

**XV DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE CONTAMINACIÓN  
Y RESTAURACION DE SUELOS Y ACUÍFEROS**

**MÓDULO 2.- RESTAURACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS  
CON CONTAMINANTES ORGÁNICOS**

**DEL 30 DE AGOSTO AL 3 DE SEPTIEMBRE DEL 2004**

<b>DIA</b>	<b>HORA</b>	<b>TEMA</b>	<b>PROFESOR</b>
LUNES 30	9:00 A 14:00	LA GEOHIDROLOGIA EN LA CONTAMINACION DE ACUÍFEROS. CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS. PROSPECCIÓN	ING. JUAN MANUEL LESSER
	16:00 A 19:00	CARACTERISTICAS DE LOS HCs MAS COMUNES	
MARTES 31	9:00 A 14:00	REMEDIACION DE SITIOS CONTAMINADOS	ING. JUAN MANUEL LESSER
	16:00 A 19:00	EDAFOLOGÍA, MUESTREO DE SUELOS	DRA. SILKE CRAM
MIÉRCOLES 01	9:00 A 11:30	COMPORTAMIENTO DE COMPUESTOS ORGÁNICOS	DRA. SUSANA SAVAL
	10:00 A 19:00	COMPORTAMIENTO DE COMPUESTOS ORGÁNICOS	
JUEVES 02	9:00 A 14:00	VISITA Y PRÁCTICA SOBRE REMEDIACIÓN	DRA. SUSANA SAVAL
	16:00 A 19:00	VISITA Y PRÁCTICA SOBRE REMEDIACIÓN	
VIERNES 03	9:00 A 14:00	CALIDAD DEL AGUA	M. C. FERNANDO LARA
	16:00 A 19:00	REMEDIACIÓN Y NORMATIVIDAD	DRA. SUSANA SAVAL



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

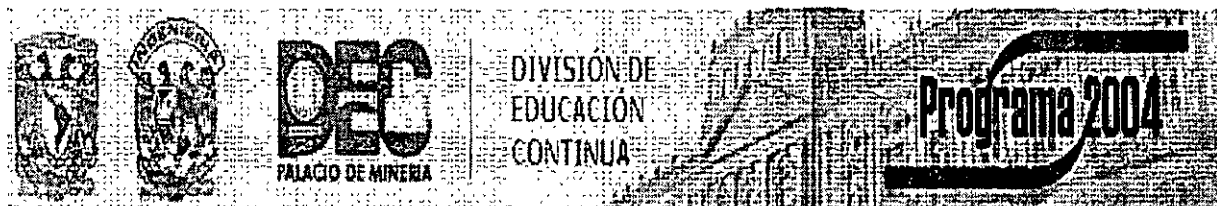


**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE  
SUELOS ACUIFEROS  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS Y  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**


**TEMA:  
HIDROQUIMICA DE LAS AGUAS NATURALES**

**EXPOSITORES: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**



# HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS NATURALES

• Por: Ing. Juan Manuel Lesser

[Saltar a la primera  
página](#) 

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 contrastes 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, 473 p.

Hem, John. (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Surver Water-Supply paper 2254.



## CAPÍTULO 2.- GENERALIDADES

### 2.1. EL CICLO HIDROLÓGICO

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 HIDROLÓGICO

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 atrapada 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.- QUÍMICA DEL AGUA DEL CICLO HIDROLÓGICO

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.)

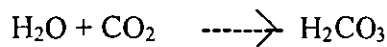
La composición química general del agua de lluvia, según Garrels y Mackenzie (1971), es la siguiente:

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 se 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.

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. (figuras 2.3 y 2.4).

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 esa roca es de difícil disolución; además tendrá aproximadamente, la misma cantidad de calcio, magnesio y sodio.

#### 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. "Envolution of the Sedimentary Rocks".

Hem, John. (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Surver Water-Supply paper 2254.

## **CAPITULO 3.- MÉTODO DE TRABAJO EN LA INTERPRETACIÓN HIDROGEOQUÍMICA**

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

### **3.1.- SELECCIÓN Y MUESTREO DEL AGUA SUBTERRÁNEA**

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.- ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS**

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.

**SÓLIDOS 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 ANÁLISIS QUÍMICOS**

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  $C/PA$  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	parte por millón
mg/l	miligramos por litro
me/l	miliequivalentes por litro
mol/l	moles por litro

### 3.4.- ELABORACIÓN DE TABLAS, PLANOS Y DIAGRAMAS E INTERPRETACIÓN 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 resume 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.

En la figura 3.2 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 figura 3.3. 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 calcio, 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 figura 3.3 se graficaron muestras de agua tipo sódico-clorurada, mixta-mixta y cálcico-bicarbonatada.

d).- Resistividades y sólidos totales disueltos.- La resistividad es una medida indirecta de los sólidos totales disueltos (S.T.D.) que contienen el agua, ya que sus valores son inversamente proporcionales a éstos últimos. Tomando en cuenta esta característica, se forma una gráfica (fig. 3.4) 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.

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

## REFERENCIAS

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

Hem, John. (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2254.

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

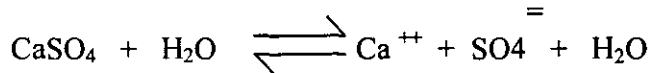
## CAPITULO 4.- GRADO DE SATURACIÓN DEL AGUA RESPECTO A LOS MINERALES MÁS COMUNES

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.- METODOLOGÍA

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

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



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

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

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

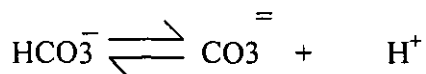
$$K_{ai} = [\text{Ca}^{++}] [\text{SO}_4^-] \text{-----}(1)$$

De manera similar para la calcita se tiene:



$$K_{ai} = [\text{Ca}^{++}] [\text{CO}_3^-] \text{-----}(2)$$

Debido a que los análisis no reportan carbonato, ( $\text{CO}_3^-$ ), se utilizó la determinación de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), sustituyendo la fórmula (2) de la siguiente manera:



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

Despejando:

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

Sustituyendo en la ecuación (2):

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

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

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

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

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

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, 1985) I es la fuerza iónica calculada por la fórmula:

$$I = \frac{1}{2} \sum (M_i \cdot Z_i^2)$$

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

La constante de actividad iónica (K<sub>ai</sub>), 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)

$$\begin{aligned} K_e (\text{calcita}) &= 10^{-8.34} \\ K_e (\text{yeso}) &= 10^{-4.61} \end{aligned}$$

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

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. (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2254.

Languimir, Donald. (1997). Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice Hall, New Jersey. 437 p.

Stumm, W. and J. Morgan, 1970. "Aquatic Chemistry". an Introduction. Emphasizing Chemical Equilibria in Natural Waters.

## **CAPÍTULO 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.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA INTRUSIÓN 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 condiciones 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 el mismo nivel de referencia.

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

### 5.3.- MECANISMO DE LA INTRUSIÓN SALINA

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

### 5.4.- MÉTODOS DE CONTROL DE LA INTRUSIÓN SALINA

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

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

a) Reducción de la extracción.- Una de las medidas técnicamente más sencillas para prevenir la intrusión de agua de mar, es la extracción de agua subterránea, a un nivel planificado. Esta medida implica una disminución en las demandas de agua lo cual,

en ocasiones crea problemas socioeconómicas y políticas muy fuertes. Cuando se opta por este método y el bombeo es reducido, puede establecerse nuevamente el gradiente hacia el mar y la intrusión es reemplazada por un ligero flujo de agua dulce hacia el mar. Si existe información suficiente sobre la variación de los niveles del agua y si se conocen las condiciones geológicas del subsuelo, la reducción de la extracción puede ser controlada de tal manera, que se obtenga la máxima cantidad de agua sin provocar una intrusión salina nociva.

- b) Recarga artificial.- Para ello es necesario contar con una fuente adicional de agua así como condiciones apropiadas del terreno, de tal manera, que la recarga puede llevarse a cabo. Las obras para la recarga pueden consistir en zanjas superficiales construidas en el área de recarga a través de las cuales se hace circular agua que se infiltra al subsuelo. Otro tipo de obras, consiste en la construcción de presas de infiltración, localizadas en la zona de recarga. En zonas donde existen capas confinantes impermeables, pueden construirse pozos de inyección. Al llevar a cabo esta recarga se provoca la reinversión del gradiente hacia el mar, la cual es acompañada por un flujo de agua dulce. La recarga, en esta forma, es económica, respecto a los otros métodos, pero en la mayoría de los casos no se cuenta con fuentes de agua adicional para llevarla a cabo.
- c) Fronteras impermeables.- Consiste en la construcción de una barrera impermeable entre la línea de costa y los pozos de explotación. El medio de construcción puede ser excavando una zanja que posteriormente se rellena con materiales arcillosos. Otro tipo de barrera. Consiste en el inyectado de material impermeable. Estas construcciones son usadas solo en áreas relativamente someras. Es importante, el conocer los resultados posteriores a su construcción, ya que, si la impermeabilización es completa, permitirá abatimientos fuertes y por lo tanto la obtención de mayores volúmenes de agua almacenada. Este método tiene la desventaja de no contar con un flujo de agua subterránea hacia fuera de la zona, que en ocasiones, es necesario para mantener un balance de sales favorables.
- d) Barrera de pozos de bombeo.- Consiste en una línea de pozos localizados entre la zona de explotación del valle y el mar. Los pozos, deben de extraer toda el agua de mar que intrusiona al acuífero, hasta obtener un equilibrio hidrostático. Para ello, los niveles de agua deben de ser bajados en la barrera, más que en cualquier otro punto en la cuenca. El volumen de extracción que se lleva a cabo en el valle, debe de ser reducido, cuando menos una cantidad ligeramente menor a la que se obtenía antes de aplicar el método. Es importante, disponer del registro de los niveles del agua en la zona de la barrera, así como el conocer la cantidad exacta de agua que se debe bombear para obtener los resultados deseados. Esta cantidad de agua que se debe de extraer, es muy variable y deberá de ser mayor al volumen de agua de mar que originalmente intrusionaba.

Mientras más cerca del mar se localiza la barrera, el bombeo tendrá que ser mayor.

- e) Barrera con pozos de inyección.- Este método para control de intrusiones salinas, consiste en la construcción de pozos de inyección alineados a lo largo de la costa, su

funcionamiento va a depender de la resistencia que encuentre el agua al moverse en el subsuelo.

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

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

## REFERENCIAS

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

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

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

Driscoll, Fletcher (1986). Groundwater and Wells. Filter/Johnson Screens, Ed. St. Paul, MN. 1089 p.

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

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

## **CAPITULO 6.- CALIDAD DEL AGUA**

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

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

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

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

### **6.1.- AGUA POTABLE**

Las normas de calidad para el agua potable, conocidas también como límites máximos permisibles, se publicaron en el Diario Oficial el 18 de enero de 1988, los cuales se transcriben a continuación:

Características de algunos elementos críticos como los que se mencionan a continuación.

## **CROMO**

El cromo se define como un elemento químico metálico con una alta resistencia a la corrosión y que es utilizado por un gran número de industrias. La forma como se encuentra en yacimientos naturales es como cromita cuya fórmula es  $FeCr_2O_4$ . Los compuestos de cromo más importantes son: cromato de sodio y potasio. Se puede encontrar también como cromo metálico ( $Cr^{++}$ ), cromo trivalente y como cromo hexavalente. Esta última forma tiene tendencia a ser reducida por especies orgánicas.

En el agua se puede encontrar en forma soluble. Proviene de la disolución de sales de cromato de sodio, cromato de potasio y cromato de amonio. Es utilizado comúnmente en industrias electrónicas, en plantas textiles, en industrias de vidrio y de materiales fotográficos. También se utiliza en la industria del calzado, en pinturas y tintes, así como en explosivos, fábricas de cerámica y papel. Exceso de cromo en el agua potable causa problemas en el hígado y pulmones con síntomas de hemorragia, así como problemas en la piel. Se clasifica como cancerígeno y dentro del grupo I (International Agency for Research on Cancer - IARC). La norma de calidad para el agua potable de acuerdo a la USEPA 1989 (U.S. Environmental Protection Agency), es de 0.1 miligramos por litro. La Norma Oficial Mexicana (NOM) indica una concentración máxima de 0.05 miligramos por litro de cromo hexavalente para el agua potable.

## **NITRITOS Y NITRATOS**

Los nitratos ( $NO_3$ ) son un producto de la estabilización aeróbica del nitrógeno orgánico. Otra fuente de nitratos son sales minerales.

Los nitritos ( $NO_2$ ) se forman por la acción bacteriana del amonio y del nitrógeno orgánico. Generalmente sus concentraciones en el agua son muy reducidas debidas a la rápida oxidación de los nitritos a nitratos. Se encuentra generalmente en aguas tratadas, tanto municipales como agrícolas.

Los nitritos se utilizan como fertilizante, así como agente oxidante en la industria química. En la industria alimenticia, son utilizados como preservador de alimentos, particularmente en carnes y quesos.

Los nitritos al ser ingeridos por el hombre, actúan en la sangre como oxidante de la hemoglobina. Se clasifica dentro del Grupo D en relación al riesgo cancerígeno (USEPA, 1985) y en publicaciones recientes se indica que no existen suficientes datos para su clasificación por lo que se recomiendan estudios más profundos. La norma de calidad para agua potable de acuerdo a la MCLG y MCL (1989) indican 10 miligramos por litro para los nitratos y un miligramo por litro para los nitritos. (MCLG = Nonenforceable standars to be used as a guide; MCL = maximun contaminant level). La Norma Oficial Mexicana indica 5 mg/l para los nitratos y 0.05 mg/l para los nitritos



## SILICE

Se expresa como óxido de sílice,  $\text{SiO}_2$  y es ampliamente utilizado para referirse al sílice que se encuentra en las aguas naturales pero debe entenderse que la forma en que se encuentra es hidratado y su representación real es  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  o bien  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

El sílice puede ser incorporado en el agua a partir de la disolución de feldespatos sódicos como la albita. Concentraciones mayores se encuentran en relación con aguas de origen geotermal. Estudios de geotermia basan o utilizan la determinación de sílice en el agua para calcular la profundidad de formación y temperatura, tendiente a estudiar los yacimientos geotérmicos y a localizar sitios para perforación de pozos geotérmicos. A las determinaciones de temperaturas basadas en edad se le denomina geotermómetros.

El rango en que generalmente se encuentra el sílice en el agua de acuerdo a la literatura, es de 1 a 30 miligramos por litro, sin embargo, concentraciones arriba de 100 mg/l llegan a ser comunes en zonas como la estudiada (comunicación verbal del laboratorio), donde el agua ha circulado a través de rocas que incluyen sílice entre los minerales que las constituyen y que han estado sujetas a altas temperaturas.

## ARSENICO

El arsénico es un elemento químico sólido, semimetálico, que destaca por su alta toxicidad hacia humanos. Se encuentra en forma de compuestos siendo el más común la arsenopirita ( $\text{FeSAs}$ ). Es utilizado por industrias de vidrio, cerámica, tintes y como insecticida en la agricultura, etc. Recientemente se ha venido utilizado en estado sólido en transistores y parte de material laser.

El arsénico como As es insoluble en agua pero varias sales sí presentan solubilidad. Concentraciones de 100 mg suelen ser venenosas para los humanos y letales en rangos de 130 mg. El arsénico se acumula en los tejidos del cuerpo humano. Ha sido reportado como venenoso cuando se encuentra en concentraciones que varían de 0.21 y 10.0 mg/l. No se ha encontrado que presente problemas de cáncer porque, antes que eso, primeramente, se considera venenoso o tóxico. La norma de calidad reciente publicada por la MCLG USEPA 1987, indica que el agua debe de contener menos de 0.05 mg/l para consumo humano. Mismo valor consigna la Norma oficial Mexicana.

## 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.

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

Donde las concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$  están dadas en equivalentes por litro. Con esta relación se obtiene el peligro que entraña el uso del agua para riego, el cual, como puede apreciarse en la fórmula, queda, supeditado a las concentraciones absoluta y relativa de los principales cationes.

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

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

drenaje, lavados fuertes y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos no desarrollarán niveles perjudiciales de sodio intercambiable. Los mejoradores químicos deberán usarse, para el reemplazo de sodio intercambiable, excepto en el caso de que no sea factible el uso de mejoradores en aguas de muy alta salinidad.

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

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

Tabla 6.2.- Tolerancia de cultivos a las sales  
Frutales

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
Palma - dátiles	Granada Higuera Olivo Vid Melón	Peral Manzano Naranja Toronja Ciruela Almendro 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 Papas Zanahoria Cebolla Chicharos Calabaza Pepinos	$CE_e \times 10^3 = 4$ Rábano Apio Ejotes
$CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 4$	$CE_e \times 10^3 = 3$

## Plantas forrajeras

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

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

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

#### CUANDO ACEPTAN

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

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

Tabla 6.3.- Cultivos tolerantes, semitolerantes y sensibles a las sales

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

(En orden descendente de más a menos tolerante)

MUY TOLERANTES	MEDIANAMENTE TOLERANTES	POCO TOLERANTES
Cebada folium (para heno tripata de pájaro)	Trigo (para heno) Avena (para heno) Gramma azul Bromo suave Veza lechosa Cicer	
$CE_e \times 10^3 = 12$	$CE_e \times 10^3 = 4$	$CE_e \times 10^3 = 2$
CULTIVOS COMUNES		
$CE_e \times 10^3 = 12$	$CE_e \times 10^3 = 10$	$CE_e \times 10^3 = 4$
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.- Límites máximos para algunos animales

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

#### 6.4.- AGUA PARA LA INDUSTRIA

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

Una forma rápida de catalogar el tipo de agua para la industria, es conociendo su dureza. Esta normalmente se reporta en concentración de carbonato de calcio ( $\text{Ca CO}_3$ ).

Cuando un agua contiene concentraciones bajas de ese 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 papelera, así como en derivados del petróleo y embotelladoras.

Tabla 6.5.- Calidad del agua para algunas industrias  
(en mg/l)

CONSTITUYENTE	INDUSTRIA TEXTIL	INDUSTRIA PAPELERA	DERVIADOS DEL PETRÓLEO	EMBOTELLADORA
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, 1985)

## REFERENCIAS

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

De Zuane, John, (1990). Handbook of Drinking Water Quality, Standards and Controls. Van Nostrand Reinhold, New York, 523 p.

Drever, James, (1998). The Geochemistry of Natural Waters. Prentice Hall, New Jersey. 437 p.

Hem, John, (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply paper 2254.

Languimir, Donald, (1997). Aqueous Environmental Geochemistry. Prentice Hall, New Jersey, 600 p.

Driscoll, Fletcher (1986). Ground Water and Wells. Filter/Johnson Screens, Ed. St. Paul, MN. 1089 p.

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



## **CAPÍTULO 7.- SIGNIFICADO DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS 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.

### **ARSENICO**

El arsénico es un elemento químico sólido, semimetálico, que destaca por su alta toxicidad hacia humanos. Se encuentra en forma de compuestos siendo el más común la arsenopirita ( $\text{FeSAs}$ ). Es utilizado por industrias de vidrio, cerámica, tintes y como insecticida en la agricultura, etc. Recientemente se ha venido utilizado en estado sólido en transistores y parte de material laser.

