residuos con un volumen de operación anual, superior a las 150,000 toneladas y un confinamiento controlado para residuos sólidos peligrosos ubicado en Mina, N.L.

### 1.3. Tratamiento y Reciclaje

La composición de los residuos refleja por un lado la capacidad del ingreso medio familiar y el consumismo existente y por otro el valor de rescate de los residuos viables de ser reciclados.

En este sentido, en los países desarrollados, el porcentaje de residuos sólidos inorgánicos es superior al 50% y en específico los porcentajes de papel y cartón son mayores al 30%. Por ejemplo en E.U.A., se tiene un 26% de orgánicos y 36% de papel y cartón, en la India son 75% y 2% respectivamente. Para México se tiene 50% de orgánicos y 20% de papel y cartón. (Cuadro No. 4 y Figura 2)

En México, de 7 plantas de tratamiento que se identificaron que en conjunto tienen una capacidad de 2,550 toneladas por día, cuatro se encuentran fuera de operación, en las restantes se hace composta y se lleva separación de subproductos, procesando 260 toneladas en total, es decir únicamente se está aprovechando el 10% de la capacidad total instalada. (Cuadro 5)

Este tipo de plantas han dejado de operar, debido a los altos costos de operación de la composta, a su escasa demanda y a su baja calidad de producción, situación que es comparable con Latinoamérica, ya que en los últimos 20 años, de 30 plantas de composta, 15 han cerrado a los pocos años por negativa de las autoridades para seguir las manejando por no ser costeables.

En los países desarrollados, el aprovechamiento de la basura son: el relleno sanitario con aprovechamiento del biogas, la incineración con aprovechamiento de la energía, la biotransformación en compost y la producción de combustible auxiliar. (Cuadro 6).

CUADRO No. 4

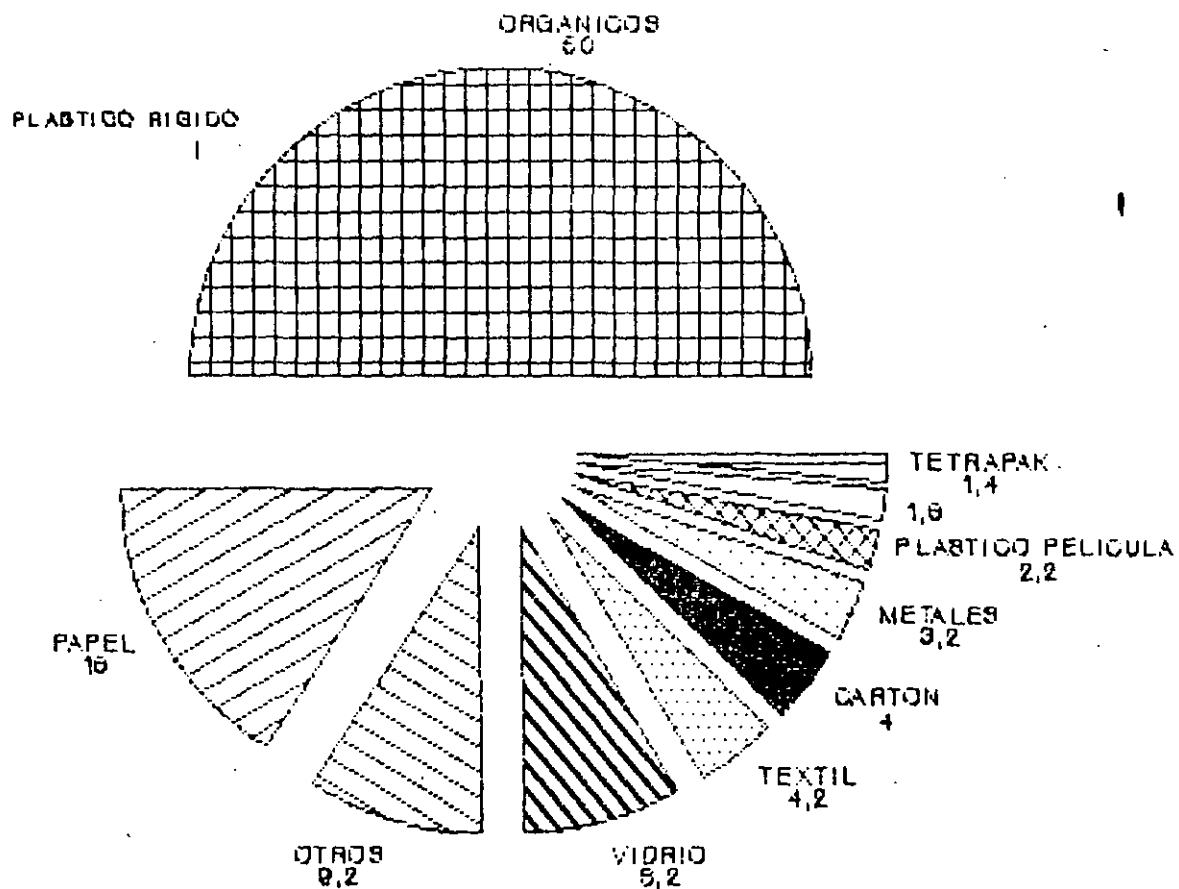
COMPOSICION DE LOS RESIDUOS (% EN PESO)  
EN DIVERSOS PAISES

PAISES PRODUCTOS	SUECIA	E.U.A.	JAPON	EUROPA	MEXICO	EL SALVADOR	PERU	INDIA
CARTON Y PAPEL	44.0	36.0	40.0	30.0	20.0	18.0	10.0	2.0
METALES	7.0	9.2	2.5	5.0	3.2	0.8	2.1	0.1
VIDRIO	5.0	9.8	1.0	7.0	8.2	0.8	1.3	0.2
TEXTILES	0.0	2.1	0.0	3.0	4.2	4.2	1.4	3.0
PLASTICOS	10.0	7.2	7.0	6.0	3.8	6.1	3.2	1.0
ORGANICOS	0.0	26.0	0.0	30.0	50.0	43.0	50.0	75.0
OTROS	34.0	9.7	49.5	19.0	10.6	27.1	32.9	18.7

ARCH.FSC6.WK1



# FIGURA NUM. 2 COMPOSICION DE LOS RESIDUOS GENERADOS EN MEXICO



% EN PESO

CUADRO No. 5

## DATOS SOBRE TRATAMIENTO EN ALGUNAS CIUDADES

CIUDAD	TIPO DE TRATAMIENTO	CAPACIDAD INSTALADA T/M/DIA	CAPACIDAD APROVECHADA T/M/DIA	CALIDAD COMPOST PRECIO/TON	% RECIKLADO (PESO)	FINANZAS	OBSERVACIONES
RIO	TRANSFERENCIA RECICLAJE COMPOST (PILAS)	--	250	BUENA 20,305	4 A 6%	SUBVENCIONADA	
SAO PAULO	RECICLAJE COMPOST (BIODIG)	400	200-300	BUENA 5,270	3 A 6	SUBVENCIONADA	
LA HABANA	PLANTA ALIMENTO CERDO	?	?	?	?	?	RESIDUOS PROVENIENTES DE RESTAURANTES, CAFETERIAS, ETC.
DISTRITO FEDERAL	RECICLAJE COMPOST (PILAS)	500	--	--	11%	--	FUERA DE OPERACION
GUADALAJARA	RECICLAJE COMPOST	500	--	--	--	--	FUERA DE OPERACION
MONTERREY	RECICLAJE COMPOST	750	--	--	--	--	FUERA DE OPERACION
OAXACA	RECICLAJE COMPOST	250	240	BUENA	--	SUBVENCIONADA	
MERIDA	RECICLAJE COMPOST	200	20	--	10%	SUBVENCIONADA	INICIA OPERACION 1992
VILLAHERMOSA	RECICLAJE COMPOST	200	--	?	3%	--	FUERA DE OPERACION
TOLUCA	RECICLAJE COMPOST	150	--	--	--	--	FUERA DE OPERACION

ARCHIVO: DATOS.WK1 DISCO SFSA 1992 DISCO ROJO

CUADRO No. 6

TENDENCIAS DEL TRATAMIENTO Y LA DISPOSICION FINAL  
EN DIVERSOS PAISES Y REGIONES

PAIS O REGION	TRATAMIENTO O DISPOSICION FINAL (M)		
	RELLENADO SANITARIO (O BASURERO)	COMBUSTION	COMPOST
ESTADOS UNIDOS	80	19	1
INGLATERRA	10	-	1
JAPON	30	70	2
ALEMANIA	70	30	3
FRANCIA	55	40	9
SUIZA	20	80	1
SUECIA	40	55	5
ESPAÑA	80	15	5
AMERICA LATINA	98	1	1
MEXICO	98		2

ARCHIVO: TENDENC WK1 DISCO SFSA 1992 ROJO

En México, la separación de los subproductos viables de ser reciclados, se realiza generalmente en los vehículos recolectores y en los sitios de disposición final. En la ciudad de México se estima que lo separado de la basura en camiones es del orden de 2.5% y en los sitios de disposición final alcanza un 10%.

En Japón se recicla del orden del 50% y en E.U.A., un 10% del total generado. En México, no se dispuso de información sobre el total reciclado, sin embargo, la industria del vidrio, estima que tiene una recuperación del 60% de su producción.

En general, se recomienda incentivar el reciclaje en la fuente, es decir, antes que los materiales recuperables se mezclen con otros residuos. Para establecer un programa de reciclaje, deben hacerse estudios en cada ciudad sobre la calidad, cantidad y viabilidad de comercialización, incluyendo el aprovechamiento actual y de alternativas de tratamiento, así como de disposición.

#### 1.4. Administración y Comercialización

En la mayoría de las Entidades Federativas, prevalece la administración directa municipal de los servicios de limpia, el cual se caracteriza por un desarrollo inferior a la de otros servicios municipales.

El servicio de limpia no está reglamentado, ni existe una política tarifaria que permita captar los recursos mínimos para administrar, operar y mantener los servicios de manera eficiente, y mucho menos para dar respuesta adecuada a la creciente demanda. Subsiste aún, el pago del servicio como parte del impuesto anual por el avalúo catastral.

El actual marco legal, en la medida que no clarifica la propiedad de la basura y los derechos de su posesión, uso y usufructo, dificulta modernizar los procesos de recolección, disponibilidad sanitaria y reutilización de algunos materiales. Aunado a ello, existe por lo regular, descontento del personal de limpia por las condiciones poco decorosas en que desempeñan sus labores.

#### 1.5 Organización

En los tres niveles de gobierno existe una tendencia de fortalecer este subsector, formando por una parte organismos operadores a nivel paraestatal o paramunicipal con capacidad jurídica y patrimonio propio y por otra parte otorgando el concesionamiento parcial o total de la prestación del servicio al sector privado o social.

CUADRO No. 7

ORGANIZACION

ORGANIZACION	UNIDADES	LATINOAMERICA		MEXICO
		CIUDADES GRANDES	CIUDADES PEQUEÑAS	
UNIDAD ADMINISTRATIVA MUNICIPAL	POR CIENTO	60	100	100
UNIDAD OPERADORA MUNICIPAL	POR CIENTO	40 ↑	100	100
EMPRESAS MUNICIPALES Y/O ESTATALES AUTONOMOS	POR CIENTO	40 ↑		TLAXCALA TAMAULIPAS NUEVO LEON
CONTRATISTAS PRIVADOS INDEPENDIENTES	ADIMENSIONAL	SOLO GUATEMALA		
CONTRATACION PRIVADA DEL MUNICIPIO	POR CIENTO	30 ↑	CHILE Y BRASIL	*ACAPULCO TECATE MERIDA PUEBLA

CRECIENTE: ↑

\* CONCESION PARCIAL: RECOLECCION EXCEPTO MERIDA, RECOLECCION, TRATAMIENTO E INCINERACION DE RESIDUOS SOLIDOS HOSPITALARIOS

\* PROXIMAS: CUERNAVACA, PUERTO VALLARTA, AGUASCALIENTES, CD. ACUÑA, MONTERREY, GUAYMAS, TULANCINGO, HIDALGO, SAN JUAN DEL RIO, TLALNEPANTLA, NAUCALPAN.

METROPOLIS CONURBADAS PRINCIPALMENTE EN LO REFERENTE A TRANSFERENCIA Y DISPOSICION FINAL ATIENDEN A TENER UNA SOLA AUTORIDAD.

ARCHIVO: ORGANI.WK1 DISCO FSC IV

CUADRO No. 8

CARACTERISTICAS DE LA PRESTACION DEL SERVICIO DE ASEO URBANO EN ALGUNAS CIUDADES CON MAS DE UN MILLON DE HABITANTES

CIUDAD	HABIT. EN MILL.	BASURA TON/DIA	COBERT. RECOLEC. %	COBERT. RELLENO SANITARIO (1)			TIPO DE INSTITUC. RESPON.S.	SERVICIO PROPIO O CONTRAT.	INGRESO/ COSTO (2)	NUMERO DE EMPLE.	EMPLEADOS POR 1000 HABIT.	TON. POR EMPLEADO
				BUENO	REGULAR	MALO						
A M MEXICO	20.0	18,000	80	20	40	40	MUNICIPAL	MUNICIPAL	MALO (0%)	17,000	0.85	0.88
A M SAO PAULO	16.0	10,000	90	65	10	25	MUNICIPAL	PRIVADO	BIEN			
A M B AIRES	13.0	8,000	96	100	0	0	E.M.A.	MIXTO	BIEN			
A M LIMA	6.0	3,500	60	60	10	30	E.M.A.	MUNICIPAL	MAL (25%)			
A M RIO DE J SANTIAGO	5.0	8,000	95	0	100	0	E.M.A.	MUNICIPAL	REGULAR	12,000	2.40	0.42
CARACAS	4.3	4,000	95	0	100	0	E.M.A.	PRIVADO	BIEN			
LA HABANA	2.0	1,400	100	0	100	0	E.M.A.	MUNICIPAL	MAL (15%)	7,500	1.74	0.53
S.DOMINGO	2.0	1,250	78	0	0	100	MUNICIPAL	MUNICIPAL	S/D	1,800	0.90	0.78
MEDELLIN	1.6	750	95	100	0	0	MUNICIPAL	MUNICIPAL	BIEN (100%)	750	0.47	1.00
MONTEVIDEO	1.3	900	95	0	0	100	E.M.A.	MUNICIPAL	S/D			
QUITO	1.3	900	70	0	0	100	MUNICIPAL	MUNICIPAL	MAL (13%)	750	0.88	1.20
GUATEMALA	1.3	940	66	0	0	100	MUNICIPAL	PRIV.(1)	BIEN			
LA PAZ	1.0	600	80	50	50	0	MUNICIPAL	MUNICIPAL	REGULAR	900	0.90	0.67
SAN JUAN	1.0	300	80	100	0	0	MUNICIPAL	MUNICIPAL	BIEN			
SAN JUAN DE MANAGUA	1.0	600	70	0	0	100	MUNICIPAL	MUNICIPAL	S/D			
SAN SALVADOR	1.0	650	70	0	70	30	MUNICIPAL	MUNICIPAL	REG (60%)	1,150	1.15	0.87
SUM A	82.0	57,490								41,850	8.99	6.08
PROM DIRECTO			82	25	28	37					1.12	0.75
PROM. PESADO			0	0	0	0						

(1) BUENO = RELLENO SANITARIO, REGULAR = RELLENO CONTROLADO, MALO = BASURERO A CIELO ABIERTO

(2) MALO = C/B 33%, REGULAR = C/B 66, BIEN C/B 66%

E M A. = EMPRESA MUNICIPAL DE ASEO

COBERTURAS.WK1 DISCO SFSA VERDE

Asimismo, se está impulsando la formación de empresas metropolitanas, como es el caso del Distrito Federal y los municipios conurbados del Estado de México, que en general atenderán los aspectos de transferencia y disposición sanitaria.

Algunos ejemplos donde se proporciona un servicio mixto, en el país son: Mérida, Yuc., Puebla, Pue., Tecate, B.C.Norte, Acapulco, Gro., Monterrey, N.L., Tlaxcala, Tlax., y en Centroamérica y Suramérica Cantón Central de la Ciudad de San José de Costa Rica, Santa Cruz, Bolivia y Río de Janeiro, Brasil, entre otras. (Cuadro 7)

### 1.6 Recursos Humanos y Participación de la Sociedad

La situación actual del personal de limpia, es de descontento, ya que están clasificadas en los últimos lugares del escalafón de servicios públicos, generando una escasez de recursos humanos y el existente, está poco capacitado y las condiciones de seguridad e higiene no son favorables.

En América Latina se tiene en promedio 1 trabajador por cada mil habitantes y en el país no es mayor a 0.8 recomendándose un rango 2 a 4 trabajadores por cada 1000 habitantes. (Cuadro 8)

Por otra parte, es necesario ampliar la participación de la comunidad en la planeación y operación de las distintas etapas del servicio, coadyuvando a decidir por ejemplo, en la selección de alternativas de solución, o bien participando en las campañas de aseo, entre otras acciones, promoviendo la participación ciudadana, buscando la modificación del comportamiento de grupos o de individuos, de tal manera que coadyuve con el servicio de aseo urbano, requiriéndose la cooperación del residente en mejorar el almacenamiento de la basura interdomiliario y en su caso, iniciar la separación en recipientes diferentes clasificándoles en residuos orgánicos e inorgánicos, requiriéndose una capacidad de respuesta del servicio y que generalmente no se tiene disponibilidad de recursos por parte del organismo operador.

**CUADRO No. 9**

**COSTOS SOBRE ASEO URBANO EN  
MEXICO Y AMERICA LATINA**

COMPONENTE	UNIDADES	MEXICO	LATINOAMERICA	E.U.A.
PERCAPITA	\$/HABIT/AÑO	28,000 A 69,000	12,000 A 26,500	75,000 A 240,000 (1)
DEL SERVICIO	\$/TONELADAS	120,000 - 295,000	56,000 A 132,000	135,000 A 435,000
BARRIDO MANUAL	\$/KILOMETRO	6,600-19,500	1,500 - 4,500	N.D.
RECOLECCION	\$/TONELADAS	36,000-75,000	36,000 -75,000	75,000-225,000
TRANSFERENCIA	\$/TONELADAS	15,000 A 30,000	4,500- 10,500	24,000- 60,000
RELLENO SANITARIO	\$/TONELADAS	15,000 - 18,000	3,000 - 9,000	36,000-150,000
RECUPERACION DE COSTOS	POR CIENTO	N.D.	50	N.D.

\* Kilometro de calle  
(1) No Incluye Barrido

N.D. No Disponible



**CUADRO No. 10**

**PRODUCTO INTERNO BRUTO POR HABITANTE 1990**

<b>REGION</b>	<b>PIB ST/AEVAÑO</b>
CANADA-EUA	30'000,000
T & T-BARBADOS	9'000,000-10'500,000
AMERICA LATINA	750,000-10'500,000
MEXICO	8'235,222

**CUADRO No. 11**

**RECUPERACION DE COSTOS EN CIUDADES GRANDES  
DE AMERICA LATINA**

<b>INGRESO / COSTO</b>	<b>PORCENTAJE</b>
2/3 - 1/1	45
1/3 - 2/3	20
0 - 1/3	35

## 2. COSTOS DEL SERVICIO

Los costos del servicio en México varían de 120 mil a 295 mil pesos la tonelada, en los que se incluye desde barrido hasta la disposición sanitaria de la basura. (Cuadro 9)

Cubrir los costos del servicio sin la separación por comercialización de subproductos reciclables, representaría un egreso familiar mensual del orden de 9,125 a 22,432 pesos, o sea 0.67 a 1.6 días del salario mínimo diario vigente en el D.F., lo anterior, se estimó con una generación per cápita domiciliaria de 0.5 kg/hab-día y una integración familiar de 5 personas.

Sin embargo, si consideramos que del 20 al 30% de la población urbana vive en zonas marginadas, donde la capacidad de pago es mínima y los servicios públicos municipales deficientes o se carecen de ellos, significaría que debería incrementarse el rango de cuotas, desde un 25% hasta un 43%, para excluir del pago a dicha población.

Esto significa, que para la población no marginada del 80%, el rango sería de \$11,406 a \$28,040 pesos/familia/mes.

Si se considera el 70% de población el rango sería de \$13,036 a \$32,046 pesos/familia/mes.

Es obvio, que en cada localidad la cuota que puede fijarse debe ser en función del estrato social, así como de la actividad económica del usuario, mismo que impacta tanto en volumen, cantidad y calidad de los residuos sólidos generados (Cuadros 10 y 11).

### 2.1. Algunos Indicadores y Costos del Servicio

Con el fin de conocer en un grado más amplio el comportamiento del servicio en algunos lugares de América, a continuación se proporciona la siguiente información, que puede ser utilizada como referencia de indicadores de eficiencia en sus diferentes etapas.

#### Barrido Manual

Rendimiento de personal

1.0 a 2.5 km. de calle/día  
2.0 a 5.0 km. de cuneta/día

Requerimientos:

0.4 a 0.8 barrenderos 1000/hab.

### Eficacia:

30 a 90 kg/km de cuneta barrida

### Costo:

	\$/km. de calle	\$/Ton.
México	6,500 a 19,500	53,625 a 161,850
América Latina	1,500 a 4,500	12,375 a 37,350
Estados Unidos	Generalmente se utiliza bárrido mecánico	

### Recolección

Densidad de la Basura kg/m<sup>3</sup>

125	a	250	(suelta)
375	a	550	(compactada en recolección)
700	a	1000	(compactada en relleno sanitario)

Tipo de vehículo Compactador de 10 a 15 m<sup>3</sup>.

Eficiencia 2 a 5 Tn/trabajador-jornada  
4 a 8 Tn/turno (dos viajes/turno)

Requerimientos 0.2 a 0.4 trabajadores/1000 hab.  
12,000 a 24,000 fam/viaje (Fam. 5 hab.)

### Costo:

México	36,000	a	85,000	\$/ton.
América Latina	36,000	a	75,000	\$/ton.
Estados Unidos de Nort.	75,000	a	225,000	\$/ton.

### Transferencia

En aumento el uso de las estaciones de transferencia

Unidades de 40 a 60 m<sup>3</sup>.

### Costo:

México	15,000	a	30,000	\$/ton.
Latinoamerica	4,500	a	10,500	\$/ton.
Estados Unidos de América	24,000	a	60,000	\$/ton.

### Relleno Sanitario

Requerimientos de espacio: 1.2 m<sup>3</sup> de operación/tn.depositada

Economía de escala para ciudades mayores a 50,000 hab.

## **BARRIDO**

REQUERIMIENTO DE PERSONAL	0.4 A 0.8 HOMBRE/1000 HAB.
RENDIMIENTO DE PERSONAL	1.0 A 2.5 Km.CALLE/DIA
EFICIENCIA	30 A 90 Kg/KmCUNETAS
COSTO	6.50 A 19.50 N\$/KmCALLE
	53.82 A 161.85 N\$/TON

## **RECOLECCION**

REQUERIMIENTO DE PERSONAL	0.2 A 0.4 HOMBRE/1000 HAB.
RENDIMIENTO DE PERSONAL	2 A 5 TON/HOMBRE-JORNADA
EFICIENCIA	5.625 A 8.250 TON/VEHICULO
COSTO	38 A 85 N\$/TON

## **TRANSFERENCIA**

UNIDADES	40 A 60 M <sup>3</sup>
COSTO	15 A 30 N\$/TON

## **RECUPERACION DE COSTOS**

<b>COSTO DEL SERVICIO</b>	<b>120 A 295 N\$/TON</b>
<b>GENERACION PERCAPITA DOMICILIARIA</b>	<b>0.5 Kg/HAB-DIA</b>
<b>EQUIVALENTE FAMILIAS</b>	<b>2000 HAB. Ó 400</b>
<b>PRODUCCION DE BASURA</b>	<b>1000 Kg/DIA</b>
<b>SIGNIFICA FAMILIA</b>	<b>0.30 A 0.74 N\$/DIA</b>
	<b>9 A 22 N\$/MES</b>
<b>AREAS URBANAS</b>	<b>20 A 30% DE LA POBLACION VIVE EN ZONAS MARGINADAS</b>
<b>INCREMENTO COSTO POR FAMILIA</b>	<b>25 AL 43%</b>
<b>MES FAMILIA</b>	<b>11.4 A 32 N\$</b>

**\* FAMILIA DE 5 MIEMBROS**

### Costo

México	15,000	a	18,000	\$/ton.
Latinoamerica	3,000	a	9,000	\$/ton.
Estados Unidos de América	36,000	a	150,000	\$/ton.

### Plantas de Reciclaje y Compost

Mayores a 100 tn/día

Tipo: Banda móvil de recuperación  
digestión en pilas o biodigestores

Recuperación de costos: 10 al 40 por ciento

### Costos:

México	18,000	a	45,000	\$/ton.
América Latina	18,000	a	45,000	\$/ton.

### 3. VIABILIDAD DE RECUPERACION DE COSTOS POR LA - COMERCIALIZACION DE SUBPRODUCTOS

Se considera generalmente que a través de la comercialización de algunos componentes de la basura municipal, pueden ser cubiertos los costos de la prestación del servicio. Sin embargo, en la mayoría de las localidades del país, la comercialización que existe de los subproductos es llevada a cabo desde la recuperación y venta por personas independientes al servicio municipal, por lo que los ingresos de esta comercialización no se ven afectados por los costos de operación e inversión del servicio.

Lo que implica que no necesariamente dicha aseveración sea cierta y que en el mejor de los casos, la recuperación y conversión de materiales mediante plantas procesadoras, únicamente pueden cubrir sus costos de operación y de inversión.

La selección de cualquier proceso de recuperación, es una función de la economía-costo de la separación versus valor de los productos y materiales recuperados, por lo tanto, para un decisión dada de recuperar algunos o todos los materiales presentes en la basura municipal, debe basarse en una evaluación económica y de las condiciones locales, esto último como pueden ser la disponibilidad de sitios para verter la basura, características y/o vocación del uso del suelo y programas de ahorro de energía principalmente.

CUADRO No. 12

NUMERO DE LOCALIDADES POR ENTIDADES FEDERATIVAS  
SEGUN TAMAÑO DE LA LOCALIDAD

ENTIDAD FEDERATIVA	100,000 499,999 HAB	500,000 999,999 HAB	1,000,000 Y MAS HAB	ENTIDAD FEDERATIVA	100,000 499,999 HAB	500,000 999,999 HAB	1,000,000 Y MAS HAB
ESTADOS UNIDOS MEXICANOS	77	14	7	MICHOACAN	3	1	
				MORELOS	2		
				NAYARIT	1		
AGUASCALIENTES	1	1		NUEVO LEON	4	1	1
BAJA CALIFORNIA	2	1		OAXACA	1		
BAJA CALIFORNIA SUR	1			PUEBLA	1		1
CAMPECHE	1			QUERETARO	1		
COAHUILA DE ZARAGOZA	3			QUINTANA ROO	1		
COLIMA	1			SAN LUIS POTOSI	2		
CHIAPAS	2			SINALOA	3		
CHIHUAHUA		2		SONORA	3		
DISTRITO FEDERAL	9	4	2	TABASCO	1		
DURANGO	2			TAMAULIPAS	6		
GUANAJUATO	3	1		TLAXCALA			
GUERRERO		1		VERACRUZ	8		
HIDALGO	1			YUCATAN		1	
JALISCO	2	1	1	ZACATECAS	1		
MEXICO	11	2	2				

### 3.1 Valor de recuperación de subproductos reciclables.

Se plantean dos esquemas, el primero corresponde a la elaboración de composta y recuperación de subproductos a través de la selección de los mismos en plantas de tratamiento; el segundo, corresponde únicamente a la separación y comercialización de residuos inorgánicos en centros de acopio.

Las capacidades de tratamiento y acopio analizadas fueron de 50 hasta 300 Tn/día.

Estas capacidades corresponden a beneficiar del orden de 79,000 hasta 500,000 habitantes, cuando la generación per cápita es de 0.63 kg/hab-día. Asimismo, si consideramos una cobertura de recolección del 80%, los tamaños de la localidad, serían de 100 mil a 625 mil habitantes, clasificados en el rango de centros urbanos medios, que de acuerdo a los datos del último censo de población y vivienda existen 77 localidades de 100,000 a 499,999 habitantes y 21 localidades mayores a 500,000 habitantes. (Cuadro 12)

### 3.2 Requerimientos de inversión

Las necesidades de inversión se calcularon a partir de los costos presentados en estudios de factibilidad para Tulancingo, Hgo. y Mérida, Yuc. Los principales componentes de cada planta (Fig. 3) considerados son: Bandas Transportadoras, Equipo para selección de gravedad, Equipo para selección magnética, Equipo para selección por aire, Molino triturador de alta velocidad, Molino triturador y compactador de plástico y papel, Molino triturador y compactador de vidrio, Molino triturador y compactador de cartón. Molino de composta, Cernidor grueso y fino para composta. Con base en estos estudios, se obtuvo lo siguiente:

Capacidad en ton./día	50	100	150	200	300
Inversión en millones \$	3,800	6,346	8,520	10,522	15,540

### 3.3 Estimación de ingresos

Debido a que el precio de comercialización de cada subproducto, no está regulado y presentan amplias fluctuaciones de acuerdo a la oferta y demanda imperante en cada localidad, así como a la escasa demanda de la composta, se plantearon dos alternativas. En la primera, se considera la comercialización de los subproductos incluyendo la composta y diferentes precios de venta de cinco subproductos cartón, papel, vidrio, textiles y composta, (Cuadro 13), obteniendo un valor de la basura de 126,721 y 83,677 \$/ton., procesada. En la segunda alternativa, no se



CUADRO No. 13

PRECIOS DE SUBPRODUCTOS DE LA BASURA

SUBPRODUCTO	COMPOSICION % EN PESO	PRECIO, W PESOS/KG.
CARTON	4	180 - ,100
PAPEL	16	300 - ,200
METALES	1.61	400
LATA	1.59	1,800
VIDRIO	8.2	1,400 - ,100
TEXTIL	4.2	800 - ,300
PLASTICO RIGIDO	1.6	800 - ,100
PLASTICO PELICULA	2.2	350 - ,100
TETRAPAK	1.4	50
ORGANICO	50	080 - 0
OTROS	9.2	500

NOTA:

EL PRECIO DE CADA SUBPRODUCTO FUERON PROPORCIONADOS POR DIFERENTES ORGANISMOS MUNICIPALES RELACIONADO CON EL SERVICIO DE LIMPIA.

ARCHIVO: SUBPRODUC.WK1 SFSA ROJO

CUADRO No. 15

ESTIMACION DE EGRESOS  
MILES DE N\$

REQUERIMIENTOS DE PERSONAL							SUELDO ANUAL				
PERSONAL	SUELDO	50	100	150	200	300	50	100	150	200	300
ADMINISTRADOR	5.84	1	1	1	1	1	70.08	70.08	70.08	70.08	70.08
INGENIERO	4.38	1	1	1	1	1	52.56	52.56	52.56	52.56	52.56
CONTADOR	4.38	1	1	1	1	1	52.56	52.56	52.56	52.56	52.56
MECANICO	2.482	1	1	2	2	2	29.784	29.784	59.568	59.568	59.568
ELECTRICISTA	2.482	1	1	1	1	2	29.784	29.784	29.784	29.784	59.568
OPERADOR DE TRASCAMO	2.482	1	1	1	1	1	29.784	29.784	29.784	29.784	29.784
OPERADOR DE EMBARQUES	2.482	1	1	1	1	1	29.784	29.784	29.784	29.784	29.784
SECRETARIA	1.31	1	1	1	1	1	15.72	15.72	15.72	15.72	15.72
CHOFER	1.31	1	1	1	1	1	15.72	15.72	15.72	15.72	15.72
AYUDANTE DE MECANICO	0.876	1	1	2	2	2	10.512	10.512	21.024	21.024	21.024
AYUDANTE DE ELECTRICISTA	0.876	1	1	1	1	2	10.512	10.512	10.512	10.512	21.024
OBRREROS	0.876	16	20	30	36	62	168.192	210.24	315.36	378.432	651.744
OPERADOR DE BASCULA	0.73	1	1	1	1	1	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
VIGILANTE	0.603	2	2	2	2	2	14.472	14.472	14.472	14.472	14.472
TOTAL ANUAL DE PERSONAL		30	34	46	52	80	538	580	726	789	1102
ELECTRICIDAD ANUAL							353	470	763	933	1239
MANTENIMIENTO ANUAL							133	222	294	421	622
COMBUSTIBLES ANUAL							60	91	116	140	178
OTROS GASTOS							14	21	26	30	38
TOT. GASTO OPERACION							1098	1384	1929	2313	3179
							N/AÑO				
MATERIAL DE RECHAZO TN/AÑO		6,105	12,210	18,315	24,420	36,630	104	208	311	415	623
MATERIAL NO TRATADO TN/AÑO		1,750	3,500	5,250	7,000	10,500	30	60	89	119	179
MATERIAL A DISPOS. TN/AÑO		7,855	15,710	23,565	31,420	47,130	134	267	401	534	801
MATERIAL NO TRAT. ALT 2							160	319	479	639	958
TOTAL DE EGRESOS ALT 1							1,232	1,651	2,329	2,847	3,980
TOTAL DE EGRESOS ALT 2							1,258	1,704	2,408	2,951	4,137

ARCHIVO: CUADRO 14.WK1 DISCO VERDE 1992 JUNIO

CUADRO No. 14

VALOR POTENCIAL DE LOS RESIDUOS SOLIDOS

PRODUCTO	COMPOSICION EN %	CANTIDAD EN KG	APROVECHABLE EN %	CANTIDAD EN KG	RECHAZO EN KG	RECUPERACION EN %	MATERIAL APROVECH EN KG	PRECIO 1 \$/Kg	PRECIO 2 \$/Kg	VALOR 1 \$/TN	VALOR 2 \$/TN
CARTON	4	40	90	36	4	97	34.92	180.00	100.00	6,285.60	3,492.00
PAPEL	16	160	50	80	80	80	64	300.00	200.00	19,200.00	12,800.00
METALES	1.61	16.1	100	16.1	0	95	15.295	400.00	400.00	6,118.00	6,118.00
LATA	1.59	15.9	100	15.9	0	97	15.423	1,800.00	1,800.00	27,761.40	27,761.40
VIDRIO	8.2	82	90	73.8	8.2	90	66.42	140.00	100.00	9,298.80	6,642.00
TEXTIL	4.2	42	40	16.8	25.2	90	15.12	800.00	300.00	12,096.00	4,536.00
PLASTICO RIGIDO	1.6	16	90	14.4	1.6	85	12.24	800.00	100.00	9,792.00	1,224.00
PLASTICO PELICULA	2.2	22	90	19.8	2.2	70	13.86	350.00	100.00	4,851.00	1,386.00
TETRAPAK	1.4	14	90	12.6	1.4	80	10.08	50.00	50.00	504.00	504.00
ORGANICOS	50	500	80	400	100	95	380	80.00	50.00	30,400.00	19,000.00
OTROS	9.2	92	1	0.92	91.08	90	0.828	500.00	500.00	414.00	414.00
<b>SUMA</b>	<b>100</b>	<b>1000</b>	<b>68.632</b>	<b>686.32</b>	<b>313.68</b>	<b>62.8186</b>	<b>628.186</b>	<b>201.724966</b>	<b>133.523192</b>	<b>126720.8</b>	<b>83877.4</b>

BASE: 1 TONELADA DE BASURA

ALTERNATIVA DE PRECIOS, EN \$/TN

		INCLUYE VENTA DE COMPOSTA
1	126720.8	INCLUYE VENTA DE COMPOSTA
2	83877.4	IDEM
3	96320.8	NO SE COMERCIALIZA LA COMPOSTA
4	64,877	IDEM

INGRESOS, EN MILLONES D PESOS/AÑO	50	100	150	200	300
2090 8932	4181.7864	6272.6796	8363.572	12545.35	
1383.9771	2767.9542	4151.9313	5536.908	8303.862	
1589.2932	3178.5864	4767.8796	6387.172	9538.769	
1,070	2,141	3,211	4,282	6,423	

*India*

considero la comercialización de la composta, manteniendo los mismos precios de venta para los otros subproductos de la alternativa 1, el valor de la basura por toneladas es de N\$96,321 y 64,877. Para cada caso se estimó una eficiencia media ponderada de aprovechamiento del 69% y de recuperación del 63%. (Cuadro 14)

Con base a un consulta realizada en algunos organismos relacionados con el aseo urbano, el precio de la tonelada de basura es del orden de N\$80,000

### 3.4. Estimación de Egresos

Se consideraron dentro de este rubro sueldos y salarios del personal, los gastos por concepto de consumo eléctrico, mantenimiento, combustibles, depreciación de la infraestructura, así como los costos de traslado y disposición del material de rechazo y del material orgánico no comercializado.

Respecto a la amortización de la inversión, se consideraron plazos de 7, 10 y 15 años con una tasa de interés del 20% anual a pagos constantes.

Los costos de operación para la alternativa 1, varían de 67,507 a 36,348 N\$/ton, correspondiendo a capacidades de tratamiento de 50 a 300 tn/día, respectivamente.

Para la alternativa 2, varían de 68,932 a 37,780 N\$/ton. (Cuadro 15). La diferencia de los egresos entre las alternativas 1 y 2 se debe básicamente a los costos de traslado y disposición al relleno sanitario del material de rechazo y de la composta cuando no se comercializa esta última.

### 3.5 Análisis de Resultados

El término de inversión significa un compromiso concreto de recursos de capital para la obtención de algún beneficio a lo largo de un período de tiempo razonable.

La escasez de recursos y la existencia de oportunidad de alternativas capaces de generar los beneficios deseados con grados diferentes de eficacia, conducen a la necesidad de evaluar las opciones diferentes de inversión potencialmente disponibles, lo anterior, con la finalidad de establecer la mejor de todas ellas, en términos de retorno o recuperación de la inversión.

Toda inversión se caracteriza por generar un flujo físico de bienes o servicios consumidos y producidos, así como un flujo financiero, representativo del flujo físico de insumos y productos valuados a precios del mercado.

## VIABILIDAD DE RECUPERACION DE SUBPRODUCTOS DE LA BASURA

### REQUERIMIENTOS DE INVERSION

CAPACIDAD (TON/DIA)	50	100	150	200	300
INVERSION (MIILLONES N\$)	3.8	6.34	8.52	10.52	15.5

### ESTIMACION DE INGRESOS (N\$/TON)

ALTERNATIVA 1	INGRESO N\$/ TON.	83.9	126.7
---------------	-------------------	------	-------

\*INCLUYE COMERCIALIZACION DE COMPOSTA

RESIDUOS APROVECHADOS 68%

RESIDUOS RECUPERADOS 62%

ALTERNATIVA 2	INGRESO N\$ / TON	64.8	96.3
---------------	-------------------	------	------

\*NO INCLUYE COMERCIALIZACION DE COMPOSTA

### ESTIMACION DE EGRESOS (N\$/TON)

50 TON    300 TON

ALTERNATIVA 1                    167.5            36.3

ALTERNATIVA 2    68.9            37.8

# ANALISIS DE RESULTADOS

## INVERSION.

SIGNIFICA UN COMPROMISO CONCRETO DE RECURSOS DE CAPITAL PARA LA OBTENCION DE ALGUN BENEFICIO A LO LARGO DE UN PERIODO DE TIEMPO RAZONABLE.

## ANALISIS FINANACIERO.

TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)  
VALOR PRESENTE NETO (VPN)  
VALOR ANUAL EQUIVALENTE (VAE)

## CRITERIO TIR.

PERIODO DE VIDA UTIL	15 AÑOS	
VALOR DE RESCATE		0
TASA IMPOSITIVA AL INGRESO GRAVABLE		37%
DEPRECIACION	LINEAL	
VALOR DE LA BASURA	83.9 N\$/TON	
COMERCIALIZACION	100%	

## FINANCIAMIENTO.

PLAZO	7 A 15 AÑOS	
TASA DE INTERES		20%
CAPITAL FINANCIADO	20 AL 100% DE LA INVERSION	

## RESULTADOS.

200 TON/DIA O 18 AS CON FINANCIAMIENTO AL 80%  
TIR IGUAL AL 20.4%

Como se mencionó la inversión producirá resultados hasta que efectivamente entre en operación y se empiecen a producir los bienes esperados. Por tal motivo, tanto los esfuerzos como los resultados previstos, es decir costos y beneficios, configuran un flujo cuya magnitud y duración o vida útil varía de un tipo de inversión a otro.

Por consiguiente es necesario establecer un procedimiento lógico para la selección de la alternativa, tanto técnica como financieramente más adecuada.

El análisis de los méritos financieros de cada propuesta puede estar basado en métodos como tasa interna de rendimiento, (TIR), valor presente neto (VPN), período de recuperación, valor anual equivalente, etc.

La selección de propuestas de inversión, debe estar basada en el beneficio financiero que se obtenga de cada propuesta, independientemente de la fuente con que se financie el proyecto.

Respecto a la fuente de financiamiento más adecuada debe ser resuelto independientemente de la utilización que se den a los fondos obtenidos, y se debe basar en los méritos de cada fuente, esto es, la fuente seleccionada debe ser aquella de menor costo y al mismo tiempo aquella que representa el menor riesgo.

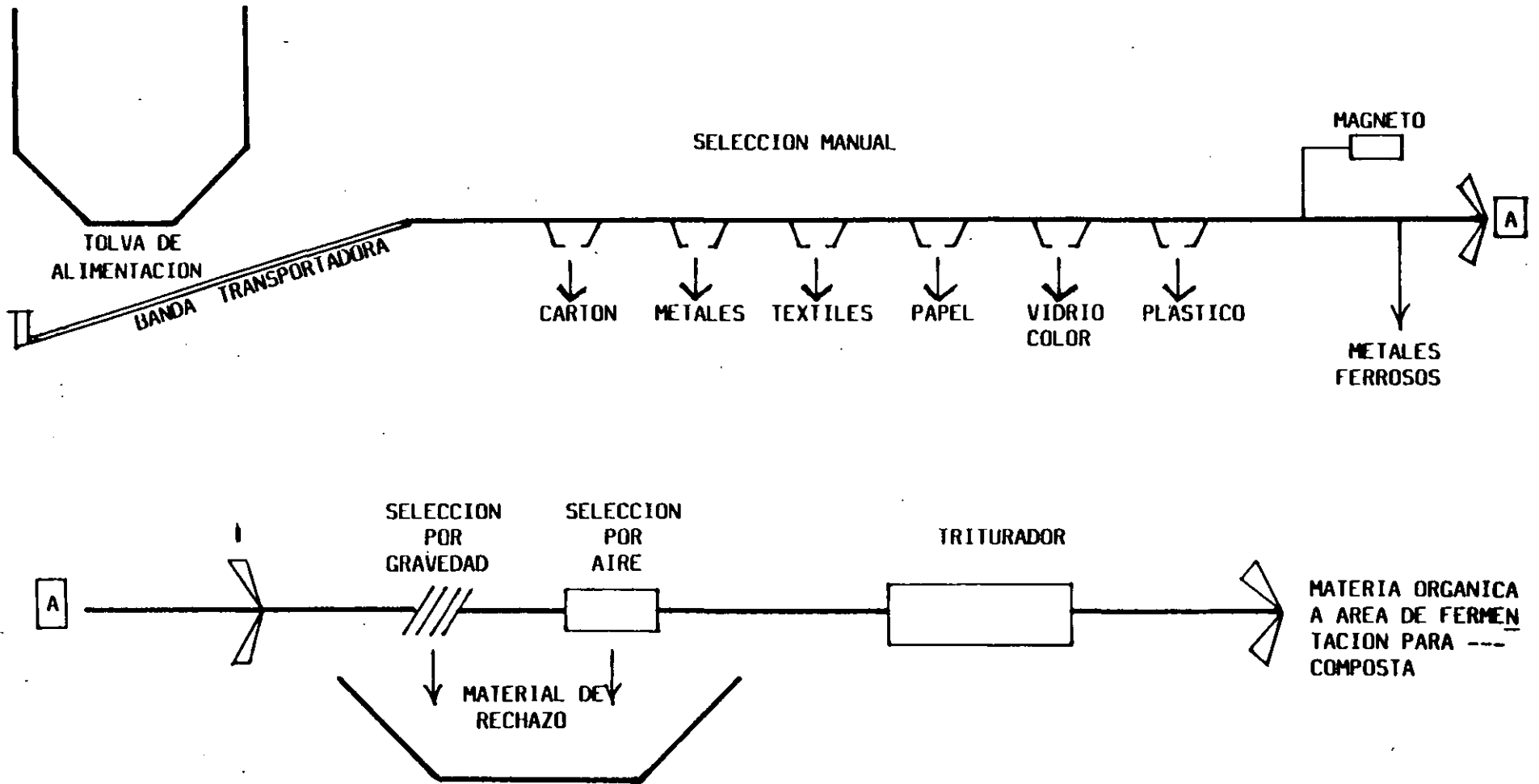
El análisis de inversión se hizo con el criterio de tasa interna de retorno en un período igual a la vida útil del proyecto a 15 años y no se considero un valor de rescate.

Se obtuvo un flujo de efectivo después de impuestos, considerando una tasa impositiva al ingreso gravable del 37%. Asimismo, se considera situación ideal al comercializar el total de los subproductos obtenidos a partir del primer año de operación y el precio de venta fue de \$83,877 pesos por tonelada.

Respecto al financiamiento de la inversión se considerarán porcentajes de 20, 40, 80 y 100% a una tasa de interés del 20% anual y plazos de amortización de 7 hasta 15 años. (Cuadro 16)

De los resultados obtenidos, se puede decir que la planta para 50 ton/día ó menos no son financieramente rentables, dado que el margen de utilidad es 2.5 veces menor a los intereses que generaría la propia inversión a una tasa de interés del 20% anual.

FIGURA # 3 ESQUEMA DE UNA PLANTA DE COMPOSTA Y RECICLAJE





CUADRO 16 ESTIMACION DE LA TIR

CAPACIDAD DE LA PLANTA	200 TND/DIA
VALOR DE LA INVERSION	10,522 MILL. \$
CAPITAL CONTABLE	2,104 MILL. \$
PASIVO	8,418 MILL. \$
VALOR DE LA BASURA	83,877 \$/TN
FINANCIAMIENTO	80 %
OTRAS FUENTES	20 %
TASA DE INTERES	20 % ANUAL
PLAZO DE AMORTIZACION	18 AÑOS

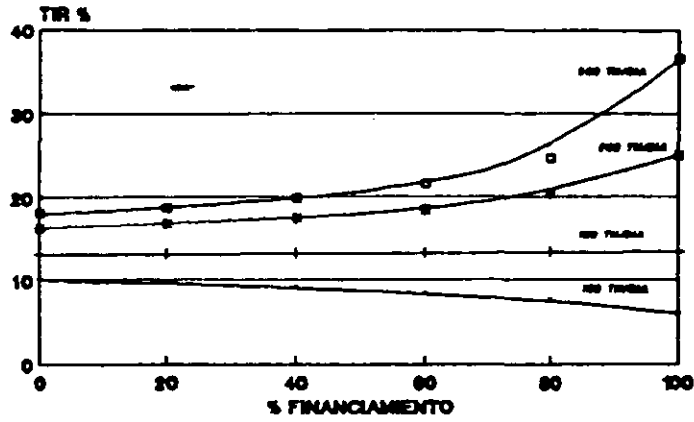
AÑOS	INTERES	PAGO AL PRINCIPAL	FEAI	DEPRECIACION	INGRESO GRAVABLE	PAGO DE IMPUESTO	FEDI
0	0		-2104				(2,104)
1	1,684	117	2,689	589	416	154	736
2	1,660	140	2,689	589	440	163	726
3	1,609	191	2,689	589	491	182	707
4	1,576	224	2,689	589	524	194	695
5	1,536	264	2,689	589	564	209	680
6	1,489	312	2,689	589	611	226	662
7	1,431	369	2,689	589	669	247	641
8	1,362	438	2,689	589	738	273	616
9	1,280	520	2,689	589	820	303	585
10	1,181	620	2,689	589	919	340	549
11	1,062	738	2,689	589	1,038	384	505
12	919	881	2,689	589	1,181	437	452
13	748	1,052	2,689	589	1,352	500	388
14	542	1,258	2,689	589	1,558	576	312
15	296	1,504	2,689	589	1,804	668	221
16	0	0	0	0	(0)	(0)	(0)

TASA INTERNA DE RETORNO 30.9%  
 VPN 20% 646

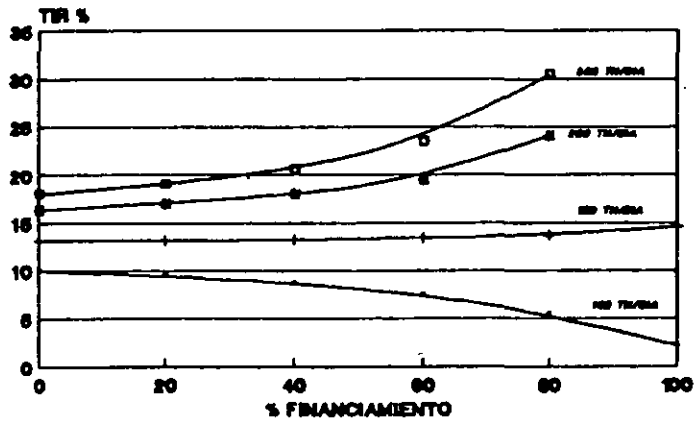
FOAI.- FLUJO DE EFECTIVO ANTES DE IMPUESTO  
 FEDI.- FLUJO DE EFECTIVO DESPUES DE IMPUESTO  
 ARCHIVO CUADRO14.WK1 SF6A ROJO

FIGURA NUM. 4

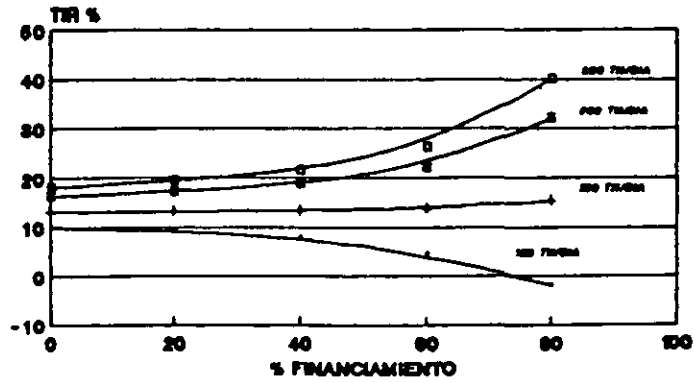
COMPORTAMIENTO DE LA TIR  
CON FINANCIAMIENTO PARCIAL  
PLAZO DE AMORTIZACION 7 AÑOS



PLAZO DE AMORTIZACION 10 AÑOS



PLAZO DE AMORTIZACION 15 AÑOS



VIDA UTIL DEL PROYECTO 15 AÑOS  
TASA DE INTERES 20 %  
VALOR DE LA BASURA \$3877 \$/TN

Para planta con capacidad de 100 Tn/día el margen de utilidad con respecto a las utilidades que podría generar las inversiones, son equivalentes y además los valores de la tasa interna de retorno son decrecientes, cuando aumentan los porcentajes de financiamiento y plazos de amortización.

Sin embargo, se puede decir que para plantas con capacidad de 200 Tn/día ó más y a partir de un plazo de amortización de 7 años y con un financiamiento parcial del 80% la tasa interna de retorno que se obtiene es de 20.4% Fig. 4

Cabe resaltar que lo anterior, es siempre y cuando los ingresos o el valor de la basura sea igual o mayor a 83,877. N\$/Ton. Cabe señalar, que en este análisis no se consideraron los beneficios ambientales que pueden representar la recuperación de los subproductos como por ejemplo, la producción del aluminio requiere grandes energías para su elaboración.

### 3.6 Centros de Acopio

Para la creación de centros de acopio se considera necesario la construcción de naves equipadas para la separación de subproductos, ya sea que se realice la separación o no de la basura orgánica.

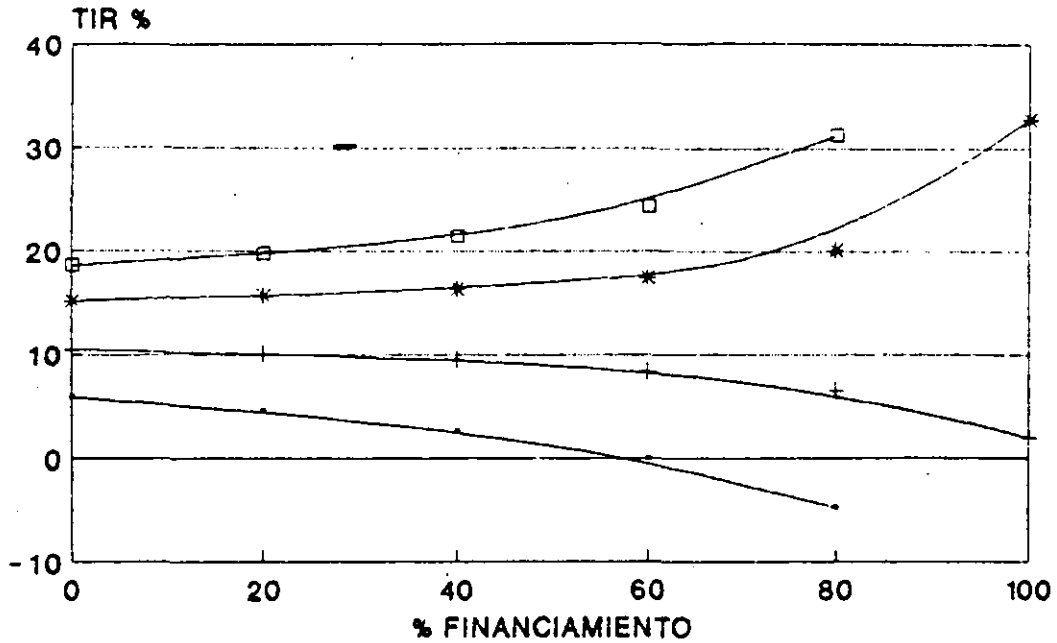
La separación de la basura en la fuente generadora permite una mayor recuperación de subproductos. Además, de poder comercializarse a un mejor precio por ser basura limpia.

En caso de no ser separada en la fuente, las eficiencias de recuperación y separación son similares a las plantas de composteo, aunado a un valor menor de los subproductos y una mayor cantidad de materias que se tendría que disponer al relleno sanitario.

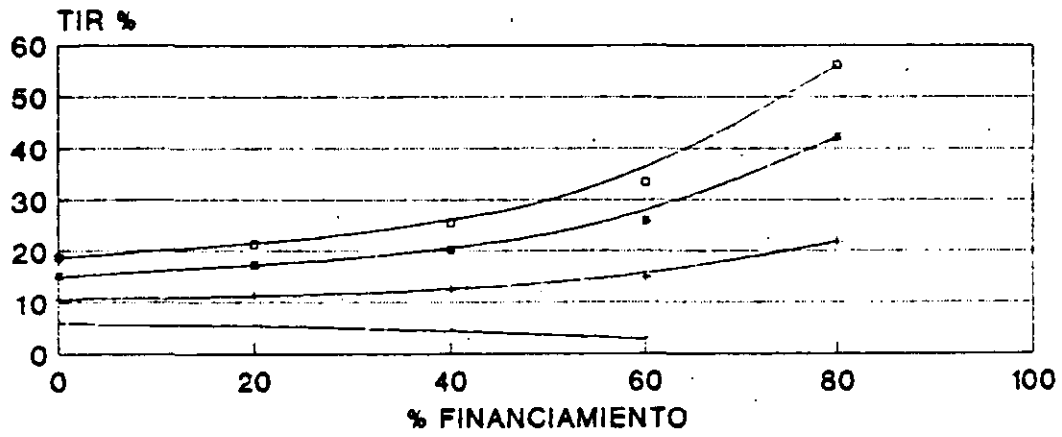
Los requerimientos de inversión consideradas para el reciclaje de la basura inorgánica representan del orden del 55% de los costos de inversión de una planta de tratamiento. Respecto a los costos de operación, únicamente se modificarían los conceptos de energía eléctrica (85%) combustibles (70%). Como no hay elaboración de composta el precio de la basura varía de 64,877 a 96,321 N\$/Ton.

Si consideramos el precio menor, se deduce que para plantas con capacidad de 50 Tn/día, aunque la inversión disminuya en más del 55%, y los costos de operación y mantenimiento se reduzcan en 12% respecto a una planta de composteo y reciclaje, tampoco resultan rentables financieramente.

FIGURA NUM. 5  
**PLANTAS DE ACOPIO**  
**COMPORTAMIENTO DE LA TIR**  
**PLAZO DE AMORTIZACION 7 AÑOS**



**PLAZO DE AMORTIZACION 15 AÑOS**



CAPACIDAD, EN TN/DIA

— 100    — 150    — 200    — 300

VIDA UTIL DEL PROYECTO 15 AÑOS  
 TASA DE INTERES 20 %  
 VALOR DE LA BASURA 84877 \$/TN

Asimismo, de los resultados obtenidos se puede decir que para plantas de acopio con capacidad de 300 Tn/día, la rentabilidad es mayor a una similar de composteo. Para plazos de amortización igual o superior a 7 años, a cualquier porcentaje de financiamiento. Situación similar para sistemas de reciclaje de 150 Tn/día, cuando el plazo de amortización es de 15 años y porcentaje de financiamiento del 80% (Fig.5)

#### 4. COMENTARIOS

A nivel nacional se recolectan 42,000 Tn/día de residuos sólidos municipales, lo que representa una cobertura del 70% y únicamente, el 15% de lo recolectado se deposita en rellenos sanitarios controlados.

De 7 plantas de tratamiento con capacidad total de 2,550 Tn/día, únicamente se está aprovechando el 10% de su capacidad.

Los servicios de aseo urbano no han alcanzado un nivel satisfactorio por las siguientes razones:

- . Carencia de planes y programas
- . Escasez de recursos humanos calificados e insuficiente aprovechamiento
- . Legislaciones no actualizadas
- . Organismos, estructuras e instituciones no fortalecidas.
- . Aplicación de Tecnología no apropiada.
- . Recursos financieros limitados y desaprovechados .
- . Limitada orientación a la comunidad.

Cabe resaltar, que en la mayoría de las entidades federativas del país existe la administración directa municipal, sin una política tarifaria definida que garantice los recursos necesarios para administrar, operar y mantener los servicios en el nivel de eficacia suficiente para atender la demanda creciente del mismo.

Los diferentes niveles de gobierno están intensificando su participación en la solución de la problemática que presenta este subsector, llevando acciones tales como alentar la participación de los sectores privado y social, en las diferentes etapas del servicio.

Se recomienda la separación de los subproductos desde la fuente generadora y disminuir en lo posible la segregación de reciclables en las aceras, los camiones recolectores y en los sitios de disposición final.

Antes de invertir en plantas de tratamiento o de reciclaje o de cualquier tipo es necesario realizar estudios de mercado, conocer tanto la cantidad como la calidad de los residuos que se generan en la comunidad, aunado a las prácticas normales de la prepeña y pepena, de manera tal que se conozcan las características del insumo final a tratar y la viabilidad de la comercialización de cada uno de los subproductos. Además deben de considerarse los programas sobre reducción de la generación de la basura, en caso de existir estas; como son en la industria del empaque, del embalaje, de la fabricación de desechos y de artículos de un solo uso.

En relación a la elaboración de coposta y su comercialización. Cabe señalar, que este producto es un mejorador de suelos y su venta es difícil debido principalmente a su baja calidad.

Sin embargo, en este sentido, y en caso de poder garantizar o incrementar el grado de confiabilidad en la calidad del producto, podría establecerse una comparación entre el estiércol como mejorador de suelo y la composta, ya que en estudios agropecuarios se establece que para mejorar un hectárea de terreno, se requieren 22 Tn. de estiércol y únicamente de 10 a 14 Tn de composta, el costo de ambos productos son de 29,000 N\$/Ton. y 65,000 N\$/Ton respectivamente, por lo que puede establecerse una competitividad entre ambos, lo anterior conlleva a convencer al agricultor del mayor rendimiento de la composta. Cabe señalar que las experiencias obtenidas a la fecha en la elaboración de este producto no son satisfactorias, por lo que sería conveniente que en caso de considerarse este tipo de plantas, deberá plantearse una calidad estándar y que sea reconocida por las autoridades competentes en materia de agricultura.

Si bien, en la recuperación de los materiales de la basura y la comercialización de los mismos, no necesariamente implica cubrir los costos de la prestación del servicio de aseo urbano, ya que prácticamente cubre los costos de operación y de inversión y adicionalmente, en ahorro de energía, en conservación de recursos renovables y no renovables y en última instancia en un mayor aprovechamiento de la vida útil de un relleno sanitario, minimizando en éste último los problemas de contaminación.

En este sentido, la decisión de este tipo de inversión deben considerarse puntos de vista del municipio de la empresa, en caso que sea concesionada y del Banco como agente financiero.

Al primero no debería convertirse en una carga adicional a un presupuesto de egresos o bien valorando los beneficios sociales y ambientales que justifiquen la inversión y sus costos de operación, para que en caso de que exista un subsidio sea plenamente justificado.

Para los concesionarios del servicio, que además de la utilidad lícita que debe de tener toda empresa, por la prestación de sus servicios, debe considerarse que es un interés social para la comunidad. Y finalmente, como institución bancaria de fomento y desarrollo se busca que se dé una sana recuperación del financiamiento que se otorgue.

## ***CAPITULO III***



### **3. RELLENO SANITARIO**

#### **3.1 Definición.**

El relleno sanitario es el método de ingeniería recomendado para la disposición final de los residuos sólidos municipales, los cuales se depositan en el suelo, se esparcen y se compactan al menor volumen práctico posible y se cubren con una capa de tierra, al término de las operaciones del día.

La Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles, ASCE, define: "Relleno Sanitario es una técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicios al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública; este método utiliza principios de ingeniería para cofinar la basura en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y cubriendo la basura así depositada con una capa de tierra con la frecuencia necesaria o por lo menos al fin de cada jornada".

Como obra de ingeniería, el relleno sanitario debe ser construido elaborando un proyecto para atender determinados objetivos generales y específicos. El objetivo general es la disposición final o depósito permanente de los residuos sólidos municipales en sitios y condiciones adecuadas para evitar daños a los ecosistemas. Como objetivo específico, podrá citarse la recuperación de ciertas áreas.

De la misma forma que en otras obras, el relleno sanitario debe realizarse a partir de un proyecto que cumpla con leyes, reglamentos, normas y métodos de construcción apropiados.

#### **3.2 Tipos de Terrenos.**

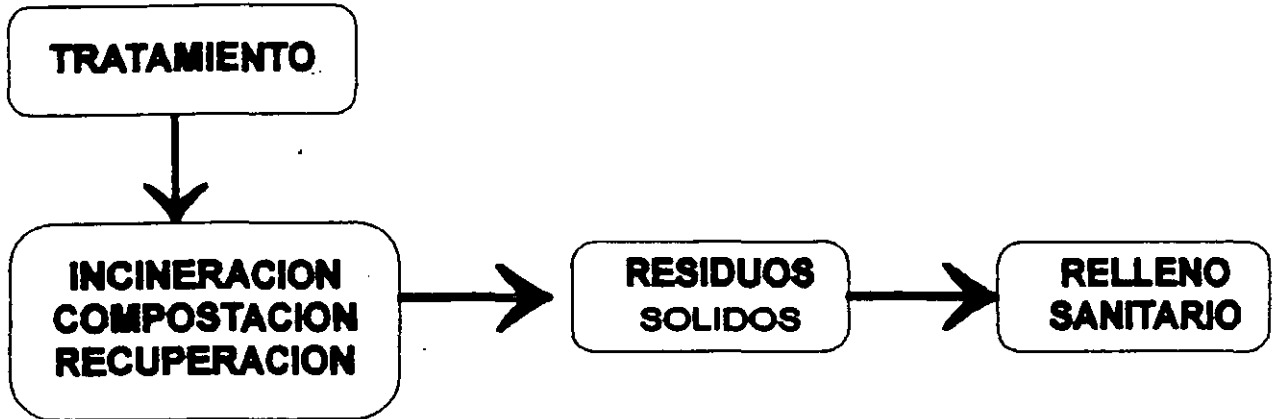
Existen a grandes resgos cinco diferentes perfiles de terreno que por sus características se prestan para la construcción y operación del relleno sanitario y por su topografía se casifican en :

**Plano.**- Es aquel terreno en el que se presentan pequeñas pendientes como las mesetas y llanuras ( 0 a 5% ).

**Ondulado.**- Se consideran terrenos ondulados aquellos en los que la pendiente no es continua, presentando partes planas y pendientes medias como son los valles ( 5 a 10% ).

**Escarpado.**- Presentan una pendiente muy pronunciada ( mayores del 10% ), como montañas, cerros, cañadas, etc.

## **SISTEMAS DE TRATAMIENTO Y DISPOSICION FINAL**



## ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

### INCINERACION

TEMPERATURA >850°C  
10% DE MATERIAL INERTE

### DESVENTAJAS

ELEVADO COSTO:  
\* DE INVERSION  
\* OPERATIVO

REQUIERE TECNICOS CALIFICADOS .

OPERACION COMPLEJA

POCA FLEXIBILIDAD

REQUIERE EQUIPOS DE CONTROL DE  
CONTAMINACION ATMOSFERICA

### VENTAJAS

GENERACION DE ENERGIA CALORIFICA

### COMPOSTACION

RESIDUO INERTE  
ESTABILIZACION DE LA MATERIA ORGANICA  
POR MICROORGANISMOS

### DESVENTAJAS

REQUIERE SEPARAR LOS RESIDUOS  
INORGANICOS

ELEVADO CAPITAL DE INVERSION

ELEVADO COSTO DE OPERACION

TECNICOS CALIFICADOS

POCO FLEXIBLE

### VENTAJAS

MEJORADOR DE SUELO

### RECUPERACION

REUSO Y/O RECICLAJE DE SUBPRODUCTOS

### DESVENTAJAS

ALTO COSTO DE INVERSION

POCA FLEXIBILIDAD

EXISTENCIA DE MERCADO

### VENTAJAS

AHORRO DE ENERGIA

CONSERVACION DE RECURSOS

GENERACION DE EMPLEO ORGANIZADO

INCREMENTA LA VIDA UTIL DEL RELLENO  
SANTARIO

## **RELLENO SANITARIO**

### **¿QUE ES?**

**TECNICA PARA LA DISPOSICION DE LA BASURA EN EL SUELO, SIN CAUSAR PERJUICIOS AL AMBIENTE, NI MOLESTIAS O PELIGRO PARA LA SALUD Y SEGURIDAD PUBLICA.**

**SE ESPARCEN Y COMPACTAN LOS DESECHOS SOLIDOS, EN EL MENOR VOLUMEN PRACTICO Y SE CUBREN CON UNA CAPA DE TIERRA AL DIA.**

### **VENTAJAS**

**INVERSION INICIAL MENOR A OTROS METODOS DE TRATAMIENTO  
BAJO COSTO DE OPERACION Y MANTENIMIENTO  
FLEXIBILIDAD  
RECUPERACION DE TERRENOS IMPRODUCTIVOS  
RECUPERACION DE GAS METANO**

### **DESVENTAJAS**

**ADQUISICIONES DE TERRENOS  
OPOSICION A SU CONSTRUCCION  
PROCESO DE URBANIZACION  
RIESGO DE CONVERSION A TIRADERO  
RIESGO DE CONTAMINACION POR LIXIVIADOS  
RIESGO DE EXPLOSION**

### **MATERIAL DE CUBIERTA**

**PREVIENE LA PRESENCIA Y PROLIFERACION DE MOSCAS  
IMPIDE LA ENTRADA Y PROLIFERACION DE FAUNA NOCIVA  
EVITA INCENDIOS Y PRESENCIA DE HUMO  
MINIMIZA LOS OLORES  
DISMINUYE LA ENTRADA DE AGUA PLUVIAL A LA BASURA  
ORIENTA LOS GASES HACIA LAS CHIMENEAS  
PRESENTA UNA APARIENCIA ESTETICA  
SIRVE DE BASE PARA LAS VIAS DE ACCESO INTERNAS  
PERMITE EL CRECIMIENTO DE VEGETACION**

**Banco de material de préstamo.-** Es aquel terreno que se usó como banco de material y presenta grandes oquedades ú hoyancos que pueden ir desde 5 a 15 m. de profundidad.

**Combinados.-** Es aquel que presenta dos o más variantes de los terrenos arriba descritos.

El procedimiento de construcción y método de relleno sanitario se seleccionará una vez conocido el perfil del terreno disponible, que podrá ser de trinchera, área y/o la combinación de ambos.

### **3.3 METODOS DE DISPOSICION FINAL**

#### **a) Método de trinchera o zanja.**

Este método se utiliza en los lugares donde el nivel de aguas freáticas es profundo, las pendientes del sitio son suaves y las características del suelo permiten escavar con equipo normales.

En este sistema, la operación consiste en depositar los desechos en la base de un talud, donde se esparcen y compactan en capas hasta formar una celda que es cubierta con el material excavado de la trinchera. Esta operación se repite tantas veces como el nivel del terreno lo permita.

Las trincheras deben de estar alineadas perpendicularmente al viento dominante, de tal manera que reduzca la cantidad de residuos susceptibles de ser arrastrados por éste; un extremo de la trinchera debe de estar ligeramente inclinado para favorecer el drenaje de lixiviados generado.

La trinchera debe de ser tan profunda como la dureza y condiciones del terreno lo permitan; el frente del trabajo deberá ser al menos dos veces más que el ancho máximo del equipo utilizado.

El equipo mínimo necesario para la operación del relleno por trinchera depende de la magnitud de la operación y del procedimiento que se use, y éste, a su vez, de las condiciones específicas de cada sitio.

En el proceso de excavación las retroexcavadoras y las dragalíneas son ampliamente utilizadas sobre los tractores de oruga; sin embargo, cuando se trata de la operación de esparcir, compactar y cubrir, resultan excelentes los tractores adaptados para el relleno sanitario.

**b) Método de área.**

Este método prácticamente se puede utilizar en cualquier superficie de terreno disponible, de tal modo que se puede llevar a cabo en bancos de material o canteras abandonadas, cañadas, terrenos planos, depresiones o ciénegas. Un punto importante que no se debe olvidar en este método, es que la distancia de transporte del material de cubierta sea la adecuada para que la operación resulte económica.

El procedimiento es similar al utilizado en el método de zanja o trinchera y se recomienda iniciar la construcción de celdas en un extremo, siguiendo un plan de operación predeterminado.

De no contar con el equipo adecuado para compactar las celdas, el paso obligado de los vehículos de recolección será encima de ellas antes de depositar los desechos, esto ayudará a su consolidación.

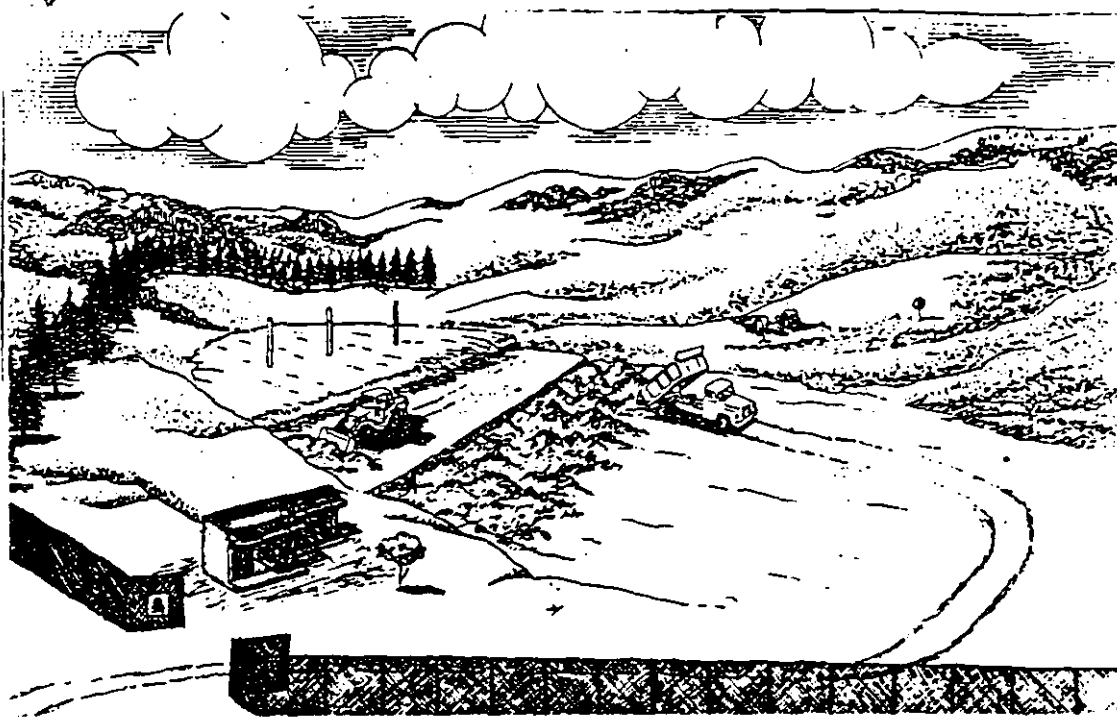
**c) Método combinado**

En algunos casos cuando las condiciones geohidrológicas, topográficas y físicas del sitio elegido para llevar a cabo el relleno sanitario son apropiadas, se pueden combinar los dos métodos anteriores, por ejemplo, se inicia con el método de trinchera y posteriormente se continúa con el método de área en la parte superior.

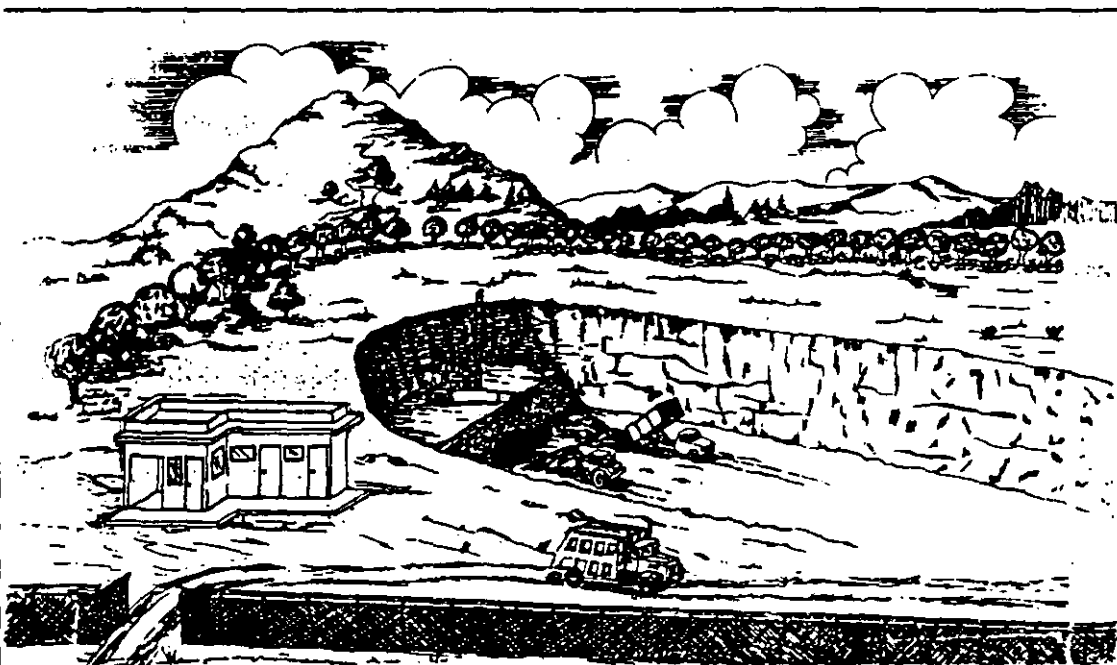
Otra variación del método combinado, consiste en iniciar con el método de área, excavando el material de cubierta de la base de la rampa, formándose una trinchera, la cual servirá también para ser rellenadas.

Los métodos combinados son considerados los más eficientes ya que permiten ahorrar el transporte de material de cubierta (siempre y cuando exista éste en el sitio) y aumentan la vida útil del relleno.

Para que se cumpla la condición de ser relleno sanitario, al finalizar el trabajo diario se deben cubrir las celdas para evitar: la proliferación de fauna nociva, malos olores que invadan a todo el sector y que los residuos sean llevados por el viento fuera del relleno.



Método de trinchera operado en una trinchera natural.



Método de trinchera operado en una trinchera artificial.

Instalación y Operación de Rellenos Sanitarios  
Gobi. del Estado de Veracruz. (1)

#### **4. SELECCION DE TERRENOS APTOS**

##### **4.1 Geohidrología.**

El objetivo principal del estudio geohidrológico es la localización de los mantos acuíferos, así como su gasto de escurrimiento, velocidad, dirección de movimiento y los cortes estatigráficos de los suelos, de tal manera que se cuente con información acerca de la disponibilidad de tierra para cobertura y sus características geológicas, las cuales nos ayudarán a conocer el volumen disponible de material de cubierta y la línea de máxima excavación en la operación del relleno sanitario.

En algunas ocasiones las limitaciones económicas de los municipios impiden llevar a cabo un estudio geohidrológico completo realizado por especialistas.

Se recomienda realizar sondeos hasta una profundidad de 20 m. o menos si se encuentra material impermeable, o bien pozos a cielo abierto de 6 m. de profundidad o mayores.

Se deberá investigar en las cercanías, las norias o pozos profundos, o con las autoridades hidráulicas del lugar, el nivel de aguas freáticas, de tal manera que se tenga una información lo más aproximada al sitio en cuestión; pero si existe alguna duda importante, será necesario llevar a cabo un estudio geohidrológico o seleccionar otro sitio para el relleno sanitario.

##### **4.2 Ciclo Hidrológico.**

Sin duda los procesos que acompañan al ciclo hidrológico, juegan un papel muy importante en el diseño y operación de un relleno sanitario; a continuación se describen estos procesos y su influencia en el diseño y operación de un relleno sanitario.

##### **4.3 Precipitación Pluvial.**

La precipitación pluvial tiene influencia en el diseño del relleno, ya que el conocimiento de ésta, en el sitio seleccionado, será importante para el diseño de los drenajes, el cálculo de volumen de lixiviados que se generarán potencialmente, el cálculo de agua de escurrimiento superficial y finalmente ayuda al diseño de las áreas de trabajo en la operación del relleno sanitario. En lo que respecta a la operación del relleno en tiempo de lluvias, puede hacer que el material de cubierta sea más difícil de esparcir y de compactar. Otro problema, es la dificultad en un momento dado que puede ocasionar el tránsito de vehículos en los caminos de terracería dentro del sitio.



# **SELECCION DEL SITIO PARA EL RELLENO SANITARIO**

- **SUELOS IMPERMEABLES**
- **ESTATIGRAFIA**
- **GEOHIDROLOGIA**
- **PERMITA SU UTILIZACION A LARGO PLAZO DE 7 A 10 AÑOS**
- **TENENCIA DE LA TIERRA**
- **ACEPTACION DE LA POBLACION**
- **TOPOGRAFIA APROVECHABLE**
- **FACIL Y RAPIDO ACCESO (3 A 12 Km DE LA MANCHA URBANA)**
- **BANCO DE MATERIAL CERCANO**
- **DIRECCION DE VIENTOS DOMINANTES EN SENTIDO CONTRARIO A LA  
MANCHA URBANA**

# FACTORES DE EVALUACION PARA LA SELECCION DEL SITIO

CONCEPTOS	OPCIONES		
	EXCELENTE	BUENA	REGULAR
VIDA UTIL	> 10 AÑOS	5 A 10 AÑOS	< 5 AÑOS
TIERRA DE COBERTURA	AUTOSUFICIENTE	ACARREO CERCANO	ACARREO LEJANO
TOPOGRAFIA	MINAS A CIELO ABIERTO ABANDONADAS	COMIENZO DE CAÑADAS, MANGLARES CONTAMINADOS	OTROS
VIAS DE ACCESO	CERCANA Y PAVIMENTADAS	CERCANAS Y TRANSITABLES	LEJANAS Y TRANSITABLES
VIENTOS DOMINANTES	EN SENTIDO CONTRA- RIO DE LA MANCHA URBANA	EN AMBOS SENTIDOS DE LA MANCHA URBANA	EN SENTIDO DE LA MANCHA URBANA
UBICACION DEL SITIO	DE 3 A 12 KM DE LA MANCHA URBANA	ENTRE 1 A 3 KM DE LA MANCHA URBANA	< KM Y > 12 KM DE LA MANCHA URBANA
GEOLOGIA	IMPERMEABLE	SEMIIMPERMEABLE	PERMEABLE
GEOHIDROLOGIA	> DE 30 M. DE PROFUNDIDAD (MANTO ACUIFERO)	ENTRE 10 Y 30 M. PROFUNDIDAD	< DE 10 M. DE PROFUNDIDAD
HIDROLOGIA SUPERFICIAL	NO HAY CORRIENTES SUPERFICIALES	LEJANO DE CORRIENTES SUPERFICIALES	CERCA DE CORRIENTES SUPERFICIALES
TENENCIA DE LA TIERRA	TERRENO PROPIO	TERRENO RENTADO A LARGO PLAZO	TERRENO RENTADO A CORTO PLAZO

## TABLA DE VALORES PARA LA SELECCION DE UN SITIO

CONCEPTOS	VALORES	EXCELENTE 1.000	BUENA 0.850	REGULAR 0.700
VIDA UTIL	1.000	1.000	0.850	0.700
TIERRA DE COBERTURA	0.700	0.700	0.595	0.490
TOPOGRAFIA	0.200	0.200	0.170	0.140
VIAS DE ACCESO	0.250	0.250	0.212	0.175
VIENTOS DOMINANTES	0.050	0.050	0.042	0.035
UBICACION DEL SITIO	0.400	0.400	0.340	0.280
GEOLOGIA	0.400	0.400	0.340	0.280
GEOHIDROLOGIA	0.400	0.400	0.340	0.280
HIDRO.SUPERFICIAL	0.300	0.300	0.255	0.210
TENENCIA DE LA TIERRA	0.700	0.700	0.595	0.490
TOTAL	4.400	4.400	3.739	3.080

#### 4.4 Evapotranspiración.

El proceso de evapotranspiración interviene también en el cálculo de lixiviados y en los cálculos de evaporación de los mismos.

### 5. MECANICA DE SUELOS.

Los resultados de los estudios del suelo deben presentarse en un anexo repaldado, incluso, con planos donde se ubiquen los sitios de muestreo, así como las características e información general de los muestreos realizados, complementados con la simbología, claves y notas usuales para este tipo de estudios.

#### 5.1 Parámetros.

A continuación se indican algunos de los parámetros más usuales.

##### a) Porosidad.

La porosidad se expresa como:

$$\text{Porosidad} = \frac{(\text{Vol. total}) - (\text{Vol. Sólidos})}{\text{Vol. Total}} (100)$$

La porosidad en los suelos pueden variar como se indica en las siguiente tabla:

Material	Porcentaje (%)
Arenas y gravas	35 - 50
Arenas apisonadas	25 - 30
Pizarras y arcillas pizarronadas	0.5 - 8
Arcillas	44 - 47
Tierras vegetales	37 - 65

##### b) Coeficiente Permeabilidad.

Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$K = Q / A (Dh / Dl)$$

donde:

K	Coeficiente de permeabilidad, en cm/seg
Q	Caudal o flujo, en cm <sup>3</sup> / seg
A	Area, en cm <sup>2</sup>
Dh/Dl	Pendiente hidráulica, en milésimas

El coeficiente de permeabilidad (K) para diferentes tipos de suelos, varían como se indica a continuación.

**c) Coeficiente de permeabilidad "K".**

Material	K (cm/seg)
Grava limpia.	$10^2 - 10^0$
Arenas limpias.	$10^9 - 10^{-3}$
Arenas limpias y mezclas de grava suelos impermeables modificados por los efectos de la vegetación e intemperización.	$10^{-2} - 10^{-7}$
Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla moreno glacial, depositos estratificados de arcilla, etc.	$10^{-3} - 10^{-7}$
Suelos impermeables, arcillas homo- génas bajo la zona de intemperización.	$10^{-7} - 10^{-9}$

**d) Pruebas de Permeabilidad.**

Las pruebas de permeabilidad se clasifican de la siguiente manera:

En el campo

- Pozos de absorción
- Pozos de filtración
- Pozos en material homogéneo

En el laboratorio

- Permeámetro de carga constante
- Permeámetro de carga variable
- Permeámetro de capilaridad horizontal

## 5.2 Granulometría.

El análisis consiste en separar y clasificar por tamaños el material del suelo. A partir de la distribución de los granos es posible formarse una idea de la graduación del material; un material bien graduado (de todos tamaños) tiende a ser impermeable; una cantidad del 10% de partículas menores que pasa la malla No. 200 en arenas y gravas puede hacer que el suelo sea virtualmente impermeable.

Para la clasificación del suelo, se puede utilizar el sistema unificado.

## 6. ESTUDIO TOPOGRAFICO

Se deben dar las especificaciones técnicas generales para cualquier levantamiento topográfico; en cada caso particular y dependiendo del tipo de terreno, se determinan las variantes que puedan existir tales como:

- \*Localización
- \*Planimetría
- \*Altimetría
- \*Secciones
- \*Curvas de nivel.

## 7. VIDA UTIL

La vida útil del relleno sanitario, es el tiempo que se utilizará el sitio seleccionado para la desposición final de los residuos sólidos.

La vida útil depende del volumen disponible del sitio, de la cantidad de residuos a disponer, de la cantidad de material de cubierta y del método utilizado.

El volumen disponible del sitio se obtiene del estudio topográfico.

La cantidad de residuos a disponer depende de la generación de residuos sólidos de la comunidad, del índice de crecimiento tanto de la población como el de generación per cápita y de la cobertura del servicio.

$$V.U = V_s / 365 \text{ Gt}$$

Donde:

- V.u Vida útil del relleno sanitario, en años.
- V<sub>s</sub> Volumen del sitio, en m<sup>3</sup>.
- Gt Cantidad de residuos, incluyendo material de cubierta (20 al 25 %).