El arsénico como As es insoluble en agua pero varias sales sí presentan solubilidad. Concentraciones de 100 mg suelen ser venenosas para los humanos y letales en rangos de 130 mg. El arsénico se acumula en los tejidos del cuerpo humano. Ha sido reportado como venenoso cuando se encuentra en concentraciones que varían de 0.21 y 10.0 mg/l. No se ha encontrado que presente problemas de cáncer porque, antes que eso, primeramente, se considera venenoso o tóxico. La norma de calidad reciente publicada por la MCLG USEPA 1987, indica que el agua debe de contener menos de 0.05 mg/l para consumo humano. Mismo valor consigna la Norma oficial Mexicana.

### **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 contiene boratos.

Significado.- Cantidades pequeñas de este elemento, es esencial para crecimiento, 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 además, 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.

## **CONCENTRACIÓN DE HIDRÓGENO (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 ELÉCTRICA**

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.

## **CROMO**

El cromo se define como un elemento químico metálico con una alta resistencia a la corrosión y que es utilizado por un gran número de industrias. La forma como se encuentra en yacimientos naturales es como cromita cuya fórmula es  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . Los compuestos de cromo más importantes son: cromato de sodio y potasio. Se puede encontrar también como cromo metálico ( $\text{Cr}^{++}$ ), cromo trivalente y como cromo hexavalente. Esta última forma tiene tendencia a ser reducida por especies orgánicas.

En el agua se puede encontrar en forma soluble. Proviene de la disolución de sales de cromato de sodio, cromato de potasio y cromato de amonio. Es utilizado comúnmente en industrias electrónicas, en plantas textiles, en industrias de vidrio y de materiales fotográficos. También se utiliza en la industria del calzado, en pinturas y tintes, así como en explosivos, fábricas de cerámica y papel. Exceso de cromo en el agua potable causa problemas en el hígado y pulmones con síntomas de hemorragia, así como problemas en la piel. Se clasifica como cancerígeno y dentro del grupo 1 (International Agency for Research on Cancer - IARC). La norma de calidad para el agua potable de acuerdo a la USEPA 1989 (U.S. Environmental Protection Agency), es de 0.1 miligramos por litro. La Norma Oficial Mexicana (NOM) indica una concentración máxima de 0.05 miligramos por litro de cromo hexavalente para el agua potable.

## **DUREZA COMO $\text{CaCO}_3$**

Fuente o causa de origen.- En la mayoría de los casos, la dureza es debida a el calcio y el magnesio.

Significado.- Consume jabón y no produce espuma. Forma depósitos de jabón en baños. El agua dura incrusta calderas y tuberías Dureza es equivalente de dureza de carbonatos y bicarbonatos.

## **ESTRONCIO (Sr)**

Fuente o causa de origen.- Proviene de la disolución de rocas y suelos, en especial de rocas carbonatadas y rocas de origen ígneo.

Significado.- Las concentraciones son en general muy bajas.

## **FIERRO (Fe)**

Fuente o causa de origen.- Proviene de la disolución de suelos, rocas y de tuberías, bombas y equipos similares. Concentraciones mayores a 1 ó 2 ppm, generalmente indican drenaje de zonas mineras u otra fuente.

Significado.- Expuesto a la superficie, el fierro disuelto en el agua se oxida formando un sedimento rojizo. Más de 0.3 ppm, mancha lavadoras y utensilios. Elemento nocivo en el proceso de bebidas, tintes, blanqueadores, hielo, etc. Grandes concentraciones, producen un sabor desagradable y favorece el crecimiento de bacterias.

### **FLUORURO (F)**

Fuente o causa de origen.- Se encuentra diseminado en cantidades muy pequeñas, en casi todo tipo de rocas y suelos.

Significado.- Reduce la picadura de dientes (caries) en los niños durante la época de calcificación. En excesos de este elemento, produce el decaimiento de la dentadura, el cual dependerá de la concentración de flúor, la edad del consumidor, la cantidad de agua que se consuma y la susceptibilidad de cada individuo.

### **FOSFATO (PO<sub>4</sub>)**

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.

## **NITRITOS Y NITRATOS**

Los nitratos ( $\text{NO}_3$ ) son un producto de la estabilización aeróbica del nitrógeno orgánico. Otra fuente de nitratos son sales minerales.

Los nitritos ( $\text{NO}_2$ ) se forman por la acción bacteriana del amonio y del nitrógeno orgánico. Generalmente sus concentraciones en el agua son muy reducidas debidas a la rápida oxidación de los nitritos a nitratos. Se encuentra generalmente en aguas tratadas, tanto municipales como agrícolas.

Los nitritos se utilizan como fertilizante, así como agente oxidante en la industria química. En la industria alimenticia, son utilizados como preservador de alimentos, particularmente en carnes y quesos.

Los nitritos al ser ingeridos por el hombre, actúan en la sangre como oxidante de la hemoglobina. Se clasifica dentro del Grupo D en relación al riesgo cancerígeno (USEPA, 1985) y en publicaciones recientes se indica que no existen suficientes datos para su clasificación por lo que se recomiendan estudios más profundos. La norma de calidad para agua potable de acuerdo a la MCLG y MCL (1989) indican 10 miligramos por litro para los nitratos y un miligramo por litro para los nitritos. (MCLG = Nonenforceable standars to be used as a guide; MCL = maximun contaminant level). La Norma Oficial Mexicana indica 5 mg/l para los nitratos y 0.05 mg/l para los nitritos

## **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.

## **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 se encuentra en plantas o agua para el ganado.

## **SILICE ( $\text{SiO}_2$ )**

Se expresa como óxido de sílice,  $\text{SiO}_2$  y es ampliamente utilizado para referirse al sílice que se encuentra en las aguas naturales pero debe de entenderse que la forma en que se encuentra es hidratado y su representación real es  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  o bien  $\text{Si}(\text{OH})_4$ .

El sílice puede ser incorporado en el agua a partir de la disolución de feldespatos sódicos como la albita. Concentraciones mayores se encuentran en relación con aguas de origen geotermal. Estudios de geotermia basan o utilizan la determinación de sílice en el agua para calcular la profundidad de formación y temperatura, tendiente a estudiar los yacimientos geotérmicos y a localizar sitios para perforación de pozos geotérmicos. A las determinaciones de temperaturas basadas en edad se le denomina geotermómetros.

El rango en que generalmente se encuentra el sílice en el agua de acuerdo a la literatura, es de 1 a 30 miligramos por litro, sin embargo, concentraciones arriba de 100 mg/l llegan a ser comunes en zonas como la estudiada (comunicación verbal del laboratorio), donde el agua ha circulado a través de rocas que incluyen sílice entre los minerales que las constituyen y que han estado sujetas a altas temperaturas.

### **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.

### **SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS**

Fuente o causa de origen.- Proviene de la disolución de minerales que forman los suelos y las rocas. Puede incluir constituyentes orgánicos y agua de cristalización.

Significado.- El valor de los sólidos totales disueltos, es una medida de todas las concentraciones que se encuentran en el agua. Es un índice importante en la determinación de los usos del agua.

### **SULFATOS (SO<sub>4</sub>)**

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**

De Zuane, John, (1990). Handbook of Drin King Water Quality, Standards and Controls. Van Nostrand Reinhold, New York, 523 p.

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, Jhon, 1971. "Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water". G.S.E.S:P. 1473.

Hem, John, (1985) Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Surver Water-Supply Paper 2254

## **CAPÍTULO 8.- TRAZADORES DE AGUA SUBTERRÁNEA**

### **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: fluoriceínas, sales, esporas e isótopos. Las fluoriceínas 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.- INTRODUCCIÓN**

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; resistente 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.- FLUORESCENCIAS

Son sustancias que tienen la propiedad de emitir luz fluorescente. La longitud de cada 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 diluida.

La intensidad de fluorescencia depende del pH. En la figura 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 (figura 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 uranina es absorbida y concentrada de 50 a 500 veces por el carbón y su concentración medida posteriormente.

Para extraer la uranina del carbón, se le agrega a éste algunas gotas de una de las siguientes preparaciones:

Una parte de alcohol etílico al 95% y una parte de hidróxido de potasio diluido al 15% en agua destilada.

Ocho partes de N-N Dimetilformadín (DMF), dos partes de agua destilada y una gota de NH<sub>3</sub>.

Por último, la urganina 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 diluida. 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 APLICACIÓN DE FLUORESCENCIA.- 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 después de la inyección, y la concentración del trazador fue aumentando hasta llegar a 32 mg/m<sup>3</sup>, según se muestra en la figura 8.3.

Otro ejemplo ilustrativo de la aplicación de trazadores, ahora en acuíferos granulares someros es el siguiente:

En un valle aluvial que presenta un acuífero freático a 3 m de profundidad, se perforaron 9 pozos a 3" de diámetro y 5 m de profundidad, distribuidos en la forma como se ilustra en la figura No. 8.4.

En el pozo central, se inyectó uranina y se obtuvieron muestras de agua en el resto de los pozos, cada 20 minutos.

Después de 3 horas 20 minutos de la inyección, se detectó uranina solamente en los pozos 4 y 5, de donde se puede obtener que el agua subterránea fluye en dirección sureste, a una velocidad de 1.5 m/hr.

Este método es utilizado en zonas sin información y su aplicación queda limitada por la profundidad a que se encuentre el nivel estático, ya que mientras mayor es ésta, mayor es el costo de los pozos de muestreo e inyección.

#### 8.4.- SALES

Las sales son el trazador artificial de agua subterránea más antiguo que se conoce se haya aplicado con éxito. Los productos utilizados más comunes son: sal de cloruro de sodio y sal de cloruro de potasio.

La sal es disuelta en agua y posteriormente incorporada al acuífero. Una de las desventajas que presenta este método, es que requiere que en la zona de inyección el caudal de agua que entre al acuífero sea grande. Por otra parte se necesita una gran cantidad de sal en cada experimento.

En zonas cársticas, para distancias entre 3 y 5 km. se requiere inyectar un mínimo de 500 kg. de sal (Zotl, 1975). La cantidad más grande que se ha llegado a inyectar en un

experimento de trazadores, fue de 50 toneladas de NaCl, (W. Kass. En H Batsche et, al., 1970), donde después de 4 días, se encontró en uno de los manantiales de observación un incremento de cloruros de solo 39 ppm.

Los grandes volúmenes de trazador requeridos mediante este método, hacen que su uso sea limitado. La ventaja consiste en que pueden efectuarse determinaciones cuantitativas.

Ejemplo sobre la aplicación de sales.- Durante los trabajos realizados para conocer la posible conexión entre el agua de un río que se infiltraba en una dolina y dos manantiales localizados a 5 kilómetros de ésta, como se mencionó en párrafos anteriores, se inyectaron 50 kg. de cloruro de sodio y 400 kg. de cloruro de potasio.

Posteriormente se obtuvieron muestras de agua con intervalos de dos horas cada una, tanto en el manantial "H" como en el "S", las cuales se analizaron químicamente determinándose el contenido de cloruros, sodio y potasio.

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

Por lo que se refiere al manantial "H", los resultados de los análisis se graficaron en la figura 8.5, donde se observa que 56 horas después de la inyección de las sales, se detectó un incremento en los iones determinados, ratificando la comunicación entre la dolina y el manantial.

Considerando el tiempo que tardo 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 filtra en la dolina.

## 8.5.- ESPORAS

Las esporas utilizadas como trazadores corresponden al tipo *Lycopodiun 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 isóseles 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.

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 Asociation.

Dechant M., 1977; "The Dyeing of Lycopodiumspores" Notes of the Ground Water Tracing Techniques Course" Graz, Australia.

## CAPITULO 9.- ISÓTOPOS AMBIENTALES EN LA GEOHIDROLOGÍA

### 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 el 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, de origen al isótopos 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:  $\text{H}_2^1\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y  $\text{H}_2\text{O}^{18}$ .

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, Estándar 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.- Isótopos

NOMBRE	SÍMBOLO	VIDA MEDIA AÑOS	RANGO DE EDAD DETECTABLE
<u>Más comunes</u>			
Deuterio	D	12.4	0 – 50 años
Tritio	T		
Oxígeno 18	18 <sub>O</sub>		
Azufre 34	34 <sub>S</sub>		
Carbono 13	13 <sub>C</sub>	5730	500 – 40,000 años
Carbono 14	14 <sub>C</sub>		
Nitrógeno 15	15 <sub>N</sub>		
<u>Menos comunes</u>			
Cloro 37	37 <sub>Cl</sub>	103	50 – 100 años
Estroncio 86	86 <sub>Sr</sub>		
Boro 10	10 <sub>B</sub>		
Silicio 32	32 <sub>Si</sub>	269	100 – 1,000 años
Argon 39	39 <sub>Ar</sub>		
Krypton 85	85 <sub>Kr</sub>		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 MÉTODO DE ANÁLISIS

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 (estándar Mean Ocean Water). Se expresa en partes por mil.

$$\delta D = \frac{H^2/H^1 \text{ muestra} - H^2/H^1 \text{ SMOW}}{H^2/H^1 \text{ SMOW}} \times 1000$$

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

Las concentraciones de estos elementos son medidas por medio de espectrómetro de masas. Los niveles de precisión son de 0.2% para el oxígeno 18 y de  $\pm 2\%$  para el deuterio (University of Waterloo 1987).

La complejidad de la determinación hace que los costos por análisis sean elevados y que no se acostumbre realizarlos en forma rutinaria.

La determinación de estos análisis se efectúa mediante espectrómetros de masas, que en su mayoría están basados en el principio del espectrómetro de Nier.

El método de trabajo en la determinación de deuterio y oxígeno 18, es tratado por A. Cortés, 1986 y los principales aspectos del funcionamiento de un espectrómetro se comentan a continuación:

Un espectrómetro de masas es un aparato diseñado para separar moléculas de acuerdo a su relación masa-carga en base a su movimiento a través de campos eléctricos y/o magnéticos. Esencialmente, un espectrofotómetro de masas opera de acuerdo a los principios básicos de: Admisión del gas y formación de iones; aceleración y colimación de iones y; analizador magnético.

### 9.3.- RECTA METEÓRICA 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 relación 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.

### 9.4.- PROCESOS QUE MODIFICAN LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

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 la 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.

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 (Ferronsky 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.- VARIACIÓN ESTACIONAL

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

#### 9.4.2.- EFECTO POR LATITUD

Los isótopos varían también con la latitud, ya que la temperatura tiene influencia directa en su concentración. Se ha medido que, en las zonas tropicales, los valores de deuterio y oxígeno 18 son más altos y disminuyen hacia los polos. En general, existe una correlación entre el contenido de isótopos estables y la temperatura media anual, que a su vez está relacionada con la latitud. Para estaciones cercanas a los océanos y con temperaturas medias anuales en superficie (TA) menor de 10° C, se cumple que  $\delta^{18}\text{O} = 0.69 \text{ TA} - 13.16\%$  y  $\delta \text{D} = 5.6 \text{ TA} - 100\%$ . Aunque esto se cumple exclusivamente para estaciones en las líneas de costa, ya que tierra adentro está sujeta a otros efectos.

En la figura 9.6 se muestra la relación entre el oxígeno 18 y la temperatura media anual a diferentes latitudes y en la figura 9.7 la concentración de deuterio en función de la latitud y altitud.

### 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 EVAPORACIÓN

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  $\delta D = (5 \pm 1) \delta 18O + C$

#### 9.4.6.- EFECTOS GEOTÉRMICOS

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  $\delta D = (O \pm 2) \delta^{18}O$ .

#### 9.5.- MÉTODO GENERAL DE INTERPRETACIÓN

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 frías. 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 electrólisis 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 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.

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 10 U.T.; debido al decaimiento radioactivo, el agua que se infiltró en esa fecha, contiene ahora, teóricamente de 0.3 a 0.6 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 0.2 U.T., podemos inferir que se trata de agua precipitada hace más de 50 años y se puede denominar "agua antigua").

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 1.2 y 20 U.T. --

Posteriormente a 1963, la cantidad de tritio en la atmósfera ha ido decreciendo para aparentemente estabilizarse en nuestros días en 3 y 8 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.

## REFERENCIAS

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. Isotops studies of precipitation and Groundwater in the Sierra de Las Cruces, México.  
Submitted to Journal of Hydrogeology.

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, np. 1165-1312.

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.

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., Frapce, 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. Viena, Austria.

Fontes, J.C., 1980 Environmental Isotopes in Groundwater Hydrology: Hand book of Environmental Isotope Geochemistry. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Vol. 1, 75 p.

Latorre, C., Lesser, J. M., Quijano, L. Y Payne, B. 1980. Isótopos Ambientales Aplicados al Estudio de la Interconexión de los Acuíferos Calizos y de rellenos en la Región Lagunera de Coahuila-Durango, México. Interamerican Symposium on Isotope Hydrology. Bogotá, Colombia, pp. 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, Qro., Valle de Tlacolula, Oax., Piedras Negras, Coah., y San Ciro, S.L.P. Informes Inéditos. Biblioteca de la Dirección de Aguas Subterráneas, S.A.R.H.

Lesser, J. M. 1984. Aplicación de Isótopos Ambientales en los Alrededores del Río San Lorenzo, Sin. Boletín de Difusión Técnica y Científica No. 2, Asociación Geohidrológica Mexicana.

Lesser, J. M. 1987. Dictámen Geohidrológico-Isotópico para definir el funcionamiento y zonas de recarga del campo de pozos del área denominada Ojo de Agua de Patagalana, Municipio de Parras, Coah. Seminario de Hidrología Isotópica. IAEA-ININ, México.

Lesser y Asociados, S.A. 1985. Estudio Isotópico del Acuífero del Valle de México. Elaborado para la D.G.C.O.H. del D.D.F.

Lesser y Asociados, S.A. 1988. Aplicación de Isótopos Ambientales en la Zona de Monclova, Coah. Informe para Altos Hornos de México.