### 7.1 Generación de Residuos Sólidos.

Proyección de población:

$$P_e = P_o (1+r)^n$$

Donde:

$P_e$  Población al año deseado  
 $P_o$  Población inicial  
 $r$  Tasa de crecimiento  
 $n$  Número de años

Tasa de crecimiento: 2 %

Incremento en la generación: 1 al 3 % anual

Generación per cápita, ppc (norma NTRS-2-SEDESOL)

$$ppc = \frac{\text{Cantidad de residuos generados}}{\text{población}} \quad \frac{\text{Kg/d}}{\text{hab.}}$$

ppc 0.5 a 1.0 Kg/hab-día

Ejemplo:

Proyecto de población (geométrico)

$$P_e = P_o (1+r)^n$$

$n = 15$  años

$r = 0.02$

$P_o = 100.000$  hab.

Año	Habitantes
1	100,000
2	100,000 (1+0.02) <sup>1</sup> - 102,000
3	100,000 (1+0.02) <sup>2</sup> - 104,040
.	.
.	.
15	100.000 (1+0.02) <sup>14</sup> - 131,948

Generación per cápita

Generación = 68,900 Kg/día (obtenida de muestra)

$$ppc_1 = \frac{68,900 \text{ Kg/día}}{100,000 \text{ hab}} = 0.689 \text{ Kg/hab-día}$$

1	$ppc_1$	- 0.689
2	$ppc_2 = ppc_1 + 1\% = 0.689 * 1.01 = 0.695$	
3	$ppc_3 = ppc_2 + 1\% = 0.695 * 1.01 = 0.703$	
4	$ppc_4 = ppc_3 + 1\% = 0.703 * 1.01 = 0.709$	
	$ppc_n = ppc_1 (1+r)^n$	
15	$ppc_{14} = ppc_1 (1+0.01)^{14}$	- 0.792

Producción Diaria, Pd

$Pd = \text{Población} * ppc * \text{cobertura del servicio}$

Si la cobertura es = 70.0

Producción anual = Pd \* 365

año	Población	ppc	Pd, Kg/día	P.a Ton/año
1	100,000	0.689	48230	17604
2	102,000	0.695	49623	18112
3	104,044	0.703	51198	18687
.				.
.				.
.				.
15	131,948	0.792	73152	26700

Es decir, al tercer año recibirá 54403 toneladas de basura.

Por lo tanto, el volumen que ocuparán los residuos en el relleno, se puede estimar a partir de la densidad de estos compactados, la cual varía de 500 a 700 Kg/m<sup>3</sup>.



Si la densidad es  $600 \text{ Kg/m}^3$  se tiene:

año	volumen $\text{m}^3/\text{día}$	volumen $\text{m}^3/\text{año}$	material de cubierta $\text{m}^3/\text{día}$	30% de vol. $\text{m}^3/\text{año}$
1	80	29200	24	8760
2	82.7	30186	24.8	90563
85.3	31145	25.6	9344	
.				.
.				.
.				.
15	122	44501	36.6	13359

Año	VOLUMEN TOTAL $\text{M}^3/\text{DÍA}$	ACUMULADO $\text{M}^3/\text{AÑO}$
1	104	37960
2	211.5	77201
3	322.4	117676
.		.
.		.
.		.
15	1946	710438

Si el volumen del sitio es de  $800,000 \text{ m}^3$ , se podrá disponer hasta en 16 años.

### Area

Para un mismo volumen de residuos y material de cubierta, mientras más capas existan, es decir mayor profundidad, menor será en área requerida.

Para:

$h = 5\text{m}$	$h = 10\text{m}$	$h = 24\text{m}$
Area= 14.2Ha.	A= 7.1Ha.	A= 2.9Ha.

### 8. DISEÑO DE LA CELDA DIARIA

Los elementos de la celda son:

- \* Altura
- \* Largo
- \* Ancho de frente de trabajo
- \* Pendiente de los taludes laterales
- \* Esposores de material de cubierta diario y del último nivel de las celdas.

El ancho mínimo de la celda es de 2 a 2.5 veces el largo de la cuchilla de la maquinaria y aumenta dependiendo del número de vehículos recolectores que llegan en la hora pico.

El talud reco ndado es 1: 3.

En los métodos de trinchera existe únicamente un frente de trabajo, en el de área o combinado pueden existir dos frentes de trabajo.

El espesor del material de cubierta se recomienda sea de 15 a 20 centímetros compactados de tierra entre los niveles de celda y 60 centímetros en la capa final.

Para 50 ton/día y 600 Kg/m<sup>3</sup> de compactación:

Altura de celda	2.65m
Ancho	8m.
Longitud	4.16m.
Area	33m <sup>2</sup>
Volumen de la celda /ha.	300
Volumen de Residuos Sólidos	83M <sup>3</sup> /DÍA
Volumen de Material de Cubierta	24M <sup>3</sup> /DÍA(MÉTODO DE ÁREA)
	14M <sup>3</sup> /DÍA(MÉTODO TRINCHERA)

$$\text{Volumen de la zanja} \quad V_z = \frac{T \cdot D \cdot S_r \cdot M_C}{D}$$

Donde:

T	Vida útil de la zanja (días)
DSr	Cantidad de residuos recolectados (Kg/día)
MC	Factor de material de cubierta (20 a 25 %)
D	Densidad de los residuos en la zanja

Largo de la zanja en m:

$$l = V_z / a \cdot h$$

donde:

a	ancho en m. (3 a 8 m.)
h	Prof. en m. (2 a 3 m.)

Tiempo de maquinaria:

$$T_{exc} = V_z / R \cdot J$$

Donde:

T <sub>exc</sub>	Tiempo de maquinaria para la excavación de la zanja (días)
V <sub>z</sub>	Volumen de la zanja en m.
R	Rendimiento de excavación del equipo (m <sup>3</sup> /hr.)
J	Jornada de trabajo diario (hora/día)

## Vida útil del terreno

Número de zanjas que se pueden excavar:

$$n = A/F \cdot A_z$$

Donde:

n      Número de zanjas  
A      Área del terreno (m<sup>2</sup>)  
F      Factor para áreas adicionales (20 a 40 %)  
Az     Área de la zanja (m<sup>2</sup>)

$$VU = t \cdot n / 365 \text{ días}$$

Donde:

t      Tiempo de servicio de la zanja (día)

Ejemplo:

¿Qué volumen de zanja y sus dimensiones se requiere para 90 días de duración y qué tiempo necesita emplearse una retroexcavadora, si su rendimiento es de 14 m<sup>3</sup>/hr de corte?

Información:

100,000 habitantes

Generación de residuos sólidos per cápita de 0.639 Kg/día

Cobertura del 70%

Cantidad de residuos sólidos de 48,230 Kg/día

Solución:

t = 90 días

DSr = 48230 Kg/día

MC = 1.2 (20% de material de cubierta)

D = 600 Kg/m<sup>3</sup>

$$V_z = \frac{(90)(48230)(1.2)}{600} = 8681 \text{ m}^3$$

Lo anterior representa que para depositar la basura de un día se requiere excavar 8681m<sup>3</sup>/90 días = 96.5m<sup>3</sup>/día

Dimensiones de la zanja

h = 2.65m

a = 8.0m

V = 8681m<sup>3</sup>

l = 8681 / (2.65)(8.0) = 409m

Área = (409)(8) = 3272m<sup>2</sup>

Área total = A(1.3) factor de aumento

Area total = 4253m<sup>2</sup>

Tiempo de maquinaria

J = 8hr/día

T<sub>exc</sub> = 8681/14\*8hr=77.5días

Vida útil del terreno:

Area = 400X400m=8ha

Cada zanja ocupa 8m más 2m de separación entre ellas.

100/8Ha= 12.5= 12 zanjas/Ha= 96 zanjas

Si cada zanja tiene una vida de 90 días, las 96 zanjas tendrán una vida útil del terreno de 24 años, sin considerar los incrementos de residuos por el incremento de población y del índice de generación.

Cálculo de la celda diaria

Volumen de la celda = 96.5m<sup>3</sup>

h = 2.65m

Ac= 96.5/2.65=36m<sup>2</sup>

Ancho= 8m

l=36/8= 4.6m

## 9. DISEÑO DE FRANJAS

Las franjas es el conjunto de celdas del relleno sanitario que se encuentran en una misma capa o nivel.

El sentido de construcción irá de extremo a extremo y de la parte alta a la parte más baja de la superficie del relleno.

## 10. DISEÑO DE CAPAS

Las celdas se unen unas con otras para formar las franjas y éstas a su vez, al irse juntando forman la capa.

Las capas se diseñan considerando la altura del sitio. Para evitar infiltraciones pluviales y facilitar el escurrimiento del agua de lluvia, la superficie tendrá una pendiente del 1 al 2% a partir del eje longitudinal de la capa.

El medio artificial puede utilizar materiales naturales o artificiales. El material natural está formado por arcillas compactadas en capas de 20 a 60 cm., el material artificial esta formado de hule, polietileno, pvc.

El espesor de suelo para disminuir la penetración de los contaminantes de lixiviado depende de la permeabilidad, el gasto de infiltración, velocidad de penetración del contaminante, precipitación pluvial, de la capacidad de intercambio catiónico.

Interfase para eliminación= 300  $\frac{C \cdot l}{(CIC)Pv}$   
De carga catiónica

Donde :

- C Concentración catiónica de lixiviado, 440meq/l
- CIC Capacidad de intercambio catiónico del suelo, 0.1 a 6meq/100grs
- Pv Peso volumétrico del suelo, 1200 a 1800kg/m<sup>3</sup>
- i Infiltración en m/m<sup>2</sup> de relleno-año, 0.01 a 1.8

## 11. DRENAJE DEL LIQUIDO PERCOLADO

El manejo de líquido percolado es uno de los mayores problemas que se presentan en el relleno.

Disponer de canales periféricos para interceptar y desviar los escurrimientos de agua; la lluvia aumenta significativamente el volumen del lixiviado, hace necesario construir un sistema de drenaje en el terreno antes del depósito de basura. Se recomienda construir estos drenajes en todas las bases de los taludes interiores y exteriores de las terrazas o niveles que conformen el relleno.

El sistema de drenaje es una red horizontal de zanjas en piedras, interrumpiendo el flujo continuo del percolado por medio de pantallas.

Se recomienda un sistema de pozos de monitoreo para el lixiviado, cuando menos se debe contar con tres pozos para muestreo, situados, uno en la dirección del flujo de las aguas subterráneas antes de llegar al sitio del relleno sanitario; otro aguas abajo del sitio y el último en el nivel o base del relleno, se pueden construir de asbesto, cemento o plástico de un diámetro de 40 cm.

## 12. DRENAJE DE AGUA DE LLUVIA

El escurrimiento de las aguas pluviales, deberán evitarse mediante la construcción de un drenaje pluvial periférico de forma trapezoidal y dimensionamiento de acuerdo con las condiciones de precipitación local, área tributaria, características del suelo, vegetación y topografía.

El caudal aportado se puede calcular mediante el método racional:

$$Q_p = K i A / 3.6 \times 10^6$$

Donde:

- Q<sub>p</sub> Caudal aportado, m<sup>3</sup>/seg.
- K Coeficiente de escurrimiento
- i Intensidad de la lluvia, para una duración igual a t<sub>c</sub>, mm/hr
- A: Área de la cuenca, m<sup>2</sup>
- t<sub>c</sub> Tiempo de concentración, min.

El canal debe ser trazado por la curva de nivel máximo a que llegará el relleno y deberá obtenerse una velocidad máxima promedio de 0.5 m/seg. La sección del canal se puede calcular con la siguiente relación:

$$A = Q_p / v$$

Donde:

- A Área de la sección de la zanja.
- v Velocidad máxima promedio.

# AMBITOS ENCONTRADOS EN LIXIVIADOS PARA RESIDUOS MUNICIPALES

COMPONENTE	AMBITO(MG/L Ó PPM)
1. ALCALINIDAD TOTAL COMO CaCO <sub>3</sub>	4000 - 26640
2. ARSENICO	0.04
3. CADMIO	0 - 0.025
4. CALCIO	100 - 320
5. CIANUROS	0
6. CINC	0.25 - 3.0
7. CLORUROS	1325 - 8870
8. COBRE	0 - 0.6
9. CONDUCTANCIA ESPECIFICA	7400 - 32000 (μOHMS/CM)
10. CROMO TOTAL	0 - 8.7
11. DBO <sub>5</sub>	300 - 62000
12. DQO	1870 - 62320
13. DUREZA TOTAL	1800 - 11000
14. FLUORUROS	0.8 - 0.8
15. FOSFORO TOTAL	1 - 10
16. HIERRO TOTAL	1.7 - 1600
17. MAGNESIO	300 - 895
18. MANGANESO	0.05 - 4.0
19. MERCURIO	0 - 0.008
20. NITRATOS	0
21. NITRITOS	0.2 - 1.2
22. NITROGENO AMONICAL	15.5 - 1420
23. NITROGENO ORGANICO	46 - 1800
24. OXIGENO DISUELTO	0
25. POTENCIAL DE HIDROGENO	6.3 - 7.9
26. PLOMO	0 - 2.0
27. POTASIO	365 - 1270
28. SOLIDOS TOTALES	1700 - 16460
29. SODIO	480 - 4920
30. SULFATOS	40 - 1000
31. FENOL	0.8 - 18
32. DETERGENTES (SAAM)	0.7 - 233
33. TURBIEDAD	128 - 1600 (UNT)

FUENTE: GONZALEZ URDELA J. LORENZO  
 MONITOREO AMBIENTAL EN RELLENAMIENTO SANITARIO  
 1ER. CONGRESO MUNDIAL DE INGENIERIA SANITARIA VOL. XXXVI  
 ENERO-MARZO, 1982

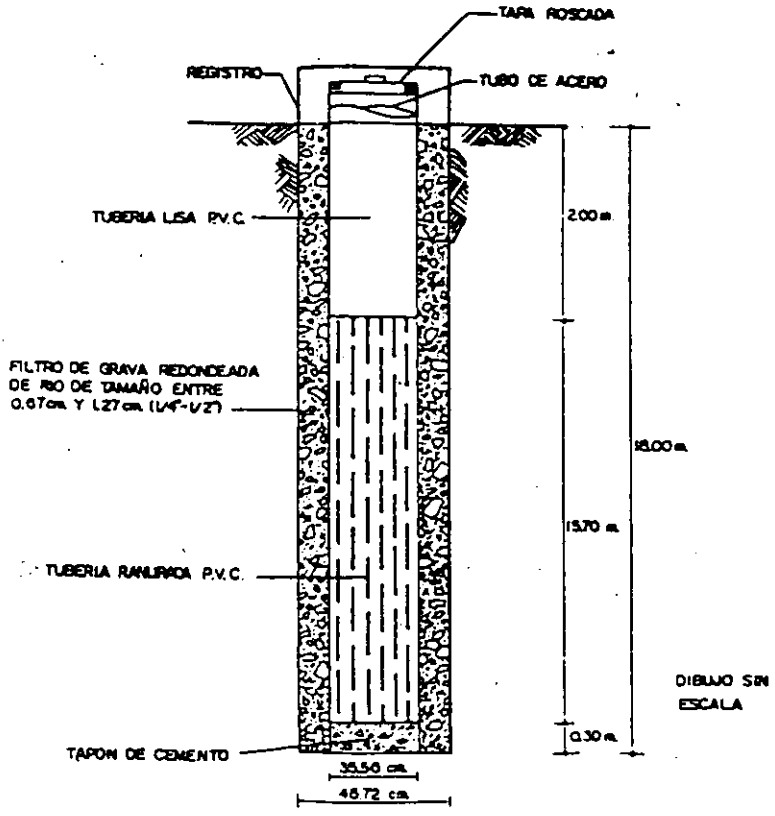
# COMPOSICION DE LOS GASES PRODUCIDOS EN UN RELLENO

TIEMPO TRANSCURRIDO  
DESDE QUE SE CONSTRUYO  
LA CELDA (MESES)

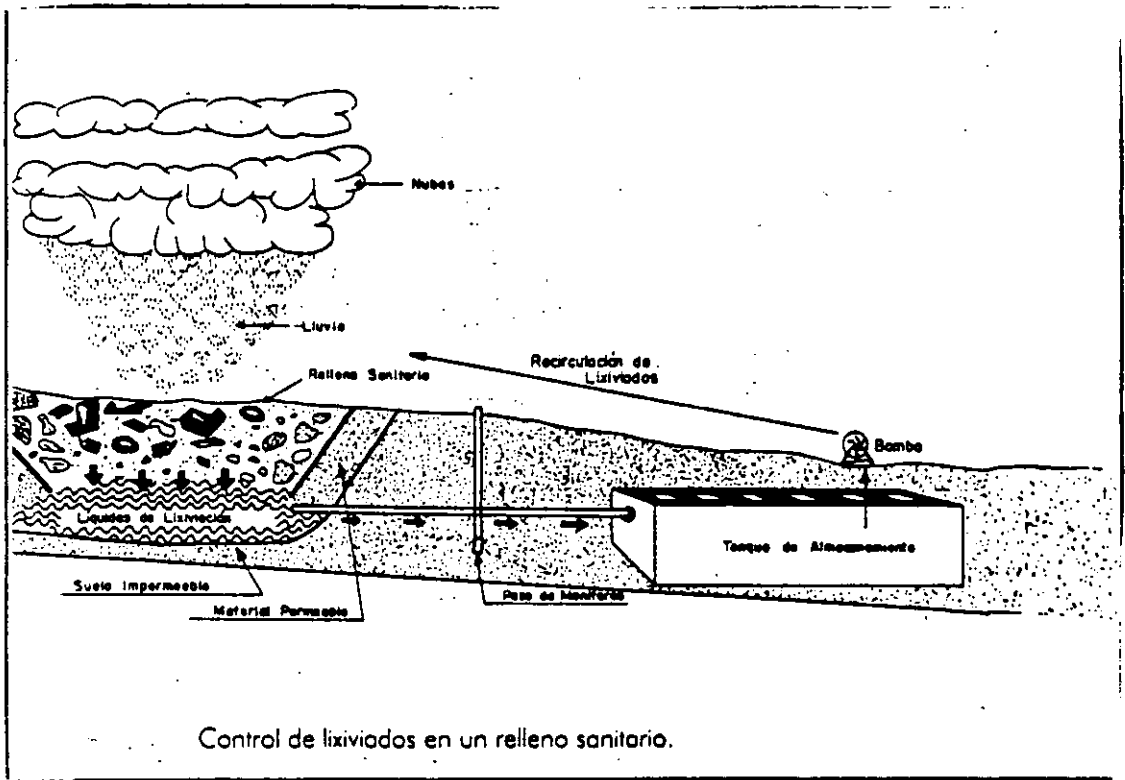
COMPOSICIÓN GASES  
EN %

	N2	CO2	CH4
0 - 3	5.2	88	6
3 - 6	3.8	76	21
6 - 12	0.4	65	29
12 - 18	1.1	52	40
18 - 24	0.4	53	47
24 - 30	0.2	52	48
30 - 36	1.3	51	51
42 - 48	0.4	51	48

FUENTE: BRUNNER R. DIRK Y KELLER J. DANIEL  
SANITARY LANDFILL DESIGN AND OPERATION  
U.S., E.P.A., 1972



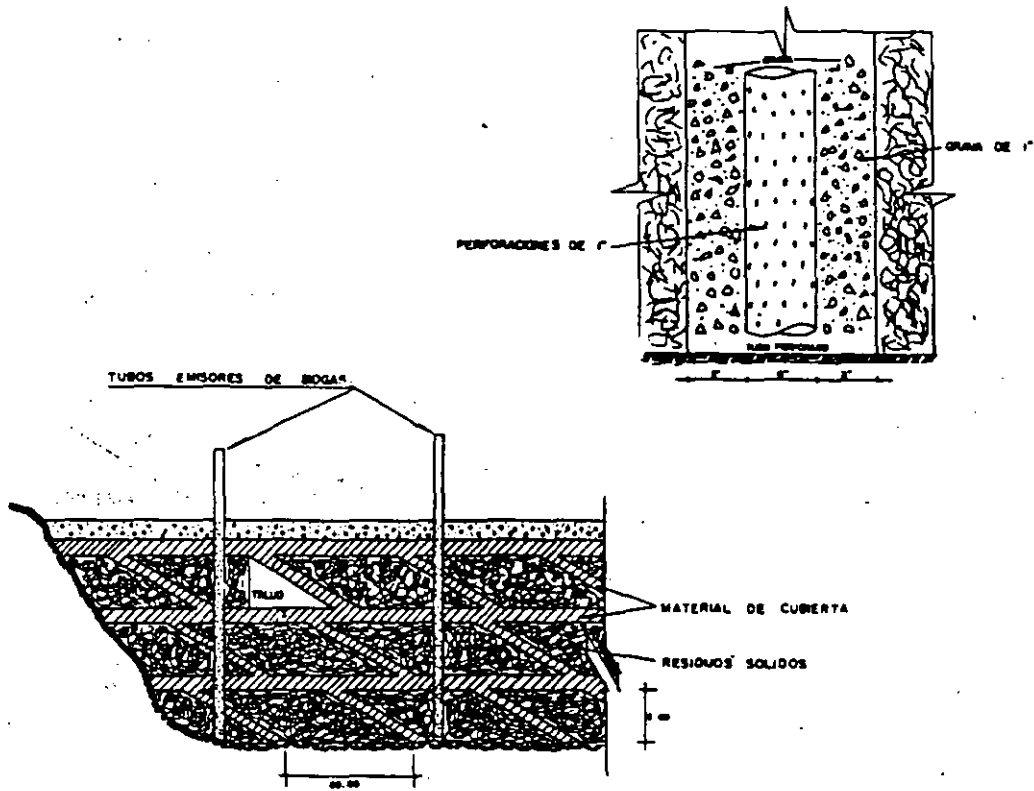
Croquis de un pozo de monitoreo y control de contaminación de agua.



Control de lixiviados en un relleno sanitario.

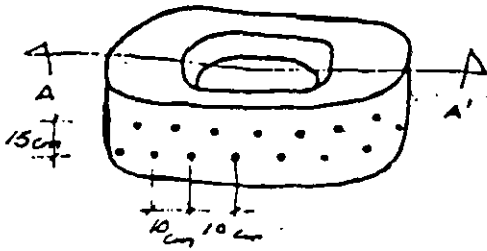
Idem I.





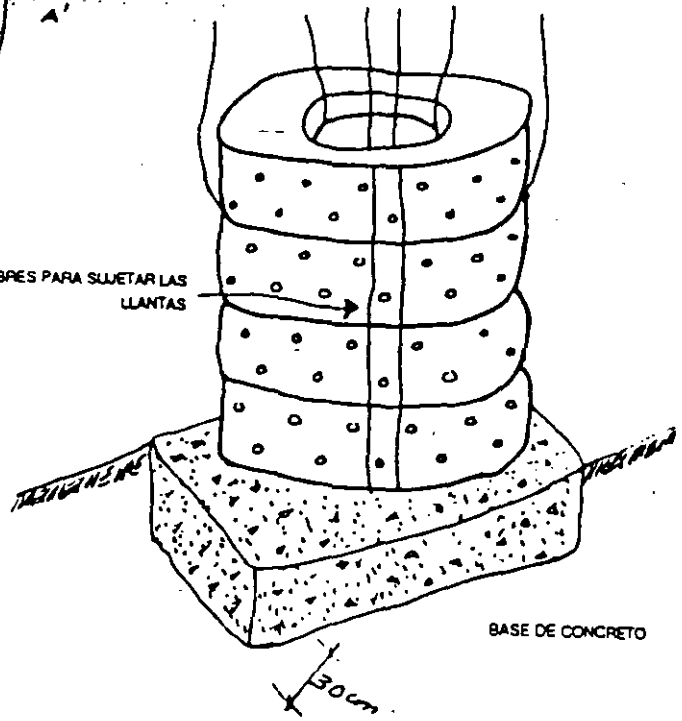
Detalle y colocación de los tubos emisores de biogas:

Idem 1



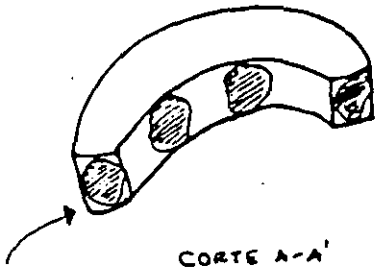
PERFORACION DE LLANTAS CON TALADRO O BERBIQUI

ALAMBRES PARA SUJETAR LAS LLANTAS



BASE DE CONCRETO

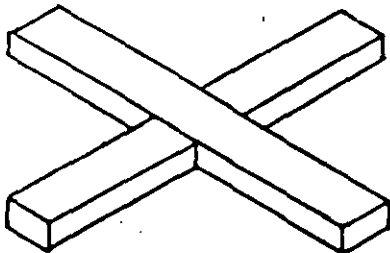
30 cm



CORTE A-A'

PIEDRAS GRANDES O BOJEROS ENTRE LAS LLANTAS PARA EVITAR QUE SE APLASTEN LAS PERFORACIONES

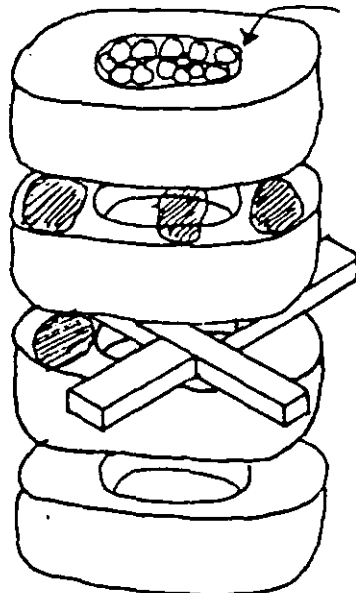
UNA VEZ ARMADAS LAS LLANTAS SE RELLENAN CON GRAVA O BOJEROS DE 4



CRUCETA DE MADERA

ENTRE LLANTAS Y LLANTAS IRAN COLOCADAS LAS CRUCETAS CON ALAMBRE

DADO EL CASO SE SUSTITUIRA LA CRUCETA POR PEDACERIA DE LADRILLOS O PIEDRAS (LO MENOS REDONDAS POSIBLES) SUJETAS POR ALAMBRES DE TAL FORMA QUE QUEDEN HUECOS ENTRE LAS LLANTAS

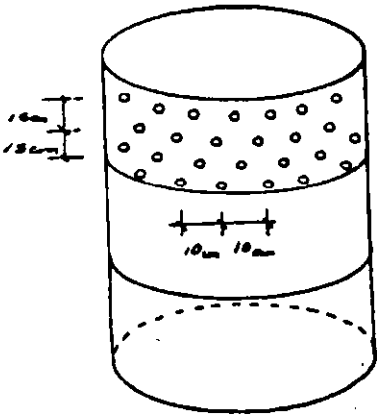


BOJEROS DE 4''

Tubos emisores contruidos con llantas usadas.

IGUALMENTE SE FUARA CON UNA BASE DE CONCRETO

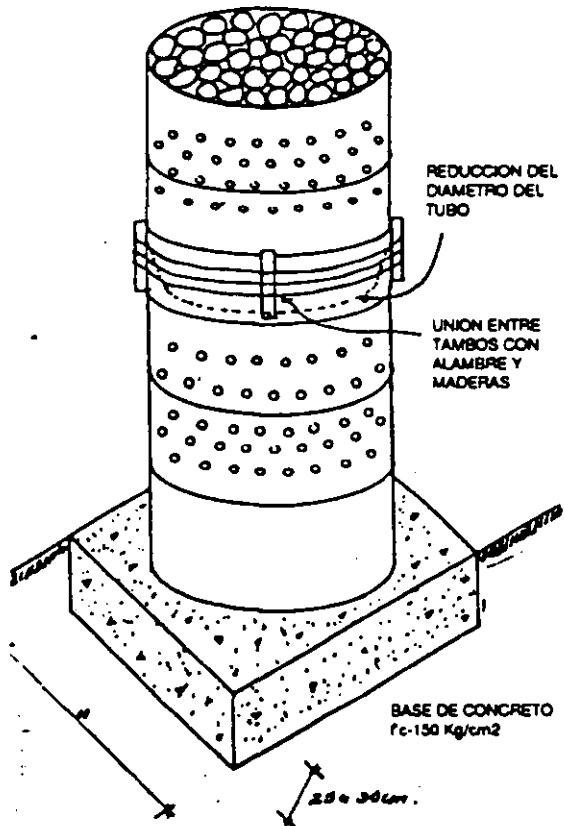
Idem 1



TAMBO DE 200 LTS.  
DESFUNDADO

PERFORACIONES CON TALADRO O  
BERBEQUI 1/2"Ø

GRAVA O BOLEROS DE 4"  
DIAMETRO LIBRE DE ARCILLA



REDUCCION DEL  
DIAMETRO DEL  
TUBO

UNION ENTRE  
TAMBOS CON  
ALAMBRE Y  
MADERAS

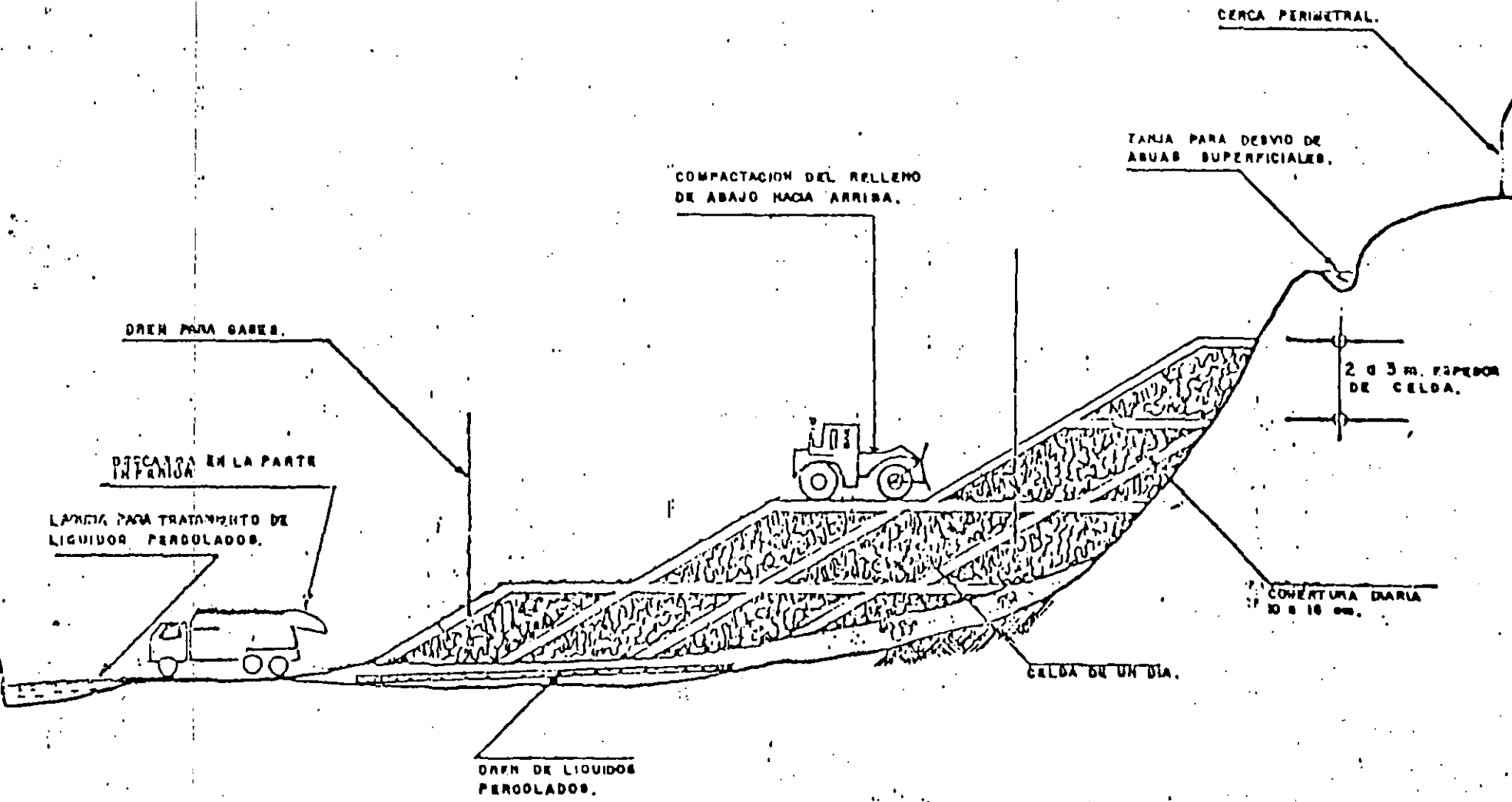
BASE DE CONCRETO  
f'c=150 Kg/cm²

H = ANCHO SUPERIOR AL DEL TAMBO

Tubos emisores contruidos con tambos vacíos.

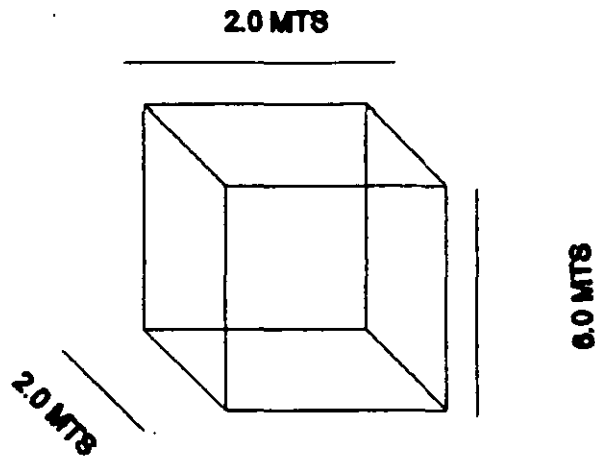
Idem 1.


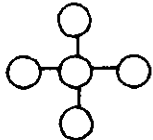
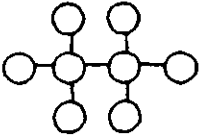
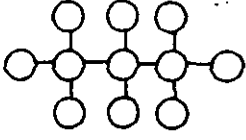
97



# RELLENO SANITARIO

# SONDEO CON POZOS A CIELO ABIERTO



AREA HA	NUMERO APROXIMADO	DISTRIBUCION
HASTA 5	3	
5 - 20	5-6	
20 - 40	8 - 9	
> 40	11 - 15	

### **13. SISTEMA DE CAPTACION DE BIOGAS**

Para la captación de los gases existen dos métodos, el primero con materiales permeables y el segundo con materiales impermeables.

En el método permeable se pueden emplear zanjas de grava o ventilas llenas de grava entre las celdas por donde fluirán los gases; las zanjas deben profundizar abajo de la base del relleno, su diámetro puede ser de 30 cm., o bien, se pueden colocar tubos perforados de PVC de 8 a 10 cm de diámetro, los cuales funcionarán a manera de chimenea y se construyen verticalmente a medida que avanza el relleno; se recomienda instalarlas cada 20 o 50 metros.

Se deben interconectar los drenes a fin de lograr una mayor eficiencia en el drenaje de líquidos y gases. En la última celda se colocan tubos de concreto para facilitar su manejo.

El método impermeable consiste en que los gases son controlados en el suelo a través de materiales impermeables, pero deberá preverse una salida de los gases hacia la parte superior.

### **14. OBRAS COMPLEMENTARIAS**

Las obras complementarias pueden ser cobertizo para equipo, caseta de vigilancia y control, báscula, cercas fijas y móviles y tratamiento de lixiviados, iluminación del relleno, instalaciones sanitarias, patio de maniobras y cartel o valla publicitaria.

### **15. SELECCION DE MAQUINARIA**

Un paso importante en la construcción de un relleno sanitario es la selección de maquinaria adecuada. La selección del equipo depende de varios criterios tales como :

- \* cantidad de basura
- \* Tipo de suelo
- \* características de los materiales a remover y compactar
- \* clima
- \* topografía
- \* eficiencia del operador

El tonelaje diario es la variable principal al seleccionar la maquinaria adecuada y se debe considerar su crecimiento futuro.

Con base a estos criterios, es posible calcular una eficiencia para alcanzar la producción a bajo costo, el método más utilizado para evaluar el rendimiento del equipo es :

$$\frac{CB}{MP} = EOM$$

Donde CB es el costo mínimo por basura  
MP es la máxima productividad posible por hora  
EOM es la eficiencia óptima de la maquinaria

#### **15.1 Tipo de Maquinaria.**

*Compactador de ruedas de acero*

El compactador de ruedas de acero es útil para esparcir, compactar y cubrir grandes volúmenes de desechos, además de lograr una gran densidad de compactación (de 712 a 949 Kg/m<sup>3</sup>). es rápido, ágil y agresivo aún más que un tractor de cadenas.

Se recomienda en superficies planas donde pueda aplicar el mayor peso a los desechos, inclinaciones más pronunciadas que 4:1 la eficiencia de compactación disminuye.

#### *Tractor de Cadena*

Las actividades que desarrolla este tipo de maquinaria son:

Empuje y compactación de residuos sólidos  
Conformación de piso y talud  
Cobertura

El tractor de cadena trabaja en toda clase de climas y se adaptan a rellenos sanitarios de área, rampa y de zanja.

Existen en el mercado varios tipos de hojas para las orugas que se adaptan a las necesidades que se requieran; destacándose 3:

hojas "U" universal (Para largas distancias de acarreo).  
hojas "S" recta (Para distancias cortas de acarreo).  
hojas "A" angulable (Ideal para el corte inicial de caminos, zanja y empuje lateral).

#### *Cargador de Ruedas*

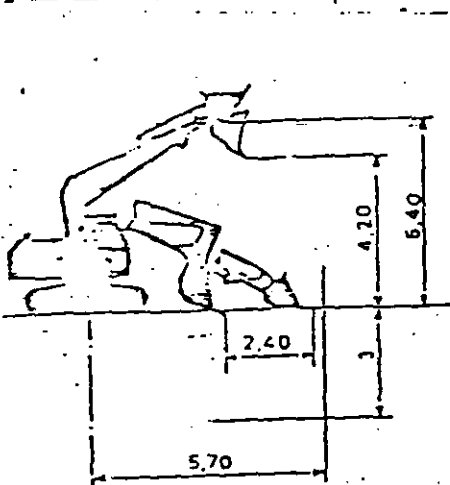
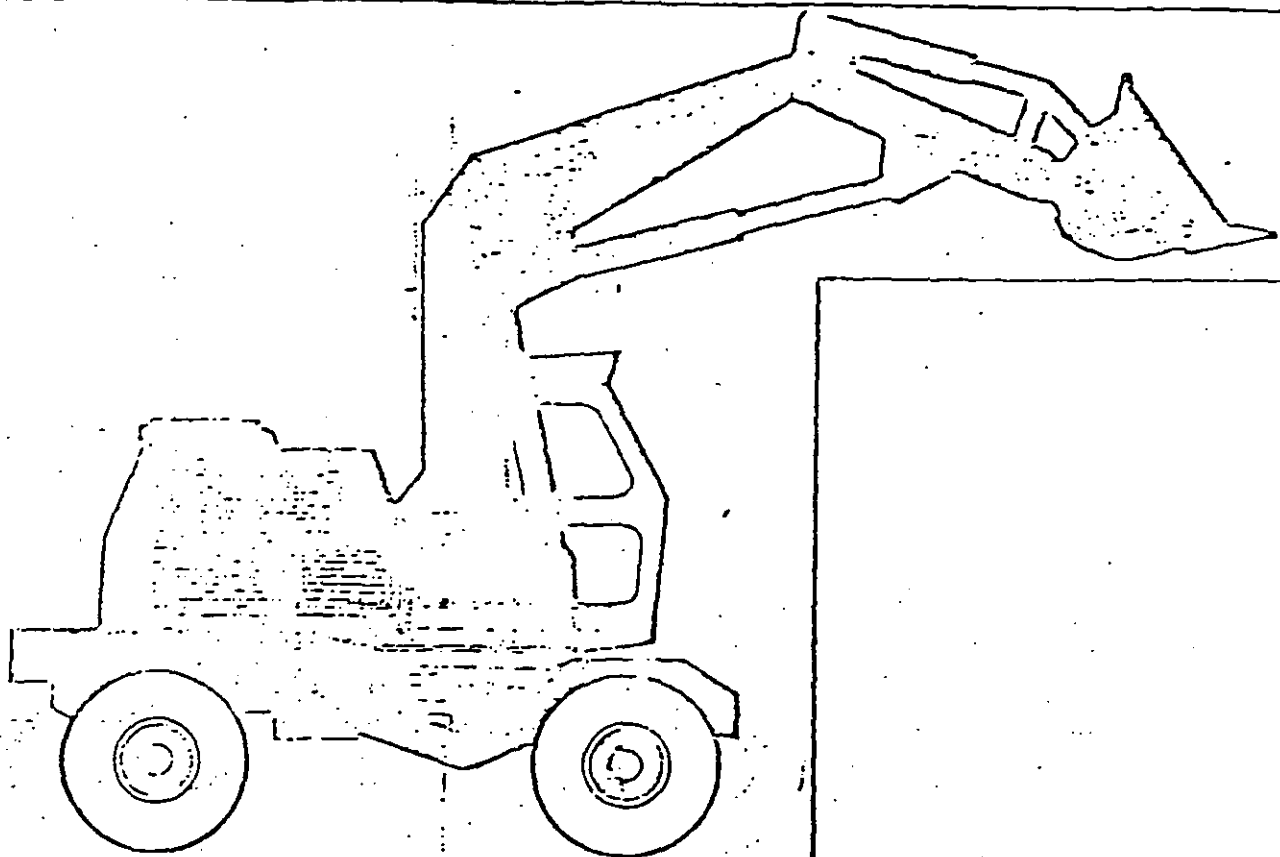
Esta maquinaria es versátil y rápida para el desmenuzamiento y reciclaje; puede cargar material de cobertura, acarrear los desechos y realizar trabajos de limpieza.

Las desventajas que presenta, es el constante pinchaduras de neumáticos, la cual es subsanada con neumáticos de espuma de goma. Estos neumáticos reducen la velocidad de la máquina y no se recomiendan para largas distancias debido a la acumulación de calor. Otra desventaja es que requiere más material de cobertura para la compactación

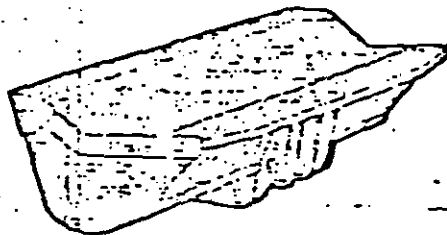
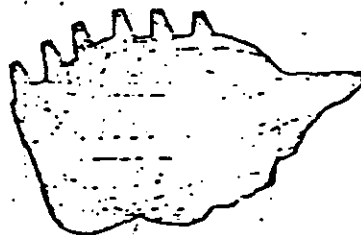
#### *Cargador de Cadenas*

Es una máquina que se ocupa de cargar material de cobertura, material utilizado en el mantenimiento de camino, para la carga de basura e incluso para la compactación. Emplea un cucharón hidráulico, el cual puede escavar y compactar.

El cargador de cadenas es ideal para rellenar zanjas. Cuando se utilizan para la compactación se obtiene una compactación igual a la de un compactador de cadenas, y puede proveer densidades mayores si se compacta con el cucharón cargado.