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

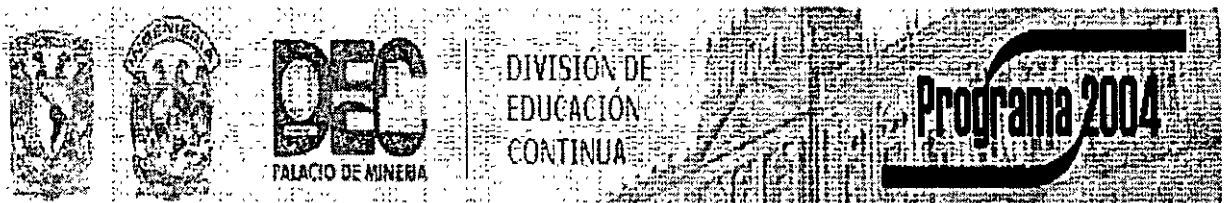


**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE  
SUELOS ACUIFEROS  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS Y  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
ESQUEMAS GENERALES I**

**EXPOSITORES: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**



MODULO

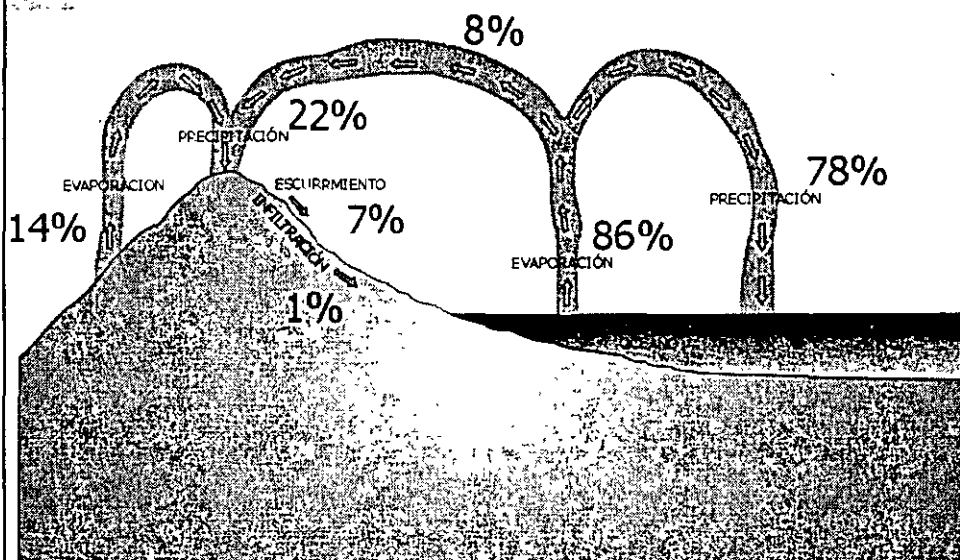
# HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS NATURALES

Por. Ing. Juan Manuel Lesser

Salta a la primera página



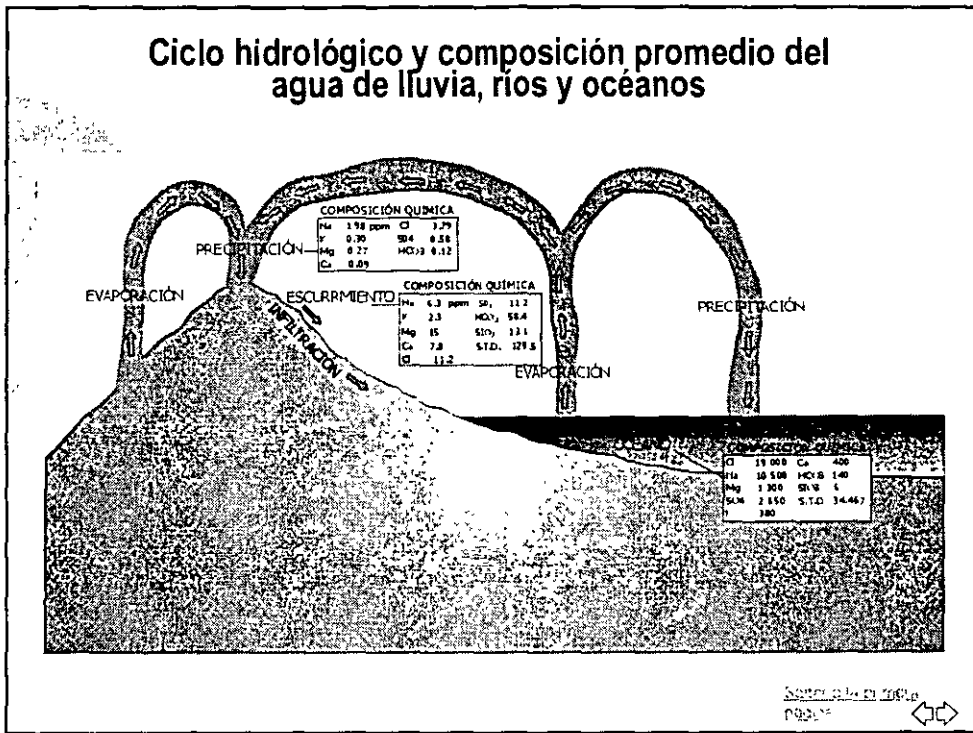
## Ciclo hidrológico



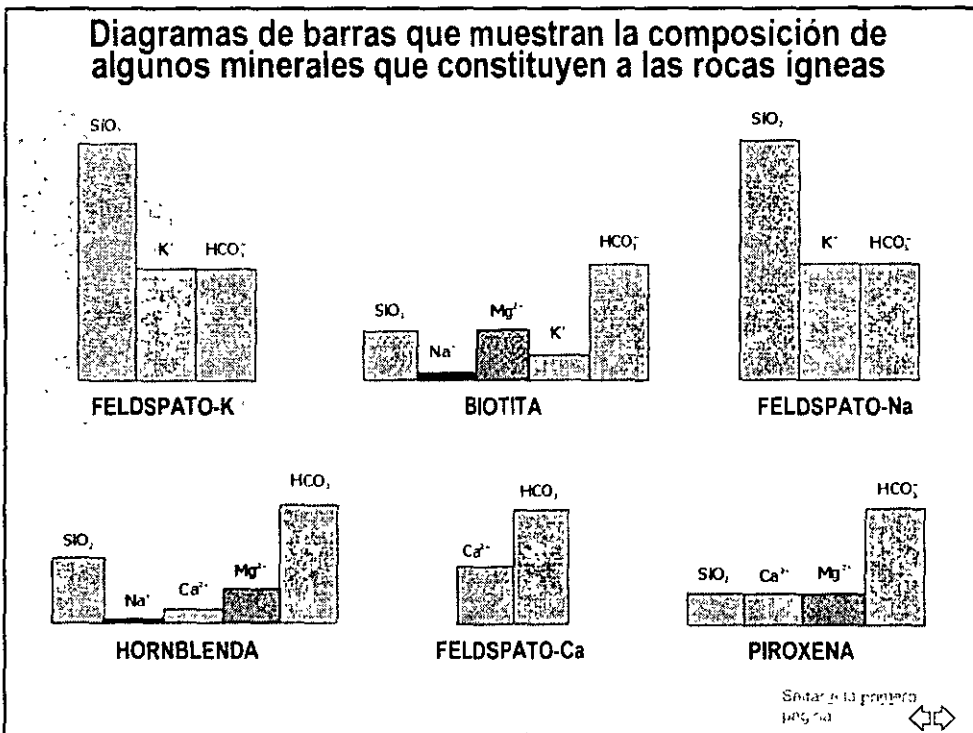
Salta a la primera página

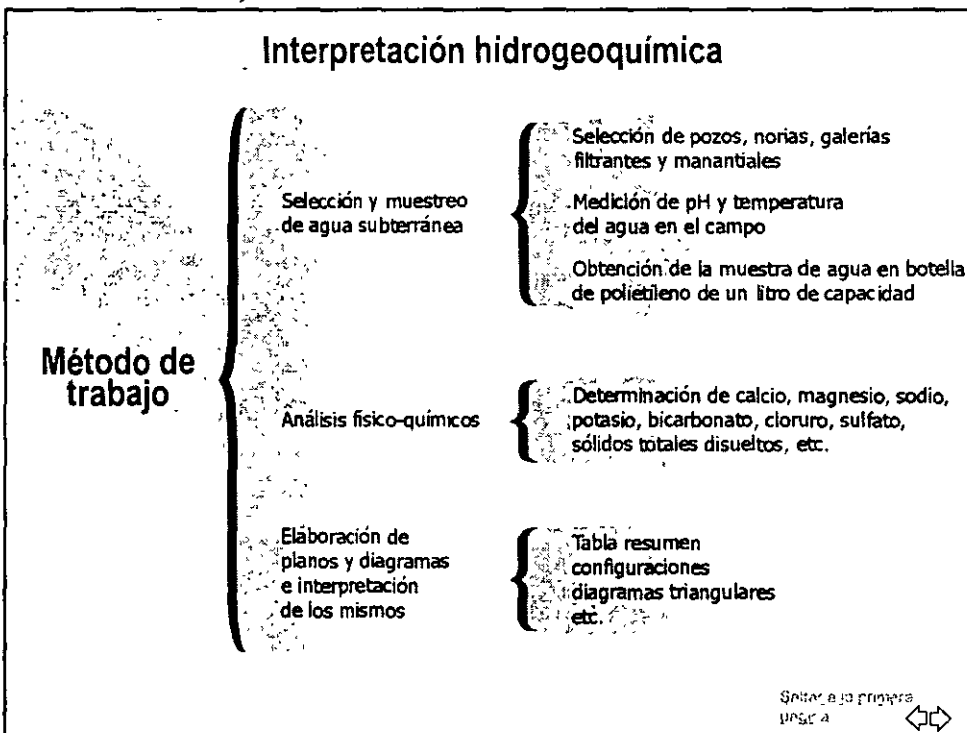
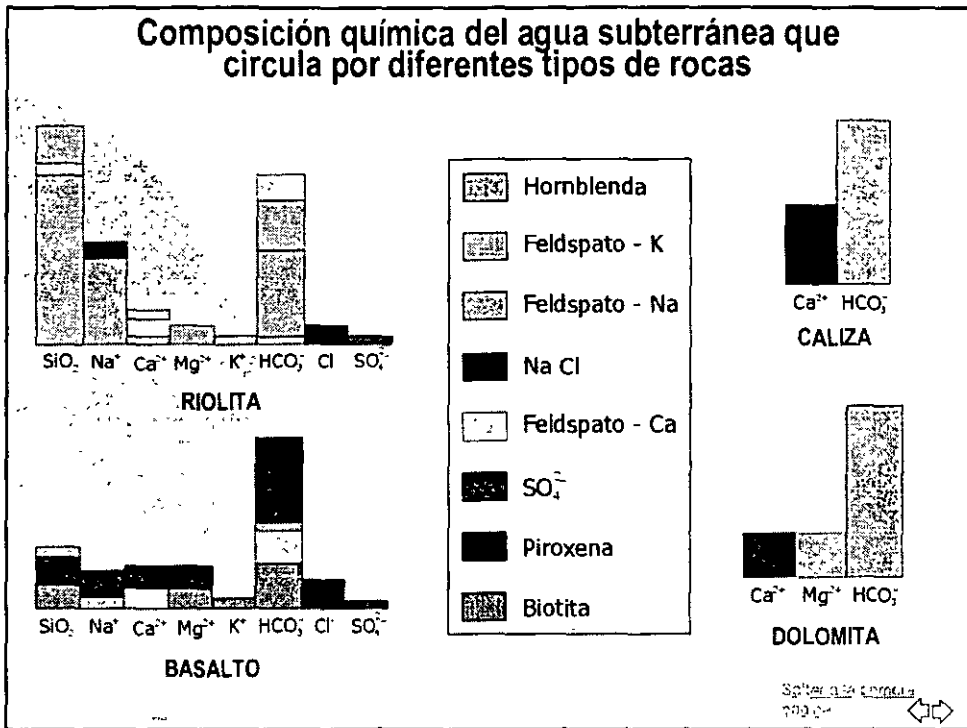


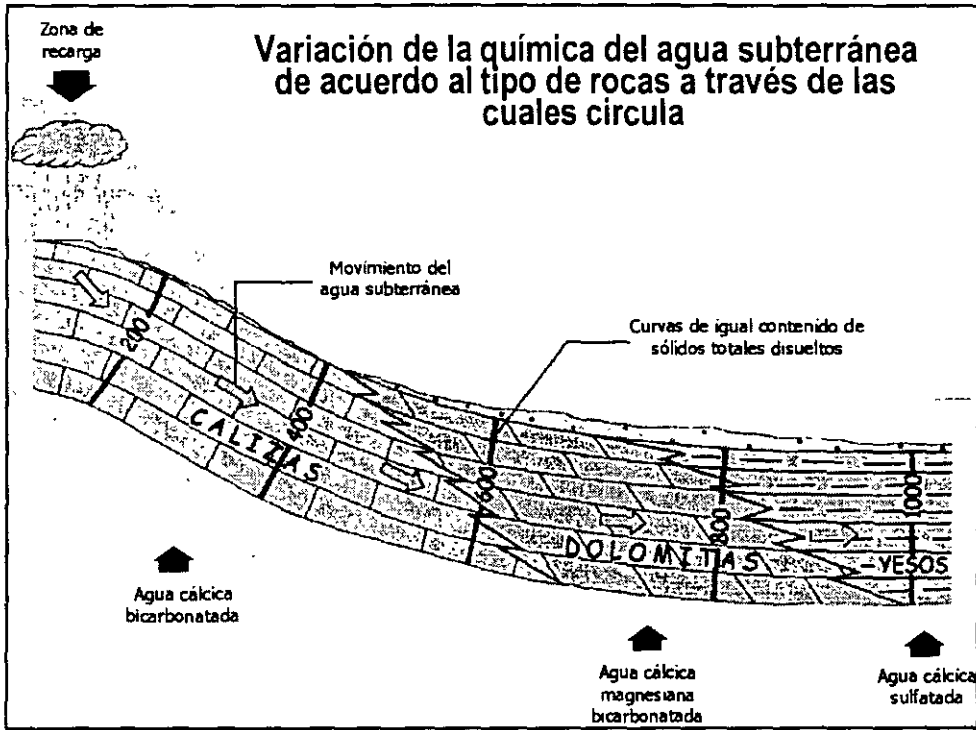
### Ciclo hidrológico y composición promedio del agua de lluvia, ríos y océanos



### Diagramas de barras que muestran la composición de algunos minerales que constituyen a las rocas ígneas



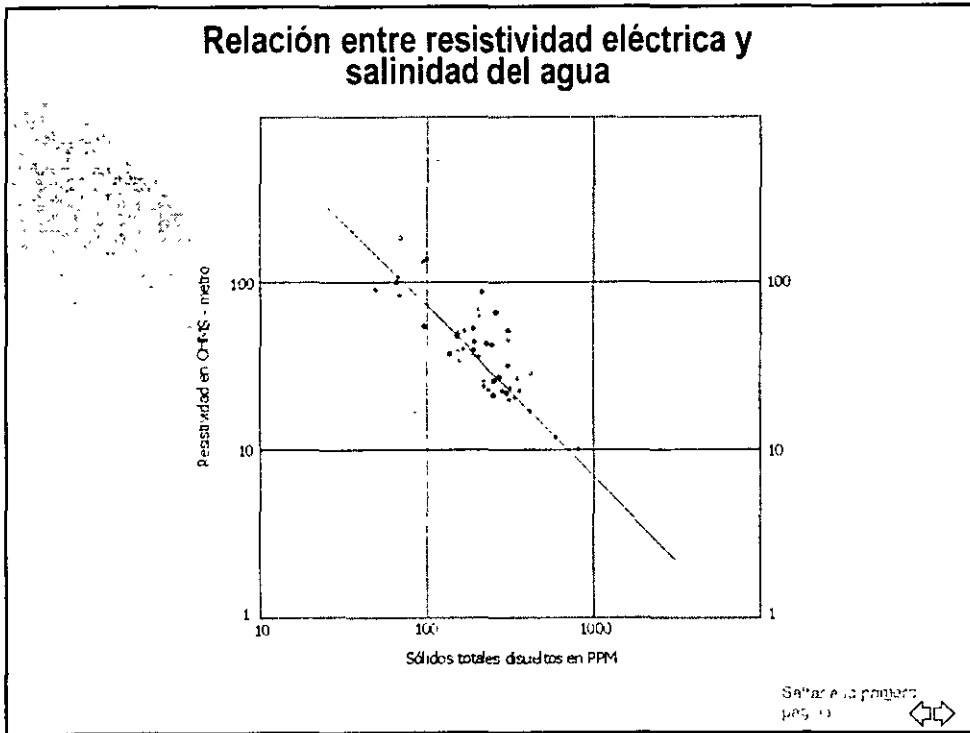
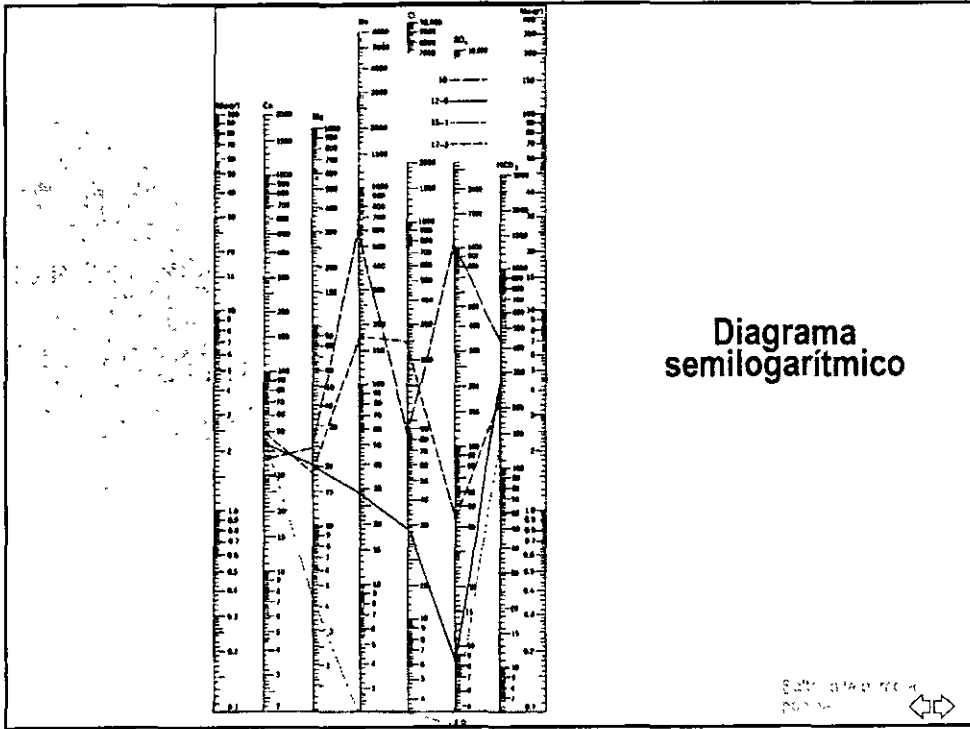