Recorrido al ras del suelo : 2,40 m.  
 Altura de descargue : 5,40 m.  
 Alcance desde eje giro : 5,70 m

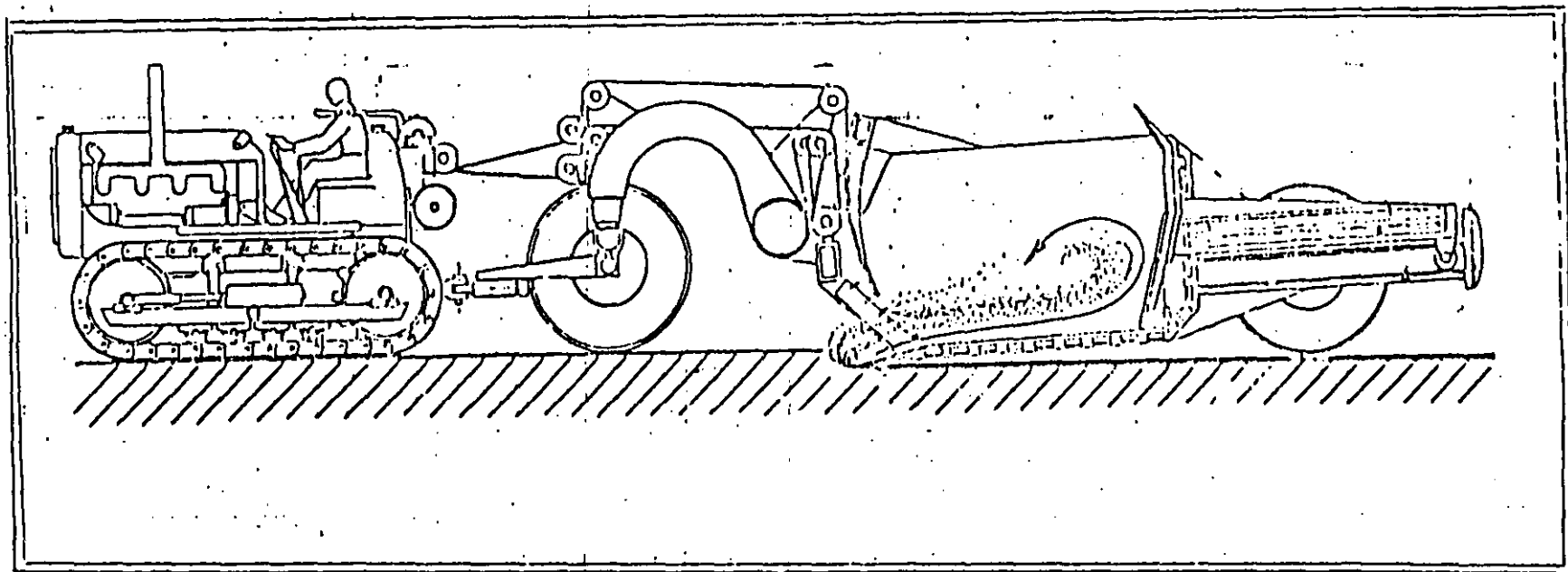


GAMA DE CUCARAS CARGADOR

simbolo	ancho	cuchilla de la	capacidad
* 100.034	1.100	3 dientes	450 l (5/16 y <sup>3</sup> )
* 100.035	1.300	6 dientes	520 l (11/16 y <sup>3</sup> )
* 100.037	1.500		850 l (11/8 y <sup>3</sup> )

CUCHARON CARGADOR FRONTAL





TRAILLAS

## SELECCION DE EQUIPO

POBLACION	TON/DIA	MAQUINARIA
0 - 20000	0 - 45	D3; 931; 936 LFC
20000 - 60000	45 - 136	D4; 943; 518LFC; 936LFC
60000 - 100000	136 - 227	D5; D6; 953 Y 518LFC
100000 - 140000	227 - 318	D6; D7; 936 Y 816
140000 - 200000	318 - 455	D8; 973 Y 816

### MOVIMIENTO DE MATERIAL

TRACTOR DE CADENAS 0 A 90 METROS

CARGADOR DE CADENAS 0 A 150 METROS

COMPACTADOR 0 A 60 METROS

TRAILLA REMOLCADA 180 A 300 METROS

MOTOTRAILLA MAYOR DE 180 METROS

Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar.

### **Retroexcavadora**

La función principal de la retroexcavadora dentro del relleno sanitario, es relizar canales para la captación de lixiviados y drenaje del agua pluvial; en ocasiones se utilizan para la carga de material y mantenimiento de los canales de lixiviados.

### **Traillas**

Diseñadas para excavar y acarrear el material de cobertura a distancias de aproximadamenre 183m. Esparce el material en capas delgadas y uniformes, sube fácilmente pendientes inclinadas y desplazarse rápidamente en caminos de superficies desiguales.

No es recomendable usar neumáticos rellenos de espuma de goma debido a que las traillas deben desplazarse a altas velocidades.

### **Camión de Volteo**

Sirve para el acarreo de tierra al frente de trabajo y como aproxcimador de combustible para las máquinas.

## **16. COSTO DE INVERSION Y DE OPERACION**

La inversión del relleno está dada por la suma de los costos del terreno, su preparación, construcción, maquinaria y equipo, obras de protección y costos de tratamiento. Las inversiones deberán amortizarse durante la vida útil del relleno sanitario, excepto en el caso de maquinaria y equipo, la cual deberá amortizarse en un plazo de 5 años.

El costo del terreno corresponde a la adquisición del predio.-

El costo de preparación es el acondicionamiento del predio que incluye despalme, desenraice, excavaciones, movimientos de tierras y caminos de acceso.

El costo de construcción es la suma de costos de edificación de cerca perimetral y movil, caseta de acceso, caseta administrativa y de pesaje, cobertizo y cimentación de báscula.

El costo de maquinaria y equipo es la suma de los costos de adquisición de báscula, tractores, compactadores, vehículos de acarreo de material de cubierta, herramienta, mobiliario y equipo de oficina.

El costo de obras de protección es la suma de costos para el manejo y captación de aguas pluviales, lixiviados y biogas.

Los costos de tratamiento se refieren en caso necesario de tratar los lixiviados, a la edificación, equipamiento y adquisición de terreno para la planta de tratamiento de lixiviados.

En caso de existir financiamiento para la inversión, es necesario incluir los interese que se generen por dicho financiamiento.

Los costos de operación incluyen aquellos conceptos que dependen del funcionamiento propio del relleno, incluyendo los que generan el equipo utilizado en la extracción, acarreo y colocación del material de cubierta.

## BIBLIOGRAFIA

- . Diagnóstico Previo Administrativo, Financiero y Jurídico del Sistema de Control de Residuos Sólidos.- SEDUE. 1985
- . Primera Reunión con Presidentes Municipales sobre Desechos Sólidos y Aguas Residuales.- Presidencia de la República, Coordinación de Proyectos de Desarrollo.- 1982.
- .. Desarrollo Institucional.- Guido Acurio, OPS., Colombia, Domingo Ruíz. OPS., Estados Unidos de América.
- . Planificación, Operación y Administración de Servicios de Desechos Sólidos. George A. Garland.- Oficina de Desechos Sólidos.- Agencia de Protección Ambiental.- E.U.A. (U.S.E.P.A.)
- . Estudios Demográficos y Urbanos Vol. 1 Colegio de México, 1986
- . Proyecciones de Población en México, 1980-2010. CONAPO
- . El Distrito Federal Algunos Problemas y su Planeación.- Gloria Salazar.- UNAM. 1983
- . Taller sobre Residuos Sólidos., Julio Roberto Jiménez Rubiano, OPS, CEPIS, Lerma Ferce, 1982.
- . Sanitary Landfill Desing and Operation Dirk R. Brunner and Daniel J. Keller. U.S. Enviromental Protection Agency, 1972.
- . Programa de Administración de Residuos Sólidos de la EPA; Simposio sobre Ambiente, Salud y Desarrollo en las Américas OPS/QMS, Serie Técnica No. 19 pp.279- 1976.
- . XI Censo General de Población y Vivienda, 1990.
- . Programa Nacional para la Protección del Medio Ambiente 1990-1994. Diario Oficial 9 de Junio de 1990.
- . Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Diario Oficial 28 de Enero de 1988.
- . Plan Nacional de Desarrollo 1989-1994. Diario Oficial 1o. de Junio de 1989.
- . El Complejo Industrial de Valorización de Desechos. Gerard Renard., Ingeniero en Jefe en el Distrito de BAYONNE-ANGLET-BIARRITZ.

- . Programa de Salud Ambiental, Situación Regional del Aseo Urbano. OPS/OMS - Junio de 1991.
- . Programa de Salud Ambiental.- Guías para el Desarrollo del Sector de Aseo Urbano en Latinoamérica y el Caribe. OPS/OMS.- Enero de 1991.
- . Programa de Salud Ambiental.- Descripción de la Legislación Estadounidense Sobre Rellenos Sanitarios.- OPS/OMS. Junio de 1991.
- . Programa de Salud Ambiental.- Consideraciones Sobre el Manejo de Residuos Sólidos en Hospitales en América Latina. OPS/OMS. Junio de 1991.
- . Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión, Raúl Coss Bu. LIMUSA, Segunda Edición, 1987



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

**CURSOS ABIERTOS**

**VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS**

**MODULO II:  
CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR DESECHOS  
SOLIDOS, INDUSTRIALES, E HIDROCARBUROS**

**EL VALLE DE MEXICO  
CONSIDERACIONES PRELIMINARES SOBRE LOS RIESGOS GEOLOGICOS Y  
ANALISIS HIDROGEOLOGICO DE LA CUENCA DE CHALCO**

**DR. RAMIRO RODRIGUEZ.**



## EL VALLE DE MEXICO

### CONSIDERACIONES PRELIMINARES SOBRE LOS RIESGOS GEOLOGICOS Y ANALISIS HIDROGEOLOGICO DE LA CUENCA DE CHALCO

ARGENTINA  
BOLIVIA  
BRASILE  
CHILE  
COLOMBIA  
COSTA RICA  
CUBA  
ECUADOR  
EL SALVADOR  
GUATEMALA  
HAITI  
HONDURAS  
ITALIA  
MESSICO  
NICARAGUA  
PANAMA  
PARAGUAY  
PERÚ  
REPUBLICA DOMINICANA  
URUGUAY  
VENEZUELA



2

El Instituto Italo-Latino Americano (IILA) es un Organismo Internacional con sede en Roma. Forman parte del mismo Italia y las veinte Repúblicas de la América Latina (Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Chile, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haití, Honduras, México, Nicaragua, Panamá, Perú, República Dominicana, Uruguay y Venezuela) según el Convenio Internacional firmado el 1º de Junio de 1966 y entrado en vigencia luego de haber sido ratificado por los Estados Miembros.

De conformidad con sus finalidades institucionales, el IILA organiza manifestaciones y desarrolla actividades que ilustran y promueven el proceso evolutivo de América Latina en los campos social, económico, cultural y técnico científico. El desarrollo y la coordinación de la investigación, documentación e información sobre los problemas, las realizaciones y las perspectivas de cada País miembro adquieren significativa importancia.

L'Istituto Italo-Latino Americano (IILA) è un Organismo Internazionale con sede in Roma. Ne fanno parte l'Italia e le venti Repubbliche dell'America Latina (Argentina, Bolivia, Brasile, Cile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haiti, Honduras, Messico, Nicaragua, Panama, Paraguay, Perú, Repubblica Dominicana, Uruguay e Venezuela) ai sensi della Convenzione Internazionale firmata il 1º giugno 1966 ed entrata in vigore in seguito alla ratifica degli Stati Membri.

In conformità alle finalità istituzionali, l'IILA organizza manifestazioni e svolge attività che illustrano e promuovono il processo evolutivo dell'America Latina nei campi sociale, economico, culturale e tecnico scientifico. Lo sviluppo e il coordinamento della ricerca, della documentazione e dell'informazione sui problemi, le realizzazioni e le prospettive di ciascun paese membro acquistano significativa importanza.



## EL VALLE DE MEXICO

### CONSIDERACIONES PRELIMINARES SOBRE LOS RIESGOS GEOLOGICOS Y ANALISIS HIDROGEOLOGICO DE LA CUENCA DE CHALCO

S. Bellia\* - G. Cusimano\*\* - T. González M.\*\*\*  
R. Rodríguez C.\*\*\* - G. Giunta\*\*\*\*

\* Istituto di Mineralogia, Petrografia e Geochimica, Università di Palermo (Italia).

\*\* Dipartimento di Geologia e Geodesia, Università di Palermo (Italia).

\*\*\* Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

\*\*\*\* Coordinador de la intervención.

## INTRODUCCION

El Valle de México representa uno de los más complejos ecosistemas del Mundo latinoamericano. La antropización del Valle, iniciada en tiempos prehispánicos, estuvo probablemente relacionada con motivaciones socio-religiosas inducidas por la necesidad objetiva y espiritual del elemento "agua", culturalmente connatural con las poblaciones aztecas y sucesivas. Desde entonces hasta hoy México ha superado los 20 millones de habitantes llegando a ser el polo industrial más desarrollado del País.

El "ambiente" del Valle une a su majestuosa belleza una serie de características que teóricamente limitarían el pleno e incondicionado disfrute de dichos territorios por parte del hombre. En el Valle de México la interacción entre hombre y ambiente es esperada por una especie de precariedad de este último. Ello significa que dicha área está sujeta a un conjunto de riesgos naturales inducidos por la antropización sobre un territorio que a menudo posee elevados índices de peligrosidad. El Valle de México está ubicado, en efecto, en una de las zonas sísmicamente más activas del mundo; entre otras cosas las características geológicas de los primeros centenares de metros por debajo de la superficie son tales que constituyen un óptimo amplificador de ondas sísmicas. El Valle está también ubicado, grosso modo en el centro de un importante conjunto volcánico todavía en actividad, el Eje Neovolcánico Transmexicano, que atraviesa el País desde el Pacífico hasta el Golfo de México por varios centenares de kilómetros. Además, la especial morfología de la cuenca endorreica construida por el desarrollo de los edificios volcánicos, sumada a la elevadas precipitaciones concentradas en breves periodos de tiempo típica de las fajas intertropicales, hace que dichas áreas sean a menudo objeto de aluviones e inundaciones.

Por fin, la necesidad de encontrar cada día mayores cantidades de agua (se calcula que para las necesidades civiles e industriales serían hoy necesarios unos 60m<sup>3</sup>/seg) lleva a un incremento de la explotación de las napas hidricas subterráneas o menos presentes por debajo de las numerosas cuencas que componen todo el Valle: por la especial naturaleza de los acuíferos y su excesiva explotación lleva necesariamente a provocar fenómenos de subsidencia, a menudo muy acentuados. Por último las numerosas actividades humanas agudizan el problema "contaminación" tanto de las napas hidricas como de la atmósfera.

El ambiente del Valle de México podría llevar a consideraciones varias y contrastantes, ya sólo observándolo con la rapidez con que se acaba de presentarlo. Ciertamente el territorio, ya de por sí, está variamente expuesto a una serie de fenomenologías "naturales" que incrementan su índice de peligrosidad, en que el elemento hombre eleva los valores de "riesgo" a niveles frecuentemente superiores a los umbrales de seguridad.

Por otra parte la actividad humana, aun constituyendo un factor negativo en la evaluación de los riesgos, también está dirigida a la atenuación del riesgo mismo a través de la prevención y la gestión de las emergencias. No cabe duda que en esa dirección han empezado a proceder las Administraciones centrales y locales junto con los organismos técnicos y científicos del sector. Parece superfluo observar cuán enormes son las dificultades de análisis y gestión de dichos problemas, que sólo en los últimos tiempos aparecieron en la escena de la programación, aun en países tecnológicamente adelantados y con concentraciones urbanas muy inferiores a las que se presentan en el Valle de México.

Esta publicación representa una contribución al estudio de las problemáticas arriba expuestas. Es el resultado de una colaboración entre investigadores del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y del Departamento de Geología y Geodesia y del Instituto de Mineralogía, Petrografía y Geoquímica de la Universidad de Palermo, en el contexto de los programas internacionales de la Vicesecretaría Técnico-Científica del Instituto Italo Latino Americano (IILA).

El tema elegido por parte mexicana ha sido desarrollado en el arco de unos trece años de investigaciones, afrontando algunas problemáticas "geológico-ambientales" presentes en el Valle de México. En particular, las investigaciones se dirigieron al análisis hidrogeológico de la Subcuenca de Chalco considerada, con mucha probabilidad de estar en lo cierto, como representativa de todo el Valle.

El objetivo prioritario de la investigación ha sido el de intentar elaborar un modelo tridimensional de la región objeto del estudio, en el cual se pueda introducir correctamente y comprender la complicada geometría de los acuíferos subterráneos, y explicar la marcha de los frentes de contaminación. En este sentido ha sido muy estimuladora la colaboración entre geólogos y geofísicos, por lo demás con experiencia a menudo diferentes, pero desde hace años atentos a las problemáticas geológico-ambientales de muchos países latinoamericanos.

Los resultados no pretenden ser definitivos y, probablemente, adolecen de excesiva parcialidad. Ojalá que las páginas que siguen puedan representar un polo de diálogo sobre los problemas tratados, más que un documento analítico puro y simple. Es por esta razón que, aun a riesgo de ser didascálicos, se prefirió proceder ordenadamente: los conceptos básicos sobre la peligrosidad y los riesgos aplicados al Valle de México, los aspectos generales de las problemáticas de la Cuenca de México y el encuadramiento morfológico, climático e hidrológico de la misma, y el encuadramiento geológico regional del Valle. Y luego: el análisis hidrológico de la Subcuenca de Chalco, partiendo de la construcción de un modelo geológico tridimensional, a través del estudio hidrogeológico de la subcuenca hasta el análisis del "riesgo" relacionado con hipótesis sobre la evaluación de la vulnerabilidad de las napas hídricas.

A la UNAM va el más sincero agradecimiento por la alta calificación con que ha administrado esta colaboración en el terreno y en la oficina; en particular se agradece las Oficinas de Intercambio Académico Internacional y de Coordinación Científico.

Un agradecimiento especial es debido a las oficinas técnicas del Departamento del Distrito Federal, de cuyo personal se ha podido apreciar la alta maduración de los problemas tratados, así como la profesionalidad en la gestión de dichas problemáticas.

Las respectivas representaciones diplomáticas, de México en Italia y de Italia en México, con rara y notable sensibilidad hacia las temáticas objeto del estudio, han permitido una más rápida e incisiva realización de la colaboración italo-mexicana.

Formulamos votos, por fin, por que la presente colaboración encuentre una ampliación en el necesario desarrollo de estudios e investigaciones sobre los riesgos naturales a los que están expuestas vastas regiones latinoamericanas, especialmente urbanizadas, entre las cuales un excelente laboratorio es representado por la fascinadora realidad de México.

Giuseppe Giunta

Coordinador de la investigación

## PARTE A

### I. PROBLEMÁTICA DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO

#### I.1 Aspectos generales

La Cuenca del Valle de México, el mítico Valle de Anahuac, ha sido y es la zona más importante del País para los mexicanos. Para los aztecas ya constituía "EL OMBLIGO DEL UNIVERSO", lugar predestinado, por los dioses del Parnaso Azteca, para el establecimiento del imperio prehispánico más poderoso de Norteamérica. El agua siempre ha estado presente en la historia del pueblo de México. La señal que indicaría el sitio idóneo para la fundación de la gran Tenochtitlán fue un águila, posada en un nopal, devorando una serpiente. Nopal que debería estar en medio de un lago. La lógica más pueril indica que este sería el lugar menos apropiado para el establecimiento de una urbe que dominaría el universo. Tenochtitlán se fundó en condiciones inhóspitas y su crecimiento estuvo rodeado de situaciones adversas.

Antes de la llegada de los tenochcas a la Cuenca, ya había florecido en ésta, Teotihuacán, la Ciudad de los Dioses. El agua, también ocupa un lugar especial en esta cultura. Bajo la pirámide del Sol se encontraba un manantial. La compleja red de drenaje de la misma nos habla de un pueblo con alto desarrollo en ingeniería y preocupado por la salud de sus habitantes.

La omnipresencia de Tlaloc, dios de la lluvia, en los pueblos de la Cuenca hace referencia a la relevancia que a este vital elemento conferían las culturas mesoamericanas. Desde esa época el abastecimiento de agua, para más de 300 000 habitantes, constituía un reto a resolver. La separación de agua dulce de agua salobre por medio del bordo de Netzahualcoyotl constituye la primera gran obra hidráulica de la Cuenca (Rojas et al., 1974).

Desde antes de la Conquista, por los españoles, el creciente desarrollo urbano requirió de nuevas fuentes de abastecimiento de agua. Los manantiales de la zona noroeste y sur de la Cuenca, como el de Chapultepec, fueron la solución a este problema. La conducción de agua se resolvió con el ingenio mexicano, surgiendo los acueductos que tanto nombre dieron a la Ciudad. Surgió de esta forma una cultura del agua. Netzahualcoyotl, rey de Texcoco, se erige como pionero en la ingeniería hidráulica en México. El exceso de agua en la época de lluvias constituyó el otro gran reto al que se enfrentaron los gobernantes tenochcas. La primera medida contra las inundaciones fue la construcción de un albarradón de 16 kilómetros con un ancho de 7-10 metros que iba, de sur a norte, del Cerro de la Estrella al Peñón de los Baños.

Al occidente de la Subcuenca de Chalco, se desarrolló lo que sería el preámbulo del sistema de acuacultura. Zonas pantanosas del Sur de la Cuenca fueron transformadas en áreas cultivables separadas por canales navegables. Dada la escasez de terreno firme se crearon las llamadas chinampas, las cuales son islotes artificia-

les flotando en el sistema de canales. En el poniente de la zona ecológica de la Subcuenca de Chalco aún sobrevive una restringida área chinampera.

Al caer la gran Tenochtitlán, surge lo que sería la capital del virreinato de la Nueva España, la Ciudad de México. Su crecimiento durante los siglos 17 y 18, propició el cambio de canal a calzada, incrementando el número de las ya existentes y la urbanización de antiguas áreas lacustres. Las inundaciones continuaron, sobre todo en las márgenes de algunas corrientes de agua que desembocaban en el vaso del Lago de Texcoco. Los manantiales continuaron siendo la más importante fuente de abastecimiento.

## 1.2 Desarrollo urbano e industrial

Como ya se ha mencionado, la Cuenca del Valle de México ha sido sede de los sistemas de gobierno desde antes de los aztecas. Los virreyes de la Nueva España no cambiaron el carácter político, centralista de la Capital. Los gobiernos posteriores a la Independencia (1810) continuaron con este mismo esquema. Al crearse la Federación de Estados en 1824, entre ellos el Distrito Federal, éste se convierte en sede de los poderes federales. Sus límites actuales son definidos en 1898. La Revolución Mexicana afirma la posición política de la Ciudad; es después de este movimiento que el país entra en una etapa de franco desarrollo, acelerando la expansión urbana de la Ciudad de México. Hasta esta época la problemática relacionada con el agua y su manejo era muy semejante a la que enfrentaron los pobladores de la gran Tenochtitlán.

El marcado centralismo de las esferas gubernamentales del País contribuye al crecimiento poblacional. La Ciudad se convierte en el eje del comercio nacional, lo cual implica un aumento relativo en la población vinculada con esta rama económica. Por esta misma razón, se inicia el establecimiento de la fuerza industrial del País en la Cuenca, generando fuertes corrientes migratorias hacia la creciente urbe. En los primeros años de la década de los 50's, la zona metropolitana rebasó los límites urbanos del Distrito Federal, avanzando, inicialmente hacia el municipio de Tlalnepantla, floreciente zona industrial. Para 1960, la mancha urbana abarcaba ya cuatro nuevos municipios del Estado de México.

Para la década de los 70's, la Ciudad ya contaba con 8 millones de habitantes, empezando a figurar en la lista de las diez ciudades más grandes del planeta. La densidad habitacional era de más de 20 000 hab/km en Ixtacalco y Atzacapotzaleco. El naciente municipio de Nezahualcoyotl contaba ya con 500 000 habitantes. Su violento crecimiento rebasó los incipientes programas de planeación urbana (Fig. 1). La periferia de la Metrópolis fue la que más sufrió por la carencia de servicios. La administración de la Metrópolis ha venido sufriendo una serie de modificaciones a lo largo de su historia; en 1929 se crea el Departamento del Distrito Federal. La división política de esa época contempla la Cd. de México y 13 delegaciones políticas. Para 1970 se cuenta ya con 16 delegaciones, dos de las cuales Xochimilco y Milpa Alta son de un marcado carácter rural.

Para finales de la década de los 80's se tiene que englobar la población del D.F. y de los municipios conurbados en el Área Metropolitana, llegando ésta a 20 millones de habitantes. Esta cantidad se ha tomado como representativa, ya que no exis-

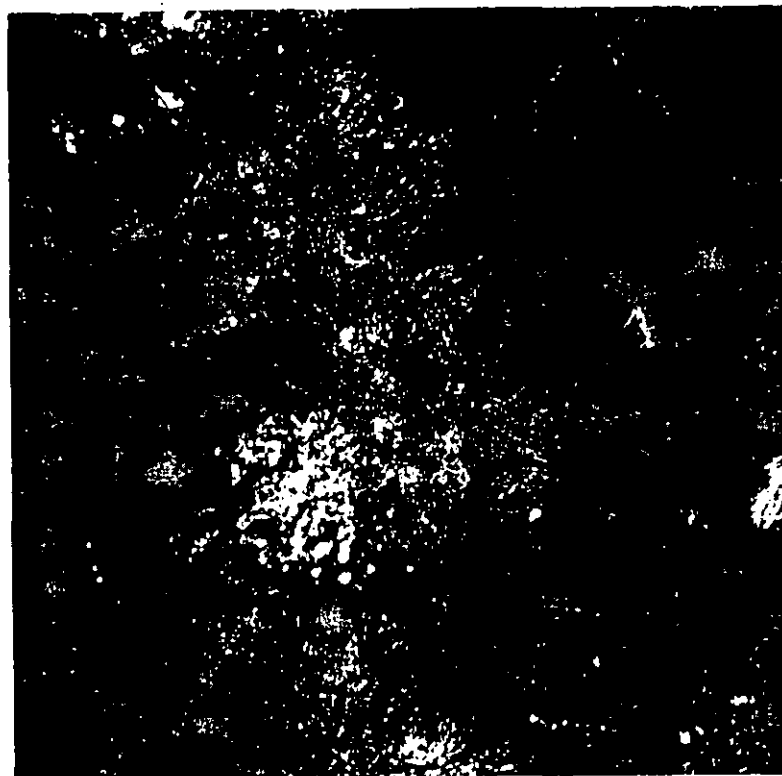


Fig. 1 - Imagen LANDSAT del sector sur-oriental del Valle de México. La zona central de la imagen corresponde a la Cuenca de Chalco.

ten criterios de suficiente validación. Los resultados del último censo realizado en 1990 aún no están publicados. El porcentaje de población flotante oscila entre 1 y 5 %.

## 1.3 Abastecimiento de agua

El que la mancha urbana se desarrollaba sobre la antigua región lacustre no implicaba únicamente problemas desde el punto de vista hidrogeológico. Las necesidades de abastecimiento de agua potable rebasaron los caudales disponibles de los manantiales desde el siglo 17. A partir del siglo 18, se inicia la explotación de

formaciones acuíferas someras por medio de norias (pozos sin equipar de gran diámetro). No es hasta principios del siglo 20 que se pasa de norias a pozos profundos (mayores de 50 m). Para los años 50's la profundidad de los pozos alcanza los 100 m. Los flujos requeridos para los 60's hacen alcanzar la profundidad de 200 m. Hacia finales de los 60's se estimaba un caudal de 32.1 m<sup>3</sup>/s de los cuales 13 corresponden al Sistema Lerma.

El régimen de extracción trae como una primera consecuencia negativa la subsidencia de los terrenos de área lacustre lo que obliga a las autoridades hidráulicas a establecer baterías de pozos que exploten ya no la formación lacustre somera (acuífero semi-permeable), sino acuíferos más profundos. Estos pozos, denominados *profundos* llegan a rebasar los 400 metros.

El abatimiento del nivel piezométrico, en algunos sectores de la Cuenca, es de alrededor de 3.5 m/año; esto ha provocado una subsidencia, cuantificada en 30 cm/año, con consecuencias negativas sobre el sistema de drenaje subterráneo y superficial.

Una consecuencia no menos grave de la explotación de algunos acuíferos, es la contaminación del agua subterránea debido a las precarias condiciones higiénico-sanitarias relacionadas con procesos de rápida urbanización, en algunos sectores de la Cuenca.

El área metropolitana de la Ciudad de México, con una población en continuo crecimiento, requiere de grandes volúmenes hídricos cuyas estimaciones varían de 57 a 73 m<sup>3</sup>/s (Rodríguez, 1990).

Los acuíferos de la Cuenca del Valle de México abastecen sólo cerca del 70% de las necesidades de sus habitantes, el restante 30% proviene de sistemas hídricos externos tales como el Sistema Lerma y Cutzamala presentando notables relacionados con la complejidad administrativa del sistema y sus instalaciones. En la Tabla I se presentan los consumos hídricos relacionados con los diversos usos del agua para el Área Metropolitana, evidenciándose notables diferencias en la dotación de agua potable (Tabla II), principalmente por la inhomogeneidad existente en las fuentes de abastecimiento y distribución. El abastecimiento de la Ciudad está asegurado en un 71.5% de 366 pozos y 60 manantiales, en 5% de agua reciclada y agua superficial y el 23.5% restante de aportaciones externas a la Cuenca (Rodríguez, 1990).

#### 1.4 Riesgos geológicos

Los riesgos naturales se producen de interacciones entre los diversos ambientes naturales (litosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera) y grupos sociales y económicos.

El conocimiento y evaluación de los riesgos geológicos (sísmicos, volcánico e hidrogeológico) representa un capítulo fundamental en el ámbito de estos estudios.

Los altos costos sociales y económicos relacionados con catástrofes naturales han dado lugar a que sea necesario establecer una correcta evaluación de los riesgos potenciales, mediante el conocimiento del medio ambiente y del grado de vulnerabilidad del sistema natural.

En los últimos años algunos organismos internacionales (UNDRO, UNESCO) han elaborado una terminología unificada para el estudio y la administración de

ENTIDAD	SECTOR	CONSUMO (%)
Distrito Federal	Doméstico	57
	Industria	14
	Servicios	11
	Comercio	3
	Uso Público y	
	Perdidas en Sistema	15
Municipios metropolitanos	Doméstico	80
	Industria	15
	Comercio	5

Tabla I - Distribución del consumo del agua en el Área Metropolitana (de Rodríguez, 1990).

REGIONES	POBLACION (mill. hab.)	DEMANDA m <sup>3</sup> /seg	OFERTA m <sup>3</sup> /seg	DEFICIT m <sup>3</sup> /seg
<b>DISTRITO FEDERAL</b>				
1. Norte	2.2	8.15	7.14	1.01
2. Poniente	1.2	4.80	4.78	0.10
3. Centro	3.5	12.60	12.59	0.01
4. Oriente	2.0	7.15	6.05	1.10
5. Sur	1.6	6.25	6.24	0.01
<b>SUBTOTAL</b>	<b>10.5</b>	<b>38.95</b>	<b>36.80</b>	<b>2.15</b>
<b>MUNICIPIOS METROPOLITANOS</b>				
1. NIZT	2.6	11.70	8.30	3.40
2. Cuautitlán	0.5	1.60	1.60	—
3. Coacalco	0.5	1.40	1.30	0.10
4. Ecatepec	2.4	7.10	4.50	2.60
5. Nezahualcoy	2.1	5.00	3.50	1.50
6. Chalco	0.4	0.80	0.30	0.50
<b>SUBTOTAL</b>	<b>8.5</b>	<b>27.60</b>	<b>19.50</b>	<b>8.10</b>
<b>T O T A L</b>	<b>19.0</b>	<b>66.55</b>	<b>56.30</b>	<b>10.20</b>

Tabla II - Demanda y oferta de agua potable en el Área Metropolitana (de Rodríguez, 1990).

catástrofes naturales (Alexander, 1990). Así, se han hecho de uso común definiciones, como:

*Natural Hazard (H); Vulnerability (V); Specific Risk (Rs); Elements at Risk (E); Total Risk (Rt).*

El análisis de estos parámetros útiles para definir el riesgo total puede realizarse utilizando fórmulas sencillas:

$$R_t = (E) (R_s) = (E) (H \cdot V)$$

Es posible llegar a evaluar los costos-beneficios relacionados con el uso de áreas sujetas a riesgo. El buen conocimiento del medio, obtenido con estudios específicos, constituye la premisa fundamental para evaluar el riesgo geológico.

El régimen sismotectónico del centro de México está condicionado al proceso de subducción de la Placa de Cocos bajo la margen oriental de la Placa Norteamericana (Fig. 2).

Dewey y Suárez (1988), han evidenciado las principales zonas sismogénicas de la región centro meridional de México, subdividiéndolas en tres grupos:

Zona sismogénica arriba de la placa en subducción: los mecanismos focales indican esfuerzos mayores, con orientación NE-SW (compresionales) y NW-SE (tensionales), que corresponden a terremotos superficiales.

Zona sismogénica en la interfase de la placa en subducción y el continente. Los mecanismos focales indican esfuerzos compresivos, orientados según la pendiente del bloque hundido. La inclinación de la placa hundida se ha estimado entre 15-20°, alcanzando una profundidad de 70-80 km, debajo del Eje Neovolcánico Transmexicano.

Zona sismogénica en el interior de la placa en subducción. Los mecanismos focales indican esfuerzos de tensión orientados paralelamente a la inclinación del bloque subducente. Se trata de terremotos de media y alta profundidad (Fig. 3).

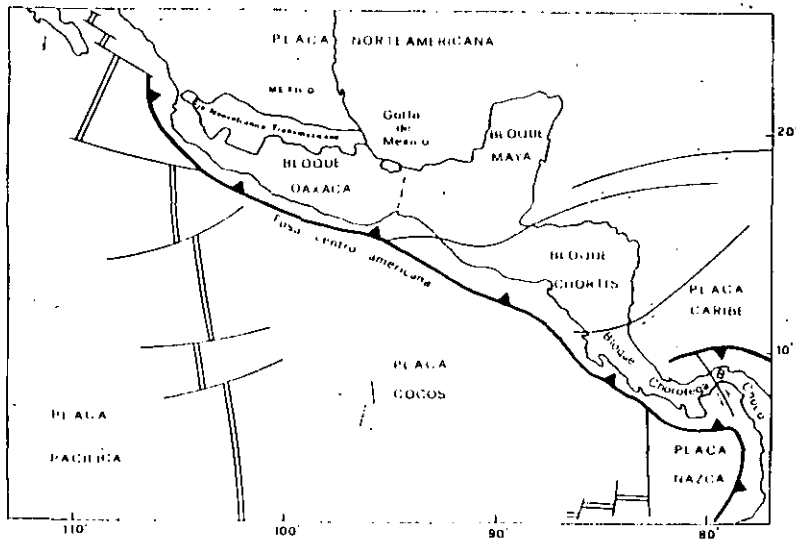
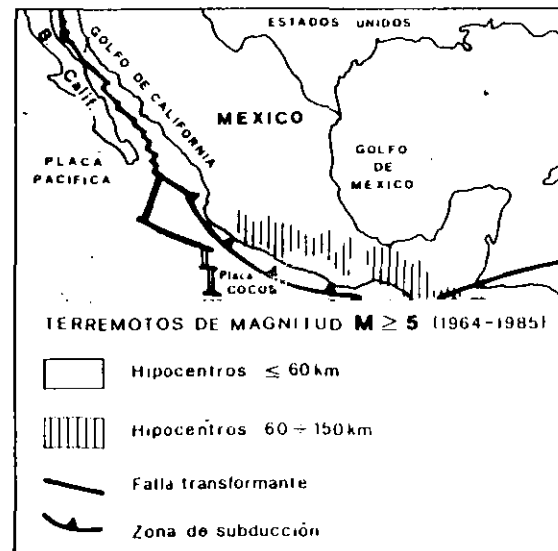


Fig. 2 - Esquema geodinámico del Istmo Centroamericano.

Fig. 3 - Esquema de la distribución de los hipocentros de los terremotos (de Dewey y Suárez, 1988, modificado).



Este esquema de conocimientos permite enfocar la problemática del riesgo sísmico en el área de estudio: la notable densidad poblacional y la presencia del enormes sectores urbanos de la Ciudad de México, unida a la alta sismicidad de la región, evidenciada por los numerosos estudios, eleva el riesgo sísmico.

Son notables los desastrosos efectos del sismo que ha golpeado la Ciudad de México, principalmente el del 19/9/85. Su magnitud fue de 8.1 (escala Richter), con epicentro localizado a 400 km al SW de la Ciudad de México, cerca de las costas del Pacífico. Este sismo cubrió una enorme área (800 000 km<sup>2</sup>) incluyendo la capital, con efectos desastrosos. En particular los efectos más graves del sismo se dieron en un área del 32 km<sup>2</sup> del D.F., donde habitan 815 000 personas. Un tercio de los edificios sufrieron daños irreparables. También fueron dañados seriamente 49 hospitales y 600 escuelas y alrededor de 5000 y 10 000 muertos, 33 000 heridos y 4 400 000 personas permanecieron privadas de agua o podían utilizar sólo agua contaminada.

Los derrumbes involucraron edificios viejos, pero también edificios nuevos. En algunos había faltado el respeto de las normas antisísmicas; pero hubo también otros que, aunque bien construidos, se desmoronaron por un efecto de amplificación debido al mal comportamiento de los sedimentos lacustres aislados que se desarrollan extensamente en el área.

Para evaluar el riesgo volcánico en el área, es necesario efectuar un estudio histórico de las manifestaciones eruptivas de los grandes volcanes andesíticos de

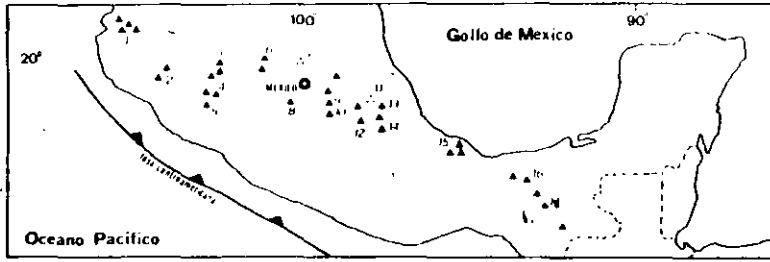


Fig. 4 - Distribución de los volcanes cuaternarios que se pueden relacionar con la Fosa Centroamericana.

*Eje Neovolcánico Transmexicano:* (1) Ceboruco; (2) Colima; (3) Cerro Grande; (4) Tancitaro; (5) Buena Vista; (6) La Cueva; (7) Hichanpán Caldera; (8) Toluca; (9) Istacchualt; (10) Popocatepetl; (11) Hornos Caldera; (12) La Malinche; (13) Cofre de Perote; (14) Orizaba. *Oaxaca-Maya block boundary;* (15) San Andrés Tuxtla. *Maya block;* (16) El Chichón; (17) Cerro San Cristóbal (de Dengo, 1985 modificado).

la Sierra Nevada, caracterizados por su notable actividad explosiva y manifestaciones a lo largo del tiempo (Fig. 4); estudios recientes pusieron en evidencia una actividad paroxística en época histórica, con carácter fuertemente destructivo (Robin, 1984).

El estudio de las antiguas secuencias de productos volcánicos, con especial atención a las fenomenologías explosivas, permitiría hipotetizar posibles escenarios de actividad volcánica futura.

Ulteriores contribuciones a la evaluación del riesgo volcánico podrían derivar del estudio y del eventual *monitoring* de la actividad fumarólica localizada en las porciones más altas de los aparatos volcánicos.

Un buen conocimiento de las manifestaciones eruptivas podría permitir reconocer las señales premonitorias, útiles para la minimización del riesgo volcánico.

Las recientes manifestaciones del Monte S. Helens (USA) en 1980, del Chichón (México), en la primavera de 1982, del Nevado del Ruiz (Colombia) de 1985, del Volcán Colima (1991), son indicativas de este tipo de actividad volcánica.

En relación al riesgo hidrogeológico en el área, la Cuenca de México está rodeada por sierras de origen volcánico, lo cual elimina la posibilidad de deslaves de terreno que pudieran presentarse debido al régimen pluviométrico. Los escurrimientos superficiales han establecido un reducido patrón de drenaje. Durante la época de lluvias, hacia el suroeste de la Cuenca de México, los caudales escurridos llegaron a provocar inundaciones de la Ciudad hasta los años '50. En la Cuenca este problema nunca ha tenido las magnitudes que se han presentado en la Cd. de México o en las colonias periféricas del Sur de la Delegación de Xochimilco. El Río de la Compañía, actualmente drenaje de las aguas negras de la ciudad de Chalco y asentamientos circunvecinos, que nace en las faldas de la Sierra Nevada y desemboca actualmente en el vaso del Lago de Texcoco, conduce caudales reducidos que no sufren incrementos notables en la época de lluvias. El azolvamiento de este canal

de desagüe provocó en las décadas de los 70's y 80's el desbordamiento del mismo afectando los asentamientos de Santa Catarina. Al inicio de los 90's se inició un programa de remoción de azolves y remodelación del curso del canal en algunas áreas críticas como el cruce del mismo con la autopista México-Puebla. Estas acciones han minimizado el riesgo de inundaciones de la creciente mancha urbana de Santa Catarina.

El fenómeno de subsidencia de la Ciudad de México es conocido desde principios de este siglo. El primer reporte con carácter técnico-científico al respecto se debe a R. Gayol en 1929. Gayol ya asocia el hundimiento de la ciudad al agua subterránea. La velocidad promedio osciló entre 4 a 7 cm/año entre 1890 y 1985, con un incremento de hasta 46 cm/año en el período 1948-1952. En algunos puntos de la Ciudad de México se han registrado 9 metros de subsidencia, especialmente en la porción más superficial de los sedimentos lacustres.



Fig. 5 - Ejemplo de fracturación reciente de los sedimentos lacustres: la fractura está orientada, grosso modo, hacia el Norte. El fenómeno parece estar relacionado con la subsidencia actual de la Cuenca (localidad Barrio Sta. Barbara en Ixtapalapa).

En un periodo de 100 años se tiene un hundimiento acumulado de 7 m y una velocidad promedio de 7 cm/año. Se conocen sitios como la Alameda Central que han reportado este hundimiento y muy pocos en donde a sido mayor. El sistema de piezómetros instalado en los 50's por Nabor Carrillo, si bien perseguía objetivos de mecánica de suelos, permite conocer con alta precisión la evolución piezométrica de los depósitos lacustres, principales agentes del fenómeno de subsidencia.

Como es bien sabido, la subsidencia se debe a la extracción de agua de los terrenos lacustres, los cuales por sus características ya no recuperan el agua que contienen. Esta idea es escasamente entendida por el grueso de la población, la cual relaciona el hundimiento con la extracción del agua del subsuelo. Con la idea de minimizar la velocidad de subsidencia, se han reubicando pozos a profundidades mayores al espesor del paquete lacustre para evitar la extracción de agua del mismo. Los llamados pozos profundos alcanzan los 400 m y se diseñan con ademe ciego los primeros 100-150 m. Aún así el régimen de extracción del acuífero profundo que subyace al acuífero semi-permeable provoca flujos verticales descendentes. Esta estrategia ha logrado reducir la subsidencia 3 mm/año.

En el Canal de Cuernavaca, al occidente de la zona de Chalco, se han medido velocidades de hasta 13 cm/año, mayores al promedio reportado para la Cuenca. Esto se debe a que aún existen pozos que se encuentran ubicados dentro del paquete lacustre. Habría que recordar que éste presenta espesores de hasta 300-400m en la parte central de la subcuenca.

Una consecuencia de la subsidencia del terreno es la aparición de fracturas en las márgenes del paquete lacustre. En la Cuenca se han detectado fracturas en dos áreas, una de "microfracturas" en Xochimilco y otra de fracturas visibles en el norte de la subcuenca (Barrio Santa Barbara en Ixtapaluca, Fig. 5). Afortunadamente, en ambos casos las fracturas están en terrenos de uso agrícola, mas sin embargo pueden llegar a presentarse en zonas urbanizadas. Esta situación permitió la promulgación de normas que prohíben, en el lugar, sacar agua del subsuelo.

## 2. MARCO GEOGRAFICO Y MORFOLOGICO DE LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO

La mayor parte del territorio mexicano está constituido por un gran altiplano de forma casi rectangular, que se alarga de noroeste a sureste por casi 2000 km, y está delimitado respectivamente por las Sierras Madre Oriental y Occidental. El término altiplano es poco adecuado; esta región es en realidad un conjunto de tierras altas interrumpidas por pequeños sistemas montañosos atravesados por depresiones a veces profundas y de cuencas generalmente endorreicas rellenas, principalmente, por antiguos y/o recientes materiales efusivos o sedimentos aluviales o lacustres.

La Cuenca del Valle de México está situada en el límite meridional de la altiplanicie mexicana, dentro del Eje Neovolcánico Transmexicano (ENT), una extraordinaria estructura volcánica de 20 a 70 kilómetros de ancho, que cruza México, desarrollada entre los paralelos 18-22 de latitud Norte, de la desembocadura del Río Grande de Santiago, en el Pacífico, hasta los Tuxtlas, en las proximidades de la costa del Golfo de México (Fig. 2). La longitud de esta faja volcánica es de cerca de 900 km cubriendo un área de casi 105 000 km<sup>2</sup> que se extiende parcial o totalmente en algunos estados de la República y el Distrito Federal. El ENT se caracteriza por un sistema de grandes fracturas ortogonales que controlan el ascenso de magma de la corteza, donde se formaron los primeros fenómenos volcánicos que rigen la formación de fosas y pilares a lo largo de toda su extensión.

Dentro de esta franja volcánica se encuentran los grandes volcánes del País y centenares de pequeños aparatos volcánicos, complejos de calderas, conos cineríticos, cráteres de explosión y maaren asociados a coladas lávicas y depósitos piroclásticos.

Tan sólo en la Cuenca del Valle de México se ubican más de 220 conos volcánicos monogenéticos de composición andesítico-basáltica.

El ENT presenta una inclinación general hacia el Oeste; la altura media es de 2300 metros, en su porción oriental, y de 1600 y 1000 m en sus porciones central y occidental, respectivamente.

Precisamente en el ENT se tienen los relieves más elevados de todo el País, elevándose entre 1500 y 3500 m sobre el nivel del valle, y son los grandes volcanes mexicanos: el Citlaltépetl (5720 m), el Popocatepetl (5540 m), el Iztaccihualt (5200 m), y La Malinche (4400 m). Entre los mayores cursos de agua que drenan esta región se pueden citar los ríos Lerma y Pánuco, cuyas cuencas hidrográficas son de las más extensas de México.

Otras características fisiográficas relevantes de esta región son las cuencas lacustres ubicadas entre los relieves montañosos; las más importantes son: las de México, Toluca, Puebla y Chapala. En algunas de ellas se encuentran todavía remanentes de antiguos lagos: Chapala, Cuicaco, Pátzcuaro y los de la Cuenca de México son algunos ejemplos.

La Cuenca del Valle de México se caracteriza por ser una cuenca endorreica,



de carácter lacustre, donde la corteza terrestre ha estado sometida a grandes esfuerzos, produciéndose un intenso fracturamiento a fases volcánicas cuaternarias que modificaron su relieve con la formación de una barrera montañosa (la Sierra de Chichinautzin) hace unos 700 000 años y culminaron con el cierre de la cuenca, desarrollándose un sistema de grandes lagos que propició el relleno de la cuenca con materiales aluviales.

Esta cuenca se encuentra ubicada a una altitud promedio de 2000 m s.n.m. Desde el punto hidrológico, el parteaguas de la Cuenca del Valle de México establece una vasta extensión, distribuida en cuatro estados de la Federación (Edo. de México, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla y Distrito Federal), de alrededor de 9600 km<sup>2</sup> (Comisión Hidráulica de Aguas del Valle de México, 1963), de los cuales más de 2400 corresponden al área urbana.

Hacia 1990 la superficie urbanizada sobrepasa el 25% de la Cuenca.

Se encuentra limitada al Sur y Este por las cabeceras del Río Balsas y al Norte y Oeste por las cuencas de Toluca y Tula. Las estribaciones más grandes de la Cuenca del Valle de México las constituyen, al Sureste, los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl y al Sur la Sierra de Chichinautzin y la Cordillera del Ajusco. A partir de ellas, están otras formaciones montañosas: por el Este, la Sierra Nevada y la de Río Frio y al Oeste la Sierra de las Cruces, que le confieren la característica de un enorme "contenedor" con sus partes bajas hacia el Norte. Las elevaciones topográficas están constituidas, en su mayor parte, por rocas volcánicas de comportamiento permeable que funcionan como zonas de recarga natural para el acuífero.

## 2.1 Características climatológicas

El clima del Valle de México es de tipo sub-tropical de altura, templado, semi-seco, sin una temporada invernal bien definida.

La temperatura media de las zonas de llanura de la Cuenca oscila entre los 15 y los 16°C. En Ciudad de México la temperatura media anual oscila alrededor de los 15°C y por causa de la contaminación atmosférica en los últimos 90 años se ha registrado un aumento de temperatura de 2°C.

La precipitación pluvial en la cuenca es diferente en cada una de sus zonas hidrológicas. En su parte Norte y Noreste se producen escasas lluvias, encontrándose que la precipitación media anual es del 700 mm (Tabla III).

La evaporación anual (900-2100 mm) sobrepasa el valor de la precipitación pluvial media anual. Sus máximos se dan en las partes altas de las sierras, del Sur, Este y Oeste, en donde su rango oscila entre 1700 e 2100 mm.

El período lluvioso comprende los meses de Mayo a Octubre, con el 80-90% de precipitación anual.

Antes del crecimiento desorbitado de la gran Metrópoli la precipitación pluvial se infiltraba en las partes altas de las sierras y a lo largo de sus laderas que actuaban como zonas de recarga o escurría hacia los grandes lagos donde se almacenaba temporalmente para después evaporarse manteniendo un ciclo hidrológico en equilibrio. En su origen natural fue una cuenca cerrada, alterada artificialmente, la que posteriormente se abrió para desalojar los crecientes volúmenes de aguas

No. de la Zona	Nombre de la zona Hidrológica	Área (Km <sup>2</sup> )	Lluvia media anual (mm)	Volumen llorado anual según Isoetas (miles metros cúbicos)
I	Xochimilco	522	891	465 102
II	Churubusco	234	1 020	230 680
III	Cd. de México	725	872	632 200
IV	Cuautitlán	972	789	766 908
V	Pachuca	2 087	520	1 085 240
VI	Teotihuacán	930	612	569 160
VII	Tecomulco	533	651	346 983
VIII	Texcoco	1 146	639	732 254
IX	Chalco	1 124	855	961 020
X	Apan	637	692	440 804
XI	Tochac	690	693	478 170
T O T A L E S		9 600	700	6 716 651

Fuente: Memorias del Drenaje Profundo

Tabla III - Precipitación media anual por zonas hidrológicas en la Cuenca del Valle de México.

residuales. Primeramente se construyó el Canal del Tajo de Nochistongo, le siguieron el Túnel de Tequiquiac, el Canal del Desagüe y el Sistema del Drenaje Profundo, cuyas descargas son aprovechadas, parcialmente, para riego en los estados de México e Hidalgo. El Río Moctezuma sirve de drenaje natural hacia la Cuenca del Panuco en el Golfo de México. Se encuentra en construcción una enorme presa en el Estado de Hidalgo que aprovechará estos volúmenes de aguas negras para la generación de energía eléctrica.

El ciclo hidrológico se ha visto alterado por la desecación de los lagos, la excesiva explotación de los acuíferos y su contaminación antropogena. La tala inmoderada y el crecimiento irracional de la mancha urbana, entre otros problemas, han alterado de manera considerable el régimen natural de recarga.

## 2.2 Subdivisión hidrográfica de la Cuenca del Valle de México

El sistema hidrográfico del Valle de México, y principalmente la zona donde se encuentra ubicada la Ciudad de México, ha sido modificado, en el transcurso de los últimos siglos, de manera irreversible.

En efecto, el actual sistema hidrográfico superficial se debe a las diversas y numerosas obras hidráulicas realizadas por el desecamiento de los diversos lagos que existían en el Valle de México. Muchos de los cursos de agua, que actualmente escurren hacia el Valle, sufrieron drásticas desviaciones con la intención de evitar las continuas inundaciones que sufría la Ciudad. Muchas de estas obras, han servido también para descargar aguas residuales de origen doméstico e industrial de la Ciudad.

Entre los principales ríos podemos mencionar: el Río Churubusco, Magdalena, de los Remedios y el Río Hondo, entre otros.

En los lagos existentes (Texcoco, Xochimilco y Zumpango) se están realizando procesos de rehabilitación. El Lago de Texcoco, en sólo 15 años, ha visto restablecer su equilibrio ecológico debido a las numerosas obras realizadas y al tratamiento de aguas contaminadas.

Recientemente se ha comenzado la recuperación ecológica del Lago de Xochimilco (Rescate Ecológico de Xochimilco).

### 2.3 Distribución y recursos hídricos superficiales de las subcuencas hidrográficas del Valle de México.

En la Cuenca del Valle de México existen 11 zonas hidrológicas, que caracterizan otras tantas subcuencas dentro del sistema hidrográfico existente (Fig. 6).

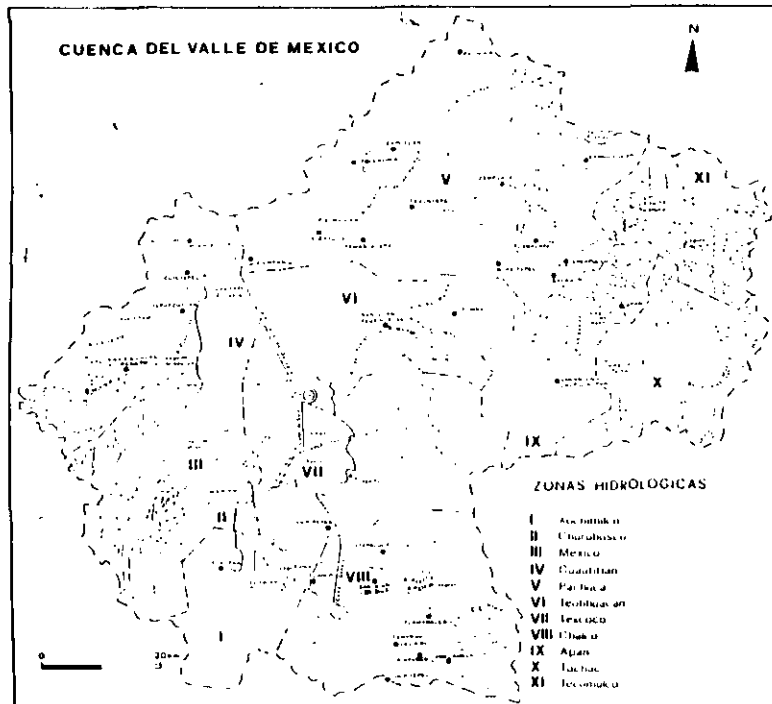


Fig. 6 - Subdivisión hidrográfica de la Cuenca del Valle de México (de Rodríguez, 1990, modificado).

#### Zona I (Xochimilco)

Caracteriza los sectores suroccidentales de la Cuenca, pertenecientes a la Sierra de Chichinautzin donde se tienen las máximas lluvias de toda la región.

#### Zona II (Churubusco)

Está integrada con el sistema hidrográfico del Río Churubusco, en la parte suroccidental del área urbana de la Ciudad de México, recogiendo los aportes de los ríos Eslava y Magdalena.

#### Zona III (Ciudad de México)

Es drenada por el sistema hidrográfico que cubre la mayor parte de la zona urbana de la Ciudad de México.

#### Zona IV (Cuautitlán)

Encierra las subcuencas de los ríos Tepetzotlán y Cuautitlán. Este último, importante por el volumen de agua que contiene.

#### Zona V (Pachuca)

Comprende las cuencas hidrográficas del Río de las Avenidas de Pachuca y otros cursos menores.

#### Zona VI (Teotihuacán)

Esta zona corresponde a la cuenca hidrográfica del Río San Juan Teotihuacán.

#### Zona VII (Texcoco)

Encierra el área perteneciente al Lago de Texcoco y todas las cuencas orientales tributarias directas de éste.

#### Zona VIII (Chalco)

Corresponde al área más meridional de toda la Cuenca del Valle de México y constituye una de las zonas más importantes, respecto al volumen de reservas hídricas subterráneas y por ser estratégica para el abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México.

#### Zona IX (Apan), Zona X (Tochac), Zona XI (Tecomulco)

Estas zonas originalmente no formaban parte de la Cuenca del Valle de México, pero pasaron a formar parte de ella después de la realización de las diversas obras de ingeniería hidráulica efectuadas en el curso del último siglo.

La Tabla IV, reporta los valores medios de los recursos hídricos superficiales de las once zonas hidrológicas y cursos relativos de agua. Los valores totales anuales estimados del recurso hídrico superficial de todo el Valle de México, son iguales a  $413\ 188 \times 10^3 \text{ m}^3$ , mientras que el volumen efectivo de agua superficial es de  $400\ 591 \times 10^3 \text{ m}^3$ . Las zonas más ricas en recursos hídricos superficiales son las occidentales: la III (Cd. de México), la IV (Cuautitlán), la VII (Tecomulco) y la II (Churubusco), mientras que las más pobres, son las más meridionales, es decir la I (Xochimilco) y las zonas septentrionales V (Pachuca) y VI (Teotihuacán).

### 2.4 Sistema hidrográfico que comprende la Ciudad de México

La Ciudad de México recibe el aporte de numerosos cursos de agua que en el período de lluvias contribuyen a la recarga de los acuíferos presentes en el subsuelo. La metrópoli constituye un aparato receptor de gran número de cursos de agua,

ZONAS HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO	VOLUMEN MEDIDO O ESTIMADO	VOL. DE AGUAS SUPERFICIALES EXCLUSIVAMENTE
	miles de m <sup>3</sup>	
I - XOCHIMILCO	1 212	1212
II - CHURUBUSCO	32 964	32 853
III - MÉXICO	142 055	140 793
IV - CUAUTITLÁN	127 389	116 215
V - PACHUCA		514
VI - TEOTIHUACÁN	6 078	4 609
VII - TEXCOCO	33 685	36 802
VIII - CHALCO	19 419	19 408
IX - APAN	13 821	13 821
X - TOCHAC	22 902	22 618
XI - TECOMULCO	12 471	11 746
<b>TOTAL DEL VALLE</b>	<b>413 188</b>	<b>400 591</b>

Tabla IV - Recursos hídricos superficiales de las zonas hidrológicas de la Cuenca del Valle de México (de Rodríguez, 1990, modificado).

sobre todo de aquellos que se encuentran en la Sierra de Chichinautzin, al suroeste y al poniente de la Ciudad. En las estribaciones septentrionales el sistema hidrográfico es más reducido, debido al bajo aporte meteórico en estas zonas.

En general, se puede afirmar que la red hidrográfica que comprende la planicie lacustre donde surge la Ciudad de México ha sido entubada y no contribuye al proceso de recarga.

El área que ocupa la Ciudad de México está dividida en 4 zonas hidrológicas:

- la zona occidental limitada por los ríos Eslava y Magdalena al Sur y por el Río Tepozotlán al Norte,
- la zona meridional, del Río San Buenaventura al Río Ameca,
- la zona oriental, del Río de la Compañía al Río San Juan Teotihuacán,
- la zona norte y noreste, donde el único curso de agua por considerar es el Río las Avenidas de Pachuca.

Los fenómenos de subsidencia que comprenden la Planicie de México han requerido establecer barreras masivas en los cursos de agua que la drenan y luego, visto también el enorme desarrollo urbano de la metrópoli, la entubación de los mismos. En tales condiciones se encuentran cursos principales como: el Río Churubusco, que recibe aportes de cursos menores, del Río Eslava y Magdalena, al Río Mixcoac; el Río de la Piedad, donde se unen los cursos de agua Becerra y Tacubaya; el Río Consulado, que recoge las aguas de cursos menores que van de Dolores a Tornillo y el Río de los Remedios, cuya cuenca se extiende del Río Hondo, al Sur, al Río San Javier, al Norte.

En la zona de la planicie, más baja morfológicamente, y urbanizada completamente, los cursos de agua se encuentran enlazados a los colectores pluviales de la ciudad o a los afluentes de los ríos que descargan en el Lago de Texcoco o en el Gran Canal.

También se ha desarrollado un sistema de intersección, que consiste en una serie de presas, con la finalidad de regular la descarga de cursos de agua, menores, en otros cuerpos receptores (lagos de Texcoco y Zumpango, canales o cursos de agua mayores) o fuera de la Cuenca (Rodríguez, 1990).

Actualmente todo el sistema de represas está afectado por graves problemas causados sobre todo por obstrucciones, por lo cual es necesario un continuo mantenimiento del sistema.

## 2.5 Etapas evolutivas de los lagos de la Cuenca del Valle de México

Durante el Pleistoceno superior, en el periodo del cierre del Valle de México, las aguas superficiales, no encontrando desagüe hacia el exterior, es decir hacia los sectores meridionales del Valle, crearon una serie de lagos entre los cuales podemos mencionar el de México, en la parte central, el de Zumpango, al Norte, el de Texcoco al Este y al Sur los de Xochimilco y Chalco, que formaban en aquel periodo, un solo lago (Fig. 7).

En el periodo azteca, durante la estación de lluvia el nivel hídrico de los lagos se elevaba, formando un gran lago con una extensión estimada de casi 2000 km<sup>2</sup> y profundidad variable entre los 15 y 20 metros, en sus partes más profundas. En esta extensa superficie de agua, se elevaban como islas la antigua Tenochtitlán y Tlatelolco.

En la época colonial, se inician las labores de desecamiento de algunas de las zonas lacustres antes citadas. Los remanentes actuales de los antiguos lagos son tres: Zumpango, Texcoco y Xochimilco, éste último constituido simplemente por estrechos canales que reciben los aportes de los ríos San Juan de Dios y Buenaventura (Fig. 8).

## 2.6 Crónica de las principales obras hidráulicas en la Cuenca del Valle de México

A partir del siglo 17, se inician las labores de desecamiento del Lago de México (1607) en un intento por evitar los daños ocasionados en la Ciudad por las continuas inundaciones. El proyecto inicial, previa la desviación del Río Cuautitlán principal responsable del aumento del nivel de las aguas del lago. La obra de desviación hidráulica alcanzó la longitud de 6600 m y una sección de 10.5 m<sup>2</sup>, pero ello no fue considerado suficiente para evitar el peligro de inundaciones, sobre todo a causa de los daños que sufrieron las obras posteriormente (Chávez, 1956).

Las decisiones definitivas, para limitar los daños después de la grave inundación en 1622, fueron tomadas en 1629. Fue construida la presa El Rey, que controlaría el Río de las Avenidas de Pachuca; al mismo tiempo, se prosigue el desecamiento de Huehuetoca y se repara la trinchera que intersectaba el Río Cuautitlán.

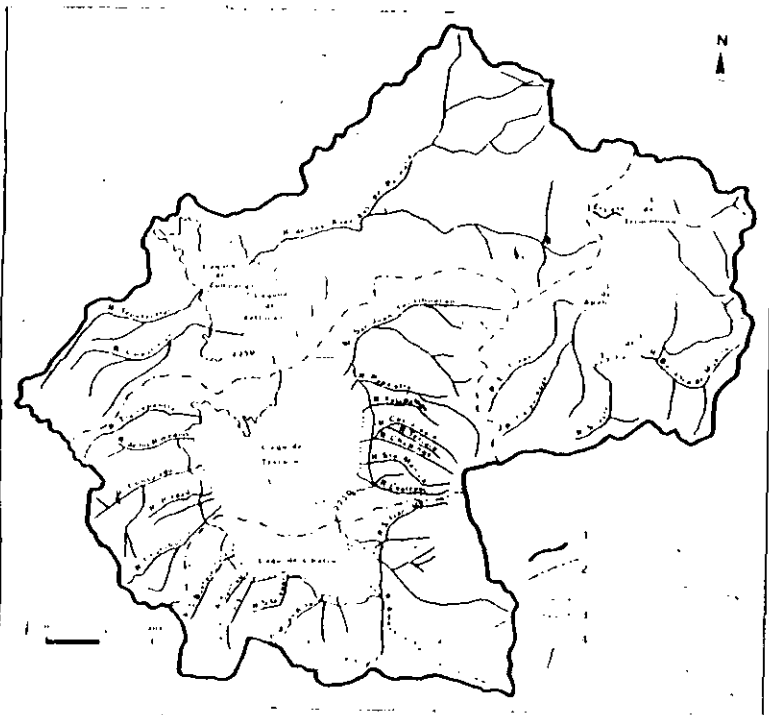


Fig. 7 - Sistema hidrográfico hipotético de la Cuenca del Valle de México en el Pleistoceno superior (Oloceno). 1) Límite topográfico de la Cuenca; 2) límite de las subcuencas; 3) límite hipotético de los lagos pleistocénicos; 4) Cursos de aguas mayores (de Lorenzo y Mirambel, 1986, modificado).

Hacia la mitad de aquel año las labores realizadas bloquearon la descarga del Río Cuautitlán cuyas aguas se distribuyeron en los lagos de Zumpango, San Cristóbal y México inundando la Ciudad. Se pensó entonces en la idea de cambiar de lugar la Ciudad, mientras una comisión de expertos decidía continuar las obras hidráulicas en la Cuenca (Chávez, 1956).

#### Obras en el siglo XVIII

En este siglo, existieron numerosas inundaciones, algunas memorables, como las de 1707 y 1714. Con respecto a tales acontecimientos y debido a los efectos de un terremoto, que destruyó muchas obras hidráulicas ya realizadas, se pensó entonces en establecer las soluciones definitivas al problema global de la Cuenca del Valle de México. En 1747, se iniciaron diversas obras que consistieron en la construcción de calles, puentes y el reforzamiento de la estructura de la presa y la recons-

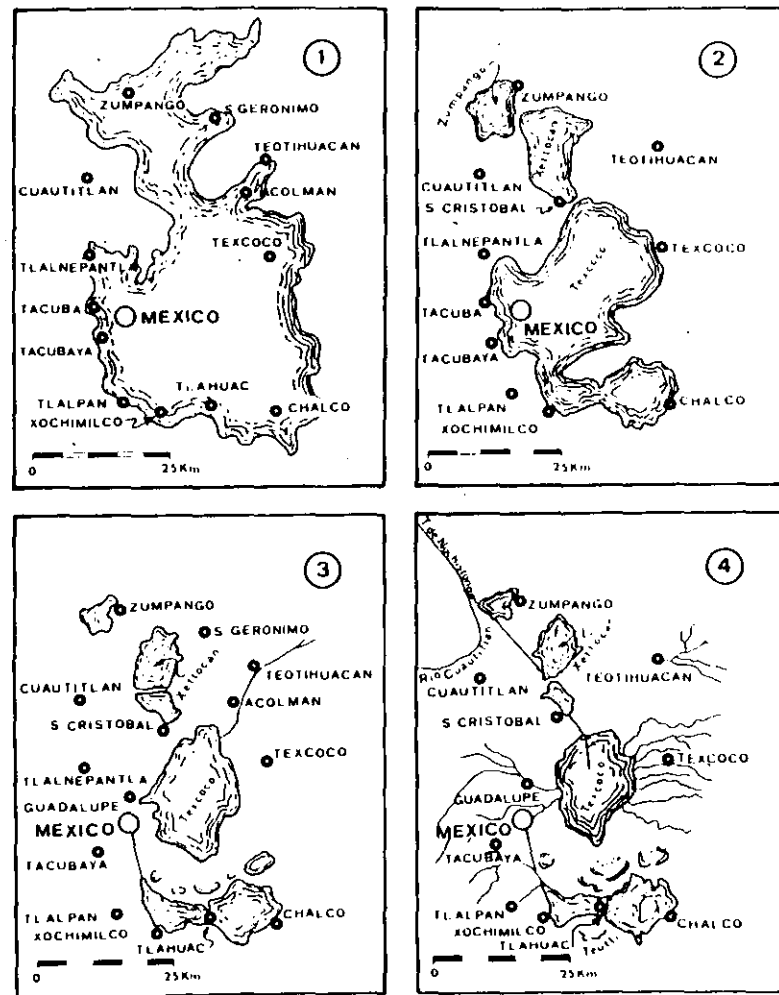


Fig. 8 - Evolución de los lagos en la Cuenca del Valle de México. (1) Los límites aproximados durante la época diluvial; (2) a comienzos del siglo XVI; (3) a comienzos del siglo XIX; (4) en el año 1889 (de Schilling, 1938, modificado).

trucción de drenajes. En 1767, se continuaron las labores del Tajo de Nochistongo y el desecamiento general de la Cuenca (Chávez, 1956).

Obras a finales del siglo XIX

#### 1) La obra de Tequixquiac

Después de tres siglos de iniciativas, en 1884 se empieza, la etapa final de los trabajos realizados en la Cuenca del Valle de México. El Túnel de Tequixquiac, una de las obras finales realizadas, semejante al Tajo de Nochistongo, debería trasladar las aguas del Lago de Chalco y Xochimilco a las atarjeas de la Ciudad de México, comunicando así dichos lagos con el Tajo de Nochistongo. Así, se completa la conexión hidráulica de Chalco a la vertiente del Golfo de México, por el Río Panuco, al cual el Tajo de Nochistongo envía aguas de la Cuenca del Valle de México.

#### 2) El gran Canal del Desagüe

Esta obra general de beneficio se realizó entre 1883 y 1895. Sin embargo grandes problemas técnicos surgieron a causa de los daños generados, sobre todo en la zona donde el Canal se unía al Túnel de Tequixquiac.

#### Realizaciones del siglo XX

El Túnel de Tequixquiac comenzó a adquirir inestabilidad en 1930, razón por la cual en 1937 se inicia la segunda excavación de otro túnel inaugurado en 1948. Seis meses después, el Túnel presentaba graves daños.

Las obras realizadas en la primera mitad del siglo 20 fueron:

— la remodelación de dos túneles en Tequixquiac;

— reforzamiento de los muros que limitaban el Lago de Texcoco.

La obra hidráulica más importante realizada en la mitad del siglo es la del Drenaje Profundo, que consiste de dos canales subterráneos que fueron puestos en funcionamiento, en 1982.

### 3. MARCO GEOLOGICO REGIONAL DEL VALLE DE MEXICO

La región centro-meridional de México representa una zona de notable interés geológico, porque deriva de fenómenos cinemáticos relacionados con la evolución de la litosfera. Actualmente, constituye el extremo suroccidental de la Placa Norteamericana, en contacto con las placas Pacífica, de Rivera y Cocos, a lo largo de la Fosa mesoamericana de Acapulco y con la Placa del Caribe, a lo largo del sistema transformante de Motagua. La corteza de tipo continental, con espesores variables de 25 a 40 km, formada ya en el Paleozoico mediante procesos de acreción en sus márgenes con formaciones de un sistema de cordilleras.

Arriba del *slab* oceánico pacífico en obducción hacia el NE son identificables al menos tres elementos principales de la actual placa deformada norteamericana en la región de estudio (Fig. 9).

a) Terrenos de acreción, principalmente constituidos de rocas volcánicas y plutónicas de composición química preferentemente andesítica. Estas comprenden secuencias magmáticas de arco que van del Mesozoico inferior al Cenozoico medio. En particular es posible distinguir entre los terrenos mesozoicos (especialmente jurásicos y cretáceos) que afloran en la Sierra Madre del Sur y los encimeros cenozoicos (desde el Eoceno hasta el Mioceno), que abundan en la Sierra Madre Occidental.

Los primeros son generalmente deformados y probablemente estructurados en *wedges* sobrepuestos; aquí se señalan secuencias con supuestas características de retroarco, mientras parece que no se describen unidades de tipo *melanges* ofiolíticas californianas y equivalentes a las de Baja California (Cedros, Vizcaíno).

El principal sistema de deformación frágil, comprende fallas con dirección WNW-ESE a NW-SE en parte unidas con los sistemas transformantes del Golfo de California.

b) Terrenos meso-cenozoicos de las "márgenes continentales". Están constituidos principalmente de secuencias sedimentarias (carbonatadas y terrígenas), depositadas en una serie de plataformas y cuencas. Afloran en lugares sobre el antiguo basamento, en la Sierra Madre Oriental y en la Sierra Madre de Chiapas, hasta la Península de Yucatán. La deformación compresiva de las márgenes continentales actúa a partir de la tectonogénesis Laramide (Sierra Madre Oriental) hasta el Mioceno superior (Peten Folded Belt) que se ha realizado en la formación de una serie de *flakes* hacia Yucatán.

La "soldadura" entre los terrenos incrementados y los que están en el margen continental se encuentra principalmente sepultada por debajo de las volcánicas cenozoicas y cuaternarias y, donde se la señala como aflorante, está representada por cabalgamientos con vergencia oriental de los primeros sobre los segundos (Bloque de Oaxaca).

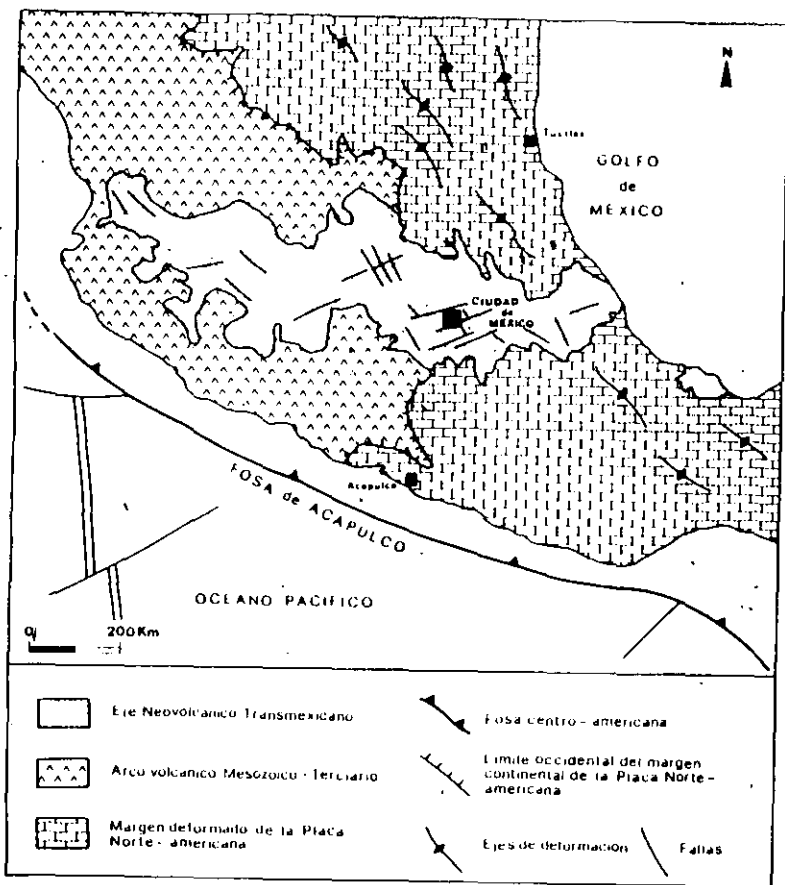


Fig. 9 - Esquema geológico de México Central (de Tandy et al., 1986, modificado).

La deformación frágil, de tipo tensional, posee una orientación media de NW-SE a N-S equivalente a los sistemas de fallas de Basin and Range de Estados Unidos.

c) "Eje Neovolcánico Transmexicano" compuesto de vulcanitas principalmente calco-alcálinas y subordinadamente alcálinas del Plio-cuaternario. Se extiende, en dirección WNW-ESE, a lo largo del paralelo 19°, por casi 1800 km, del Pacífico al Caribe con un ancho máximo de casi 180 km. Corta los ejes longitudinales del

sistema de cordilleras meso-cenozoicas y yace en "discordancia angular" donde el sustrato es plegado por las faces tectogénicas responsables de la construcción de las mismas cordilleras.

El patrón de deformación frágil es deducible también del alineamiento de numerosos aparatos y centros eruptivos y consiste en algunos sistemas principales de fallas, orientados con amplia dispersión en los cuadrantes septentrionales. El ENT posee una cierta singularidad en el marco de los arcos magnéticos cenozoico-cuaternarios del Pacífico Oriental: esta se encuentra en los desarrollos transversales respecto a las cordilleras subyacentes y oblicuo respecto a la Fosa de Acapulco probablemente relacionada con una variación en la dirección de subducción de la Placa oceánica de Cocos, debajo de la misma Fosa de Acapulco.

La subducción activa de la Placa de Cocos del Pacífico bajo la Placa Norteamericana a lo largo de la Fosa de Acapulco sigue un vector de movimiento orientado al NW con una velocidad hipotizada de unos 6 cm/a, y ha sido bastante bien dibujada por la imponente sismicidad presente en el borde continental. Se considera, que la Placa de Cocos se hunde con una pendiente de 15°-20° aproximadamente llegando a la profundidad de 75-80 km bajo el límite meridional del Eje Neovolcánico Transmexicano. La ubicación de hipocentros de sismos superficiales, ciertamente más numerosos, presenta una distribución casi paralelo a la Fosa mesoamericana de Acapulco, interceptando una faja de varios centenares de km, en el interior de México.

La distribución de hipocentros, con profundidad hasta de 150 km, tiende a hacerse paralela al Eje Neovolcánico Transmexicano. En general, se trata de eventos sísmicos con magnitud elevada (5) que algunas veces alcanzan valores superiores a 7 (Fig. 3).

Las principales zonas sismogénicas pueden ubicarse en la interfase entre la placa descendente y aquella en obducción o en el interior de esta última para sismos más superficiales, o aún más, en el interior de la placa en subducción (Dewey y Suarez, 1988). Para el primer caso los mecanismos focales presentan liberación de energía elástica a lo largo de fallas inversas o sobre corrimientos con ejes de esfuerzos compresivos máximos orientados paralelamente a la dirección de subducción. Los sismos más superficiales comprenden la mayor parte de aquellos ubicados bajo el Eje Neovolcánico Transmexicano, presentándose mecanismos tanto compresivos (con ejes principales orientados NE-SW) como tensionales (con esfuerzos máximos orientados NW-SE). Los sismos más profundos, cuyos hipocentros se encuentran en el interior de la placa en subducción, presentan mecanismos focales distensivos con ejes de esfuerzo tensional máximo orientado paralelamente a la inclinación del bloque descendente.

El Valle de México ocupa el área centro-meridional de la mitad oriental del Eje Neovolcánico Transmexicano. En este último, se encuentran presentes aparatos volcánicos con altura superior a los 5000 m (Pico de Orizaba, 5675 m, Citlaltépetl, 5720 m, Popocatepetl, 5450 m, e Iztaccihuatl 5200 m).

Los altiplanos tienen un elevación media de 2300 m en la porción oriental, 1600 m en la porción central y cerca de 1000 m al occidente.

El Eje Neovolcánico Transmexicano presenta numerosos estratovolcanes poligénéticos, volcanes monogénéticos, conos cónicos, complejos de calderas y crá-

terres de explosión, con lavas y productos piroclásticos.

Las unidades magmáticas plio-cuaternarias del ENT están constituidas por balsaltos, andesitas, dacitas y riolitas que se apoyan, generalmente, sobre un sustrato constituido por una unidad magmática cenozoica compuesta de lavas riolíticas, andesíticas, dacíticas y coberturas ignimbriticas.

El análisis efectuado sobre lineamientos estructurales conduce a esperar una distribución acumulativa de fracturas de tensión que prevé una serie de picos principales de orientación: NE-SW, NW-SE, N-S (De Cserna et al., 1988).

Desde el punto de vista morfotectónico, se pueden identificar tres regiones principales (occidental, central y oriental), en las cuales se puede manifestar el predominio de un sistema, estructural respecto a otro. Las direcciones principales mencionadas pueden más o menos reconducir a la convergencia de la Placa de Cocos y Norteamericana, o también a las estructuras tensionales del Basin and Range de los Estados Unidos.

El Valle de México tiene un desarrollo de un centenar de kilómetros en dirección NNE-SSW y una treintena de ancho. Está limitando, al Norte por la Sierra de Pachuca, al oriente por la Sierra del Río Frio y de la Sierra Nevada, al Sur por la Sierra de Chichinautzin y al poniente por el Volcán Ajusco y la Sierra de las Cruces.

La Cuenca de México es una cuenca endorreica desecada artificial que se formó como resultado de la obstrucción del antiguo Valle de México por actividad volcánica cuaternaria (andesítico-basáltica) que edificó la Sierra de Chichinautzin, al Sur de la Ciudad de México.

Análisis estratigráficos estructurales y petroquímicos han permitido reconstruir del Cretácico la secuencia de terrenos que constituyen la entabladura del Valle de México (De Cserna et al., 1988). Los sondeos, que han alcanzado el sustrato sedimentario perteneciente a las secuencias de la Sierra Madre Oriental donde éstas afloran extensamente, han identificado de abajo: anhidritas y calizas (Cretácico inf.); formaciones Xochimilco y Morelos de Fries, 1960) a las que siguen calizas, margas y areniscas (Cretácico sup.; formaciones Cuautla y Mexcala de Fries, 1960) plegadas con un espesor máximo de 1700 m aproximadamente. En discordancia, a lo largo de una superficie erosionada, siguen, depósitos clásticos continentales rojizos con intercalaciones de coladas lávicas basálticas y brechas riolíticas (Eo-oligoceno; Grupo Balsas de Fries, 1960); el espesor se aproxima a los 600 m. Estos depósitos tienen el significado de una molasa postorogénica respecto a la fase Laramide.

Sobre las secuencias sedimentarias sobreyacen los terrenos volcánicos andesíticos y dacíticos (Oligo-mioceno) relacionados al magmatismo de arco de la Sierra Madre Occidental. Las secuencias volcánicas pertenecientes a este grupo, están constituidas de brechas, piroclastos y lavas. En las perforaciones profundas, presentan espesores variables entre 400 y 1000 m y contienen niveles de rocas clásticas aluvionales de espesor medio de 6 m, que indican la interrupción de la actividad volcánica.

Las lavas pertenecientes a este grupo son a menudo fluidas y el análisis petrográfico permite de identificar de las estructuras holocristalinas hipidiomórficas, con fenocristales de andesina, oligoclasa, cuarzo, augita, e hiperstena. En algunas perforaciones profundas (PEMEX, 1988) se han encontrado coladas lávicas de composición basáltica.

Siguen los productos relacionados a un vulcanismo de composición riolítica,

dacítica, andesítica y basáltica (Mioceno). Estos terrenos representan, en general, el sustrato volcánico sobre el cual se edificaron y se desarrollaron los complejos y aparatos volcánicos del Eje Neovolcánico Transmexicano, del Plio-cuaternario.

Las secuencias pliocénicas se inician con piroclastos andesíticos y dacíticos poco cementados que descansan sobre terrenos más antiguos, a lo largo de una superficie erosionada.

Además, a lo largo de las superficies de erosión, descansan coladas de lava con brechas volcánicas y piroclastos, de composición de andesítica a basáltica. Hacia arriba, la secuencia datada del Plioceno superior comprende depósitos piroclásticos y clásticos de tipo aluvional, acumulados en zonas hundidas (ej. Chalco), con un espesor máximo de casi 700 m, que disminuye en los bordes de las cuencas, presentando interdigitaciones entre depósitos clásticos y volcánicos.

Casi todo el vulcanismo cuaternario es de tipo monogénico y esta caracterizado por centenares de conos cineríticos y numerosos domos con coladas lávicas asociadas. La composición varía de basáltica a dacítica. A esta fase magmática son atribuidos los aparatos finales de los volcanes Iztaccihuatl y Popocatepetl como también el imponente complejo volcánico de la Sierra de Chichinautzin.

Las interrupciones del drenaje, hacia el Sur del Valle de México, son debidas a la presencia de los productos de la Sierra de Chichinautzin que modificó profundamente la morfología del Valle en los últimos 700 000 años (Vázquez y Jaimes, 1989).

La diversa morfología, adquirida por el área, favorece a las formaciones de sedimentos lacustres y depósitos clásticos, localmente cubiertos y/o interdigitados con productos volcánicos provenientes de la actividad volcánica contemporánea.

Estas secuencias de relleno, constituidas por materiales aluviales, lacustres y volcánicos varían de espesor con respecto a la paleomorfología, pero generalmente aumentan de espesor, de Norte a Sur, llegando, en la porción meridional de la Cuenca de México, a un espesor de casi 600 m.

El material lacustre está constituido esencialmente por limos, arenas y arcillas formadas en aguas tranquilas por la alteración de brechas y cenizas volcánicas.

Localmente estas arcillas contienen lentes de turba. Una descripción de los litotipos relativos al Valle de México, y relativos regroupamientos en formaciones, se debe a De Cserna et al. (1988).

El Valle de México, está integrado por un complejo sistema de deformación frágil, a veces activa, que ha sido estudiada siguiendo diferentes metodologías de diversos autores (De Cserna et al., 1988; Vázquez y Jaimes, 1989).

Se han identificado centenares de volcanes monogénicos cuaternarios, cuya distribución está relacionada con las principales orientaciones de las fracturas.

En la Cuenca del Valle de México se presentan tres campos volcánicos recientes:

- a) campo volcánico Chichinautzin, con 132 conos monogénicos
- b) campo volcánico Tezontepec, al noroeste de Teotihuacán, con 66 aparatos volcánicos
- c) campo volcánico de la porción inmediatamente al Sur de la Ciudad de México, caracterizado por la presencia de 20 conos volcánicos.

El total de los principales lineamientos tectónicos integrados en el área de estudio, con datos geológicos y gravimétricos, ha sido continuado a través de la

interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas.

En la Fig. 10 se presenta, por medio de una imagen Landsat, un resumen de los principales lineamientos tectónicos resaltando el predominio de los orientados en dirección NE-SW, respecto a los de orientación NW-SE. De Cserna et al. (1988), han seleccionado 14 fallas mayores que atraviesan la Cuenca de México, y que están relacionadas con una zona de cizallamiento de desplazamiento lateral izquierdo, con orientación NE-SW. Es muy probable que la sismicidad local, especialmente la superficial, sea afectada en su mayor parte por las fallas descritas. El esquema de deformación mencionado, llamado en la literatura "Zona de cizallamiento Tenochtitlan" está conectado con el proceso de subducción oblicua de la Placa de

Cocos (en dirección N 35°-45° E) bajo la Placa Norteamericana a lo largo de la Fosa Mesoamericana (con dirección N 70° W aproximadamente).

La orientación resultante de los ejes de los esfuerzos máximos sería NE-SW para los ejes compresivos y NW-SE para los tensionales.

Esto debía llevar a la formación de una especie de *megatension gashes* orientadas paralelamente a los esfuerzos compresivos; y a lo largo de ellas se dispusieron las alineaciones efusivas más recientes como consecuencia de esfuerzos tensionales perpendiculares a dicha dirección.