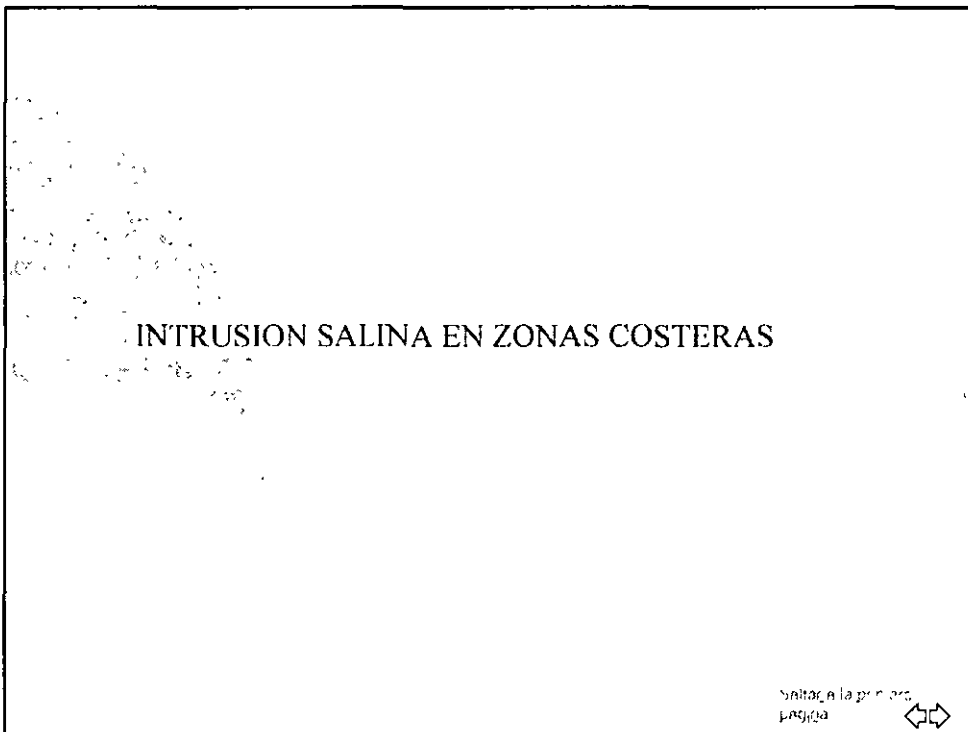


### REPRESENTACIONES GRAFICAS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA

Saltar a la primera página

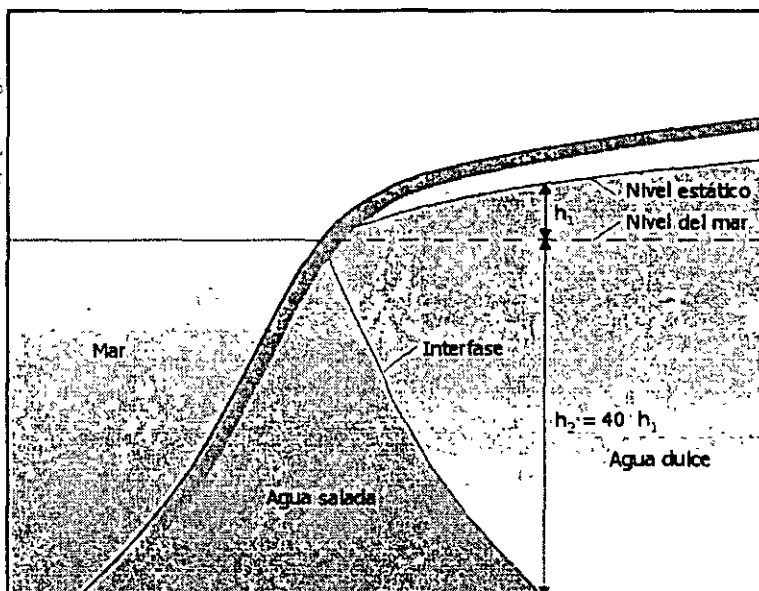






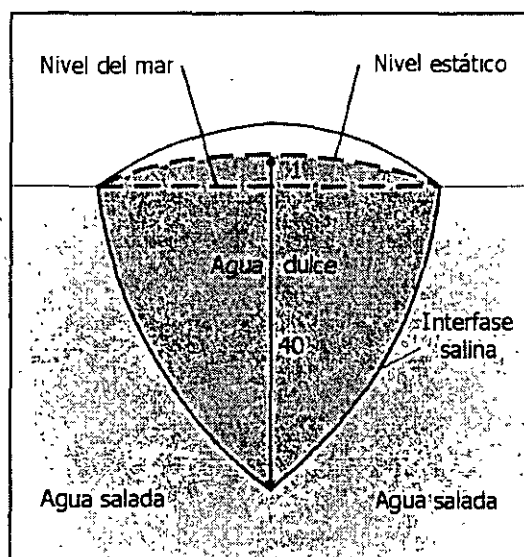


### Intrusión salina según la teoría de Gyben Herzberg

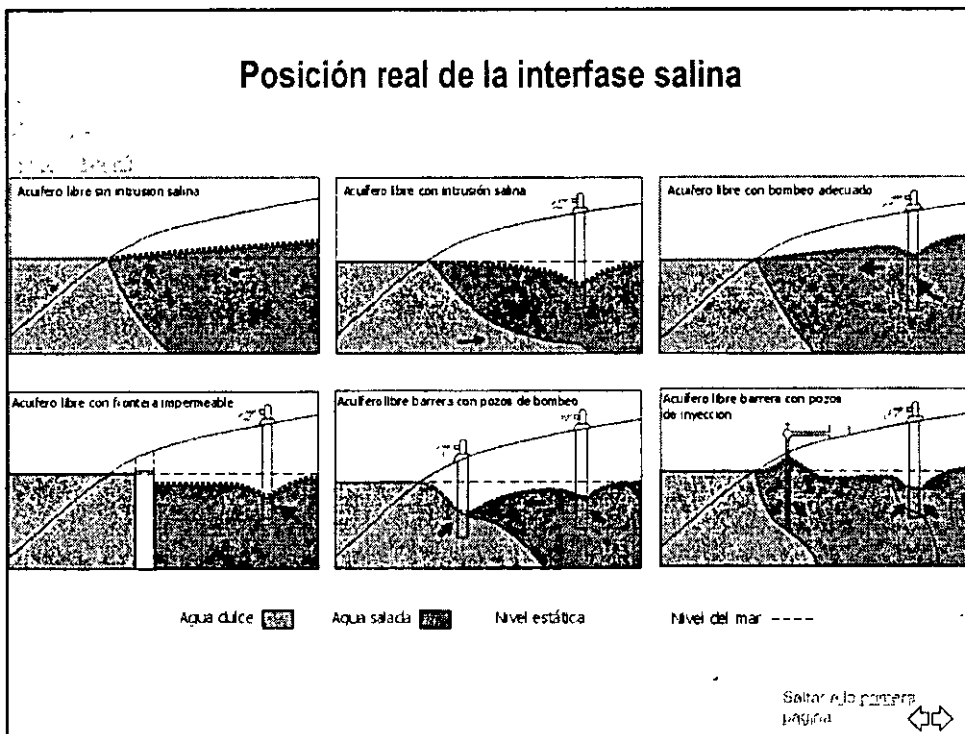
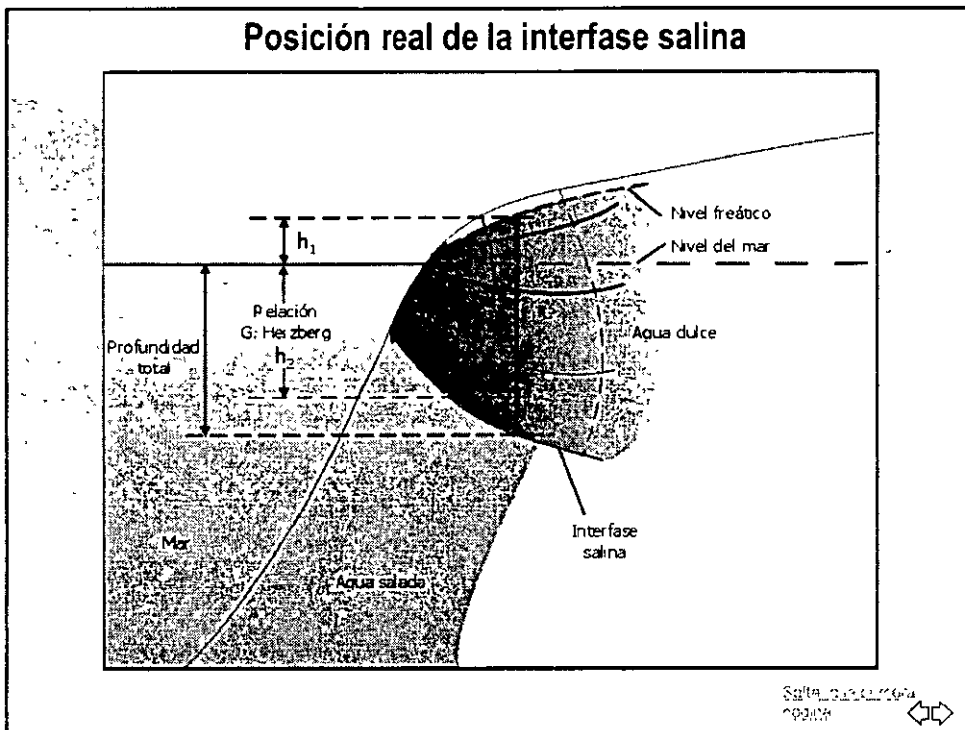


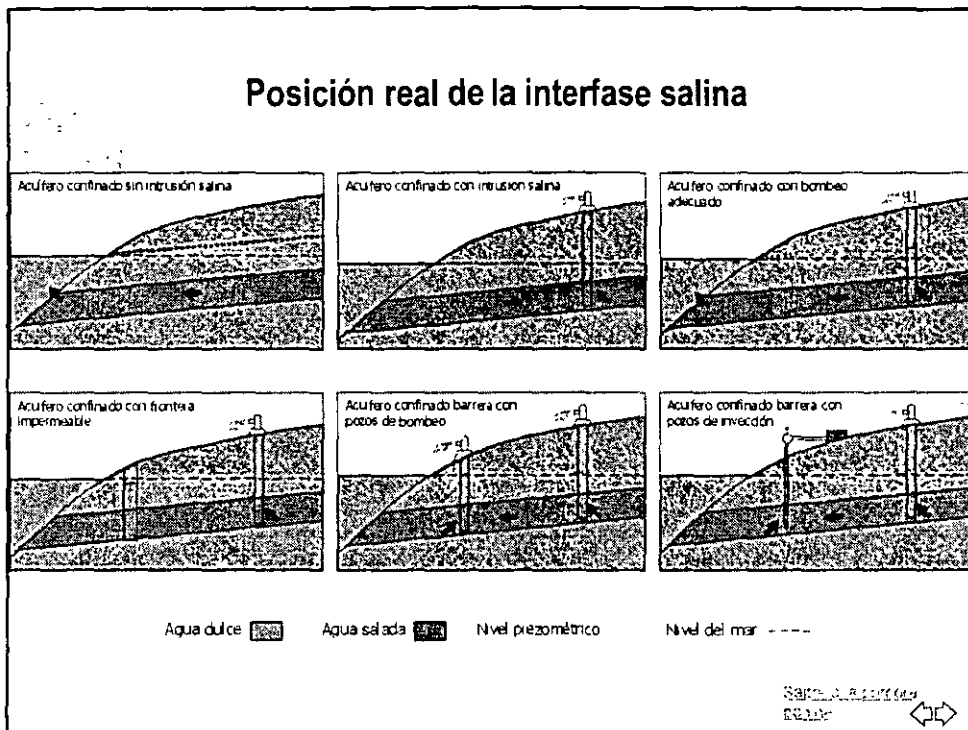
Se trata de la página 109 del libro

### Posición de la interfase salina



Se trata de la página 109 del libro





## CALIDAD DEL AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO NOM 127 SSA 1994 (2000)

Saltar a la primera página

Lunes 18 de enero de 1988      DIARIO OFICIAL      Primera Sección 27

IV. Olor: Característico;  
 V. Color: Hasta 20 unidades de la escala de platino cobalto, o su equivalente en otro método, y  
 VI. Turbiedad: Hasta 10 unidades de la escala de sílice, o su equivalente en otro método.

ARTICULO 213.—El contenido, expresado en miligramos por litro, de elementos, iones y sustancias, no excederá los límites permisibles que a continuación se expresan:

Alcalinidad Total expresada como CaCO <sub>3</sub> .....	400.00
Aluminio.....	0.20
Arsénico.....	0.05
Bario.....	1.00
Cadmio.....	0.005
Cianuro expresado como ión CN.....	0.05
Cobre.....	1.50
Cloro libre: En agua clorada.....	0.20
En agua sobre clorada.....	1.00
Cromo hexavalente.....	0.05
Dureza de Calcio expresada como CaCO <sub>3</sub> .....	500.00
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 orgánico.....	0.10
Oxígeno consumido en medio ácido.....	2.00
Piomo.....	0.05
Selenio.....	0.02
Sulfatos, expresados como ión.....	250.00
Zinc.....	2.00

**Límites  
Norma  
Oficial  
Mexicana**

SALVA SU PUNTO  
76/2013

expresados sobre la parte de vista biológico o químico)

Turbiedad      5 unidades de turbiedad nefelométrica (UTN) o su equivalente en otro método.

4.3 LÍMITES PERMISIBLES DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

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**

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.5-1.00 (después de un tiempo de contacto mínimo de 30 min)
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Hierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50
Fosfatos (como PO <sub>4</sub> =)	0.10
Manganeso	0.10
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05

**Límites  
Norma  
Oficial  
Mexicana**

SALVA SU PUNTO  
page 3

Lunes 13 de agosto de 1994      DIARIO OFICIAL      Segunda Sección

Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxi cloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> =)	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 RADIACTIVAS**

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 enmendados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4.

**5.1 Contaminación biológica**

**5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoos y virus.** - Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz


**Límites  
Norma  
Oficial  
Mexicana**

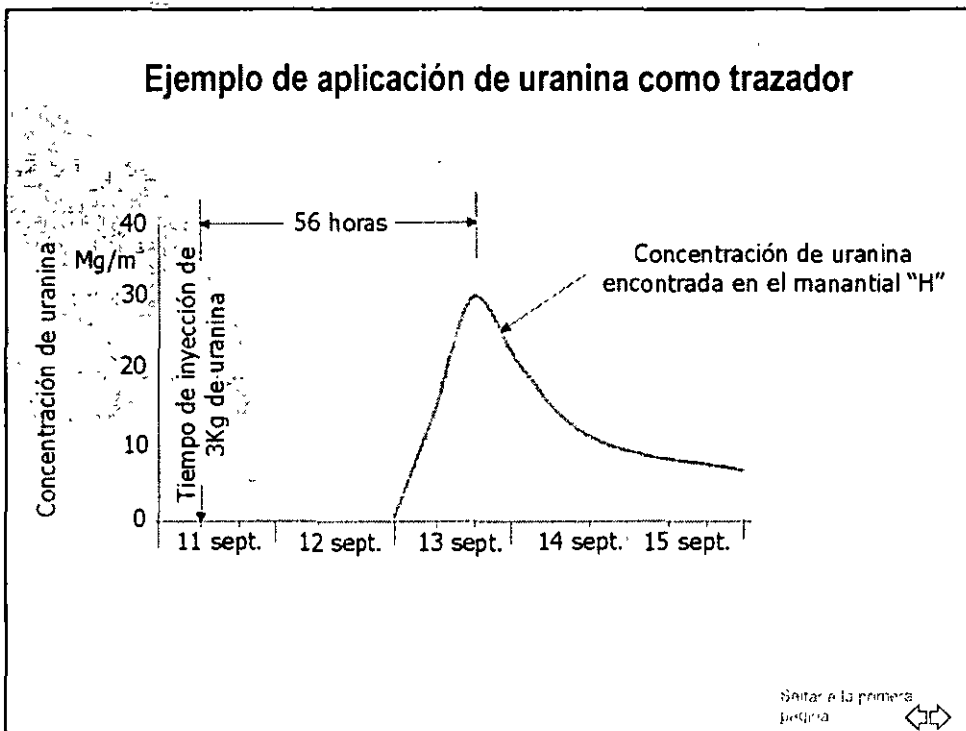
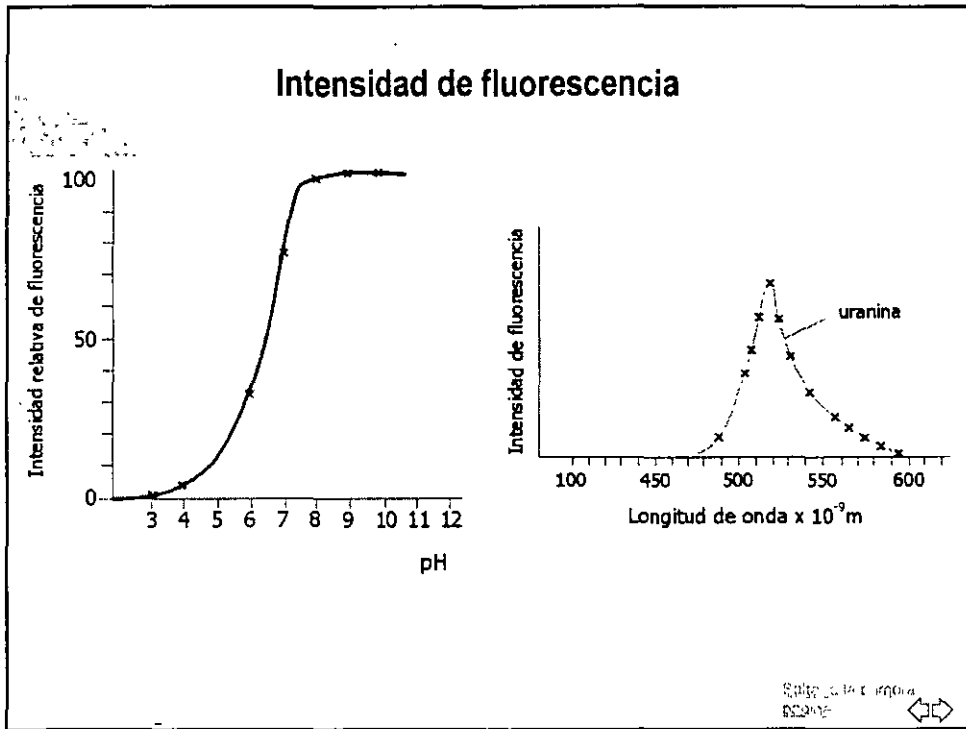
Se trata de la página 12