De lo expuesto, como esquema regional del Valle del México, en el más amplio contexto del México centro meridional, es evidente la complejidad de la reconstrucción geológica de esta región y de su historia geodinámica y cinemática, que en el intervalo de al menos un centenar de millones de años ha producido la configuración actual a través de la evolución de una margen continental de las más interesantes del Pacífico Oriental.

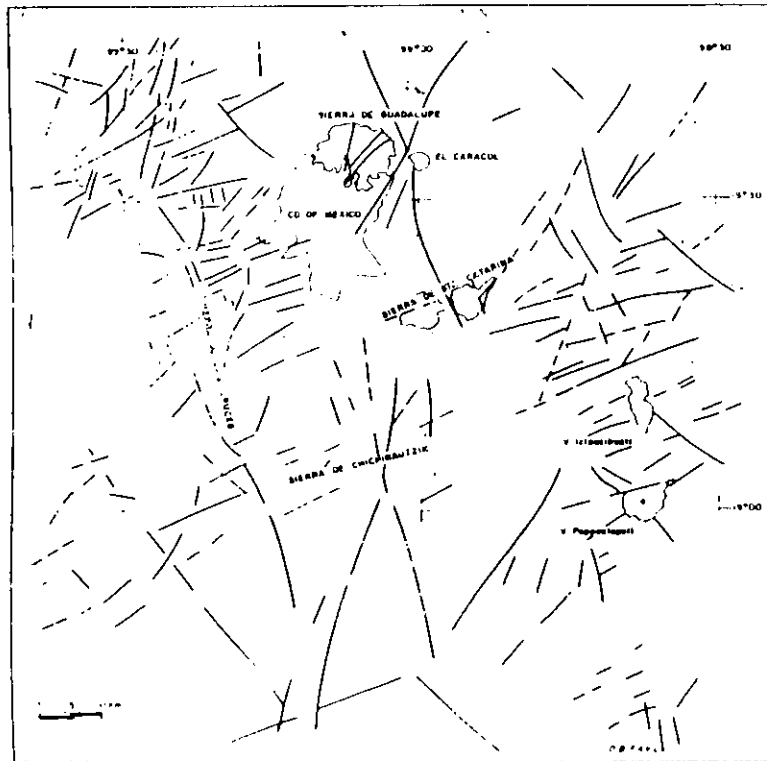


Fig. 10. Mapa de los principales lineamientos en la región circundante a la Cuenca del Valle de México (de De Cserna et al., 1987).



#### 4. CONSIDERACIONES HIDROGEOLOGICAS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MEXICO

Los estudios hidrogeológicos concernientes al Valle de México fueron desarrollados y programados antes de 1985 por diversos organismos técnicos del Departamento del Distrito Federal (DGCOH) y del Gobierno Federal (Comisión de Aguas del Valle de México CAVM), de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (SARH). Estos estudios han sido de gran importancia para el conocimiento de este importante reservorio hídrico, la estimación de los recursos hídricos y el mantenimiento óptimo de la calidad del agua para uso doméstico.

La exigencia de estos estudios realizados sobre los diversos sectores de la Cuenca del Valle de México tiene su origen en el interés hidrogeológico de esta región, que aloja a una de las ciudades más grandes del mundo y que afronta cada año graves problemas por el suministro del recurso hídrico.

Un primer estudio de detalle realizado por la DGCOH del DDF se debe a Lohnberg (1959) que presenta una investigación hidrogeológica de la Sierra de Chichinautzin, estableciendo que el sector de Xochimilco-Chalco es el más beneficiado de todos los aportes de la Sierra, que contribuye a la alimentación del 85% del este sistema acuífero.

En años posteriores, fueron llevadas a cabo otras investigaciones en varios lugares de la Cuenca. Sin embargo se presentan dificultades para interpretar correctamente la información estratigráfica y estructural generada por infinidad de obras de captación y perforaciones profundas, debido al escaso conocimiento geológico que se tenía del subsuelo. Los conocimientos han sido integrados sobre todo con prospecciones geofísicas realizadas en las bajas vertientes de las estructuras volcánicas y en la extensa llanura de origen lacustre o aluvional (Cuenca de México).

Recientemente, en 1989, se han publicado los resultados de tales investigaciones que involucran a varios sectores de la Cuenca (Número especial de la Cuenca de México: Geofísica Internacional, v. 28, 1989).

##### 4.1 Características hidrogeológicas de los terrenos y los tipos de acuíferos de la Cuenca del Valle de México.

Un análisis detallado de las características de permeabilidad de los diversos terrenos de las columnas estratigráficas establecidas en la Cuenca del Valle de México, permiten distinguir:

- terrenos que presentan permeabilidad por fisuración
- terrenos con permeabilidad baja y media
- terrenos permeables por porosidad

##### a) Terrenos permeables por fisuración

Las rocas más antiguas, que constituyen la cobertura del complejo volcánico del Valle de México, presentan en general un comportamiento de medio impermeable. Sin embargo tienen una permeabilidad importante cuando han sido fracturadas por procesos tectónicos. La presencia de frecuentes discontinuidades asociadas, en parte a fisuraciones relacionadas con fenómenos de contracción y enfriamiento y en parte a fracturación provocada por deformaciones tectónicas, ocasiona elevados valores de permeabilidad y variabilidad en relación a estas discontinuidades.

En los tipos retículos resultantes se produce una notable circulación hídrica, a veces limitada por la ausencia de fracturas en la roca lávica, muy compacta o casi privada de discontinuidades.

A estas discontinuidades están asociadas un considerable número de cavidades de dimensiones varias, formadas por las burbujas que se encontraban en el flujo lávico antes de consolidarse y que contribuyen a aumentar localmente la permeabilidad que resulta en una contribución a la porosidad intrínseca de la lava. Un papel importante juegan los productos de escoria, cuya alta porosidad se traduce en elevada permeabilidad. En estos casos los poros están representados por huecos de grandes dimensiones presentes entre elementos de forma irregular con porosidad intrínseca no indiferente y caóticamente acumulados en el curso de los movimientos de los derrames. En general los terrenos volcánicos que presentan lavas y escoria, están estrechamente asociados con un tipo de permeabilidad "grande", especialmente si se presentan fisuras de dimensiones notables.

En el Valle de México, principalmente, las coladas lávicas de composición andesítica constituyen el medio impermeable a profundidad que limita a varios cientos de metros, la circulación del flujo subterráneo.

Por el contrario, las formaciones de composición riolítica, desarrolladas principalmente en la parte meridional de la Cuenca, forman acuíferos con notables espesores que presentan permeabilidad moderada, debido al escaso fracturamiento. Derrames basálticos más recientes con textura burbujosa y con fracturas que muestran fenómenos de *weathering* constituyen acuíferos de alta permeabilidad debida en parte a su porosidad, aunque, por sus condiciones físicas, a menudo se presentan con comportamientos de acuíferos semi-permeables.

Por la gran extensión que abarca, el comportamiento del terreno volcánico puede considerarse medianamente homogéneo según el concepto de la composición estadística de zonas más a menos permeables.

De ello se sigue la posibilidad de considerar, para esos terrenos, un valor medio de permeabilidad.

Los datos existentes concernientes a valores de permeabilidad de las diferentes rocas volcánicas son insuficientes, por lo que sólo es posible definir cualitativamente el grado de permeabilidad utilizando simplemente el criterio del comportamiento hidrogeológico relativo al tipo de variación litológica.

Aprovechando cuatro pruebas de bombeo de larga duración, realizadas en algunos pozos ubicados en la Cuenca, han sido determinados algunos coeficientes de transmisibilidad relacionados con acuíferos de la Sierra de Chichinautzin. Estos coeficientes van de un valor de 2.9 a  $393.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  (Tabla V). La prueba re-

APROVECHAMIENTO No.	VALOR DE LA TRANSMISIBILIDAD MEDIANA $10^{-2} m^2/s$
119	35.1
203 IZTAPALAPA 8	36.4
S.C. 1	125.6
S.C. 7	58.6
TUL 4	NO INTERPRETABLE
S.T. 14	393.1
NORIA 6	112.4
PER 9	59.4
38	2.9

Tabla V - Valores de transmisibilidad media por acuíferos volcánicos de la Sierra del Chichinautzin (de DGCOT del DDF, 1987).

lativa al pozo Tulychualco 4, resultó no interpretable debido a la presencia de formaciones volcánicas fracturadas de alta permeabilidad.

Con el fin de completar el esquema del terreno permeable por fisuración, hay que recordar que los terrenos eruptivos asociados con depósitos de origen fluvial y lacustre en la extensa Planicie de México, se encuentran bajo la forma de masas lávicas y de productos efusivos. Sus relaciones con los terrenos menos permeables de dichos depósitos les quita interés hidrogeológico, pues no tienen la posibilidad de ser alimentados sino por infiltraciones directas limitadas a la reducida área de afloramiento. En otras situaciones pueden favorecer la formación de acuíferos locales en las rocas huésped.

#### b) Terrenos de permeabilidad baja y media

Características permeables presentan las tobas, brechas, formaciones volcánicas y los diversos productos piroclásticos intercalados entre los complejos lávicos andesítico-basáltico superior, y andesítico-riolítico inferior, que constituyen la cobertura de los numerosos aparatos volcánicos que se encuentran en la Cuenca del Valle de México. Esta secuencia volcánico-clásica, establece en forma global un comportamiento de medio semi-permeable que a escala regional almacena y transmite grandes volúmenes hídricos hacia los acuíferos adyacentes.

Las características hidrogeológicas de los piroclastos están controladas por las dimensiones de los granos, su fracturamiento y del grado de compactación. Los materiales granulares de grano fino (cenizas, lapilli, etc.) presentan una alta porosidad, aunque su permeabilidad es baja (Fig. 11).

Las tobas de grano fino a veces se presentan arcillificadas a causa de su profunda alteración.

En la base de las estructuras volcánicas se localizan depósitos piroclásticos de granulometría prevalentemente gruesa, no cementados, menos porosos pero más



Fig. 11 - Particular de los depósitos piroclásticos, constituido por tobas de granulometría variable, discretamente cementadas. Volcán La Caldera.

permeables que los que se encuentran en cotas más elevadas. Constituyen acuíferos de buena permeabilidad, bajo el nivel piezométrico regional. La posición de estos depósitos, a veces en las honduras pero sobre todo en las partes altas de las estructuras volcánicas, determina en el subsuelo de las vastas llanuras lacustres y aluviales, la existencia de distintas napas hídricas que conservan su individualidad mientras no intervengan factores tectónicos que interrumpan la continuidad del horizonte poco permeable.

#### c) Terrenos permeables por porosidad

En la parte central y meridional de la Cuenca, los acuíferos volcánicos están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales de baja permeabilidad. Con estas características hidrogeológicas, los acuíferos son confinados o semiconfinados y presentan bajos coeficientes de almacenamiento. Los depósitos lacustres y fluviales de baja permeabilidad pueden constituir acuíferos semi-permeables que presentan en ocasiones espesores de cientos de metros y que, regionalmente, presentan grandes volúmenes hídricos.

Materiales aluviales no consolidados, como arenas, gravas, limos y arcillas interestratificadas afloran en muchos lugares cortando el relieve volcánico de la Cuenca formando niveles hídricos superficiales del subsuelo. Los valores de permeabilidad y transmisibilidad varían de acuerdo con su granulometría y espesor. El coeficiente de transmisibilidad de los acuíferos aluviales varía de  $5 \times 10^{-3}$  a  $5 \times 10^{-2} m^2/s$  (Chávez, 1988).

De lo expuesto anteriormente, respecto a la permeabilidad del terreno en la Cuenca del Valle de México resulta que el principal medio acuífero es representado por el conjunto de formaciones volcánicas, antiguas y recientes. Si en las estructuras volcánicas están presentes horizontes de materiales piroclásticos de baja permeabilidad, es posible que se verifiquen las condiciones favorables para la presencia de napas hidricas separadas, aunque con áreas de alimentación comunes, que se colocan en las cotas más elevadas de los relieves volcánicos.

#### 4.2 Identificación geológica e hidrodinámica del sistema acuífero de la Cuenca del Valle de México

Las características hidrogeológicas descritas y la estructura geológica controlan en diversos grados los procesos hidrodinámicos que se verifican en los sistemas hidrogeológicos (recarga de napas hidricas subterráneas, circulación del flujo subterráneo y descarga del acuífero).

En la Cuenca, las rocas con alta capacidad de infiltración son representativas de rocas volcánicas fracturadas y piroclastos de grano medio a grueso, los cuales afloran en gran número constituyendo excelentes áreas de alimentación. Igualmente favorables a la infiltración son los depósitos aluviales de grano grueso presentes a lo largo de los numerosos valles que intersecan las estructuras volcánicas.

En el Valle de México la constitución geológica, típica de los terrenos volcánicos, ha producido varias estructuras hidrogeológicas.

##### 1. Estructura hidrogeológica con acuíferos de napa libre suspendida

Frecuentemente, en áreas montañosas elevadas las rocas fracturadas y alteradas cubren formaciones poco permeables estableciendo acuíferos suspendidos, independientes del sistema hidrogeológico regional. Los sistemas volcánicos fracturados recientes, predominantemente piroclastos y lavas poco permeables, constituyen la secuencia hidrogeológica que da origen a estos acuíferos (Fig. 12). El volu-

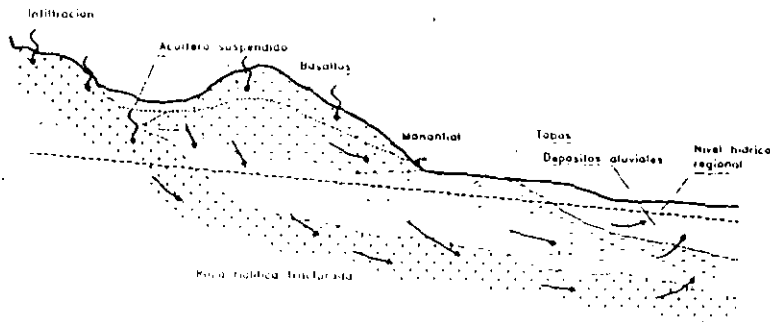


Fig. 12 - Estructura hidrogeológica con acuíferos de napa libre suspendida (de Chávez, 1988, modificado).

men hídrico almacenado, atribuye a éstos un carácter permanente o transitorio.

Estos acuíferos, a veces pueden alimentar manantiales que se localizan en los flancos del relieve o sobre paredes de incisiones profundas. Algunos otros se forman en valles inermontañosos donde los depósitos fluviales forman acuíferos poco extendidos pero potentes recargadores de los flujos superficiales.

##### 2. Estructura hidrogeológica con acuíferos intercomunicados de napa libre extendida

Los pozos profundos desarrollados sobre aparatos volcánicos de la Cuenca a lo largo de los valles han alcanzado los acuíferos volcánicos que probablemente presentan un nivel hídrico regional.

Esto confirmaría la existencia de sistemas de flujo hídrico que interconectarían los diversos relieves montañosos y los valles adyacentes (Fig. 13). Las profun-

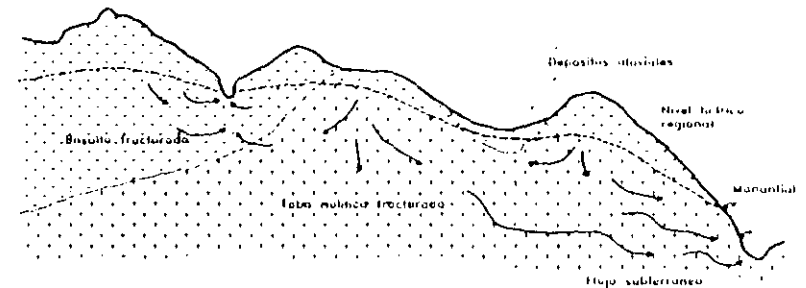


Fig. 13 - Estructura hidrogeológica de diversos acuíferos interconectados (de Chávez, 1988, modificado).

didades a las cuales los niveles hídricos se localizan en las áreas montañosas dependen de diversos factores topográficos, geológicos e hidrogeológicos. El factor dominante es la capacidad transmisora de las rocas, la cual depende de las características de permeabilidad (grado y tipo) y del espesor saturado de los acuíferos.

Los niveles hídricos más profundos se alcanzan bajo los complejos volcánicos montañosos constituidos principalmente de rocas fracturadas con alta permeabilidad.

##### 3. Estructura hidrogeológica con acuíferos de napa múltiple (napa hídrica superior libre)

En el subsuelo de los valles y planicies de la Cuenca, normalmente las coladas lávicas, fracturadas, tienen la función de colectores entre los materiales de baja o media permeabilidad, tales como aluviones, depósitos fluviales y lacustres y piroclastos. En esta región, el basaltismo juega un papel importante en todo el sistema hidrogeológico. En general, la discontinuidad de la continuidad espacial de los niveles permeables impide el flujo hídrico subterráneo. Los materiales de colmataje constituyen los sistemas hidrogeológicos a flujo hídrico único dado que todos los niveles de los sistemas a menudo están hidráulicamente interconectados (Fig. 14).

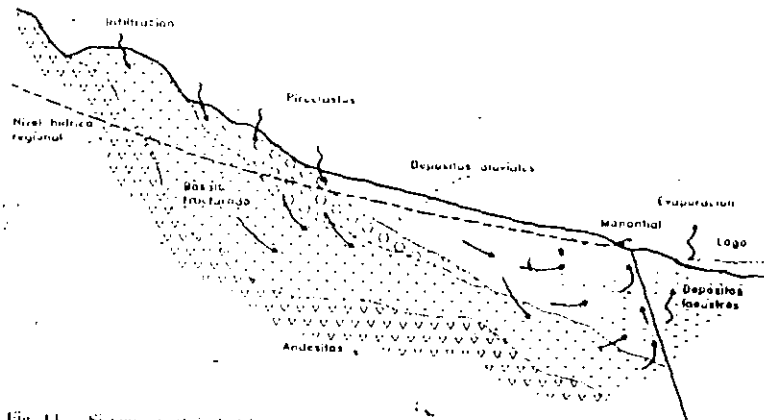


Fig. 14 - Sistema de flujo hídrico en una estructura hidrogeológica de acuíferos de napas múltiples (de Chavez, 1988, modificado).

A causa de la heterogeneidad y anisotropía de estos materiales, se tienen diferencias significativas en las cargas hidráulicas, en temperatura y en la calidad de las aguas.

Por lo que respecta a la alimentación, los sedimentos lacustres y aluviales están circundados principalmente por dos tipos de formaciones volcánicas: las del Terciario superior, de tipo andesítico, impermeables y las del Cuaternario, de tipo basáltico granular y permeable. La primera formación se considera como límite de flujo hídrico nulo para la recarga, que se realiza a lo largo de los cauces de los ríos que escurren sobre los conos aluviales. La segunda formación, constituye el límite de alimentación conocido.

La descarga natural del sistema acuífero está controlada parcialmente por factores geológicos. El volumen hídrico descargado es directamente proporcional a estas características e inversamente al volumen potencial que los sistemas pueden descargar a través de los drenajes naturales.

En esta región, los acuíferos volcánicos generan manantiales a lo largo de los flancos o en la base de los relieves, con caudales variables de una decena de litros a algunos metros cúbicos por segundo. Los acuíferos de naturaleza basáltica que alimentan manantiales, en general poseen napas hídricas libres y permanentes. Los sistemas hidrogeológicos, poco extensos y de baja transmisividad como los acuíferos que determinan napas suspendidas, pueden generar manantiales con caudal intermitente y poco volumen. La mayoría de las cuencas fluviales recibe en gran parte agua de descarga natural de los acuíferos. El volumen hídrico mínimo, que los acuíferos de alta transmisividad descargan a lo largo de las pendientes de los cursos de agua, está estimado en algunos metros cúbicos por segundo.

Los factores geológicos constituyen también una de las influencias dominantes en la descarga hídrica artificial, efectuada en los pozos. En efecto, las características de los acuíferos determinan la cantidad de flujo y la eficiencia del almacena-

miento. Generalmente, los pozos desarrollados en los basaltos cuaternarios presentan un caudal específico de 20 m<sup>3</sup>/s, dependiendo de la transmisividad del medio. Los pozos de los acuíferos riolíticos y aluviales se caracterizan por presentar caudales específicos variables entre 1 y 15 m<sup>3</sup>/s.

#### 4.3 Esquematación del sistema acuífero de la Planicie de México

A lo largo de la franja de piedemonte de las principales sierras donde se realiza la brusca variación de pendiente de los cursos de agua, se desarrollan extensos depósitos aluviales que cubren las diversas formaciones volcánicas.

Siempre en proximidad de las franjas de piedemonte se desarrollan la llamadas "zonas de transición" donde las diversas formaciones volcánicas están recubiertas por depósitos aluviales, a veces con depósitos lacustres más recientes. En ocasiones, los depósitos aluviales y lacustres se interdigitan y en estos casos se presentan intercalaciones de niveles arcillosos, muy compresibles, con niveles de materiales francamente granulares.

También, puede verificarse (por ejemplo, en algunas áreas próximas al Cerro de la Estrella, al NE del centro poblacional de Chalco) que las coladas lávicas se interponen entre los depósitos aluviales.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la Planicie de México está constituida por un acuífero semi-permeable ("acuitardo"), en la parte superior, con espesor variable, llegando a tener, en algunas zonas, 200-400 m (Planicie de Chalco y de Texcoco). Este acuífero semi-permeable está constituido principalmente por materiales sedimentarios y volcano-sedimentarios del Cuaternario tales como: depósitos lacustres, cenizas volcánicas, lapilli, arcillas, etc. Bajo éste se encuentra el "acuífero", actualmente en explotación, formado por material granular, más grueso que el del acuífero semi-permeable y otros tipos de material volcánico. Su espesor es también variable, siendo generalmente mayor, de 200 metros, al igual que sus propiedades hidráulicas. Le subyacen rocas volcánicas, en ocasiones fracturadas, cuya base llega a ser del orden de 2000 m en el centro de la Cuenca, disminuyendo hacia los márgenes. El contenedor impermeable, a profundidad, lo constituyen rocas calcáreas dolomíticas cretácicas.

El sistema acuífero, localizado en la parte más superficial del subsuelo de la Planicie de México, presenta diferencias secundarias respecto a las planicies limítrofes, tales como las de Texcoco y Chalco. Las principales diferencias secundarias están relacionadas con las secuencias de los terrenos que componen los depósitos lacustres. En efecto, en estos depósitos se presentan dos niveles de acuíferos (capas duras), de espesor reducido e intensamente aprovechados a través de los pozos que no se encuentran en los sectores meridionales de la Planicie de México.

Un sondeo típico en la zona lacustre puede esquematizarse con la siguiente secuencia (Herrera et al., 1982), de la cima a la base:

- 1) Depósitos arenosos, arcillosos o limosos, con abundantes restos fósiles o materiales heterogéneos. Espesor máximo de 10 m aproximadamente.
- 2) Niveles limo-arcillosos que en ocasiones presentan delgadas intercalaciones

de arenas, muy compresibles y de color extremadamente variable ("acuitardo I" auct.). Sus espesores oscilan entre los 15 y los 32 m.

3) Piroclastos de grano medio-fino, muy cementados ("primera capa dura" auct.). Espesor estimado de casi 3 m.

4) Niveles limo-arcillosos del todo similares a los superiores, pero con mayor grado de compactación ("acuitardo II" auct.). Espesores variables, entre los 4 y los 14 m.

5) Depósitos arenosos con gravas e intercalaciones de limos y arcillas arenosas ("acuifero granular" auct.).

Por el contrario, en el subsuelo de la Planicie de Texcoco, se presentan en la sucesión de depósitos lacustres dos niveles muy cementados (capas duras) constituyendo los acuiferos confinados en aprovechamiento. La sucesión estratigráfica típica resulta constituida por (Herrera et al., 1987), de la cima a la base:

1) Depósitos limo-arcillosos de espesor variable de 15 a 35 m ("acuitardo I" auct.).

2) Piroclastos de grano medio-fino con espesor máximo de 7 m ("capa dura" auct.); primer acuifero en aprovechamiento.

3) Depósitos limo-arcillosos de espesor variable de 10 a 17 m ("acuitardo II" auct.).

4) Piroclastos de grano medio-fino de espesor variable de 2 a 11 m (capa dura II" auct.); segundo acuifero en explotación.

5) Depósitos de arenas y gravas ("acuifero granular") aprovechado para usos industriales y potables.

Estos mismos medios aparecen en la "zona de transición", aunque la variabilidad sea mayor. En algunos lugares, además, se encuentran intercalaciones adicionales y la continuidad de la "capa dura" resulta un poco dudosa.

Los tipos litológicos mencionados presentan un amplio intervalo de variación en los parámetros hidrodinámicos (permeabilidad, coeficiente de almacenamiento, transmisibilidad, etc.). Estos medios acuiferos se encuentran comunicados hidráulicamente; la interrelación del primer paquete (depósitos lacustres) con el segundo (depósitos aluviales y piroclásticos), ha quedado demostrada por los fenómenos de subsidencia que han afectado a la Ciudad de México. Provocada por la excesiva extracción en el acuifero semi-permeable y por la extracción de la parte superior del acuifero profundo, causó así flujo del acuifero semi-permeable hacia este acuifero granular.

De las pruebas mecánicas, efectuadas sobre materiales de origen lacustre de la Planicie de Texcoco, se ha observado que la conductividad hidráulica varía poco con la consolidación quedando comprendida entre  $10^{-3}$  m/s y  $10^{-2}$  m/s.

El valor propuesto, para el coeficiente de almacenamiento específico del acuifero confinado ("capa dura"), es igual a  $8.83 \times 10^{-4}$ , mientras para las partes donde el acuifero es libre el coeficiente de almacenamiento resulta de 0.2, valor normalmente asignado a los rellenos fluviales.

Este multiacuifero es recargado por infiltraciones de la precipitación, actuando como áreas de recarga más importantes las sierras circundantes. El régimen de flujo es controlado por la extracción ( $43 \text{ m}^3/\text{s}$ ), predominando pozos con profundidades menores o iguales a 100 m. El mantenimiento de agua subterránea en la Cuenca representa cerca del 70-80% de su abastecimiento total.

La mineralización del agua subterránea oscila entre 200 y 400 mg/l de sólidos totales, con algunas anomalías que van de 1000 mg/l, en la Agrícola Oriental, a más de 20 000 mg/l en Sosa Texcoco, ubicado en el vaso del Lago de Texcoco (Rudolph et al., 1989).

#### 4.4 Extracción de los acuiferos de la Planicie de México

El bombeo, a través de pozos profundos, se inicia en la Ciudad de México a principios del siglo, aunque faltan datos referentes a la localización de los pozos y la cantidad de agua extraída.

Por medio del Departamento del Distrito Federal se inicia, a partir de 1935, el censo de pozos hídricos.

Los datos iniciales se refieren a 196 pozos municipales. En estos registros no son anotados una serie de pozos obstruidos en 1955, que están localizados en el centro de la Ciudad.

Después de los pozos municipales fueron perforados una gran cantidad de los que se conoce su exacta ubicación y volumen total de agua extraído, estimado en casi la cuarta parte del de los pozos municipales. Por medio de la información disponible ha sido posible reconstruir la historia de las extracciones y su localización desde 1935. Estos datos son necesarios para la construcción de modelos matemáticos para el estudio del fenómeno de subsidencia.

Los datos referentes a niveles piezométricos se disponen desde 1953 cuando la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, hoy Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM), inicia la instalación de estaciones piezométricas. Los datos recabados son publicados por la CAVM en sus boletines de Mecánica de Suelos cada cuatro años. En 34 estaciones se tienen los registros completos de las fluctuaciones del nivel hídrico en acuiferos profundos. Los datos relativos a estas variaciones se han utilizado sucesivamente para la calibración del modelo matemático realizado para el estudio de la evolución del abatimiento del nivel piezométrico de 1900 a 1973.

Para la zona considerada en el modelo matemático, se ha efectuado el balance hídrico para el período 1950-1975. Para 1959, la extracción media anual (Q) fue de 70.4 millones de metros cúbicos, de los cuales 30.7 se extrajeron de la región (Qr), mientras el 39.7 encuentra su origen en la recarga de la frontera (Qf). El 44% del volumen hídrico extraído proviene de la región mientras el 56% proviene de la recarga a través de los límites hidrogeológicos de la región. De los 30.7 millones de metros cúbicos, 30.1 provenían del acuifero semi-permeable (98%) y sólo 0.6, (2%) del acuifero principal (acuifero granular profundo). En lo que respecta a la subsidencia, ésta fue estimada en un promedio de 4 cm en el año de 1959, mientras el nivel piezométrico desciende 15% al año. El coeficiente de almacenamiento aparente (Sa) del sistema acuifero semi-permeable fue de 26.7%, valor muy elevado para un acuifero confinado.

En el período 1959-67, la extracción anual de agua (Q) fue de 221.3 millones de metros cúbicos, de los cuales 161.1 (72.8%) fueron extraídos de la región y 60.2 (27.2%) de la frontera. De los 161.1 extraídos de la región, 158.3 provenían del acuifero semi-permeable y sólo 2.8 del acuifero granular profundo. El valor de la

del Valle de México, es de 274 con un caudal de 5 371 l/s. Las zonas hidro-  
lógicas más ricas en manantiales son la III, IV y VIII (Fig. 6); pero la que abastece  
el mayor volumen hídrico es la I, donde sólo 10 manantiales producen un caudal  
de 2 333 l/s (Tabla VIII). Los recursos hídricos subterráneos económicamente apro-  
vechables en toda la Cuenca (Tabla VIII) se realizan a través de pozos o captación

Tabla VII - Manantiales por zonas hidrologicas en la Cuenca

Fuente: Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México

ZONA	MANANTIALES	MANANTIALES	MANANTIALES	TOTAL
I	10	2 684	6 193	274
II	28	531	11	3
III	91	611	11	11
IV	51	899	42	42
V	17	19	16	16
VI	8	382	190	190
VII	16	382	190	190
VIII	42	837	586	23
IX	3	9	23	9
X				693
XI				651
				692
				855
				635
				612
				520
				19
				789
				872
				1 020
				891
				700

Tabla VIII - Recursos hídricos subterráneos económicamente aprovechables en la Cuenca separados por zonas hidrologicas y tipo de captación

No incluye los excedentes de los manantiales que abastecen en parte a la C. d. de México

Fuente: Manantiales del Estado de México

ZONA HIDROLOGICA	MANANTIALES	MANANTIALES	MANANTIALES	TOTAL
I Xochimilco	522	8 925*	126 700	135 625
II Chimalhuacán	234	17 092	19 685	36 777
III C. d. de México	725	24 251	61 367	147 802
IV Cuautitlán	2 087	0 599	193 847	194 446
V Pachuca	930	12 047	69 689	81 716
VI Tolucahuacán	1 146	5 992	101 471	107 461
VII Texcoco	1 124	19 678	218 657	238 335
VIII Chalco	637	0 000	71 994	71 994
IX Apaxtlan	690	0 347	63 045	63 392
X Toluca	533	0 520	70 530	71 050
XI Tecoacundo	9 600	115 279	1 097 708	1 212 987

subsidencia media fue de 21 cm durante este periodo y el abastecimiento del nivel hi-  
drico de 71 cm, implicando por consiguiente un valor del coeficiente de almacena-  
miento aparente de 29.6%.

En el periodo 1967-1975, la extracción media (Q) fue de 193.4 millones de me-  
tros cúbicos, de los cuales 207.1 fueron extraídos de la región y el resto 86.3 prove-  
nían de la zona de recarga de la frontera. De los 207.1, el 98.9% (204.9 millones  
de m<sup>3</sup>) provenían del acuífero semi-permeable, mientras el 1.1% (2.2 millones de  
m<sup>3</sup>) del acuífero granular profundo. La subsidencia media fue de 27 cm, mientras  
el abastecimiento anual del nivel hídrico fue de 56 cm. Para el mismo periodo, el valor  
del coeficiente de almacenamiento aparente fue de 48%.

Las estimaciones previstas entre 1975 y el 2000 prevén una extracción de 298  
millones de m<sup>3</sup>. El aporte de la frontera será igual a 20.2%; en tal caso el coefi-  
ciente de almacenamiento pasará de 57.4% a 83.3%.

#### 4.5 Recursos hídricos subterráneos de la Cuenca del Valle de México

El volumen hídrico infiltrado varía de una zona a otra con respecto a las ca-  
racterísticas físicas e hidrogeológicas del medio acuífero y de los terrenos de cover-  
tura, pero sobre todo de la cantidad de aporte meteorológico que se presenta en las di-  
versas zonas hidrologicas de la Cuenca. El coeficiente de infiltración varía dentro  
de un intervalo bastante reducido (del 30 al 10% del aporte pluviométrico) (Tabla VI).  
Parte de dicho volumen infiltrado regresa a la superficie, en el área donde se  
representan condiciones hidrogeológicas particulares, por la descarga externa del acuí-  
fero mediante manantiales. El número de manantiales censados, en toda la Cuenca

Tabla IX - Sistema de Recursos Hídricos

Fuente: Sistema de Recursos Hídricos

ZONA	NO	ARI A	ARI B	TOTAL
HIDROLOGICA		km <sup>2</sup>	km <sup>2</sup>	
I	522	465 102	135 625	135 625
II	234	238 680	36 777	36 777
III	725	612 200	64 367	64 367
IV	2 087	766 908	147 802	147 802
V	930	1 085 240	194 446	194 446
VI	930	569 160	81 736	81 736
VII	1 146	232 294	107 463	107 463
VIII	1 124	961 020	238 335	238 335
IX	637	440 804	71 994	71 994
X	690	476 170	63 392	63 392
XI	533	346 983	71 050	71 050
TOTAL	9 600	6 716 561	1 212 987	

ZONA HIDROLOGICA	DATOS DE 1960		DATOS DE 1961 Y 1967	
	EXTRACCION	POTENCIALIDAD	EXTRACCION	POTENCIALIDAD
I Xochimilco	139.0	135.6		
II Churubusco	69.0	36.8		
III Cd. de México	239.9	64.4		
IV Cuautitlán	98.3	147.8	50.3	230.2
V Pacluca	33.5	194.4		
VI Teotihuacán	169.2	81.7		
VII Texcoco	128.7	107.5		
VIII Chalco	70.6	238.3		
IX Apan	1.6	72.0		
X Tocha	3.6	63.4	8.3	205.0
XI Tecocomulco	2.1	71.1		
T O T A L	955.5	1 213.0	912.2	1 437.0

Fuente: Memorias del Drenaje Profundo.

Tabla IX - Acuíferos de la Cuenca del Valle de México (millones de m<sup>3</sup>)

de manantiales que equivalen a  $1\ 212\ 987 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, de los cuales  $115\ 279 \times 10^6$  m<sup>3</sup> provienen de los manantiales.

Los datos relativos al aprovechamiento de los acuíferos presentes en las diversas subcuencas del Valle de México y su potencialidad son reportados en la Tabla IX. Estos datos se refieren a los años de 1960, 1961 y 1967. De dicha tabla se observa que los acuíferos más aprovechados son aquellos ubicados en la subcuenca de la Ciudad de México, aunque presentan la más baja potencialidad. Por el contrario, presentan elevada productividad respecto a los acuíferos de la subcuenca de Chalco. Los datos referentes al aprovechamiento de todos los acuíferos de las 11 zonas hidrológicas, respecto al año de 1967, es de  $912.2 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, contra una potencialidad hídrica estimada, por medio de coeficientes de infiltración, de  $1437.0 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.

## PARTE B

### 5. ANALISIS Y ESTUDIO INTEGRADO DE LA SUBCUENCA HIDROGRAFICA DE CHALCO

#### 5.1 Subcuenca hidrográfica piloto de Chalco: criterios de selección

Dadas las dimensiones de la Cuenca del Valle de México y lo complejo de su problemática, era necesario seleccionar una cuenca de menores dimensiones para el análisis de diversos criterios de riesgo geológico y vulnerabilidad acuífera.

La elección de la "zona hidrológica" más representativa y estratégica de la Cuenca es la de Chalco, puesto que la representatividad de los resultados pudiera ser extendible a cuencas similares del Eje Neovolcánico Transmexicano.

Un punto importante es que la mancha urbana se encuentra actualmente en expansión lo que puede facilitar que los resultados y conclusiones formuladas en esta investigación sean susceptibles de ser tomadas en cuenta por las autoridades del Departamento del Distrito Federal (DDF) y del Municipio de Chalco del Estado de México.

Los aspectos distintivos de la Subcuenca de Chalco son resumidos en la siguiente lista:

#### *Subcuenca hidrográfica de Chalco*

- Cuenca hidrográfica bien delimitada superficial y subterráneamente.
- Su constitución geológica es similar a la de la Cuenca, incluso el paquete sedimentario de origen lacustre.
- Suficiente información geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica de calidad confiable.
- Presencia de diversos fenómenos geológicos, hidrogeológicos y socio-económicos.
- Se han realizado estudios geofísicos, geológicos e hidrogeológicos en los últimos 10 años.
- Es una de las zonas de mayor desarrollo urbano de la Cuenca. La expansión se da también hacia las áreas de recarga de los acuíferos de la Cuenca.
- Área urbana colindante con zona de reserva urbana y ecológica.
- Región de la mayor velocidad de subsidencia de la Cuenca de México.
- Los volúmenes de extracción de la Subcuenca son representativos.
- Se encuentran en ella fuentes de contaminación representativas. Alberga uno de los basureros más grandes de la Cuenca.

La Subcuenca puede ser considerada como un gran laboratorio hidrológico en donde están teniendo lugar procesos geológicos e hidrogeológicos de relevancia, dado que su papel, en el ciclo hidrológico regional, es importante.

### 5.2 Delimitación de la Subcuenca hidrográfica de Chalco

La Subcuenca de Chalco está ubicada al Sureste de la Ciudad de México y localizada entre los  $19^{\circ} 12' - 19^{\circ} 19'$  de latitud N y  $98^{\circ} 55' - 99^{\circ} 00'$  de longitud W. Su altitud media es de 2240 m s.n.m., ocupando un área de 1124 km<sup>2</sup>.

El parteaguas septentrional se encuentra sobre el Volcán Xaltepec y se continúa por los cerros Tetcón y Tetcuatzi, Volcán Guadalupe, Volcán la Caldera, Cerro El Pino y Cerro Tejolete Grande. Continúa en dirección de la Sierra Nevada llegando a las faldas del Cerro Telapón para después dirigirse al sureste, hacia los grandes volcanes mexicanos, el Iztaccihuatl y el Popocatepetl. El límite occidental de la subcuenca está representado por el alineamiento de los volcanes Tlaloc, Ocu-sacayo y Teutli, después de haber pasado el poblado de Milpa Alta, para proseguir hacia el Norte, encontrándose con el Volcán Xaltepec.

El parteaguas meridional, a grandes rasgos, se desarrolla en dirección E-W uniendo los numerosos aparatos volcánicos que se encuentran en esta zona (V. Ocausco, V. Cuatepel, V. Aholo, etc.) para continuar al Sur de Amecameca de Juárez, corriendo por el poblado de San Pedro Nexapá y cerrar en Tlamacas (Fig. 15).

Antiguamente en la parte central de la Subcuenca se encontraba el antiguo Lago de Chalco (115 km<sup>2</sup>), que hoy corresponde a la planicie lacustre del mismo nombre. En este lago descargaban los ríos Ameca y de la Compañía. En su interior, se localiza la estructura volcánica del Cerro Xico, constituido por un anillo piroclástico, con muchas de las características de los anillos de tefra (Francis y Thorpe, 1974), de 100 m de altura y un diámetro de 1500 m. El Xico se encuentra fusionado con otra estructura similar (Xico Viejo). Otros aparatos volcánicos menores son el Cerro de Tapacoya (El Elefante) y el Cerro de Cocotlán, respectivamente al Norte y sureste del Xico (Fig. 16).

### 5.3 Notas de geología

La Subcuenca hidrográfica de Chalco representa la porción meridional de la Cuenca del Valle de México. En el área afloran numerosos aparatos volcánicos, diferentes por edad y por la naturaleza de los productos expulsados.

La porción central y septentrional de la Subcuenca está ocupada por una extensa planicie lacustre cuyas formaciones están relacionadas con la interrupción del drenaje hacia el Sur, en el Cuaternario superior, de la Sierra Chichinautzin.

La actividad volcánica ha generado, en el área en estudio, a partir del Oligoceno superior, un gran número de edificios volcánicos (centros monogenéticos, aparatos poligenéticos, estratovolcanes, anillos y conos de tobas, domos, etc.) y una notable cantidad de productos coladas lávicas, depósitos tefro-magmáticos y plinianos, lahares, etc.).

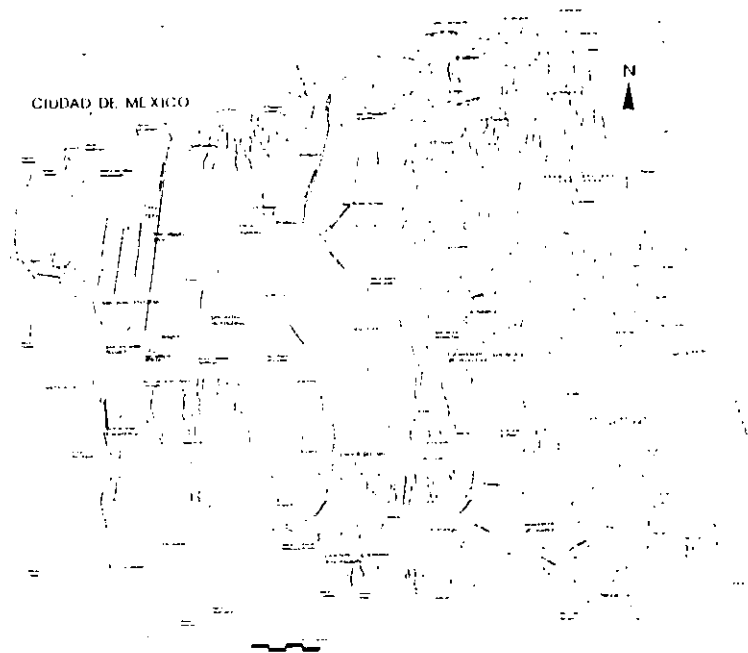


Fig. 15 - Mapa esquemático de la Subcuenca hidrográfica de Chalco.

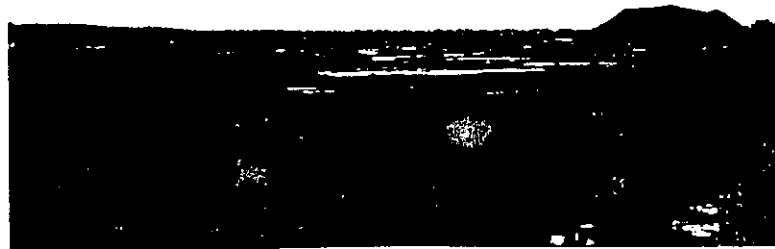


Fig. 16 - Panorama de la Planicie de Chalco; en primer plano el Volcán El Elefante



Además, en el área de estudio resulta evidente el control de la tectónica sobre la actividad volcánica por el alineamiento de muchos aparatos volcánicos y de la dirección de los flujos lávicos y piroclásticos.

La carta hidrogeológica anexada (1: 100 000) ha sido realizada teniendo en cuenta la cartografía geológica existente, investigaciones de campo, aerofotografía y el análisis de muestras.

En esta carta también se evidencian los principales lineamientos tectónicos. Los litotipos que afloran en el área en cuestión son, en el texto, precedidos de un número progresivo de abajo hacia arriba. La sucesión litoestratigráfica, que toma en cuenta también datos de perforaciones, resulta así esquematizada (Vázquez et al., 1989):

**Formación Morelos:** aflora al Sur de la Sierra de Chichinautzin, constituida por calizas y dolomitas diagenéticas y niveles laminares de anhidritas, datadas del Albiano medio-Cenomaniano inferior, y depositadas sobre una extensa plataforma marina; se revelan en el pozo PEMEX de Tulyehualco-1, muy próximo a la Subcuenca de Chalco, a la profundidad de 2160 m de la superficie del terreno y un espesor incompleto de 650 m.

**Formación Cuautla:** aflora al Sur de la Sierra Tepoztlán y al Norte de Zumpango, constituida por calizas de mar bajo, datadas entre el Cenomaniano superior y el Turoniano superior. Fue descubierta en el pozo PEMEX Tulyehualco-1, a 2100 m de profundidad de la superficie del terreno.

Arriba de estas formaciones sedimentarias, de mares generalmente bajos, se inicia la depositación de productos lávicos de distinta naturaleza y composición.

Secuencias volcánicas datadas del Oligoceno superior al Mioceno superior, de abajo hacia arriba:

1) Sucesiones de brechas volcánicas, tobas y brechas volcánicas sobrepuestas e intercaladas con coladas lávicas, de composición variable de andesita a riodacita y de edad comprendida entre el Oligoceno superior y el Mioceno inferior. El análisis petrográfico evidencia, para las lavas, una estructura olocristalina hipidiomórfica con fenocristales de plagioclasa, sanidina, cuarzo, piroxeno y anfíbolos. En el área en cuestión estas rocas volcánicas afloran al Norte y al Oeste del poblado de Amecameca. En profundidad, las rocas pertenecientes a esta secuencia presentan un espesor variable de 390 a 1750 m (PEMEX, 1988).

2) Sucesiones de tobas, brechas volcánicas, interestratificadas hacia arriba, con coladas de lava, datadas del Mioceno medio al Mioceno superior. Su composición, varía de andesitas a riodacitas. En el área de estudio, estos litotipos afloran en el C. El Elefante. Desde el punto de vista petrográfico, se reconocen tipos porfíricos y afaníticos con constante presencia de anfíbolos estables. En el subsuelo esta unidad está ampliamente distribuida, a profundidad muy variable, en el pozo Texcoco-1, entre 814 m y 920 m, en el pozo Roma-1, entre 600 y 633 m, en el pozo Mixhuca-1, entre 880 y 1190 m, en el pozo Tulyehualco, entre 930 y 1740 m, en el pozo Copileo-1, entre 1180 y 1580 m).

Los litotipos cenozoicos mencionados sobreyacen en discordancia sobre el sustrato sedimentario y constituyen la base de grandes extensiones de notable potencia, sobre las cuales se construye toda la sucesión volcánica más reciente.

3) Sobre (1) y (2), descansan depósitos piroclásticos, clásticos y aluviales del

Plioceno que no afloran en el área de la Subcuenca pero se presentan abundantemente en el subsuelo. En la porción meridional de la Subcuenca, estos depósitos están constituidos por materiales piroclásticos con horizontes de conglomerados, arenas y arcillas lacustres, remanentes de depósitos en paleocuevas (como el "graben" de Chalco), alcanzando un espesor máximo del orden de los 750 metros. Estos depósitos están cubiertos en discordancia por los posteriores litotipos cuaternarios (Vázquez et al., 1989).

Volcanitas y depósitos cuaternarios datados del Pleistoceno al Oloceno, de abajo hacia arriba:

4) **Formación Llano Grande:** intercalaciones de pómez soldadas, surges, flujo de cenizas y brechas, y coladas lávicas y domos, de composición variable de andesítica a dacítica. Estos litotipos afloran ampliamente en la porción centro-occidental del área en estudio.

5) **Formación El Pino:** caracterizada por secuencias de composición basáltica, andesítica y traquítica, constituidas por coladas lávicas con intercalaciones de cenizas, lapilli y escoria soldada. Rocas atribuidas a esta formación afloran en la región más septentrional del área del Pino, constituyendo parte del parteaguas septentrional de la Subcuenca de Chalco; en el aparato volcánico del Cocotlán, en la porción central de la Subcuenca; en el Cerro Santa Cruz y en Cerro El Tezoyo, en parte recubierta por rocas atribuidas a la siguiente formación Tlaloc; y en el Cerro Xaltepec sobrepuestas a las rocas de la Formación Llano Grande.

6) **Formación Tlaloc:** caracterizada por sucesiones andesíticas, latíticas y dacíticas y, en la base, pómez soldada, surges, flujo de ceniza, pómez y bloques intercalados y sometidas a coladas lávicas. Las rocas atribuidas a esta formación afloran extensamente en la porción noroccidental del área.

7) **Formación Iztaacihuatl:** constituida por sucesiones esencialmente efusivas, caracterizadas por coladas lávicas que finalizan en extrusiones dómicas. La composición varía de andesítica-basáltica a dacítica. Las rocas atribuidas a esta formación afloran en la porción oriental de la Subcuenca en correspondencia con el Parque Nacional Izta-Popo y constituyen, en un gran tramo, el parteaguas oriental de la misma Subcuenca, siguiendo el alineamiento de los grandes estratovolcanes Iztaacihuatl y Popocatepetl.

8) **Formación Popocatepetl:** caracterizada por piroclastos y brechas recubiertas por una alternancia de lavas y pómez plinianas, flujos de cenizas, piroclastos soldados y surges. La composición varía de andesítico-basáltico a dacítico. El afloramiento de estas rocas constituye la porción suroriental de la Subcuenca.

9) **Formación Chichinautzin:** secuencia de coladas lávicas, alternadas con material piroclástico. La composición varía de andesítica a basáltica (Fig. 17). Las rocas atribuidas a esta formación afloran ampliamente en la porción meridional de la Subcuenca y forman grandes estratovolcanes que constituyen un largo tramo del parteaguas meridional de la misma. En el área septentrional es atribuido a esta formación el estratovolcán de Santa Catarina y el anillo piroclástico del Neco.

10) **Depósitos aluviales,** con lentes locales de piroclastitas, travertino, tiza, diatomitas y arcillas lacustres. Constituyen el relleno del bajo morfológico central y meridional de la Subcuenca y de las hondas incisiones en la base de los relieves volcánicos. Estos depósitos son interdigitados con algunas formaciones volcánicas



Fig. 17 Frente de colada andesítica-basáltica de la parte superior de la Sierra Chichinautzin.



Fig. 18 - Depósitos lacustres constituidos por siltitas y limos (reciclación de materiales piroclásticos) en niveles con laminación oblicua o cruzada típicas de las llanuras lacustres del Valle de México.

cuaternarias. El espesor máximo es de unos 500 m en las zonas bajas y tiende a adelgazarse en las zonas marginales.

11) *Sedimentos lacustres*: arcillas alteradas, limos y arenas, con lentes locales de piroclastos, a veces cementados, e interdigitados con los productos de la Formación Chichinautzin y con la porción superior de los depósitos aluviales. Estos productos están relacionados con la actividad volcánica de los grandes estratovolcanes cuaternarios de la Sierra de Chichinautzin y del Popocatepetl, que depositaron abundantes materiales piroclásticos en un ambiente lacustre (Vázquez et al., 1989). Los sedimentos lacustres afloran en la zona central de la Cuenca formando una meseta con altura media de 2200 m. Los espesores varían entre los 30 y 300 m, adelgazándose hacia sus márgenes (Fig. 18). Constituyen la porción noroccidental de la Subcuenca de Chalco.

En el área de estudio, respecto a los aluviones y sedimentos lacustres y a las manifestaciones eruptivas más recientes, se pueden evidenciar al menos tres típicas relaciones geométricas:

1) *Contacto progresivo*: caracterizado por formaciones lávicas y piroclastos sometidas a depósitos aluviales y al mismo tiempo a sedimentos más recientes de arcillas lacustres.

2) *Contacto interestratificado*: con fases aluviales y lacustres que se presentan alternadamente, dando lugar a sucesiones heterogéneas;

3) *Contacto interdigitado*: entre los depósitos lacustres, los aluviales y los depósitos volcánicos.

Desde el punto de vista de la actividad volcánica, la Subcuenca de Chalco presenta un gran número de edificios volcánicos con un evidente patrón tectónico. Es el caso de los conos de tobas de Santa Catarina, de lo anillo de tobas del Neco, de evidente génesis freatomagmática, de los numerosos aparatos existentes en la Sierra de Chichinautzin y de los numerosos aparatos volcánicos aflorantes entre Tenango del Aire y San Rafael (Fig. 19).

Todos los aparatos y edificios volcánicos cuaternarios que afloran en la Subcuenca de Chalco, presentan un control tectónico con orientación prevaleciente NE-SW y NW-SE, evidenciado en la carta geológica anexa. Esta evidencia encuentra también una correlación con la orientación general de las coladas lávicas y los Hujos piroclásticos que tienden a orientarse en las dos direcciones, arriba mencionadas.

#### 5.4 Aspectos petrográficos y geoquímicos

En el ámbito de los trabajos de campo, se realizó un muestreo de las rocas aflorantes en el área, dirigido sobre todo hacia la caracterización de los productos

29



Fig. 19 - Particular de la superficie ondulada de separación entre dos eventos piroclásticos. Se nota una ligera rubetación del techo del horizonte interior (Volcán Nico).

efusivos pertenecientes a diversos edificios volcánicos diferenciándolos por su edad y las características de los productos expulsados.

El estudio al microscopio de secciones de láminas de roca ha evidenciado para todas las formaciones volcánicas muestreadas, la presencia de una textura porfírica más o menos evidente con fenocristales y asociaciones mineralógicas relacionadas con los procesos de cristalización de los magmas.

La Tabla X muestra los datos químicos de algunas de las muestras volcánicas.

Las indicaciones sobre la naturaleza de estos productos se exponen en el diagrama *Total-Alcali-Silice* (TAS), (Fig. 20). Todos los productos muestreados caen en el sector inferior del diagrama relativo a los productos subalcalinos.

En particular, los productos relativamente más antiguos, muestreados en los aparatos volcánicos de Tlapacoya y El Pino, están clasificados como dacíticos, mientras que los volcánicos de Santa Catarina, Milpa Alta y Tezompa caen en el campo de las andesitas, de acuerdo con las características petrográficas evidenciadas en el estudio de las secciones finas (Fig. 21, 22, 23) y con la clasificación proporcionada en estudios anteriores (Vázquez et al., 1989).

La naturaleza subalcalina de estos productos puede ser posteriormente examinada tomando en cuenta otros diagramas (AFM, FeO-MgO-SiO<sub>2</sub>) que aquí no se han reportado, resultando evidente la naturaleza calcocalcina de estos productos.

	MEX 10	MEX 12	MEX 13	MEX 14	MEX 16	MEX 24	MEX 27	MEX 30	MEX 31
SiO <sub>2</sub>	58.00	65.35	65.96	65.73	62.51	58.60	59.13	59.06	57.70
TiO <sub>2</sub>	1.38	0.83	0.71	0.70	0.83	1.11	1.24	1.26	1.38
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.55	15.24	15.90	16.06	16.81	16.14	16.70	16.87	16.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.85	1.31	1.74	1.17	0.89	1.18	1.37	1.10	1.80
FeO	6.53	3.56	2.43	2.83	4.13	5.41	5.44	5.66	5.53
MnO	0.13	0.08	0.07	0.06	0.09	0.12	0.12	0.12	0.13
MgO	3.06	2.49	2.16	2.14	3.23	4.43	2.84	2.88	3.33
CaO	6.53	4.89	4.04	4.14	5.46	6.45	6.17	6.16	6.36
Na <sub>2</sub> O	4.10	4.06	3.86	3.87	4.31	4.03	4.57	4.41	4.00
K <sub>2</sub> O	1.71	1.94	1.48	1.48	1.38	1.81	1.65	1.68	1.82
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.43	0.22	0.13	0.09	0.16	0.33	0.68	0.59	0.55
L.O.I.	0.00	0.00	1.36	1.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23
Total	99.27	99.97	99.84	99.75	99.80	99.61	99.91	99.79	99.47
	Sa Catarina	El Pino	Tlapacoya	Tlapacoya	Milpa Alta	Tezompa	Sa Catarina	Sa Catarina	Sa Catarina
							Pozo 31-430		

Tabla X - Análisis químicos de los elementos mayores de las muestras tomadas en la Subcuenca hidrográfica de Chalco.

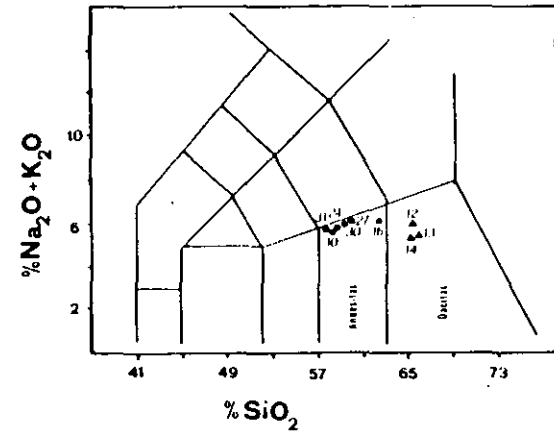


Fig. 20 - Diagrama TAS (Total Alkali-Silice) relativo a las volcánicas muestreadas en la Subcuenca de Chalco (■ andesitas, ▲ dacitas).



Fig. 21 - Dacita del Volcán El Helante. Fenocristales de anfíbol en masa de fondo fluidal microcristalina (Nicoló //, 10 X) (Méx. 13).



Fig. 22 - Dacita de la Formación El Pano. Masa de fondo fluidal bien cristalizada con feldspatos



Fig. 23 - Andesita de la Formación Chichimantzin. Estructura porfírica con presencia de minerales félicos (Nicoló //, 10 X) (Méx. 30).

## 6. CONSIDERACIONES HIDROGEOLOGICAS SOBRE LA SUBCUENCA HIDROGRAFICA DE CHALCO

La importancia del complejo volcánico de la Sierra de Chichinautzin, como captador natural de agua subterránea, encuentra fundamento en su estructura por la acumulación de horizontes lávicos ampliamente fisurados y gran cantidad de vacuolas, en los que se intercalan niveles discontinuos de piroclastos porosos, escasamente permeables. El conjunto de los productos volcánicos se sobrepone a un substrato sedimentario separado, a una profundidad superior a los 2000 m, que aflora sobre todo en diversas áreas próximas a la región meridional del Valle de Cuernavaca.

La disposición estructural del complejo volcánico de Chichinautzin proporciona la dirección preferencial de salida del flujo hídrico, ya que con éste se relaciona la existencia del parteaguas subterráneo que delimita hidroestructuras primarias y secundarias con respecto a estas cuencas hidrogeológicas menores.

El flujo hídrico subterráneo de la Sierra de Chichinautzin presenta dos direcciones preferenciales de descarga, hacia el Norte y hacia el Sur, es decir hacia el Valle de Xochimilco y hacia el Valle de Cuernavaca-Cuautla. Una descarga hídrica más limitada se efectúa hacia el sector de Amecameca de Juárez.

Del análisis de los alineamientos más evidentes evidenciados por las dislocaciones tectónicas, sin considerar los datos recabados de la exploración geoelectrónica y de la estratigrafía de pozos, es posible subdividir la unidad hidrogeológica de Chichinautzin en 6 hidroestructuras secundarias (Topilejo-Milpa Alta-Temamatla, Tenango-Amecameca-Ozumba, Valle de Cuernavaca, Tepoztlán, Yautépec y Yecapixtla). Sólo dos de éstas son responsables de la alimentación de los acuíferos subterráneos identificados en la hidroestructura subterránea de la Planicie de Chalco. Estas hidroestructuras son caracterizadas por condiciones estratigráficas y estructurales particulares que permiten separar situaciones hidrogeológicas diferentes, ya sea en el interior de ellas o respecto a las áreas limítrofes.

A continuación se describen brevemente solamente las hidroestructuras que constituyen las principales áreas de alimentación de la Planicie de Chalco.

### 1) *Hidroestructura Topilejo-Milpa Alta-Temamatla*

Está constituida extensamente por terrenos de elevada permeabilidad que permiten la infiltración de agua meteorica. La circulación hídrica se efectúa hacia los sectores norte, donde se encuentran las baterías de los pozos del sistema Sur del Departamento del Distrito Federal. En el flujo hídrico subterráneo de la hidroestructura se alimentan, entre otros, los acuíferos de la planicie lacustre - aluvial de Chalco.

### 2) *Hidroestructura Tenango del Aire-Amecameca-Ozumba*

Constituye la frontera entre las subcuencas de México y de Amacuzac. En esta

zona se encuentra material piroclástico granular asociado con piroclastos de permeabilidad media a baja. Las sucesiones verticales y el desarrollo espacial de dichos materiales determinan la presencia de diversos acuíferos de poca importancia. En Amecameca de Juárez se desarrolla un parteaguas subterráneo que determina la descarga hídrica subterránea preferencial hacia Tenango del Aire, en dirección de Chalco, mientras otra descarga se realiza hacia el suroeste, es decir hacia la localidad de Ozumba y Tepetitla. Aparentemente, no existe ninguna comunicación hidráulica entre esta hidroestructura menor y aquella del suroeste, entre las localidades de Yecapixtla, Oaxtépéc y Cuautla.

### 3) *Hidroestructura de la Planicie de Chalco*

En el subsuelo de la Planicie de Chalco se presenta una estructura hidrogeológica un tanto compleja. Algunos pozos de exploración han permitido reconstruir las principales secuencias litoestratigráficas.

El pozo Tulyehualco 1 (Pozo PEMEX de 3000 m, realizado en 1986 por el Comité de Reconstrucción del Area Urbana de la Ciudad de México) ha intersectado un paquete sedimentario Plio-cuaternario, con un espesor de 930 m, descansando sobre formaciones volcánicas del Mioceno, seguida después 2100 m de una secuencia de calizas dolomíticas del Cretácico.

Las frecuentes variaciones laterales de facies y el cierre lateral estratigráfico del depósito lacustre y piroclasto-aluvional determinan un complejo de medios acuíferos semi-permeables y permeables.

La presencia de medios semi-permeables asegura la intercomunicación con los acuíferos que presentan movimientos lentos en el flujo hídrico vertical, ascendente y descendente. La napa hídrica circula preferencialmente en los terrenos elásticos de tamaño medio y en los piroclastos con intercalaciones, en ocasiones, fluvio-lacustres.

## 6.1 Observaciones piezométricas

Las observaciones piezométricas, realizadas en Mayo de 1987, han mostrado que los niveles estáticos en los pozos se mantienen en un intervalo de oscilación bastante variable. En efecto, en las regiones meridionales del Valle de Xochimilco-Thahuac-Chalco los niveles se interceptan entre los 25 y 70 m de la superficie del terreno, mientras que en las cercanías de Tenango del Aire los pozos cortan el nivel del agua a una profundidad de 70-100 m, aproximadamente, que corresponden al nivel estático regional del acuífero de Chalco. Al Norte de Amecameca los niveles son más superficiales cortándolo a una profundidad de los 5 m de profundidad. De Amecameca hacia Ozumba, respecto al sector de Tenango del Aire, la piezometría es más próxima a la superficie topográfica, pero variable (5-20 m), lo cual se cree que debe corresponder a un acuífero independiente del de Tenango del Aire.

Las diferencias encontradas en las profundidades de los niveles estáticos de los pozos dependen de la morfología compleja de la hidroestructura principal y, en forma secundaria, del aislamiento hidráulico de los acuíferos.

Una situación similar se presenta al Norte de Amecameca donde los pozos lle-

gan a los niveles hídricos a los 5 m de profundidad, aproximadamente, contrariamente a lo que se presenta en Tenango del Aire donde la profundidad se aproxima a los 100 m.

Las direcciones del flujo son, para las porciones septentrionales del Valle de Xochimilco-Tláhuac-Chalco, sur-norte, mientras que en el sector de Amecameca se presenta un flujo de descarga hídrica con dirección oeste, es decir hacia Tenango del Aire, donde cambia sucesivamente en dirección norte, contribuyendo a la alimentación de la región de Chalco. Al Sur de Amecameca, la dirección del flujo hídrico es preferencialmente hacia el suroeste (Ozumba, Tepetlaxpa).

## 6.2 Esquematación hidrogeológica de la Planicie de Chalco

La planicie lacustre y aluvial de Chalco (Subcuenca de Chalco) se localiza entre el margen septentrional de la Sierra de Chichinautzin y la meridional de los relieves menores de Santa Catarina, la Caldera, El Pino.

En esta región se han examinado algunos pozos de exploración para la reconstrucción de las secuencias litoestratigráficas (Chalco, Tamamatla, Mixquic, Tulyehualco, etc.). El pozo exploratorio Tulyehualco-1 (3000 m) se encuentra entre la localidad de Milpa Alta y Tláhuac, al Oeste de Chalco. Es uno de los cuatro pozos exploratorios realizados en 1986 por PEMEX para el Comité de Reconstrucción del Área Urbana de la Ciudad de México. Este pozo ha sido correlacionado con los datos estratigráficos del pozo Tláhuac-3 (1207 m de profundidad) realizado en 1964 por cuenta de la Dirección General de Obras Hidráulicas.

La reconstrucción geológica del subsuelo de Chalco determinó un espesor variable de sedimentos lacustres y aluviales de edad cuaternaria, a veces interdigitados. En su sucesión se intercalan en forma variable material piroclástico de grueso a fino, en ocasiones arcilloso y coladas lávicas del espesor de algunas decenas de metros. El espesor máximo estimado, es de al menos 400 m y el paquete sedimentario yace sobre una potente secuencia de formaciones volcánicas y piroclastos, en ocasiones muy fracturados.

El sistema acuífero local está constituido por (a) un acuífero semi-permeable y (b) un acuífero granular con napa hídrica semi-confinada por éste, cambiando su carácter hidráulico en los márgenes de la cuenca, donde actúa como libre, y (c) un acuífero albergado en rocas volcánicas fracturadas conectado hidráulicamente con el anterior.

A partir del mapeo geológico superficial, de la información geológica de pozos y de la conjunción de los resultados de diversos métodos geofísicos de prospección usados en el área, se infieren las características hidrogeológicas de las rocas de la región.

Las vulcanitas miocénicas localizadas en las porciones centro y sur de la Cuenca del Valle de México presentan generalmente permeabilidad baja, debido principalmente a su estructura masiva y escaso fracturamiento, funcionando como sustrato. En general las rocas de las sierras, que circundan la Cuenca, tienen porosidad primaria baja y una permeabilidad de media a alta debidas al fracturamiento por lo que actúan como importantes áreas de recarga (DGR 011, 1986).

Por otra parte, los derrames basálticos por su estructura y fracturamiento son

muy porosos y permeables. Los extensos afloramientos en las sierras de Chichinautzin y Santa Catarina constituyen excelentes receptores y transmisores para la recarga del agua subterránea, producto de las intensas precipitaciones en las partes altas de las sierras. Aunque también intercalaciones de este tipo de roca en el paquete sedimentario, en la Subcuenca de Chalco, pueden propiciar la rápida incorporación de contaminantes al flujo subterráneo.

Los depósitos lacustres (acuífero semi-permeable), ampliamente distribuidos en la Cuenca, tienen en general una baja permeabilidad por porosidad. Generalmente se encuentran saturados con aguas con altos contenidos de sales. La extracción de agua del semi-permeable por pozos someros y el régimen de extracción actual del "acuífero granular" por pozos más profundos induce flujos hídricos verticales originando los conocidos problemas de subsidencia de la Cuenca en esta época (14 cm/año). Constituyen el acuífero semi-permeable del sistema hidrogeológico local logrando alcanzar alrededor de los 300 m en las partes más profundas de la Planicie de Chalco.

La permeabilidad de los depósitos lacustres presenta un amplio rango de variación, en función de la cantidad de material piroclástico y lávico intercalado.

El régimen de flujo subterráneo, a nivel regional, se caracteriza por tener una dirección preferencial N-S (Lesser, 1984) en la parte norte de la Subcuenca hidrogeológica de Chalco y una dirección contraria en la parte sur, resultando de las sierras circundantes que actúan como zonas preferenciales de recarga del sistema hidrogeológico. Este flujo alimenta directamente al "acuífero granular", actualmente en explotación, que puede presentar entre 300 y 400 metros de espesor en sus partes más profundas y que está constituido principalmente por piroclastos, depósitos clásticos fluviales y en ocasiones coladas lávicas. Los pozos en explotación ubicados en este acuífero presentan ademe ciego en la parte superior y ranurado en la inferior con la finalidad de no afectar el cuerpo de agua mineralizada (cerca de 1100 ppm) que se encuentra en la parte superior ("acuífero" auct.). Estas formaciones acuíferas se encuentran bajo una interdigitación de sedimentos lacustres y piroclastos. El agua del acuífero en explotación es de buena calidad presentando contenidos de sales entre 200-300 ppm.

La baja permeabilidad del material de grano medio-fino de depósitos lacustres, que se encuentra en la zona, ocasiona en la parte central de la Subcuenca acumulaciones someras de agua, por lo que podría pensarse en la presencia de flujos verticales ascendentes por su carácter perenne, lo que sería explicable por lo irregular del paquete lacustre y altas presiones hidrostáticas, producto de la intensa recarga local.

En los márgenes sur de la Subcuenca hidrográfica de Chalco han existido manifestaciones superficiales del nivel hídrico (tanto de manantiales de agua dulce como salobre) (Durazo y Farvolden, 1989) que han ido desapareciendo en razón directa del descenso paulatino del nivel piezométrico, tornándose en sumideros que actualmente son aprovechados por los habitantes de la zona para canalizar sus desagües de aguas negras las cuales se incorporan rápidamente al sistema hidrogeológico por las altas velocidades que se llegan a presentar en este tipo de materiales (Rodríguez y González, 1989). La creciente urbanización de las laderas de la Sierra de Chichinautzin puede llegar a alterar el régimen de recarga y la calidad natural del agua subterránea.

En las zonas de recarga donde el espesor del acuífero semi-permeable es menor, la circulación del agua hacia el acuífero profundo es relativamente rápida, aprovechando la existencia de un medio fracturado de alta permeabilidad para después fluir por las formaciones granulares de porosidad variable. Por otra parte, el bombeo efectuado básicamente en el acuífero inferior, está provocando un flujo vertical descendente del acuífero semi-permeable hacia el acuífero, dando lugar a una mezcla de aguas cuya calidad, por efectos de dilución, no se ve alterada. No es posible realizar una evaluación de este aporte dado que el acuífero semi-permeable está constituido por una alternancia variable del material granular, principalmente arenas, limos y arcillas, cuyos valores de compresibilidad y permeabilidad son difíciles de evaluar.

Las baterías de pozos ubicadas en el Sur de la Subcuenca, como el ramal Tecomilt-Mixquic, extraen agua de la roca fracturada. Estos dos cuerpos permeables son difíciles de diferenciar y presentan una excelente comunicación hidráulica.

Parametrizar hidráulicamente estas formaciones por mediciones directas o indirectas es un proceso complicado. En toda la Subcuenca en donde se tienen más de 100 obras hidráulicas sólo se cuenta con un par de pruebas de bombeo confiables sin pozo de observación. Esto es explicable si se toma en cuenta la urgencia por lograr el abastecimiento de agua y el violento régimen continuo de extracción, lo cual impide por ejemplo la suspensión parcial de la extracción para la realización de pruebas de bombeo o la medición de niveles estáticos.

## 7. LEVANTAMIENTO GEOELECTRICO

Los resultados de los procesos de interpretación geoelectrica requieren, para su asociación geológica, de la existencia de tablas de correlación entre rangos resistivos y unidades litológicas elaboradas para cada entorno geológico. En medios sedimentarios la identificación geoelectrica de las diferentes unidades litoestratigráficas es complicada por el grado de saturación de las mismas. Hay que tomar en cuenta que casi todas las formaciones sedimentarias de interés hidrogeológico caen en el intervalo resistivo de 5-100  $\Omega$ -m. De no contar con este tipo de información no es posible pasar de perfiles geoelectricos a secciones geológicas. La versatilidad de estos métodos de prospección geofísica está condicionada por la cantidad y calidad de la información geológica.

La correlación geológica de los perfiles geoelectricos se logró mediante la asociación de rangos resistivos a estratos geológicos de pozos. Dada la complejidad geológica que presenta la Planicie de México y su gran extensión, se tomó como punto de referencia un macropperfil geoelectrico localizado en la parte central-norte de la Planicie, con una longitud de 107 km integrado por 8 líneas geoelectricas (Rodríguez et al., 1989). Este perfil compromete 20 pozos con información geológica confiable que se utilizaron para la asociación de intervalos resistivos con las formaciones geológicas detectadas. No se efectuó una descripción estratigráfica de detalle, ya que la mayoría de los pozos presentan profundidades no mayores a 100 metros. Las líneas geoelectricas presentan continuidad en grandes paquetes geológicos y no en algunos pequeños.

Se presentan a continuación cuatro de las líneas geoelectricas que cubren el oriente de la Planicie y en donde se detectaron formaciones geológicas que se encuentran también en la Planicie de Chalco (Fig. 24).

La correlación geoelectrica-geológica presentada ha sido utilizada para diferenciar y caracterizar unidades litoestratigráficas con intervalos resistivos similares. En este ambiente geológico es posible encontrar dos grandes tipos de rocas: rocas sedimentarias con resistividades que van de 0.20-100.0  $\Omega$ -m y volcánicas con intervalos óhmicos de 100.0-3000.0  $\Omega$ -m. En el primero caen todas las unidades de interés hidrogeológico compuestas por una gran variedad de formaciones sedimentarias, mientras que en el segundo rocas de origen volcánico que, según su grado de fracturamiento, pueden o no funcionar como acuífero.

### Línea APAN

En esta línea se identificaron 8 unidades litológicas, las cuales se evidenciaron de la siguiente manera: la primera se observa a lo largo de toda la sección, caracterizándose por un rango resistivo de 12 a 32  $\Omega$ -m y profundidad de 5 a 25 metros, y se asocia a aluviones.

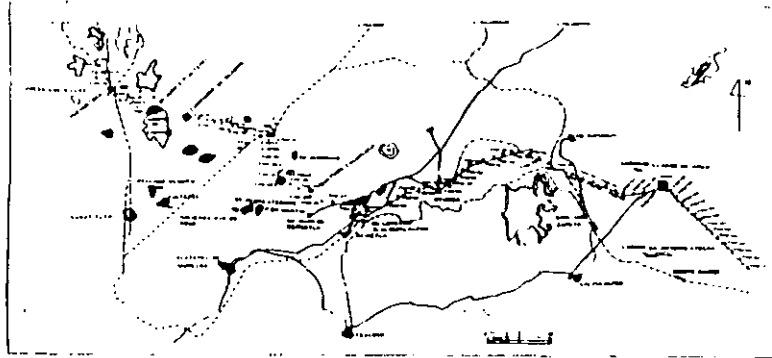


Fig. 24 - Ubicación de perfiles geofísicos.

Le subyacen tres unidades litológicas; hacia los SEV's 58 y 59 se visualiza un cuerpo cuyo rango resistivo oscila entre los 130  $\Omega$ -m y espesor de 55 metros aproximadamente, se asocia a basaltos fracturados del Cuaternario de la Formación El Pino, siendo su fuente de emisión el Cerro San Pedro. Entre los SEV's 58 al 84 se presenta una unidad con rango resistivo entre 30 y 40  $\Omega$ -m y espesor variable de 150 a 100 metros, y se asocia a arenas, gravas y arcillas. Esta unidad se observa entre los SEV's 65 al 69 a una profundidad de 180 metros aproximadamente. Del SEV's 64 al 70 se identificó una unidad con espesor de 110 metros y rango resistivo de 22 a 32  $\Omega$ -m, y se correlaciona a arcillas que le dan un carácter de confinante al acuífero subyacente.

A una profundidad mayor de 200 metros, entre los SEV's 64 y 70, se evidencia una unidad con espesor variable y rango resistivo de 17 a 35  $\Omega$ -m asociándose a piroclásticos del Plioceno representados por material de grano fino a medio. Entre los SEV's 58 al 64 esta unidad aumenta su resistividad entre 44 y 55  $\Omega$ -m. Esta variación se podría explicar por cambios en la granulometría. Entre los SEV's 59 al 67 se presenta una unidad con resistividad de 118 a 334  $\Omega$ -m y espesor variable; se visualiza a una profundidad mayor de 200 metros, su geometría podría estar controlada por los eventos volcánicos que le dieron origen, y se asocia a andesitas del Plioceno, siendo su fuente de emisión el Cerro de San Pedro. Esta unidad se observa de nuevo entre los SEV's 68 y 69 a una profundidad mayor de 500 metros. Entre las unidades de andesitas se observan piroclásticos con predominio de material de grano fino que posiblemente estén rellenando una superficie de erosión. Entre los SEV's 58 al 65 se observa una unidad con características geoelectricas semejantes a piroclásticos del Plioceno con material de grano grueso, observándose a una profundidad de 400 metros.

#### Línea TROLO

En esta línea se distinguen 5 unidades litológicas. En los primeros 25 metros se distingue una capa de aluviones con rango resistivo de 11 a 36  $\Omega$ -m. Le subyace una unidad con rango resistivo de 11 a 36  $\Omega$ -m y espesor variable. Esta unidad se extiende a lo largo de la sección y se asocia a piroclásticos del Plioceno (arenas, gravas y arcillas) de la Formación

Calpulalpan (Vázquez et al., 1989), esta unidad es visualizada también en la Línea Apan.

Entre los SEV's 49 al 53, a una profundidad de 80 metros, se evidencia un cuerpo con resistividad de 130 a 250  $\Omega$ -m y espesor medio de 70 metros. Se asocia a basaltos fracturados con interdigitaciones de escoria, siendo posiblemente su fuente de emisión el Cerro Zontepéc. A una profundidad mayor de 200 metros se visualiza, entre los SEV's 48 y 58, una unidad con resistividad de 13 a 36  $\Omega$ -m y espesor variable, que se asocia a piroclastos del Plioceno inferior con predominio de material de grano grueso de la Formación Calpulalpan.

Entre los SEV's 52 al 57 se observa una unidad con resistividad menor de 15  $\Omega$ -m a una profundidad mayor de 400 metros, que se correlaciona con piroclastos del Plioceno inferior con predominio de material de grano fino, los cuales son de baja permeabilidad.

Entre los SEV's 54 y 55 se detectó una discontinuidad geoelectrica a profundidad relacionada con una zona de fallamiento.

#### Línea PACH02

En esta línea se identificaron 3 unidades litológicas. La primera se extiende a lo largo del perfil y se visualiza en los primeros 20 metros, se caracteriza por un rango resistivo de 13 a 31  $\Omega$ -m y se asocia a aluviones. Le subyace una unidad con rango resistivo de 255 a 3000  $\Omega$ -m y espesor variable y se correlaciona con basaltos sanos fracturados del Cuaternario, lo que explica su amplio rango resistivo. Entre los SEV's 40 al 47 y a una profundidad mayor de 100 metros esta unidad se visualiza más fracturada y con grado de saturación mayor, donde su resistividad varía de 25 a 70  $\Omega$ -m. Entre los SEV's 41 al 44 se encuentra esta misma unidad con un menor grado de alteración, presentando una resistividad de 3000  $\Omega$ -m. Le subyace una unidad del Plioceno inferior con predominio de material de grano fino.

#### Línea OTUMBA

En esta línea se identificaron 5 unidades litológicas. La primera se extiende someramente a lo largo del perfil. Por su carácter geoelectrico se le asocia a aluviones, siendo éstos material de arrastre de los cerros circunvecinos. Le subyace, entre los SEV's 30 al 33, una unidad con rango resistivo de 23 a 30  $\Omega$ -m y espesor medio de 40 metros, se le asocia a depósitos lacustres lo que le da un confinamiento al acuífero que le subyace. Estos depósitos pueden ser el resultado de los procesos de sedimentación relacionados con remanentes del Lago de Texcoco.

Entre los SEV's 30 al 34 se distingue una unidad con rango resistivo de 66 a 88  $\Omega$ -m y espesor de 300 a 100 metros, y se asocia con piroclastos del Cuaternario de la Formación El Pino. Le subyace, a partir del SEV's 32 en adelante, una unidad con espesor variable y rango resistivo mayor de 239  $\Omega$ -m, y se asocia con los basaltos sanos y fracturados de la línea Pach02.

A una profundidad de 250 metros se evidencia una unidad con resistividad de 28 a 43  $\Omega$ -m y espesor variable, que se asocia con piroclastos del Plioceno con material de grano medio a fino, encontrados también en la línea Pach02.

A los 400 metros de profundidad se detectó entre los SEV's 30 al 32 una unidad que por su carácter geoelectrico se asocia a piroclastos del Plioceno inferior con predominio de grano fino, siendo éstos de baja permeabilidad.

Los resultados obtenidos de la correlación geoelectrica-geológica del macroperfil son resumidos en la siguiente Tabla XI. En la misma se puede observar que el paquete lacustre presenta resistividades entre 0.5 - 66.0  $\Omega$ -m y los aluviones entre



Roca	Intervalo ( $\Omega$ m)	Localización
Sedimentos lacustres saturados con agua mineralizada	8 - 16	Huehuetoca-Zumpango
	19 - 30	Otumba-Teotihuacán
	18 - 32	Apan
Sedimentos lacustres: arenas, tobas, arcillas y gravas	0.5 - 8.0	Santa Catarina
	4 - 20	Huehuetoca
	30 - 35	Irolo-Apan
Aluviones	60 - 66	Apan
	40 - 24	Teotihuacán
	17 - 31	Otumba
	15 - 28	Irolo
Limos	12 - 24	Apan
	16 - 37	Zumpango
Basaltos (no alterados)	1p - 38	Zumpango-Iecamac
	500 - 3000	Otumba-Irolo
Basaltos (fracturados)	3000	Teotihuacán
	300	Teotihuacán
	200 - 585	Otumba-Irolo
	48 - 70 (saturados)	Otumba-Irolo
Andesitas	132 - 230	Irolo
	102 - 334	Apan
Piroclastos del Plioceno (grano fino)	137 - 250	Zumpango
	> 10	Otumba-Teotihuacán
Piroclastos del Plioceno (grano grueso)	> 14	Iecamac-Zumpango
	26 - 45	Apan
Piroclastos del Plioceno (grano grueso)	24 - 55	Otumba-Teotihuacán
		Iecamac-Zumpango
Piroclastos del Mioceno		Irolo-Apan
Piroclastos del Mioceno	22 - 39	Huehuetoca

Tabla XI - Correlación entre los valores de resistividad eléctrica y litotipos presentes en la Cuenca de México

10.0 y 37.0  $\Omega$ -m. Los piroclastos del Plioceno de grano grueso van de 25.0 - 55.0  $\Omega$ -m. De no contar con este tipo de tabla, la diferenciación de estos tres tipos de unidades sería sumamente complicada.

### 7.1 Caracterización geofísica de los substratos de la Planicie de Chalco

Con la finalidad de tener un conocimiento integral de la zona de estudio y no sólo información superficial del paquete sedimentario, obtenida mediante el análisis de la información geoelectrónica, se procesó información gravimétrica de un levantamiento efectuado por Servicios Geofísicos, en 1953, el cual cubre la mayor parte del Area Metropolitana. Los datos obtenidos fueron corregidos y fue extraída la tendencia regional con la finalidad de realizar estructuras geológicas de interés para el estudio.

Existen pocos estudios realizados en la Planicie de México que permiten conocer algo de su estructura profunda. Podemos mencionar el estudio sísmico de refracción del Pozo Texcoco localizado al Norte de Cd. Nezahualcoyotl, que evidenció la presencia de cuatro unidades litoestratigráficas, en los primeros 1500 metros de profundidad (D.D.F.: Memorias de las Obras del Sistema del Drenaje Profundo, 1975), con relieve suave y que pueden ser correlacionadas con:

- Depósitos lacustres muy compresibles, saturados con agua con una velocidad de 60 m/seg.
- Una formación arcillo-arenosa poco compacta y saturada con agua con una velocidad de 1700 m/seg.
- Tobas volcánicas con horizontes de arena con velocidad de 2900 m/seg.
- Rocas compactas, posiblemente ígneas con velocidades de 4500 m/seg.

Dado que no se tienen valores representativos de las densidades de las formaciones geológicas, se consideró que el Pozo Tulyehualco-1 tiene características similares a las condiciones geológicas del área de estudio, lo que permitió seleccionar valores promedios de contrastes de densidad.

En 1986, Petróleos Mexicanos realizó un levantamiento sísmológico de reflexión, a lo largo de calles y avenidas de la Ciudad de México, consistente en 26 líneas (243 km), con longitudes entre 2 y 28 kilómetros. Los resultados obtenidos son complementados con la perforación de 4 pozos profundos de los cuales se obtuvieron muestras de canal, núcleos, registros sísmicos de porosidad y densidad compensada.

Con la información disponible se propuso un modelo sencillo que divide las rocas del subsuelo en tres unidades concordantes con la geología de la región para correlacionarla con el plano de anomalías de Bouguer.

La primera, con densidad 1.60 gr/cm<sup>3</sup>, está asociada al material lacustre.

La segunda, asociada con secuencias volcánicas constituidas principalmente por tobas, conglomerados, algunas brechas y en menor proporción por intercalaciones de coladas de basaltos con una densidad promedio de 2.10 gr/cm<sup>3</sup>.

Y la última correlacionada con la unidad volcánica inferior, se le asoció una densidad de 2.50 gr/cm<sup>3</sup>. Está constituida principalmente por basaltos y algunos piroclastos que representan el substrato ígneo de la región.

Después de aplicar las correcciones necesarias a la información gravimétrica, se eliminó la tendencia regional resaltándose una anomalía negativa que puede correlacionarse con una zona de baja densidad asociada a la zona lacustre que ocupaba el antiguo Lago de Chalco y una serie de anomalías positivas asociadas a elementos estructurales bien conocidos (la Sierra de Santa Catarina, el Cerro El Pino, Tlapacoya, Nco).

Se utilizó un algoritmo basado en Banerjee y Das Gupta (1977), que calcula la atracción gravitacional de prismas rectangulares finitos. Se propone un modelo inicial, basado en información geológica y geofísica, formado por una colección de prismas rectangulares de diferentes dimensiones y densidad.

El modelo fue amarrado aprovechando el conocimiento que se tiene de la línea de pozos de la batería de Santa Catarina.

El proceso de ajuste entre la anomalía observada y la calculada se realizó por ensayo y error modificando los parámetros de los prismas.

El modelo final propuesto consta de 162 prismas. Cabe destacar que en cada prisma se ha considerado el contraste de densidad de cada una de las formaciones, respecto a la primera, ya que se pretende resaltar el efecto de las formaciones volcánicas.

El proceso es complejo: cada vez que se modifican los parámetros de un prisma, se alteran los parámetros de los prismas vecinos y los de las capas superiores y, por lo tanto, el efecto gravimétrico producido.