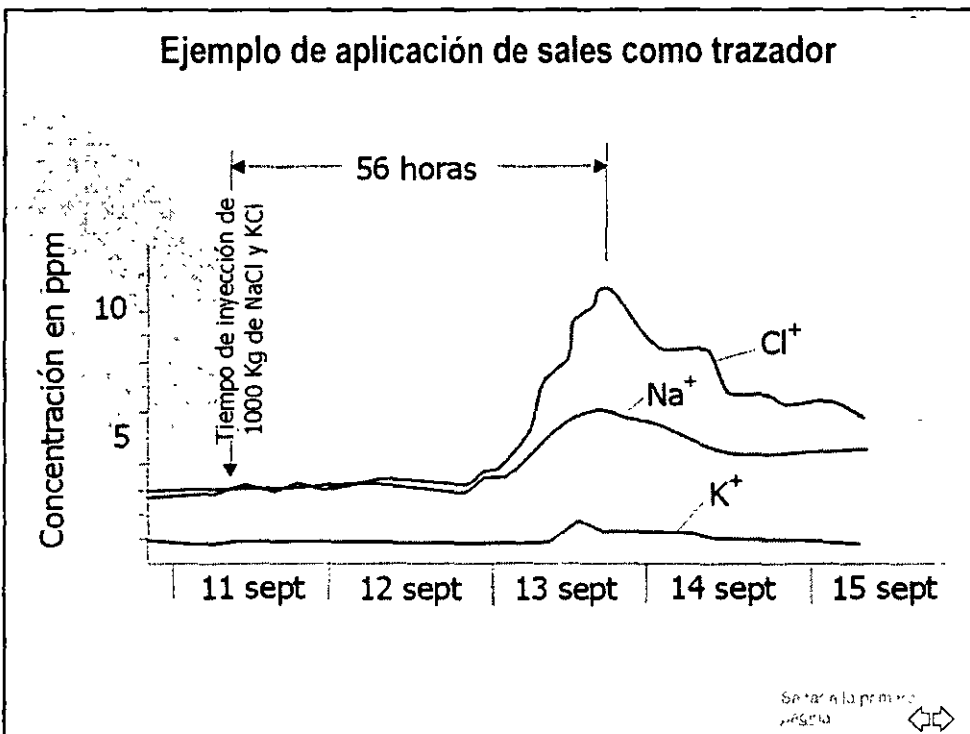
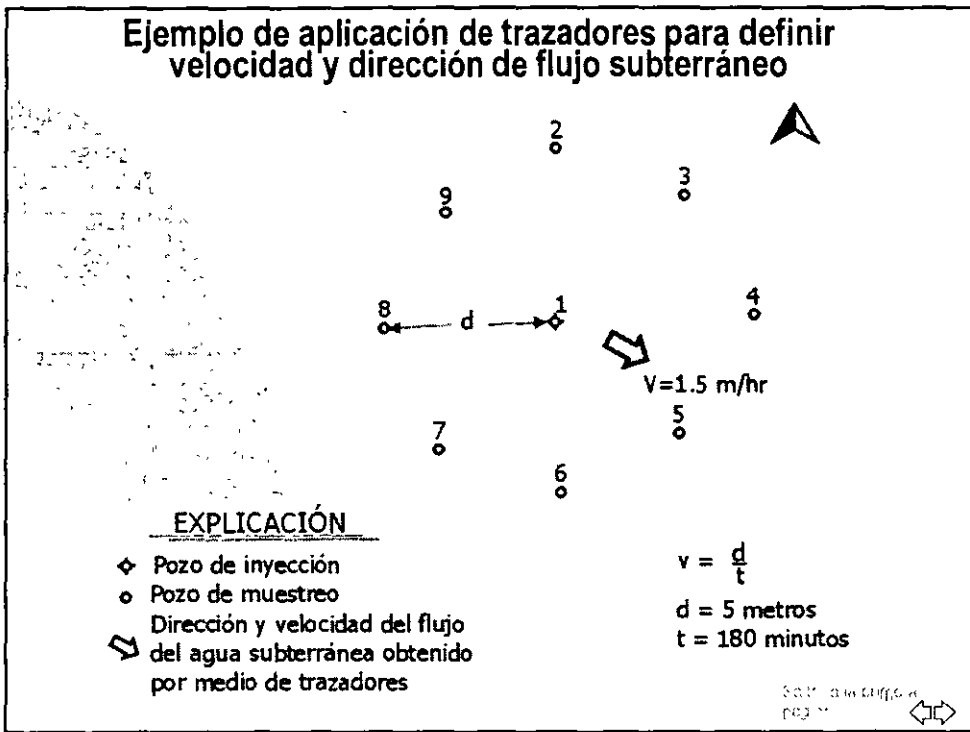


**TRAZADORES DE AGUA SUBTERRÁNEA,  
AUXILIAR EN LA CONTAMINACIÓN  
DE ACUÍFEROS**

Se trata de la página 12







### ESPORAS



Scanned with  
CamScanner



### ISOTOPOS

Scanned with  
CamScanner





## ISOTOPOS DEL HIDRÓGENO

H1 Elemento natural

H2 Isótopo del hidrógeno (Deuterio)

H3 Isótopo del hidrógeno Radioactivo (Tritio)

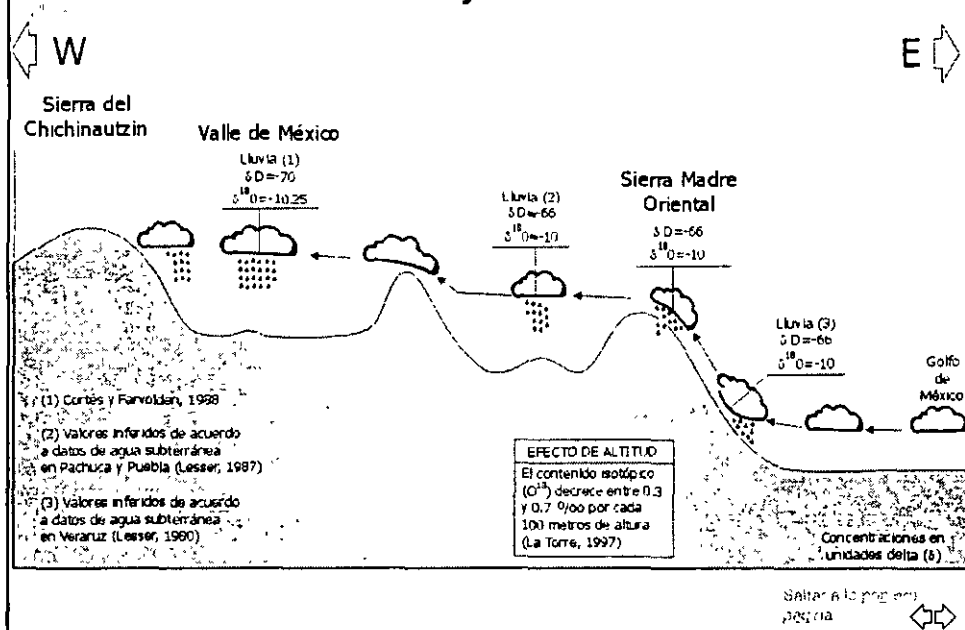
## ISOTOPOS DEL OXIGENO

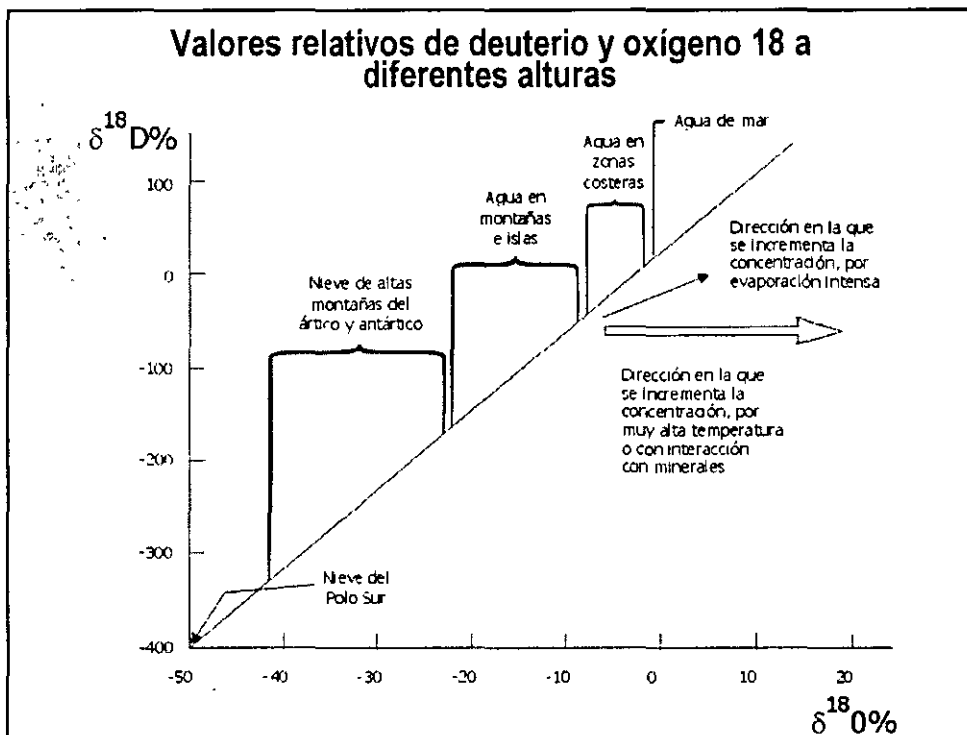
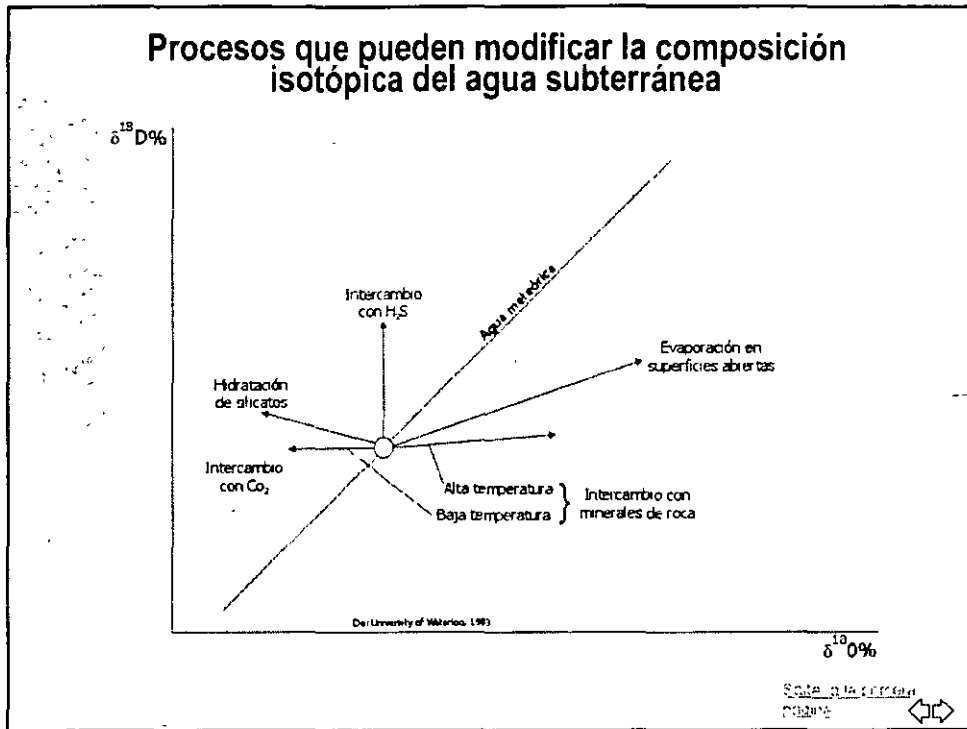
O16 Elemento natural

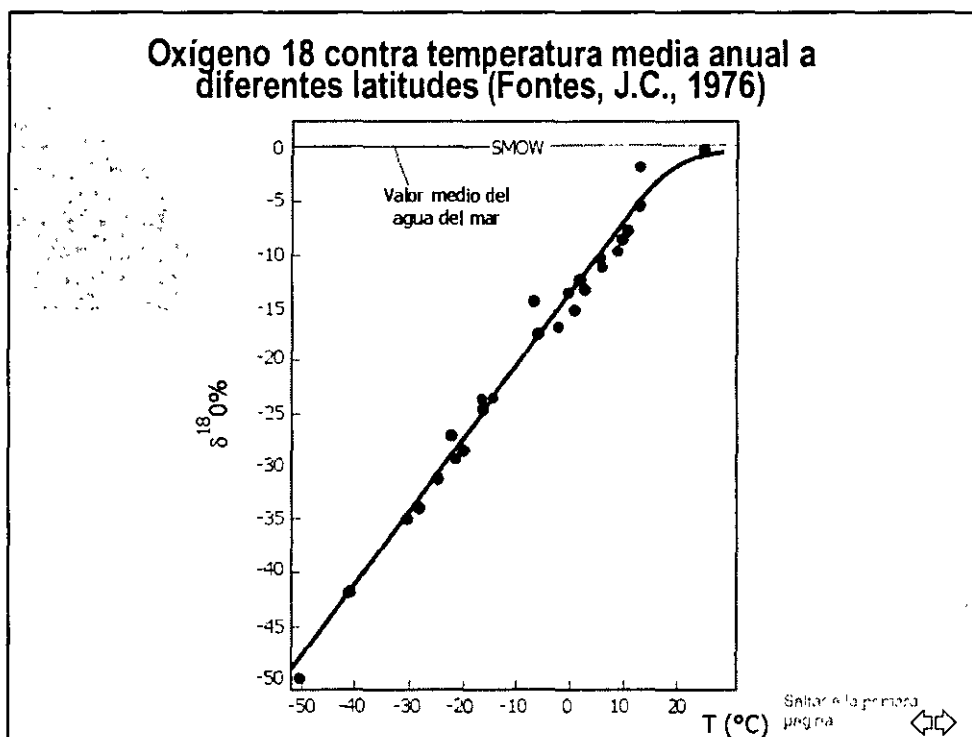
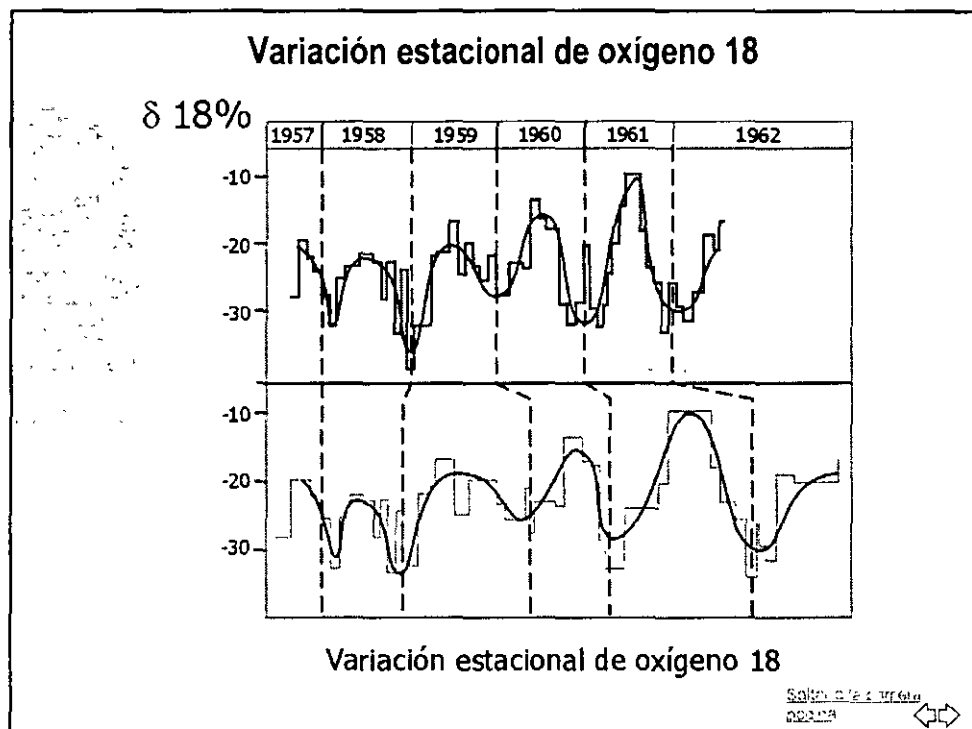
O18 Isótopo del oxígeno (Oxígeno 18)

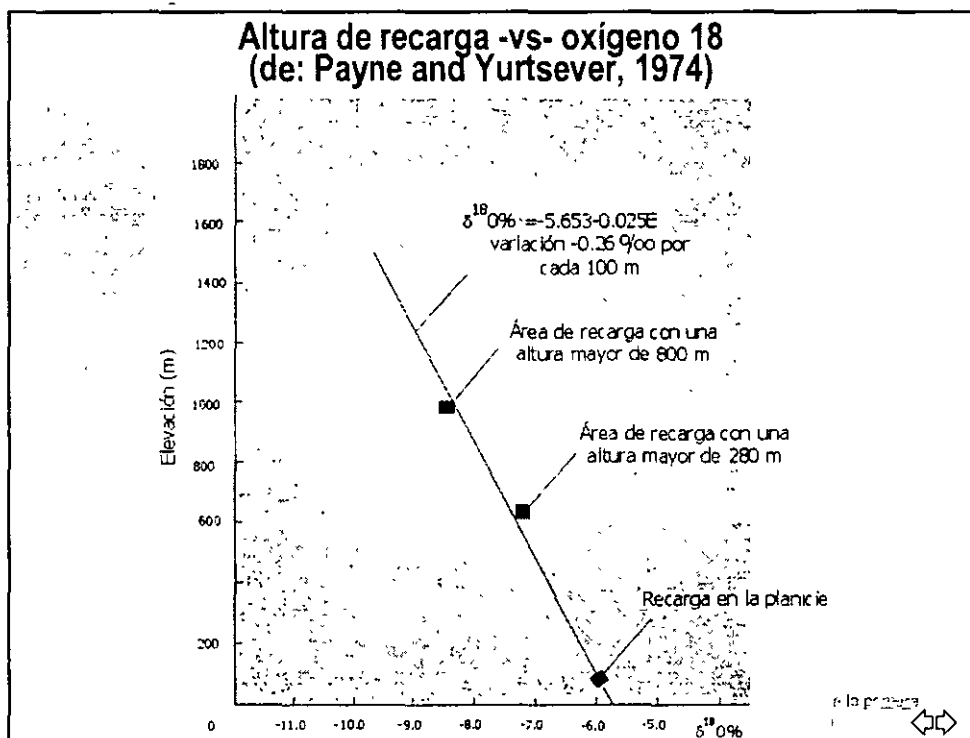
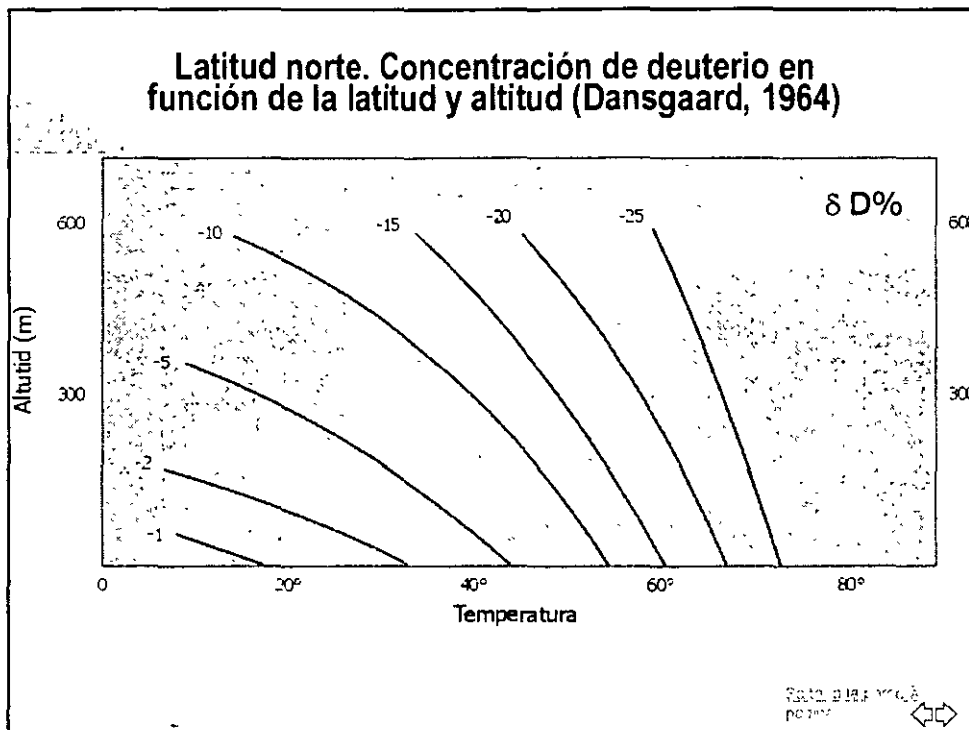
Salta a la página  
siguiente

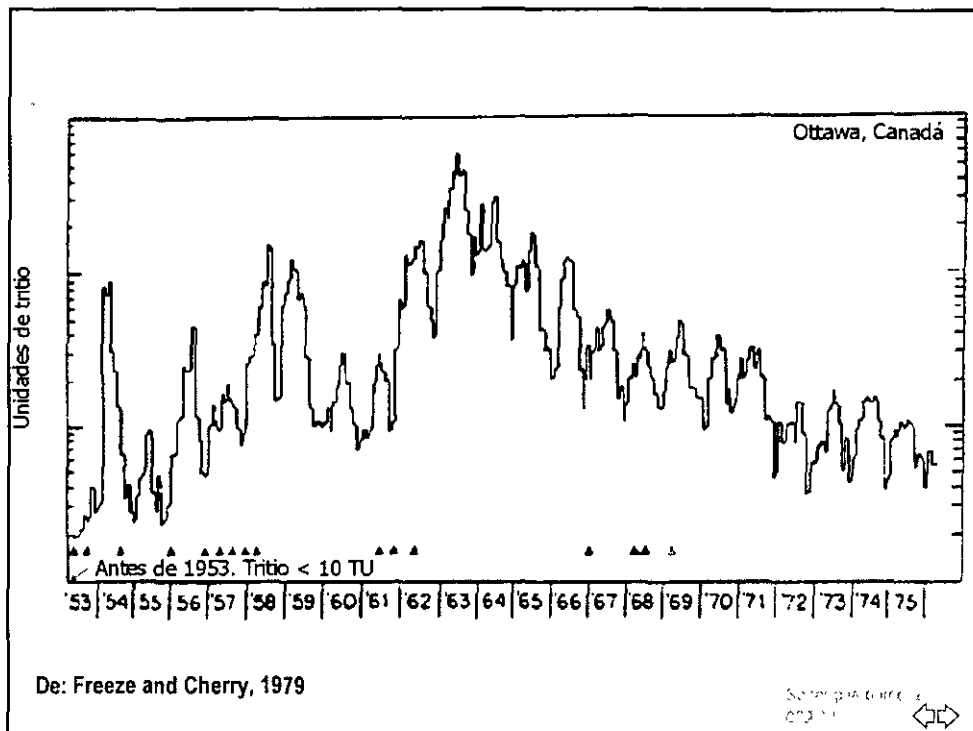
### Comportamiento isotópico de la lluvia entre el Golfo de México y el Valle de México











# Hidrogeoquímica

- GENERALIDADES
- INTRUSIÓN SALINA
- CALIDAD DEL AGUA
- TRAZADORES
- ISÓTOPOS

« Por: Ing. Juan Manuel Lesser

Señalar la primera página



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE  
SUELOS ACUIFEROS  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS Y  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
LA GEOHIDROLOGIA EN LA RESTAURACIÓN DE  
ACUIFEROS**

**EXPOSITORES: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**

# LA GEOHIDROLOGIA EN LA RESTAURACION DE ACUIFEROS

POR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES

lesserjuanm@infosel.net.mx

## 1.- ROCAS Y ACUÍFEROS

La corteza terrestre se encuentra formada por diferentes rocas y materiales que varían en su capacidad geohidrológica. Mientras que algunas tienen porosidad y permeabilidad, permitiendo el paso del agua, otras se presentan compactadas e impermeables.

Para su explicación, se tomo como ejemplo a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Se agruparon los diferentes tipos de rocas y/o materiales en relación a su composición y a sus características geohidrológicas en: (1) rocas fracturadas y piroclásticos; (2) materiales granulares; (3) rocas impermeables; (4) materiales impermeables y; (5) materiales semipermeables. A continuación se describen estas unidades.

*Rocas fracturadas y piroclásticos.*- Un ejemplo de *roca fracturada* corresponde a los *basaltos*. Estos, son el producto de erupciones volcánicas a partir de centros eruptivos, de donde son eyectadas corrientes de lavas de composición basáltica, muchas de las cuales forman los flancos de los volcanes. Algunas de dichas coladas de lava se extiende hacia los valles en donde se encuentran formando acuíferos.

Las coladas de basalto al enfriarse, se enjutan provocando el fracturamiento de la roca, lo que ocasiona que permitan fácilmente la infiltración, circulación y almacenamiento de agua.

Los *piroclásticos* son fragmentos de material expulsados por un volcán durante las erupciones explosivas. Cuando los fragmentos presentan tamaño fino se les denominan cenizas, que al compactarse forman las *tobas*. Fragmentos de mayor tamaño y que son importantes geohidrológicamente son los denominados *tezontles*. Estos, corresponden a la misma roca basáltica que, en el momento de ser eyectada, incluye abundantes gases, lo cual hace que presente una textura de apariencia de esponja. Es común que durante las erupciones volcánicas los fragmentos de la lava sean lanzados al aire, acumulándose sobre los flancos de los conos volcánicos. Los *tezontles* asociados con las lavas

fracturadas, presentan una alta permeabilidad y permiten la fácil infiltración y circulación del agua en el subsuelo.

*Materiales granulares.*- Como su nombre lo indica, los *materiales granulares* corresponden a fragmentos de rocas que semejan granos, los cuales se clasifican de acuerdo a su tamaño. Se originan por la erosión y transporte de rocas que forman elevaciones topográficas. El principal agente erosivo lo constituyen las corrientes superficiales, las cuales mueven o transportan los fragmentos de roca de las partes altas de las sierras hacia las porciones bajas, donde son acumulados o depositados. Durante su trayecto, los fragmentos son redondeados obteniendo la apariencia de granos. El tamaño de estos puede variar desde fracciones de milímetro hasta varios centímetros. Los materiales granulares más finos (con diámetros menores de 1/256 y 1/16 mm) se conocen con el nombre de *arcillas y limos* respectivamente. Los materiales granulares de mayor tamaño (entre 1/16 y 2 milímetros) se denominan *arenas*, tamaños mayores de 2 milímetros corresponden a *gravas y cantos rodados*. Al encontrarse sueltos estos granos se denominan “materiales”. Cuando se encuentran consolidados por cementación u otro proceso reciben el nombre de “roca”. Los materiales granulares finos (arcillas y limos) presentan baja permeabilidad y se clasifican como impermeables al flujo subterráneo. Por lo que respecta a las arenas y gravas, éstas presentan permeabilidades altas y constituyen buenos acuíferos. Generalmente las arenas y las gravas incluyen un cierto porcentaje de arcilla; su permeabilidad esta en relación a la mezcla resultante.

*Rocas impermeables.*- Son rocas que impiden el paso de agua a través de ellas. Cuando las rocas se presentan densas y sin fracturamiento, impiden el flujo de agua a través de ellas lo cual hace que se comporten como *impermeables*.

*Materiales impermeables.*- Conforme se mencionó en párrafos anteriores se hizo la distinción entre “roca” (cuerpo de material compacto) y “materiales”, siendo estos últimos los constituidos por fragmentos no consolidados. Cuando estos materiales son de tipo arcilloso, como es el caso de sedimentos lacustres arcillosos de lagos, entonces presentan una baja permeabilidad y pueden clasificarse como impermeables. En ciertas zonas, su permeabilidad puede llegar a permitir el paso de reducida cantidad de agua y se clasifican como materiales semipermeables (ver párrafo siguiente). Las arcillas están constituidas por fragmentos de tamaños menores de 1/256 mm. El agua que puede saturar a estos materiales, en su mayor parte es retenida por atracción molecular hacia cada uno de los granos de arcilla, como se ilustra en la figura No. 2.1 y solamente un porcentaje



muy reducido de agua circula a través de los espacios sobrantes. En general, las arcillas se consideran como material impermeable, especialmente para propósitos prácticos, ya que los pozos perforados en estos materiales rinden caudales de agua muy reducidos, generalmente menores de 1 lps lo que hace que se clasifiquen como negativos.

*Materiales semipermeables.*- Cuando los materiales granulares consisten en una mezcla de arcillas y arenas, los espacios libres entre granos permiten la circulación de cierta (aunque reducida) cantidad de agua, ocasionando que la permeabilidad del material sea mayor que en las arcillas pero menor que en las arenas.

*Acuífero.*- Se denomina *acuífero* a un cuerpo de roca que se encuentra saturado y presenta una permeabilidad tal que permite la circulación de agua en cantidades económicamente significativas y que puede ser explotada a través de pozos. Existen diferentes acuíferos entre los cuales destacan los siguientes: *Acuífero libre*; es aquel en el que la superficie del nivel estático se encuentra a la presión atmosférica. *Acuífero confinado*; es aquel que se encuentra sujeto a una presión, generalmente ocasionada por el encajonamiento del agua entre dos cuerpos impermeables. *Acuífero colgado*, es aquel que circula sobre una capa impermeable localizada arriba del nivel estático de un acuífero regional. *Acuífero semiconfinado*; es aquel que se encuentra cubierto por un material semipermeable (figura 2.2).

*Acuitardo.*- Es una capa que retiene pero no evita el flujo del agua hacia un acuífero adyacente. El acuitardo no permite un paso rápido del flujo del agua pero puede servir como una zona de alta capacidad de almacenamiento. También se define como un material que acepta la entrada de agua pero que la cede lentamente

## **2.- FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS**

### **Ciclo hidrológico**

En la corteza terrestre el agua en su gran mayoría se encuentra formando parte del ciclo hidrológico.

El agua de lluvia que se precipita sobre los continentes tiene tres caminos a seguir: Evaporarse para formar las nubes; escurrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar e, infiltrarse en el subsuelo para formar

acuíferos. Esta agua infiltrada posteriormente es drenada por corrientes superficiales o aflora en forma de manantiales, para evaporarse o seguir su camino al mar donde también parte de ésta se evapora y continua en su ciclo natural conforme se ilustra en la figura No. 2.3. Las aguas que no se encuentran en movimiento dentro del ciclo hidrológico se caracterizan por incrementar su contenido salino y se conocen como aguas fósiles; la proporción de agua fósil respecto a agua dentro del ciclo hidrológico es sumamente baja.

El agua subterránea que forma los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, donde parte de esta al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se infiltra y corre a través de ellas. El agua infiltrada, en ocasiones pasa por zonas cercanas a cámaras magmáticas donde incrementa su temperatura o puede permanecer atrapada entre sedimentos en forma de agua fósil.

### **Distribución del agua en el subsuelo**

La distribución del agua en el subsuelo se ilustra en la figura 2.4, donde se muestra el límite de la zona saturada que se denomina nivel estático. La porción que se encuentra bajo el nivel estático en la roca saturada se denomina acuífero. La zona no saturada que corresponde a la porción entre la superficie del terreno y el nivel estático recibe también el nombre de zona vadosa. Cuando los acuíferos corresponden a materiales granulares, en los pozos se produce un efecto de capilaridad que permite la ascensión del agua, dando origen a una zona denominada de aguas capilares.

### **Zonas de recarga**

Son las principales áreas donde se infiltra el agua de lluvia. Generalmente corresponden a porciones permeables ubicadas topográficamente altas, permiten la infiltración y circulación de agua hacia los acuíferos. Estas áreas son las principales zonas de recarga.

### **Zonas de descarga**

La salida o descarga natural del agua de los acuíferos, se realiza en forma natural a través de manantiales o del drenado por medio de ríos. Actualmente, la salida del agua de la mayor parte de los acuíferos, se realiza mediante la extracción por el bombeo de pozos.

## Niveles estático, dinámico y freático

En un acuífero libre, se define como *nivel estático* a la porción superficial del acuífero (figura 2.6). En contraste, se define como *nivel dinámico* al que se refleja en un pozo al encontrarse operando, razón por la que también se le denomina *nivel de bombeo*.

*Nivel piezométrico* generalmente se utiliza para los acuíferos confinados donde el nivel corresponde a la presión a que está sujeta el agua del acuífero.

Recibe el nombre de *nivel freático* el nivel que presentan los acuíferos someros, cuya agua en ocasiones se denomina también como aguas freáticas.

## 3.- PROPIEDADES DE LOS ACUÍFEROS

### Permeabilidad (K)

Dentro de los conceptos fundamentales de las características de las rocas que forman acuíferos, se encuentra el concepto de *permeabilidad*, el cual es la propiedad de un medio poroso o fracturado para permitir el paso de un fluido. Se define como el flujo de agua por unidad de tiempo que cruza una sección unitaria bajo un gradiente también unitario. Se expresa en metros por segundo. Si el fluido es agua, a la permeabilidad se le conoce también como *conductividad hidráulica*:

En la tabla No. 2.1 se muestran valores de permeabilidad para diferentes materiales, las arcillas tienen una permeabilidad del orden entre  $10^{-7}$  y  $10^{-9}$  m/seg; los materiales granulares  $1 \times 10^{-5}$  m/seg y; los basaltos  $5 \times 10^{-2}$  m/seg.

Porosidad  $n = V_h/V_t$   
 $V_h =$  Volumen de huecos  
 $V_t =$  Volumen total

Porosidad efectiva ( $S_y$ ) = rendimiento

$S_y = V_d/V_t$   
 $V_d$  Volumen drenado  
 $V_t$  Volumen total

---

Coeficiente de almacenamiento

$S =$  Coeficiente de almacenamiento  
 $S_s =$  Coeficiente específico =  $\frac{S_s}{b}$   
 $b =$  Espesor del acuífero

Acuífero libre            2 – 30%  
Acuífero confinado    0.001 – 0.00001

---

(K) Permeabilidad = Conductividad hidráulica  
Flujo en una sección unitaria

(T) Transmisibilidad  
= Flujo sobre una franja de longitud =  $b$   
 $b =$  Espesor del acuífero

### Transmisibilidad (T)

La *transmisibilidad* es otra forma de expresar la facilidad con que puede circular el agua en un acuífero. Se define como la cantidad de agua que puede fluir a través de una sección unitaria bajo un gradiente unitario y un tiempo instantáneo. En la figura No. 2.5 se muestra la diferencia entre la transmisibilidad y la permeabilidad, siendo la transmisibilidad la descarga que ocurre a través de un segmento unitario respecto a la anchura pero una altura ( $b$ ) que equivale al espesor del acuífero, mientras que la permeabilidad corresponde a una descarga que ocurre a través de una sección unitaria y, para ambos casos, bajo un gradiente hidráulico unitario.

### *Coefficiente de almacenamiento (S)*

Es el volumen de agua que puede contener o almacenar una roca permeable dentro de los huecos que presenta.

### *Rendimiento específico (Sy)*

Es el volumen drenado entre el volumen total (material + agua) en acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento varía por lo general del 2 al 30% (0.02 a 0.30) mientras que en acuíferos confinados va de 0.001 a 0.00001.

## **4. ACUITARDOS**

### **Funcionamiento**

En contraste con el funcionamiento de los acuíferos mostrados en la figura 2.2, en el presente inciso se mencionan las características de los acuitardos.

Un *acuitardo* corresponde a una roca o material de baja permeabilidad que retarda pero no previene el flujo del agua de o hacia el acuífero adyacente. Las arcillas lacustres en muchos casos constituyen acuitardos.

### **Recarga y descarga de los acuitardos**

La recarga de los acuitardos se genera por la infiltración de las aguas de lluvia o bien de las aguas que circulan a través de arroyos y canales, en forma similar a la recarga de los acuíferos pero con la diferencia de que la recarga de un acuitardo es muy lenta.

Su descarga se lleva a cabo también en forma muy lenta, generalmente como “lloraderos” que llegan a formar manantiales incipientes.

### **Permeabilidad de los acuitardos**

La permeabilidad de los acuitardos y en especial de las arcillas que se encuentra cubriendo la parte plana del Valle de México, presentan valores de entre  $10^{-7}$  y  $10^{-9}$  m/seg.

## **Nivel freático**

El nivel de saturación en las arcillas que forman el acuitardo de la Ciudad de México se encuentra muy cerca de la superficie, por lo general a profundidades del orden de 3 metros. A este nivel somero se le denomina nivel *freático*.

## **Asentamientos del terreno**

Las arcillas que se encuentran cubriendo la parte plana del Valle de México corresponden a sedimentos de los antiguos lagos. Tienen un espesor que fluctúa entre 40 y 60 metros en la mayor parte del valle, el cual se acuña hacia las elevaciones topográficas. En las partes centrales de las zonas de Texcoco y Tlahuac-Chalco, las arcillas se encuentran intercaladas y/o mezcladas con horizontes de arenas, y llegan a presentar espesores de más de 100 metros. Las arcillas están saturadas y presentan un nivel freático a entre 2.5 y 3.5 metros de profundidad. Bajo ellas, se encuentra un acuífero que actualmente, funciona como libre, teniendo el nivel estático a cierta profundidad bajo el acuitardo, lo que provoca que éste último presente un “goteo” o drenado vertical hacia el acuífero. La pérdida de agua del acuitardo ocasiona una pérdida de su volumen, que se traduce en el asentamiento del terreno que es típico en la Ciudad de México.

Las arcillas tienen una compresibilidad que va de 0.11 a 6 centímetros cuadrados por kilogramo, una relación de vacíos que varía de 2 a 15 y; una permeabilidad entre  $1 \times 10^{-9}$  m/seg.

## **5.- CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS NATURALES**

El agua de lluvia que se infiltra al subsuelo circula a través de las rocas disolviendo las sales y minerales que las forman, produciendo cambios en su composición química. Por lo tanto, la composición química del agua subterránea dependerá del tipo y grado de solubilidad de las rocas y sales naturales con las que el agua tiene contacto al circular por el subsuelo.

### **Composición química del agua de lluvia**

El agua de lluvia al precipitarse sobre la corteza terrestre arrastra materiales finos que se encuentran suspendidos en la atmósfera y que en muchos casos son transportados por el

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

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

La contaminación de la atmósfera produce modificación en la composición química de las aguas de lluvia, generalmente ocasionando la presencia de lo que se denomina como “lluvia ácida”. Sin embargo, la concentración total de sales en un agua de lluvia se caracteriza por presentar valores bajos, generalmente menores de 40 miligramos por litro.

### **Calidad del agua en acuíferos basálticos**

Los basaltos son rocas fracturadas constituidas por minerales ferromagnesianos. Presentan bajo grado de solubilidad, la alta permeabilidad de las rocas disminuye la capacidad de disolución de sales por el agua.

Por lo tanto, el agua de lluvia que se infiltra y circula por rocas basálticas se va a caracterizar por presentar bajos contenidos salinos, principalmente de bicarbonatos y sodio (del agua de lluvia), y en algunos casos magnesio, fierro y manganeso (de los minerales ferro-magnesianos).