Los resultados obtenidos permiten establecer el buzamiento a profundidad, hacia el Oeste de la Planicie de Chalco, de las formaciones volcánicas. Estos resultados concuerdan con lo establecido por Rodríguez y González (1989) que postulan un engrosamiento del paquete lacustre y una zona de máximo relleno sedimentario que está asociada a procesos de deposición del antiguo sistema de lagos someros que existían en la Cuenca de México.

Hacia las estribaciones de la Sierra de Santa Catarina y del Volcán Teutli se observa un adelgazamiento del paquete sedimentario, evidenciándose grandes espesores de formaciones volcánicas que pueden ser asociados al Cerro El Pino y al antiguo Cerro El Elefante (Tlapacoya).

En la parte ESE se observa una zona de baja densidad, que puede interpretarse como una posible, antigua y somera, conexión del sistema lacustre Chalco-Xochimilco que pudiera haber sido interrumpida por alguno de los múltiples eventos tectónicos y/o volcánicos que han ocurrido en el área.

## 7.2 Configuración del paquete lacustre

Aprovechando una serie de estudios geofísicos, principalmente sondeos eléctricos verticales (SEV's) (Rodríguez, 1987) se ha podido hacer una parametrización de las principales formaciones acuíferas de la Planicie de México. Estos resultados permiten ahora una fácil asociación entre entidades geoelectricas y formaciones geológicas.

Se seleccionaron alrededor de 100 SEV's (Rodríguez y González, 1989) efectuados por el Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica de la UNAM y la Comisión Federal de Electricidad para establecer la geometría espa-

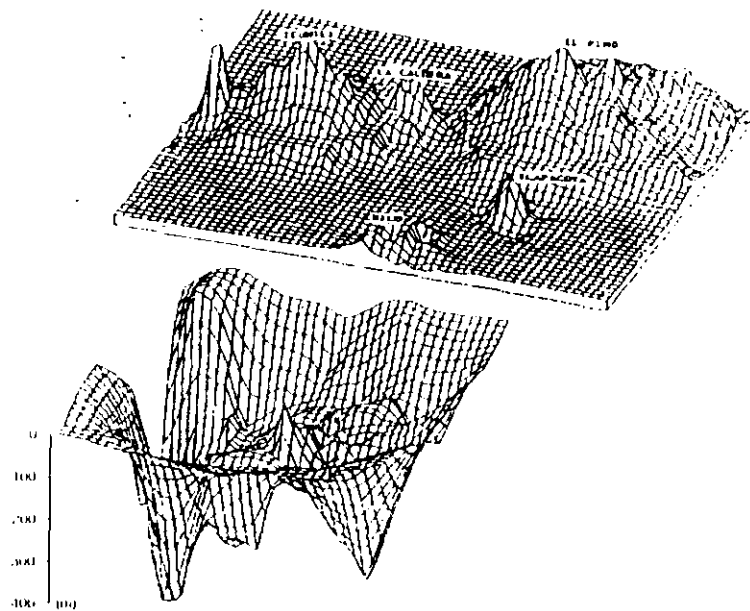


Fig. 25 - Topografía del área y configuración del paquete lacustre (Modelo tridimensional de Benlumea y Vázquez, 1988).

cial de la cima del paquete lacustre, aprovechando el contraste resistivo que presentan los sedimentos de ambiente lacustre respecto al material granular (0.50 - 8.0  $\Omega$ -m vs 20.0 - 35.0  $\Omega$ -m). El proceso de la reinterpretación basado en algoritmos computacionales iterativos buscó más la determinación del espesor del acuífero semi-permeable que la definición estratigráfica del mismo (Aguas, 1989). La Fig. 25, representa la configuración tridimensional de la base de los depósitos lacustres. Los resultados geoelectricos fueron calibrados con información estratigráfica de pozos del área y correlacionados con aquellos obtenidos del estudio sísmico de refracción.

Como puede observarse, el acuífero semi-permeable presenta espesores máximos (cerca de los 400 m) en la porción sur de la Sierra de Guadalupe (bajo la zona urbana de Tlahuac) lo que indicaría que los remanentes lacustres que lo originaron tuvieron en esa zona sus mayores profundidades, aunque pudiera tratarse también de un reflejo de la tectónica del área o una combinación de ambos efectos. El estudio geoelectrico, por la presencia del agua mineralizada (efecto electrolítico) no es capaz de diferenciar los lentes de arcilla pura de depósitos lacustres; por lo que se ha denominado *paquete lacustre* al conjunto.

En el área comprendida entre la antigua Isla de Tlapacoya y el Volcán Nco



8. CONSIDERACIONES SOBRE LA VULNERABILIDAD DE LA SUBCUENCA DE CHALCO

8.1 Problemática ambiental: el efecto antropogénico

La actividad antropogénica afecta el medio ambiente de una u otra manera. Planificar el crecimiento urbano de una metrópoli en un país en vías de desarrollo requiere de una infraestructura técnica y humana con la cual difícilmente se cuenta. La expansión de la Cd. de México no ha podido seguir ningún patrón preestablecido. El auge industrial en la Cuenca, que ha propiciado que se encuentre establecida en ella el 40% de la capacidad industrial nacional, originó el rápido crecimiento de municipios de Edo. de México, colindantes con el Área Metropolitana, como Tultitlán y Naucalpan. La región disponible fué vertiginosamente ocupada generándose crisis habitacionales para las clases media y baja. Una zona que ofrecía posibilidades para asentamientos irregulares, producto de invasión de terrenos, fueron las faldas de las estribaciones, montañosas del centro y sur de la Cuenca. Desde los años sesenta las estribaciones del Ajusco y la Sierra de las Cruces empezaron a ser urbanizadas de forma irregular. La competencia por espacios habitables propició que pequeñas comunidades establecidas en las laderas de la Sierra de Chichinautzin incrementaran su área urbana. En contadas ocasiones la expansión se ha venido dando a través de fraccionamientos con cierta organización mas, sin, embargo, la mancha urbana ha crecido de manera muy irregular.

Los asentamientos humanos irregulares, como el de Santa Caterina, no cuentan con servicios como electrificación, agua potable y drenaje hasta finales de la década de los 80's. En un medio geológico como el estudiado la falta de planificación del desarrollo urbano afecta de diversas maneras el medio ambiente. Cuando los asentamientos tienen lugar en zonas preferenciales de recarga, como lo son las sierras periféricas de la Cuenca, puede verse afectado el almacenamiento del sistema acuifero. Esto es debido principalmente a que se reducen las áreas de infiltración de la precipitación. La urbanización afecta también el patrón de drenaje de estas zonas lo cual incide en la alteración del ciclo hidrológico regional. La pavimentación de los asentamientos en fase de regularización se efectúa sin tomar en cuenta los drenajes naturales de los escurrimientos, llegándose a producir en períodos "pico" de precipitación, flujos que invaden las zonas residenciales, como ha llegado a ocurrir en colonias de Xochimilco y Tlahuac.

El manejo de los residuos sólidos domiciliarios en este tipo de comunidades refleja la complejidad socioeconómica del medio. Como estas urbanizaciones se dan en la periferia de la urbe, es frecuente encontrar también basureros que en su inicio de operación fueron traders a ciclo abierto no controlados. Este es el caso de las colonias en el entorno inmediato de los basureros de Santa Cruz Meyehualco y Tezozoc, al poniente de la Subcuenca, y Santa Catarina y Tlahuac en la zona de estudio.

Los basureros no sólo representan riesgos para la salud de los pobladores en sus inmediaciones sino que su potencialidad contaminante es mayor para los mantos acuiferos. Además de los basureros existen otras fuentes importantes de contaminación acuifera en la zona.

8.2 Identificación de fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea

En la Subcuenca de Chalco las formaciones de buena permeabilidad se encuentran por de bajo a paquetes lacustres cuyo espesor va de unos cuantos metros en los márgenes hasta más de 300 metros en el zona de Tlahuac. Esta configuración geológica juega un papel relevante en los procesos de lixiviación de contaminantes superficiales.

El acuifero semipermeable, en gran parte asociado a la misma formación lacustre, sobre los acuiferos granulares actualmente en explotación, presenta en la Subcuenca de Chalco espesores variables de algunos cientos de metros y mineralización del agua (1000-1200 mg/l). La baja permeabilidad del primero disminuye pero no anula del todo la infiltración al acuifero granular al que está unido. Por ello, resultan evidentes las siguientes consideraciones:

- 1) La presencia señalada, por varios autores, de una zona de transición, caracterizada por la mezcla de agua de un acuifero con cierta salinidad, y el acuifero granular que presenta contenidos relativamente bajos de sales (200-300 mg/l).
- 2) La variación en la concentración de alguna especie química en el agua extraída del acuifero, con respecto al régimen pluviométrico. Estas variaciones pueden ser fácilmente explicadas en términos de los intercambios entre los acuiferos.
- 3) La coherencia en la variación de las especies químicas con la localización de pozos y su relación con las fuentes contaminantes, principalmente en la batería de pozos de Santa Catarina.

Estos hechos evidencian la crítica situación del sistema acuifero de Chalco, caracterizado en su parte superior por un acuifero salino de mayor densidad. Resultan por ello evidentes las atribuciones naturales de esta agua al mezclarse con el agua que presenta menor densidad. El riesgo de que substancias contaminantes, relacionadas con actividades humanas, se transfieran al acuifero de poca salinidad, actualmente en explotación, es una evidencia que debiera ser constantemente vigilada. A la luz de todas estas consideraciones deberá establecerse un cuidadoso balance de las entradas y salidas del sistema, con la finalidad de estudiar la eventual disminución del gradiente piezométrico, afortunadamente aún elevado, que podría favorecer una más fácil propagación del frente contaminante.

No es factible, con la información con que se cuenta al momento, establecer el grado de contaminación del flujo subterráneo, entre otras razones por la ausencia de análisis químicos de compuestos orgánicos. Estos son producto de lixiviaciones provenientes de residuos industriales sólidos y líquidos que pudieran haber sido depositados en el basurero de Santa Catarina (Fig. 27).

El canal de desagüe del Río de la Compañía, que fluye de oriente a norponiente en la zona, también puede presentar lixiviaciones en aquellas áreas donde predominan arenas de granulometría variable en los sedimentos lacustres y aluvionales

39

## 9. PROPUESTA SOBRE LA REALIZACIÓN DE UN MAPA DE VULNERABILIDAD DE LOS ACUIFEROS DE LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA DE CHALCO

Por las razones expuestas en capítulos anteriores, el área que ocupa la Subcuenca de Chalco se encuentra actualmente en un estado de evolución, caracterizado por un equilibrio más bien delicado.

Esta Subcuenca, que refleja en conjunto toda su problemática ambiental, puede ser utilizada como "laboratorio" y zona de estudio piloto para la realización de acciones que tiendan a recuperar sus antiguas condiciones.

La realización de una carta de vulnerabilidad representaría una valiosa herramienta en la prevención y administración de los recursos hídricos subterráneos de esta región, que resultan estratégicos para las actuales concentraciones humanas que presenta la Ciudad de México.

Una carta moderna de vulnerabilidad permitirá realizar una evaluación del impacto ambiental. En efecto, estas cartas proporcionan información sobre la manera en que se mueven los contaminantes, en la superficie y en el subsuelo, sobre la presencia de fuentes de contaminación y sobre reservas hídricas que puedan presentar riesgo de contaminación.

La primera carta de vulnerabilidad, realizada en Europa por los años 70's, fue efectuada por el Bureau de Recherche Géologique et Minières de Francia. Posteriormente se realizan otras en Checoslovaquia (1974) y en la Unión Soviética. En Italia se realiza, en 1980, la primera carta de vulnerabilidad a escala operativa del territorio devastado por el sismo de 1976.

En 1985, el Consiglio Nazionale delle Ricerche, en Italia, crea el "Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche" (G.N.D.C.I.) que opera en el programa especial VAZAR (Vulnerabilidad de los Acuíferos en Zonas de Alto Riesgo). El esquema de trabajo de este programa podría ser utilizado en el área de Chalco, tal y como se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 30.

Una carta de vulnerabilidad establece un "escenario estático", útil para definir las distribuciones espaciales de mayor peligro territorial (Foster, 1980).

Las aportaciones principales, de estas cartas son:

- 1) La zonificación del área de estudio sobre la base de la vulnerabilidad pasiva o intrínseca (la posibilidad de penetración o difusión de un contaminante en el acuífero).
- 2) Estimación de factores de riesgo efectivos o potenciales, relacionadas con la utilización o transformación del área estudiada.
- 3) Identificar las situaciones de incompatibilidad para proceder a la reducción del riesgo o para mitigar el efecto, en aumento, de un contaminante.
- 4) Presentar los elementos necesarios para la correcta planeación territorial (planes, licencias, regulaciones, reubicación de instalaciones y operaciones de captación).

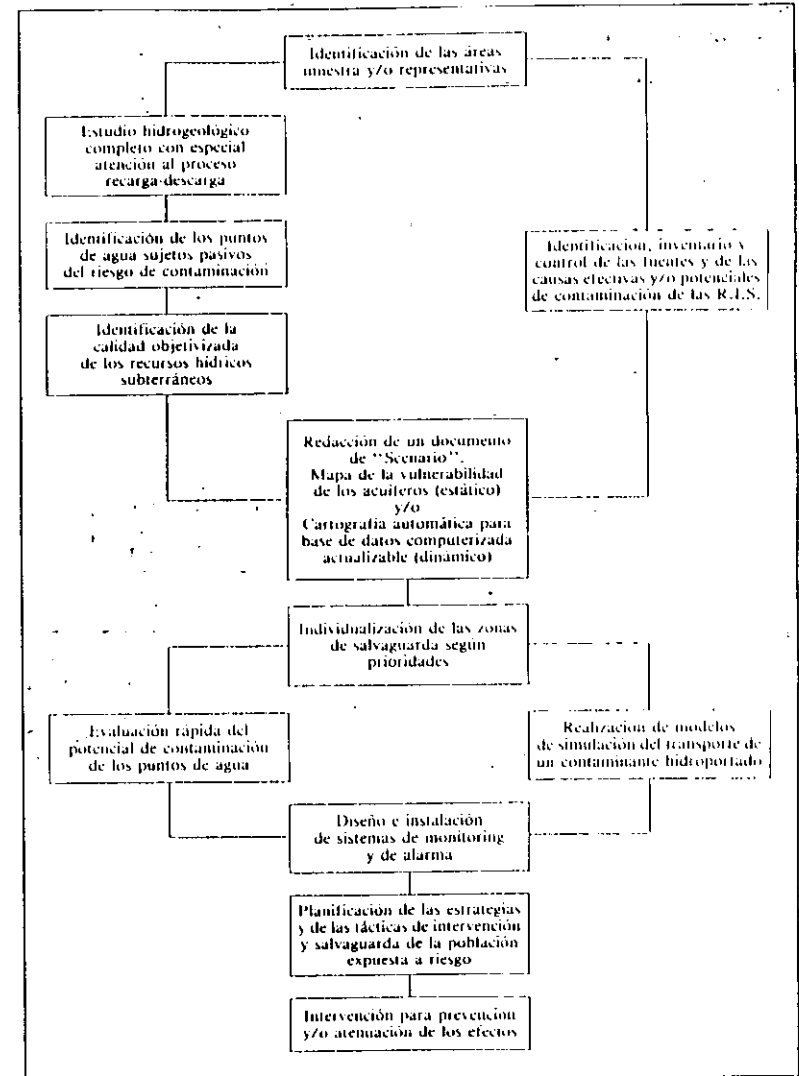


Fig. 30 - Esquema lógico de trabajo del Programa Especial VAZAR (línea de investigación 4 del G.N.D.C.I. de Civita, 1990b).

- 5) Realizar una vigilancia eficaz del territorio.  
 6) Obtener un esquema de conocimiento útil, en el caso que sea necesaria una rápida intervención en caso de catástrofes naturales.

### 9.1 Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca

La vulnerabilidad intrínseca depende sustancialmente de tres factores:

- Tiempo de tránsito, empleado por el agua o los contaminantes para atravesar la zona no saturada e incorporarse en la zona saturada, de un acuífero subyacente.
- La dinámica de flujo del contaminante en la zona saturada.
- La concentración del contaminante a su arribo a la zona saturada, con respecto a su concentración inicial.

Los factores arriba indicados dependen de una serie de parámetros que regulan las características hidrogeológicas y físicas del área estudiada (Tabla XIV). Pa-

FACTORES PRINCIPALES	PARAMETROS BASICOS
TIEMPO DE TRANSITO	Subyacencia (espesor insánturo) Espesor, textura, porosidad, permeabilidad, retención específica del suelo. Litología, granulometría, índice de fracturación, índice de carsificación, estructura y permeabilidad vertical del insánturo. Densidad, viscosidad, solubilidad en agua de los contaminantes. Recarga activa y media global.
DEFECTO SUBTERRANEO	Características hidrogeológicas del acuífero (porosidad útil, permeabilidad, dispersión, almacenamiento, velocidad efectiva del flujo, ...). Estructura, geometría, gradiente hidráulico. Temperatura del agua y de las rocas acuíferas. Densidad, viscosidad y solubilidad en agua de los contaminantes.
CAPACIDAD DE ATENUACION DEL IMPACTO DE LOS CONTAMINANTES	Subyacencia; Recarga activa media global; Pendiente y uso de la superficie topográfica. Densidad del retículo de drenaje y relaciones con el acuífero. Espesor, textura, composición mineralógica, retención específica, caracteres químico-físicos, permeabilidad del suelo y del insánturo en general.

Tabla XIV Factores principales y parámetros básicos que regulan los aspectos de la vulnerabilidad de los acuíferos hacia la contaminación (de Cívita, 1990b).

ra la evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero es pues necesario un conocimiento articulado y profundizado (Tabla XV). Sin embargo la recolección de esta información se dificulta y ocasiona elevados costos, dada la necesidad de complementar los datos existentes con otros nuevos.

La evaluación de la vulnerabilidad de un acuífero depende de diversos factores (características físico-químicas de la fuente que originó el contaminante, cantidad, modo y tiempo de permanencia, etc.) que deberá ser estimada en cada caso.

Por ello es necesaria la elaboración de bases de datos de lo más diverso. La metodología aplicable deberá ser diferente, dependiendo de una categorización: *universal*, para ser aplicada en cualquier área geográfica y fisiográfica y *local*, para un área particular y limitada (Cívita, 1990b).

### 9.2 Realización del mapa de vulnerabilidad

Puesto que este mapa constituye un instrumento indispensable para la planificación de situaciones que se presentan con el tiempo, será necesario actualizarlo continuamente, creando sistemas de información que deben ser constantemente retoolmentados. Este mapa deberá contener, a escala adecuada, información fisiográfica, económica, administrativa y recursos humanos. Las principales etapas, para un mapa a escala media (1:50 000 o, 1:25 000), son (Cívita, 1990b):

- 1) estimación de la vulnerabilidad intrínseca
- 2) elementos hidroestructurales
- 3) estado real de la contaminación del cuerpo hídrico subterráneo
- 4) fuentes productoras reales y potenciales de contaminación
- 5) potenciales ingestores y transmisores de contaminación de los cuerpos hídricos subterráneos
- 6) preventores y/o reductores de contaminación
- 7) potenciales sujetos de contaminación.

El mapa de la vulnerabilidad intrínseca permite zonizar las variaciones areales de un único factor de peligro territorial, mientras que el mapa de la vulnerabilidad integrada representa una elaboración más sofisticada que toma en cuenta la susceptibilidad del sistema suelo-subsuelo-acuífero a la contaminación y las fuentes reales y potenciales de contaminación.

En el diagrama de flujo de la Fig. 31 se expone la metodología para la realización de la cartografía de vulnerabilidad.

Por lo que atañe al caso de Ciudad de México donde la concentración de la población está en continuo crecimiento, a la necesidad de nuevas fuentes de aprovisionamiento hídrico se contraponen la proliferación de fuentes de contaminación en un territorio sometido a un fortísimo impacto antrópico. De aquí la importancia, para las áreas de mayor riesgo (por ejemplo la Subcuenca hidrográfica de Chalco), de recolectar y catalogar datos para la elaboración de sistemas informativos con bancos de datos actualizables e interfaseados con instrumentos de cartografía automatizada.

Los mapas de la vulnerabilidad (en escala operativa) continuamente actualizados podrán realizarse en tiempo real, favoreciendo opciones inteligentes en las fases de planificación, de vigilancia y de intervención en caso de contaminación.

SECTOR	TIPOLOGIA	ADQUISICIONES
1. Topografía	Cotas absolutas, pendiente de la superficie topográfica, coeficiente y densidad de drenaje	Mapas topográficos, aerofotointerpretación, remote sensing
2. Cobertura vegetal	Uso del suelo, zonas de flujo preferencial, lineaciones, carga contaminante teórica (fotofarmacos, abonos, ...)	Cartografías especializadas, aerofotointerpretación, remote sensing
3. Climatología	Serie histórica de las precipitaciones y de las temperaturas medias; Dirección e intensidad del viento; Evapotranspiración; Evaporación; Precipitaciones eficaces (recarga activa + arroyamiento)	Anales hidrológicos, procesaciones y modelos de cálculo numérico, datos de estaciones de medición.
4. Pedología	Tipo, espesor, textura, composición mineralógica, porosidad, permeabilidad, retención específica, caracteres físico-químicos de los suelos	Levantamientos, análisis y test específicos, aerofotointerpretación, remote sensing, cartografías especializadas.
5. Hidrología	Arroyamiento superficial; hidrogramas a las series diversas; tiempos de correlación; flujo básico.	Anales hidrológicos, mediciones de caudal (curso de agua, manantiales), individualización de pérdidas y de rebases en el alveo o en el mar (remote sensing).
6. Hidrogeología		
a) Insatura	Subyacencia; litología, estructura, porosidad útil, permeabilidad vertical; Velocidad de filtración; Índices de fracturación, de carstismo, de infiltración; recarga activa; cotas piezométricas; gradiente hidráulico.	Levantamiento hidrogeológico, geognóstica, geofísica, piezometría, test con infiltrómetros y de absorción, datos limnométricos, test con trazantes, aerofotointerpretación, remote sensing, levantamientos espeleológicos.
b) Saturada	Litología, estructura, permeabilidad (tipo, grado horizontal y vertical, porosidad útil, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, dispersión; tipología del acuífero (fibra, en presión, semacotinado, ...); interconexiones con otros acuíferos o con cuerpos hídricos superficiales; dirección del flujo; posición de los partaguas subterráneos; velocidad efectiva de flujo, direcciones del flujo, caudal unitario y global.	Levantamiento hidrogeológico, geognóstica, geofísica, test de absorción y emulación, test con trazantes, mapas piezométricos, aerofotointerpretación, remote sensing, explotación espeleológica, modelos de cálculo numérico.
7. Uso de las aguas	Ubicación de las captaciones, alcantaras de riadadas, alcantaras distribuidas, depresiones provocadas por instalaciones de bombeo (inclusive los de dewatering), ubicación y potencial de las instalaciones para recomstitución de acuíferos.	Plano general de los acueductos, platos de cuenca y de saneamiento, censamientos, levantamientos, encuestas directas ante Entidades públicas, consorcios, privados.
8. Química		
a) Hidrogeoquímica	Características físicas y químicas de las aguas, identificación de los trazantes ambientales, facies química, relaciones características, intercambios con la matriz, edad, tiempos de residencia, calidad de las aguas subterráneas, ...	Análisis químico-físico y bacteriológico, análisis isotópico, ... (entidades públicas, laboratorios universitarios y privados).
b) Contaminología	Identificación de los contaminantes, concentraciones, densidad, solubilidad, viscosidad, peso específico, vida media, capacidad de intercambio catiónico, biodegradabilidad, movilidad, ...	Redes de monitoring, análisis estadísticos, determinaciones y experiencias de laboratorio, datos tabulados.
9. Antropización	Posición y naturaleza de los asentamientos urbanos e industriales, de los productores reales y potenciales de los ingeridores, de los reductores, de los preventores y de los sujetos de contaminación (CAA, VV., 1988).	Censamientos, tabulaciones y cartografías de Entidades públicas, levantamientos directos y aerofotográficos.

Tabla XV - Sectores de procedencia, tipología y métodos de adquisición de las informaciones necesarias para la evaluación y la cartografía de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (de Civita, 1990b).

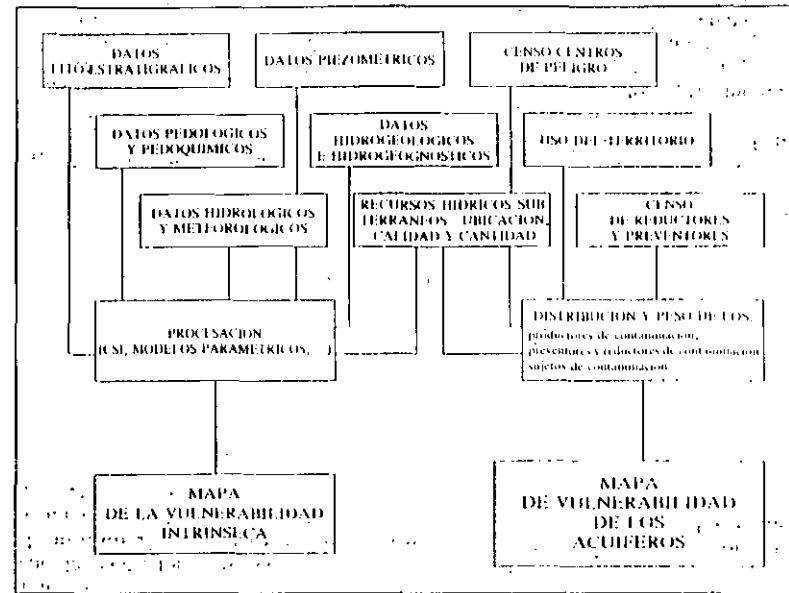


Fig. 31 - Metodología para la realización de un mapa de la vulnerabilidad (de Civita, 1990).

## CONCLUSIONES

En todo el mundo, a causa del rápido crecimiento de la población y de la tendencia migratoria desde el campo hacia las concentraciones urbanas, la mayoría de las ciudades está sometida a una fuerte expansión. Mientras que antes de la segunda guerra mundial la mayor parte de las inversiones estaba destinada a la creación y a la mejora de las conexiones entre la ciudad y el territorio, en estos últimos años se está verificando una tendencia creciente a invertir en las mismas ciudades.

Hoy en día hay enormes barrios metropolitanos de países industrializados y asentamientos marginales de los países en vías de desarrollo que se expanden como una mancha de aceite, poniendo en crisis las administraciones públicas, que ya no pueden sostener los costos crecientes de gestión.

Bajo el punto de vista humano en general las ciudades constituyen un riesgo puesto que un gran número de personas y un enorme patrimonio en términos de capitales se concentran en un espacio restringido. En dicho marco de desarrollo urbano desproporcionado se coloca Ciudad de México, una de las primeras megalópolis del mundo, con sus 20 millones de habitantes, para la que en el año 2000 se prevé una población que alcanzará los 28 millones de habitantes ocupando todo el valle en que se yergue la ciudad y los territorios circundantes. Por este motivo Ciudad de México presenta todos los problemas que se derivan de un desarrollo urbano impetuoso en una situación de fuertes contrastes económicos. Por causa de este enorme desarrollo la ciudad debe afrontar una vasta gama de riesgos, naturales y de otro tipo, puesto que el comportamiento humano se vuelve cada día más heterogéneo, ocasionando nuevos y más fuertes riesgos. En efecto Ciudad de México representa un ejemplo típico de área en que se concentran los más importantes riesgos relacionados con las calamidades naturales (de origen geológico, atmosférico, etc.) pero existen también peligros relativos a problemas especiales (contaminación, aluviones, subsidencia, contaminación de napas hídricas, etc.).

Los riesgos naturales mayores que interesan al territorio de Ciudad de México son el riesgo sísmico (a este propósito se recuerda el último evento sísmico del 19 de septiembre de 1985, que trastornó un área de unos 800 000 km<sup>2</sup>, causando varios miles de víctimas) y el riesgo de inundaciones, puesto que la ciudad está construida en un área de origen prevalentemente fluvio-lacustre en que se descarga un sistema de drenaje natural de tipo endorreico que contribuía al levantamiento de los niveles hídricos de los antiguos lagos (Lago México, Texcoco, Chalco, Xochimilco, etc.) provocando inevitablemente inundaciones en la ciudad y favoreciendo la amplificación de las ondas sísmicas a causa de las características litológicas de los terrenos. Su población luchó constantemente contra estos peligros y contra estos eventos se precavó, sobre todo en los últimos tres siglos, realizando notables obras hidráulicas que permitieron en parte el saneamiento de los antiguos lagos, canalizando las aguas hacia el exterior de la ciudad mediante canales y obras de drenaje subterráneo.

Después del terremoto de 1985 la Cuenca de México ha sido estudiada mediante

la aplicación de metodologías de investigación de tipo geofísico y de tipo directo (pozos explorativos PEMEX). A este propósito se han realizado algunas perforaciones profundas oportunamente distribuidas en el área de la Cuenca (por ej. pozos Roma, Texcoco, Tulyehualco, etc.) que permitieron, entre otras cosas, la reinterpretación de perforaciones ya realizadas y definir mejor las sucesiones estratigráficas reconstruidas para el subsuelo de la misma Cuenca.

En líneas generales, el modelo construido para el subsuelo, integrado con la ayuda de datos relacionados a las investigaciones geofísicas realizadas por el IGF de la UNAM y por la CFE por cuenta del D.D.F., prevé una sucesión de terrenos con características fluvio-lacustres de edad cuaternaria, que a veces descansan en terrenos piroclásticos y aluvionales distintamente intercalados e interdigitados del Plioceno inferior. Dichas sucesiones pliocénicas marcan una etapa significativa de la evolución del Valle de México cuyos sectores meridionales, interrumpidos por la intensa actividad volcánica, ayudaron a que se instauraran condiciones endorreicas en el Valle. Los espesores de dichas sucesiones son sumamente variables en relación a la estructura morfotectónica del Valle, que permitió en sus sectores meridionales la deposición de terrenos volcánicos con espesores superiores a los 600 metros. El substrato de este poderoso conjunto sedimentario está constituido por volcanitas miocénicas, a veces muy fracturadas que a su vez descansan, alrededor de los 1500-2000 m de profundidad, en sucesiones carbonático-pelíticas de edad cretácico-paleogénica.

Los principales objetivos de la investigación geofísica fueron los de una mejor definición de las relaciones espaciales de los terrenos fluvio-lacustres con los subyacentes terrenos pliocénicos y con las volcanitas miocénicas, además de una mejor zonización de la Cuenca de México, para el estudio de las respuestas de los terrenos a las tensiones provocadas por los sismos.

Las investigaciones de tipo geológico y geofísico sirvieron también para el estudio de los mecanismos de circulación hídrica en el subsuelo de la Cuenca y para predisponer instrumentos más sofisticados para la previsión y evolución de los fenómenos de subsidencia debidos a la intensa explotación de los acuíferos subterráneos del Valle de México.

Un ejemplo típico de las consecuencias de una sustracción sistemática del agua bajo un área urbana, en condiciones geológicas desfavorables, es el de Ciudad de México donde, desde mediados del siglo pasado, se ha practicado un bombeo creciente desde pozos que alcanzaban profundidades entre los 50 y los 500 m. Este bombeo intensivo causó una fuerte baja de los niveles piezométricos, en todos los medios permeables, especialmente en los que se encuentran situados a profundidades mayores de 25 metros. La diferencia de presión entre la superficie piezométrica superior y la inferior determinó un gradiente hidráulico directo hacia abajo; este aumento produjo una gradual consolidación de los estratos limosos y limo-arcillosos, altamente comprimibles, presentes en las sucesiones de los depósitos lacustres de la cuenca.

Bajo el punto de vista hidrogeológico los estudios de toda la Cuenca del Valle de México remontan a 1985 y han tenido como finalidad principal la evaluación del enorme recurso hídrico explotable con el objetivo prioritario de la salvaguarda y conservación de la calidad ideal del agua destinada a los usos civiles.

Las estructuras hidrogeológicas de naturaleza prevalentemente ígnea actual-



Departamento del Distrito Federal (1975) - *Memorias de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal*. Talleres Gráficos de la Nación, t. I-IV. México, D.F.

Dewey J.W., Suárez G. (1988) - *Sismotectonics of Middle America*. (en prensa).

Durazo J., Farvolden R.N. (1989) - *Groundwater conditions in the Valley of México from surface manifestations and historical record*. Journ. Hydrol. (en prensa).

Ferrara V. (1990) - *Problemi connessi alla valutazione della vulnerabilità all'inquinamento delle acque sotterranee nell'area vulcanica etnea*. Atti 11 Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie, Tecnologie e Obiettivi", Mariano sul Panaro (Modena - Italia) 20-22 Set. 1990, v. 1, 175-186.

Foster D.H. (1980) - *Disaster Planning*. Springer & Verlag, 275 pp., New York.

Fries C. (1960) - *Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región central meridional de México*. UNAM, Instituto de Geología, Bol. 60, 236, México D.F.

Gayol R. (1929) - *Breves apuntes a las obras de sanamiento y desagüe de la Capital de la República y de las que, del mismo género, necesita con grande urgencia*. Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura, v. VII.

Gayol R. (1929) - *Breves apuntes relativos a la Catedral de México*. Revista de Ingeniería y Agricultura, v. XI.

González G. (1985) - *Proyecto de un sistema sanitario en Santa Catarina*. Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

González-M. T. (1991) - *Estudio hidrogeofísico de la Subcuenca de Chalco. Evaluación de impacto ambiental del basurero de Santa Catarina*. Tesis Doctoral, CCH-IGF (en revisión).

Gutiérrez J. (1989) - *Modelo gravimétrico geológico-estructural de la Subcuenca de Chalco*. Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F.

Herrera I. (1990) - *El sistema acuífero de la Cuenca de México*. Introducción Volumen especial. Geof. Int., v. 28-2.

Herrera I., Yates R. y Henmart J.P. (1982) - *Estudio de hundimiento y balance de los acuíferos subterráneos a la Ciudad de México*. Elaborado para: D.D.F., Instituto de Investigaciones en matemáticas aplicadas y en sistemas (IMAS) - UNAM, Enero de 1982, México D.F.

Herrera I., Rudolph D.L., Hernandez-G. G. y Medina-B. R. (1987) - *Modelos de simulación numérica de flujo de salinera en los estratos de Sosa Texcoco (Valle de México) + Apéndice*. UNAM, Instituto de Geofísica, Departamento de Recursos Naturales, Departamento de Modelación computacional, Julio de 1987, México D.F.

Lesser I.J. (1984) - *Actividades geohidrológicas en el Valle de México*. Reporte técnico 4-33-1-676, D.D.F., t. I-III, México D.F.

Lorenzo I.L., Mítambel L. (1986) - *Thapacoya: 35,000 años de historia*. INAHJ, México.

Lugo Hubp J. (1984) - *Geomorfología del Sur de la Cuenca de México*. Serie Varria, t.I, n. 8, Instituto de Geografía.

Mooser F. (1975) - *Historia geológica de la Cuenca de México*. D.F. - "Memorias de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal". Talleres Gráficos de la Nación, t. I, 7-38 y mapa geológico, México D.F.

Pasquaré G., Vezzoli L., Zanchi A. (1987) - *Morphological and structural model of Mexican Volcanic Belt*. Geof. Int., v. 26-2, 159-176.

Pasquaré G., Ferrari L., Perazzoli V., Tiberi M., Furehetti F. (1987) - *Morpho-*

*logical and structural analysis of the central sector of the Transmexican Volcanic Belt*. Geof. Int., v. 26-2, 177-193.

PEMEX (1988) - *Cortes litológicos y registros geofísicos de los pozos profundo exploratorios Roma-1, Mixhuca-1, Tulyehualco-1 y Copilco-1*. Información consultada en la Fundación J. Barros Sierra, A.C., México, D.F.

Perez-Cruz G. (1988) - *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Cd. de México*. Tesis de Maestría, DESPFI, UNAM, México D.F.

Robin C. (1984) - *Le Volcan Popocatepetl (Mexique): structure, evolution petrologique et risque*. Bull. Volcanol., 47-1.

Rodríguez-C. R. (1987) - *Consideraciones preliminares, basadas en resultados geoelectricos, sobre la interfase agua mineralizada-agua dulce en el área de Sta. Catarina Yecahuitzol, Distrito Federal, México*. Geof. Int., v. 26-4, 573-583.

Rodríguez-C. R., Díaz G.P. (1986) - *Perfil geofísicos al Sur del Valle de México*. Reporte Técnico, 279 pp., IGF-UNAM, CAVM-SARH, México D.F.

Rodríguez-C. R., Díaz G.P. y Arzate-F. J.A. (1987) - *Perfil geofísicos en Pachuca-Zempoala, Emiliano Zapata-Apan, Teotihuacán-Tepexpan, Otumba-Cd. Sahagún en el Valle de México*. Reporte Técnico, 110 pp., IGF-UNAM, CAVM-SARH, México D.F.

Rodríguez-C. R., Lara-G. F. (1988) - *Proposal on the hydrodynamical behavior of the Sta. Catarina aquifer system D.F. México: Geoelectrical - Hydrogeological analysis*. Revista Geofísica dell' Instituto Panamericano de Geografía e Historia n. 28, 193-202.

Rodríguez-C. R., González-M. T. (1989) - *Comportamiento hidrodinámico del sistema acuífero de la subcuenca de Chalco, México*. Geof. Int., v. 28-2, 207-217.

Rodríguez-C. R., Ochoa-A. C. (1989) - *Estudio geoelectrico del sistema acuífero de la Cuenca de México*. Geof. Int., v. 28-2, 191-205.

Rodríguez-M. J. (1990) - *Agua e hidrología en la zona metropolitana de la Ciudad de México. Antecedentes, diagnóstico, perspectivas y alternativas*. Instituto de Investigaciones Ecologicas, AC (INAINE), (Enero de 1990), México, D.F.

Rojas T., Strauss R.A. y Laineros J. (1974) - *Nuevas noticias sobre obras hidráulicas y coloniales en el Valle de México*. SEP, INAH.

Rudolph D.L., Herrera I. y Yates R. (1989) - *Groundwater flow and solute transport in the industrial well field of the Texcoco saline aquifer system near México City*. Geof. Int., v. 28-2, 363-408.

Schilling E. (1938) - *Die schwimmenden Gärten von Xochimilco*. Kiel (1938).

Tardy M., Carfantan J.C., Rangin C. (1986) - *Essai de synthese sur la structure du Mexique*. Bull. Soc. Geol. France (8) t. II, n. 6, 1031.

Vázquez-S. E., Jaimies-P. R. (1989) - *Geología de la Cuenca de México*. Geof. Int., v. 28-2, 133-190.

Volumen Nabor Carrillo (1969) - "El hundimiento de la Ciudad de México". Secretaría de Hacienda y Crédito Público, México.

48



DIVISION DE EDUCACION CONTINUA  
CURSOS ABIERTOS  
VI CURSO INTERNACIONAL DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS  
MODULO II:

CONTAMINACION DE ACUIFEROS POR DESECHOS SOLIDOS, INDUSTRIALES, E HIDROCARBUROS  
DIRECTORIO DE ASISTENTES

Del 26 de septiembre al 7 de octubre de 1994.

- 1.- BELLO BARRADAS ALEJANDRO  
SUPERVISOR EN GEOLOGIA  
COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
MISSISSIPPI No. 71-5to. PISO  
COL. CUAUHEMOC  
DELEG. CUAUHEMOC  
TEL. 229 44 00 ext. 3051
- 2.- BUSTINDUI ARRAMBIDEZ V. MANUEL  
GERENTE TECNICO  
INGENIAL, S.A. DE C.V.  
NUEVA YORK No. 310-4to. PISO  
COL. NAPOLES, C.P. 03810  
DELEG. BENITO JUAREZ  
TEL. 543 75 83
- 3.- CAMARA ZI ALFREDO JESUS  
TECNICO ACADEMICO ASOCIADO "C"  
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE YUCATAN  
FACULTAD DE INGENIERIA  
AV. MAQUILADORAS TAB. CAT. 12685  
PARQUE DE INDUSTRIAS NO CONTAMIANATES  
TEL. 99 44 70 87  
MERIDA, YUCATAN
- 4.- CASTILLO PARAMO RAMON M.  
JEFE DE DEPTO. COMP. ESTRUCTURAS  
COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
AV. MANUELITO No. 32  
COL. OLIVAR DEL PADRE  
DELEG. CONTRERAS  
C.P. 07180  
TEL. 595 60 75
- 5.- CORDERO HERNANDEZ HERMINIO  
SUBCOORDINADOR DE SUPERVISION DEL RELLENO  
PROCESA, INGENIERIA Y ECOLOGIA  
RANCHO SECO No. 127  
COL. SANTA CECILIA  
DELEG. COYOACAN  
C.P. 04930  
TEL. 594 58 30
- 6.- CORTES SALAZAR LUIS GERARDO  
JEFE DE UNIDAD HIDROGEOLOGICA  
C.N.A.  
FEDERALISMO NORTE No. 275  
SECTOR HIDALGO  
TEL. 626 43 59
- 7.- GAMEZ GONZALEZ F. JAVIER  
ESPECIALISTA EN HIDRAULICA  
COMISION NACIONAL DEL AGUA  
AV. CONSTITUYENTES No. 29 OTE.  
COL. CENTRO  
QUERETARO, QRO.  
TEL. 91 42) 13 56 28
- 8.- GARIBAY OROZCO RAFAEL  
INGENIERO DE PROYECTO  
PROCESA INGENIERIA Y ECOLOGIA, SA DE CV  
RANCHO SECO No. 127  
COL. SANTA CECILIA  
DELEG. COYOACAN, C.P. 04930  
TEL. 594 56 30
- 9.- GUARDADO CABRERA JORGE  
AUXILIAR DE PROYECTOS  
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO  
EJE CENTRAL LAZARO CARDENAS NORTE 152  
COL. SN. BAROLO ATEPEHUCAN  
DELEG. GUSTAVO A. MADERO, C.P. 07730  
TEL. 368 59 11 y 368 93 33
- 10.- LOMELI BADILLO FCO. MIGUEL  
ESPECIALISTA EN HIDRAULICA  
COMISION NACIONAL DEL AGUA  
ZACATECAS No. 87 SUR  
CENTRO, C.P. 63000  
TEPIC, NAYARIT  
TEL. 2 75 77

11.- RAMIREZ ESPITIA A. DANIEL  
INSPECTOR  
SECRETARIA DE DES. URBANO Y ECOLOGIA  
KM. 5.5 RECTA A CHOLULA  
PUEBLA  
TEL. 47 06 23

12.- RIVERA ROSAS MA. DOLORES  
LIDER DE PROYECTO  
INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO  
EJE CENTRAL LAZARO CARDENAS 152  
COL. SAN BARTOLO ATEPEHUACAN  
DELEG. GUSTAVO A. MADERO  
TEL. 368 59 11

13.- SEVILLA OLGUIN TERESA  
JEFE DE UNIDAD DEPARTAMENTAL  
D.G.C.O.H.  
DIVISION DEL NORTE No. 3330  
COL. CD. JARDIN  
DELEG. COYOACAN  
TEL. 549 82 20

14.- TIRADO JUAREZ BERNARDO  
ACADEMICO  
U.N.A.M.  
CIRCUITO INTERIOR

15.- VILLEGAS MARTINEZ RAUL  
JEFE DE TURNO  
D.G.C.O.H.  
DIVISION DEL NORTE No. 3330  
COL. XOTEPINGO  
DELEG. COYOACAN  
TEL. 544 51 81