Durante las erupciones volcánicas son comunes las emisiones de gases que contienen sales, las cuales se acumulan por lo general alrededor de los cráteres o centros eruptivos. Ocasionalmente éstas sales pueden ser transportadas y depositadas a lo largo de fallas y fracturas, por medio de soluciones hidrotermales. Por ello, ocasionalmente el agua de los acuíferos basálticos llega a tener contacto con dichos horizontes salinos e incrementa notablemente su concentración, como es el caso de los flancos de la Sierra de Santa Catarina y algunas porciones del pie de la Sierra del Chichinautzin

### **Origen de acuíferos con agua salada.**

Otro origen de sales en el subsuelo se puede encontrar en la circulación de flujos de agua regional. Es común que estos flujos, después de circular grandes distancias y a gran profundidad, tengan contacto con sales las cuales son disueltas por el agua. Pueden

existir también focos termales que ocasiona el incremento de temperatura en el agua, lo que a su vez facilita la disolución de sales. El agua de flujos regionales puede circular y en muchas ocasiones llegar a ascender hasta la superficie o cerca de ella, a través de fallas o fracturas. El agua con altos contenidos salinos se llega a manifestar en varias formas: (1) la presencia de manantiales, en ocasiones termales, con agua salada; (2) el depósito de sales a lo largo de fracturas con mecanismos semejantes a los que en minería son comunes y se conocen como depósitos hidrotermales y; (3) la acumulación o entrapamiento de agua salada en ciertos horizontes.

Durante la perforación de un pozo, se puede llegar a atravesar una falla o un horizonte donde se encuentre atrapada el agua salina o las sales que se pueden incorporar al acuífero a través del pozo.

Las aguas naturales generalmente tienen un largo tiempo de estancia en el subsuelo. Las aguas saladas naturales, se caracterizan por la ausencia de organismos.

## **6.- VULNERABILIDAD DE LOS ACUÍFEROS A LA CONTAMINACIÓN (RIESGO GEHIDROLÓGICO)**

### **Riesgo**

El riesgo de que un acuífero pueda ser contaminado está en función tanto de las características propias del acuífero como de los materiales que se encuentren a su alrededor y que en determinados casos puedan servir de protección al acuífero o de permitir en mayor o menor grado su contaminación.

Por definición, el riesgo es la probabilidad de que se presente un efecto indeseable y obtiene como producto de la probabilidad del riesgo por la frecuencia.

El manejo del riesgo es la decisión de las acciones que deben de tomarse ante una contingencia.

El riesgo ambiental es la probabilidad de efectos adversos sobre humanos y otros seres vivos como resultado de agentes químicos, físicos o biológicos que ocurren en el medio ambiente.



El análisis de riesgo a la salud es la determinación de la probabilidad de afectación y mortandad sobre el ser humano.

### **Vulnerabilidad.-**

La forma para medir el riesgo geohidrológico es lo que se conoce como vulnerabilidad de los acuíferos.

Cada lugar presenta diferentes características químicas y físicas que permiten en mayor o menor grado la contaminación de los acuíferos. Un método para calcular la vulnerabilidad es el denominado DRASTIC, publicado por la EPA (Environmental Protection Agency). Este método toma en cuenta los factores siguientes:

- Profundidad al nivel estático
- Recarga neta
- Tipo de roca
- Tipo de suelo
- Pendiente del terreno
- Zona vadosa
- Permeabilidad

Su nombre esta formado por las siglas en ingles de los factores mencionados: **Depth, Recharge, Acuífer, Soil, Topography, Impact Conductivity.**

### **Profundidad al nivel estático**

La profundidad al nivel del agua es un factor importante en la vulnerabilidad de los acuíferos, debido a que está en relación con la distancia que el contaminante va a viajar antes de alcanzar al acuífero, dando oportunidad para que existan procesos como la oxidación, adsorción y en general la atenuación del contaminante. Por otra parte, las aguas que se encuentran a profundidad implican mayores tiempos de estancia en el subsuelo. Mientras mayor sea la profundidad al nivel estático, la vulnerabilidad será menor.

En la tabla 2.2 se muestran los valores con que el programa DRASTIC de la EPA clasifica la vulnerabilidad de los acuíferos. Cuando la profundidad al agua se encuentra a

entre 0 y 1.5 metros se le asigna un valor de 10 puntos, mientras que cuando el agua se encuentra a profundidades mayores de 30 metros, el valor con que se califica es de 1 punto. Además, la calificación asignada es multiplicada por el peso específico de cada factor, que se consigna en la misma tabla.

### **Cantidad de recarga (recarga neta)**

La recarga típica de los acuíferos es la precipitación pluvial, la cual se infiltra a través del subsuelo hasta el acuífero. La recarga neta consiste en la cantidad de agua que se infiltra por unidad de área. El agua que se infiltra transporta al contaminante. De acuerdo al volumen de agua existirá un parámetro de dispersión y dilución del contaminante. La cantidad de agua que se recarga es el principal vehículo para el transporte de contaminantes. Mientras mayores sean los volúmenes de recarga, mayor será el potencial de contaminación al subsuelo, lo cual se cumple hasta que la cantidad de recarga es tan grande que causa dilución del contaminante. En la tabla 2.3 se muestran valores para calcular la vulnerabilidad a partir de recargas netas de agua al subsuelo.

### **Tipo de roca**

La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación está influenciada también por el tipo de materiales que constituyen el subsuelo. Materiales granulares pueden “filtrar” a los contaminantes presentes en el agua al existir procesos de adsorción, reacción o dispersión. En los acuíferos formados en rocas fracturadas prácticamente no se presenta la atenuación de contaminantes, por lo que estos son más vulnerables a la contaminación.

En la tabla 2.4 se presentan las calificaciones que el programa DRASTIC aplica a diferentes tipos de rocas, observándose que los basaltos son muy vulnerables, calificándose con el valor 9, en contraste con otros tipos como se indica en la tabla.

### **Tipo de suelo**

Incluye a la porción superficial del terreno donde generalmente existe una actividad biológica significativa. En esta clasificación, se considera al suelo como la porción superficial de terreno con una profundidad máxima de 2 metros. Los suelos tienen un impacto significativo en la cantidad de agua que se puede infiltrar en el subsuelo y por lo tanto en la habilidad para mover a un contaminante en forma vertical a través de la zona

vadosa. La presencia de materiales finos tales como arcillas, disminuyen la permeabilidad y restringen el movimiento de contaminantes. Por otra parte, existen procesos de filtración, biodegradación, adsorción y volatilización, que remueven partículas contaminantes.

Otra variables es el tipo de suelos, el cual puede variar de una grava a arena y arcilla. En la figura 2.5 se muestra una tabla con calificaciones de acuerdo al tipo de suelos.

### **Pendiente del terreno**

La topografía del terreno ayuda a controlar que el contaminante permanezca en un sitio (donde la pendiente tiende a ser horizontal) o sea arrastrada hacia otros sitios (donde la pendiente es fuerte). Este efecto se encuentra asociado con el grado de infiltración, siendo este menor en las zonas donde la pendiente del terreno es fuerte y mayor donde la pendiente es moderada o nula. En la tabla No. 2.6 se muestran los rangos de calificaciones de acuerdo a la pendiente del terreno.

### **Zona vadosa**

La zona vadosa o zona de aereación, es la que se encuentra entre la superficie del terreno y el nivel estático. En esta porción se producen procesos de biodegradación, neutralización, filtración, reacciones químicas, volatilización y dispersión. El grado de biodegradación y volatilización decrece con la profundidad. De acuerdo a la composición de los materiales que constituyen a la zona vadosa, esta presenta un rango de calificación de vulnerabilidad el cual se muestra en la tabla No. 2.7.

### **Permeabilidad**

La permeabilidad es la facilidad que presenta un medio para que circule el agua a través de él. En zonas donde la permeabilidad es alta, existirá mayor vulnerabilidad a la contaminación. Donde los materiales presentan transmisibilidades bajas, el factor de contaminación disminuye.

Para calcular este factor, inicialmente se mide la permeabilidad del material, ya sea mediante pruebas de bombeo o bien en forma general utilizando tablas como la del tipo de la mostrada en la figura No. 2.8. Posteriormente y conociendo el valor de

permeabilidad, se obtiene la calificación de la vulnerabilidad respecto a este parámetro, la cual se muestra en la tabla No. 2.9.

### Cálculo de la vulnerabilidad de una zona

Aplicando los valores de vulnerabilidad para cada uno de los factores mencionados, en los párrafos anteriores se obtiene un valor de vulnerabilidad para un sitio. Así por ejemplo, en una zona con rocas basálticas y una porción de medios granulares las calificaciones serían de 164 y 35 conforme se muestra en la tabla 2.9, siendo los basaltos de mayor vulnerabilidad que los materiales granulares.

Tabla 2.2.- Valores de vulnerabilidad  
De acuerdo a la profundidad al nivel estático

Rango en metros	Valor
0-1.5	10
1.5-4.5	9
4.5-9.0	7
9.0-15.2	5
15.2-23.0	3
23.0-30.0	2
30.0-0+	1
Peso específico: 5	

Tabla 2.3.- Recarga neta

Rango en mm	Valor
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250-+	9
Peso específico: 4	

Tabla 2.4.- Tipo de roca

Tipo	Rango	Valor Típico
Lutita	1-3	2
Rocas ígneas y metamórficas	2-5	3
Rocas ígneas y metamórficas intemperizadas	3-5	4
Secuencias de capas de arenisca, caliza y lutita	4-6	5
Tilita	5-9	6
Arenisca	4-9	6
Caliza	4-9	6
Arena y grava	4-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza cástica	9-10	10
Peso específico: 3		

Tabla 2.5.- Tipo de suelo

Tipo	Valor
Capa delgada o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Carbón	8
Agregado de arcillas	7
Mezcla Arenosa	6
Mezcla	5
Mezcla limosa	4
Mezcla arcillosa	3
Abono	2
Arcilla	1
Peso específico: 2	

Tabla 2.6 Pendiente del terreno  
(ángulo de inclinación en %)

Rango	Valor
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1
Peso específico: 1	

Tabla 2.7 Zona vadosa

Tipo	Rango	Valor típico
Capa confinante	1	1
Limo o arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca		
Horizontes de caliza, arenisca y lutita	4-8	6
Arena y grava con alto contenido de limo y arcilla	4-8	6
Rocas ígneas y metamórficas	4-8	4
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza carstica	8-10	10
Peso específico: 5		

Tabla 2.8.- Permeabilidad en varios tipos de roca  
Conductividad hidráulica  
(m/s)

Rango	Valor
$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5}$	1
$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	2
$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$	4
$3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$	6
$5 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$	8
$9 \times 10^{-4} +$	10
Peso específico: 3	

Tabla 2.9.- Ejemplo del cálculo de vulnerabilidad

Factor	Sierra de basaltos	Valle de material granular Cubierto por arcillas
Nivel estático	5	5
Recarga neta	36	4
Tipo de roca	27	6
Tipo de suelo	20	2
Pendiente del terreno	1	10
Zona vadosa	45	5
Permeabilidad	30	3
Suma	164	35
Clasificación	altamente vulnerable	reducida vulnerabilidad



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

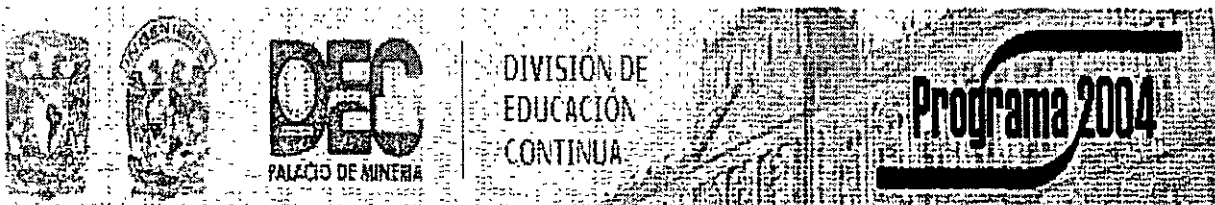


**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE  
SUELOS ACUIFEROS  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS Y  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
ESQUEMAS GENERALES II**

**EXPOSITORES: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**



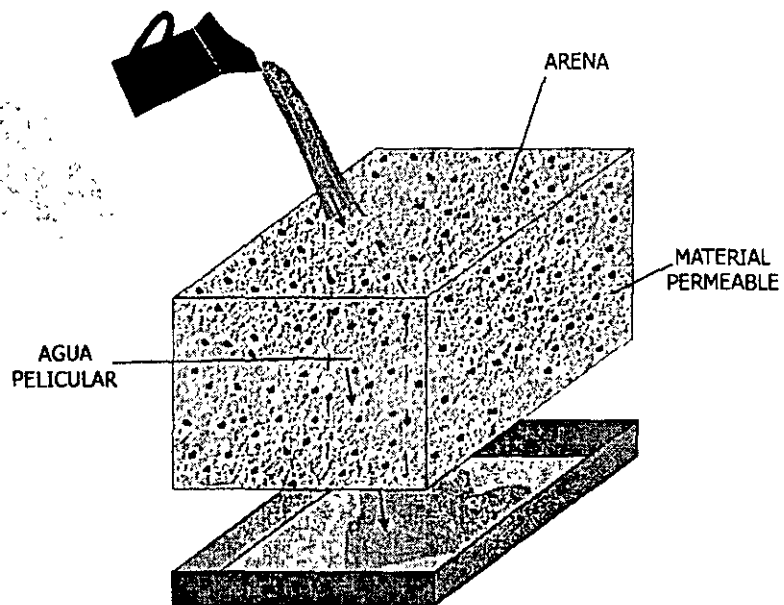


# LA GEOHIDROLOGIA EN LA CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE ACUIFEROS

 LESSER, 2004

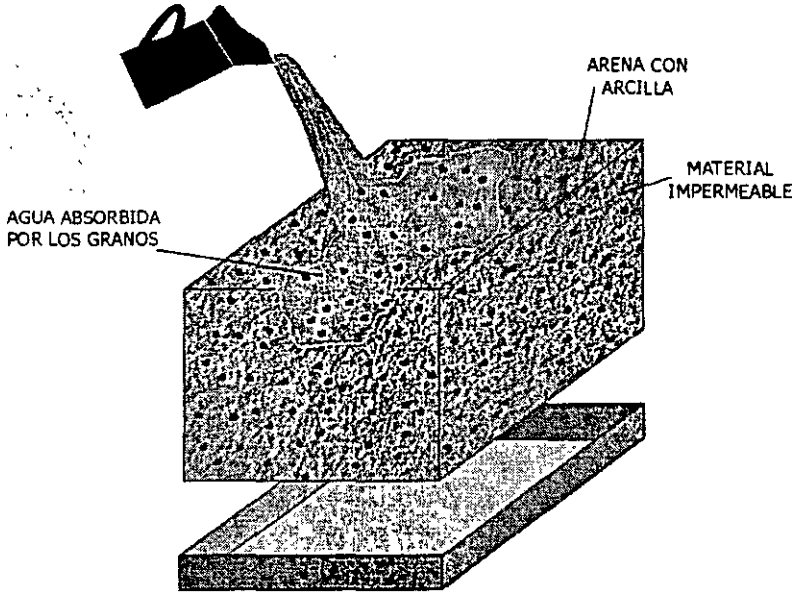


## Material permeable



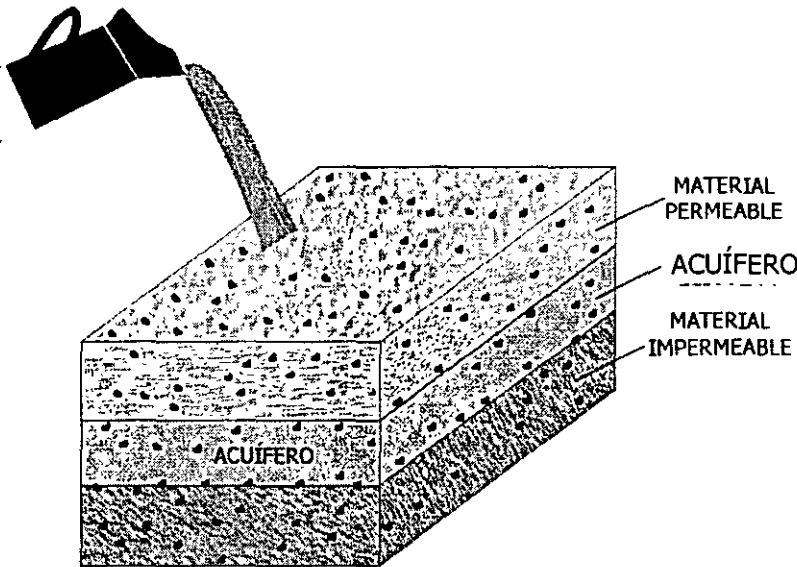
 LESSER, 2004

# Material impermeable

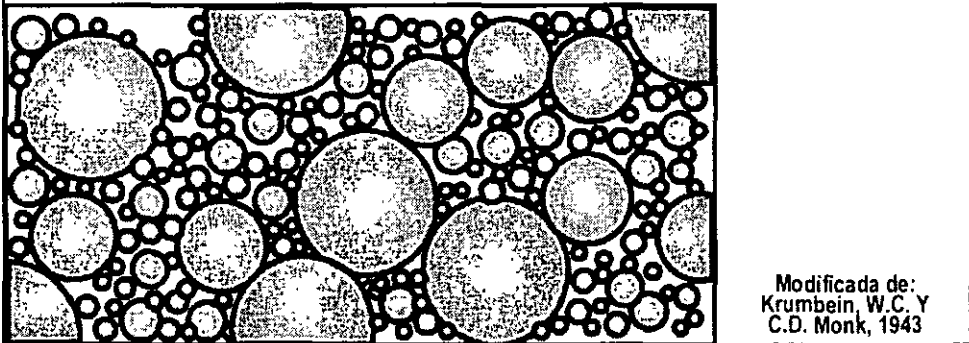
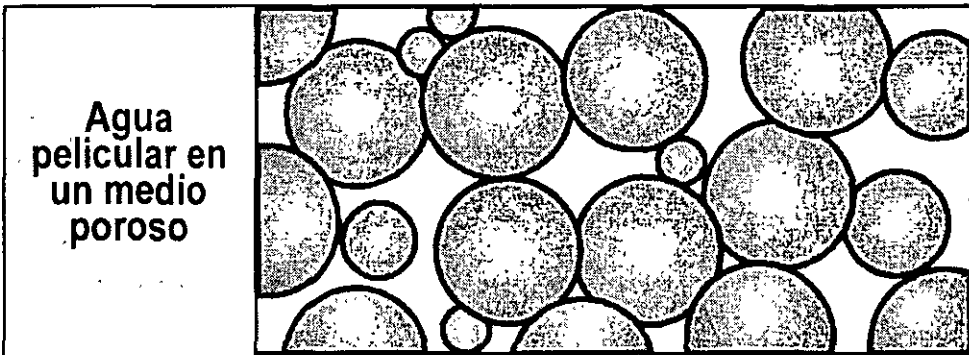
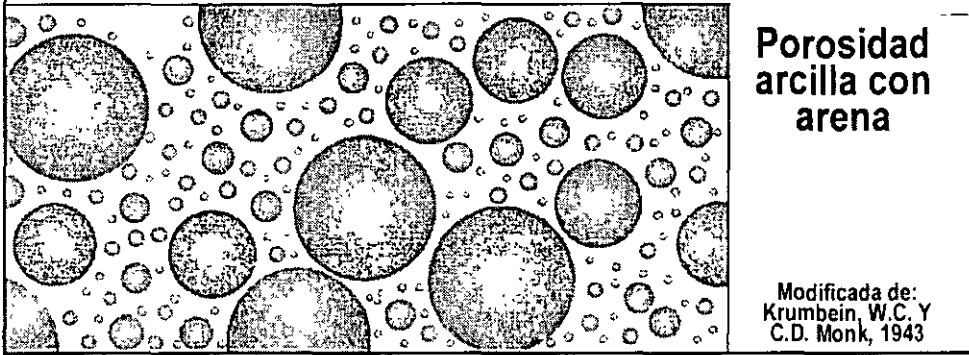
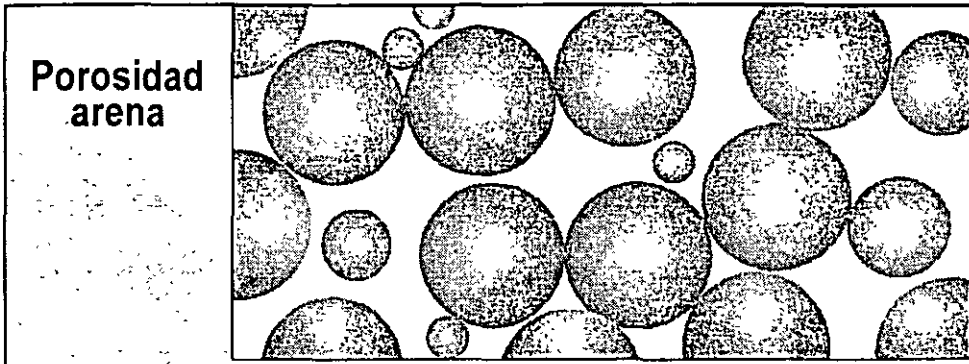


LESSER, 2004

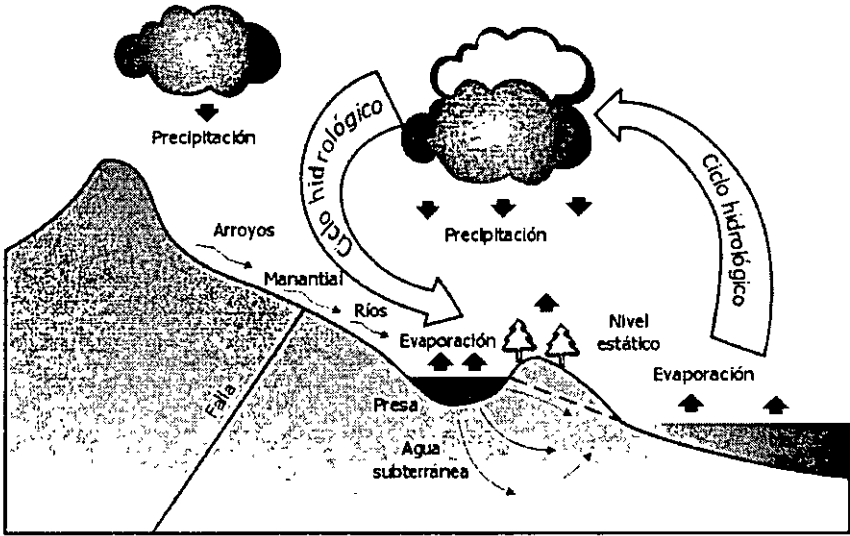
# Acuífero



LESSER, 2004

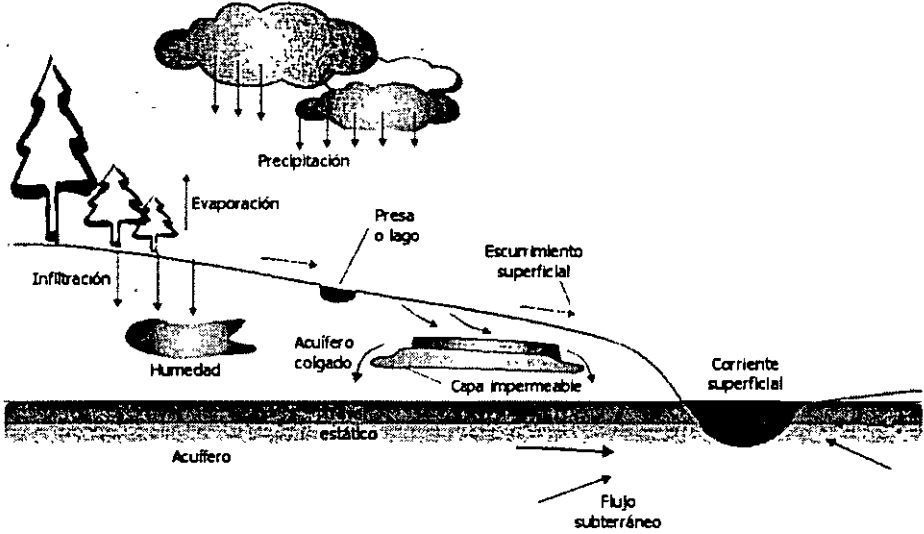


# Ciclo hidrológico



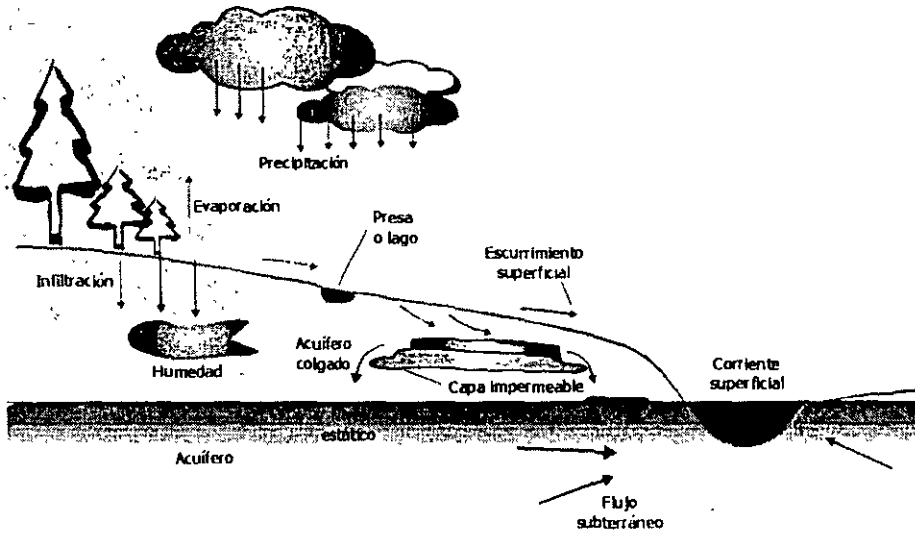
LESSER, 2003

# Ciclo hidrológico



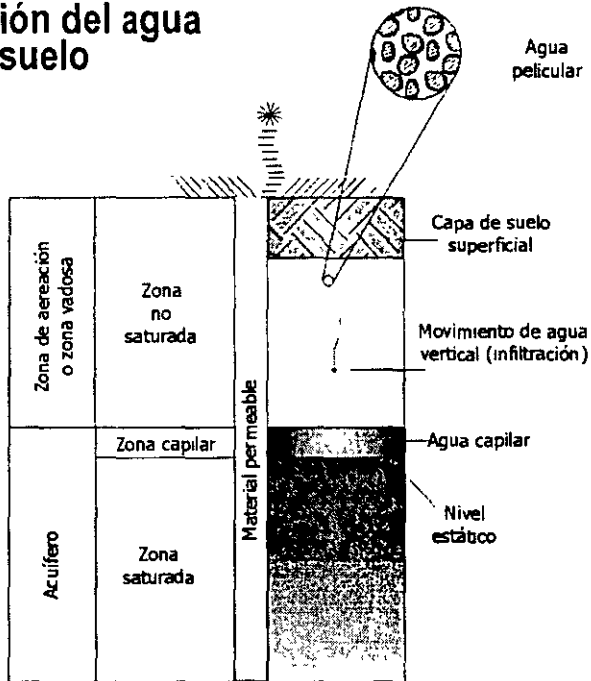
LESSER, 2004

# Ciclo hidrológico



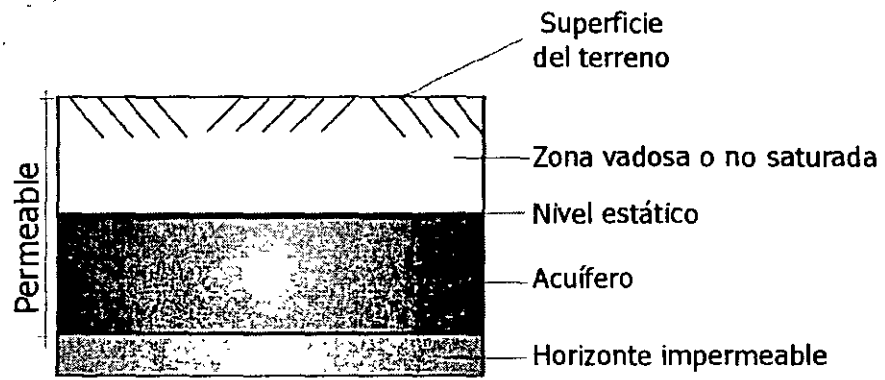
LESSER, 2004

# Distribución del agua en el subsuelo



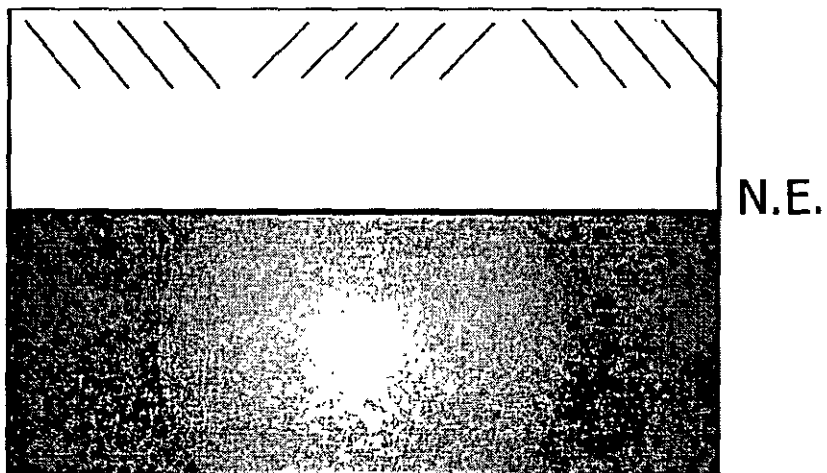
LESSER, 2004

## Acuífero



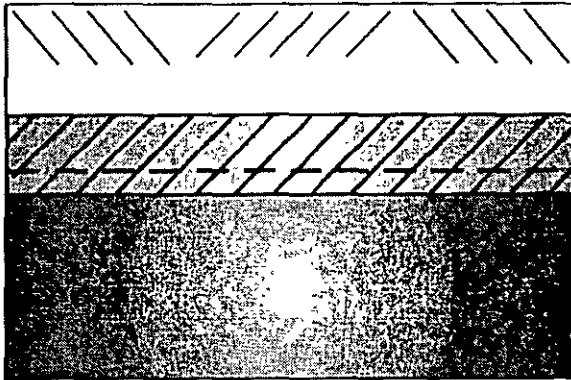
 LESSER, 2004

## Acuífero libre



 LESSER, 2004

### Acuífero confinado

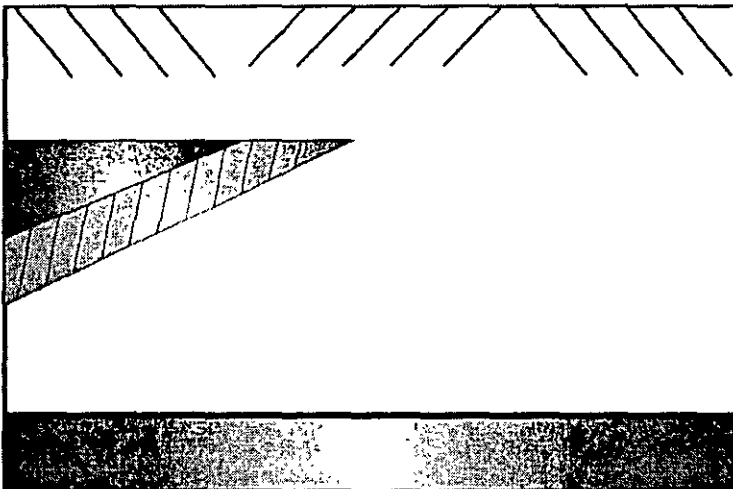


Nivel  
piezométrico



LESSER, 2004

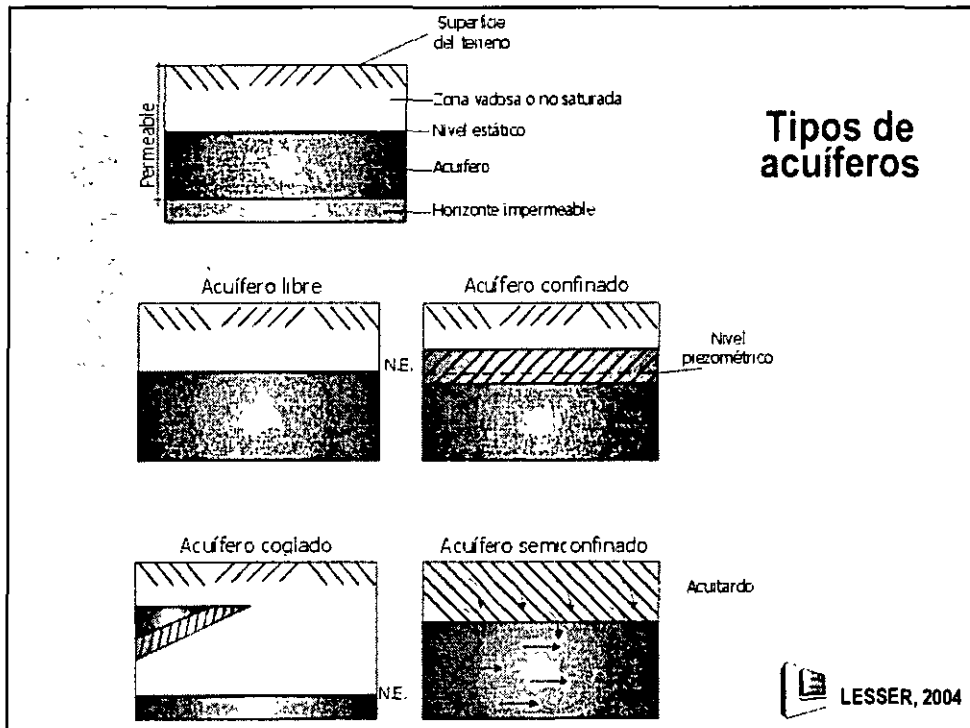
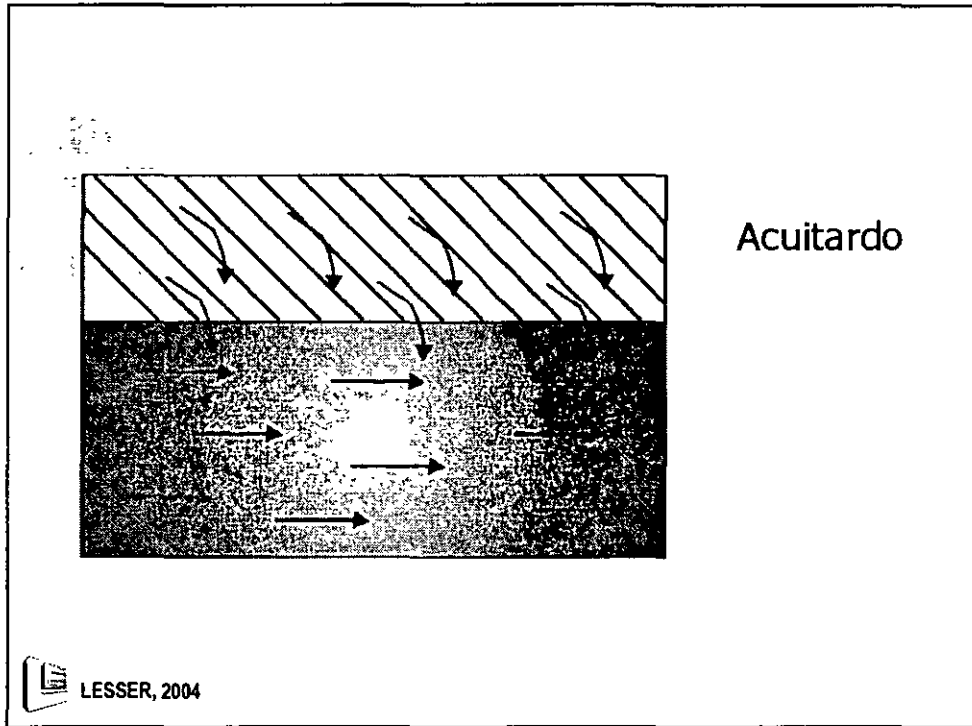
### Acuífero colgado



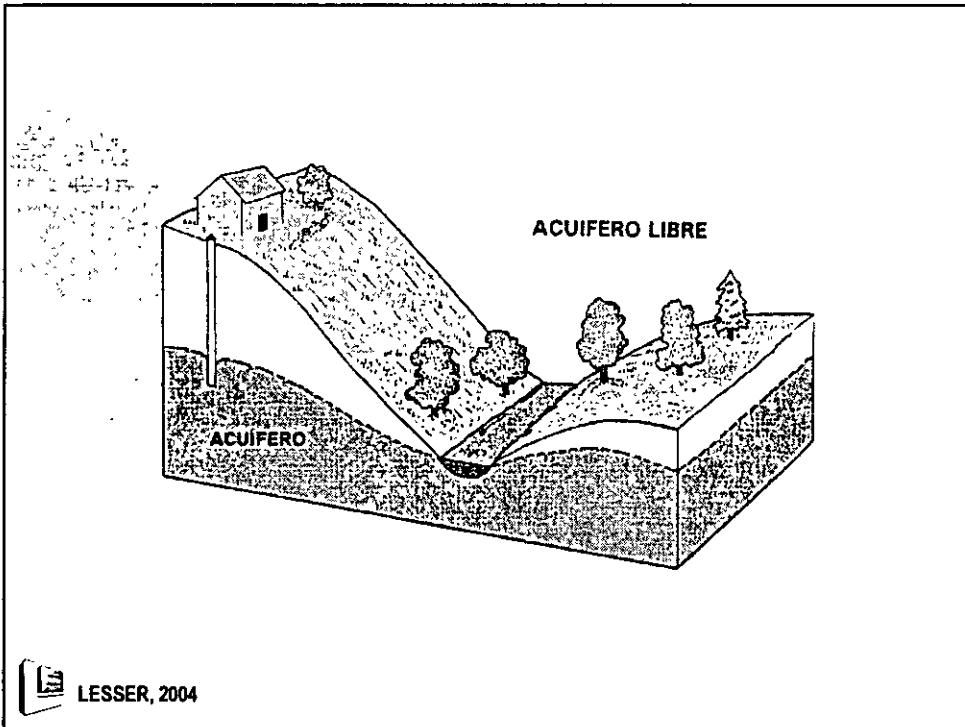
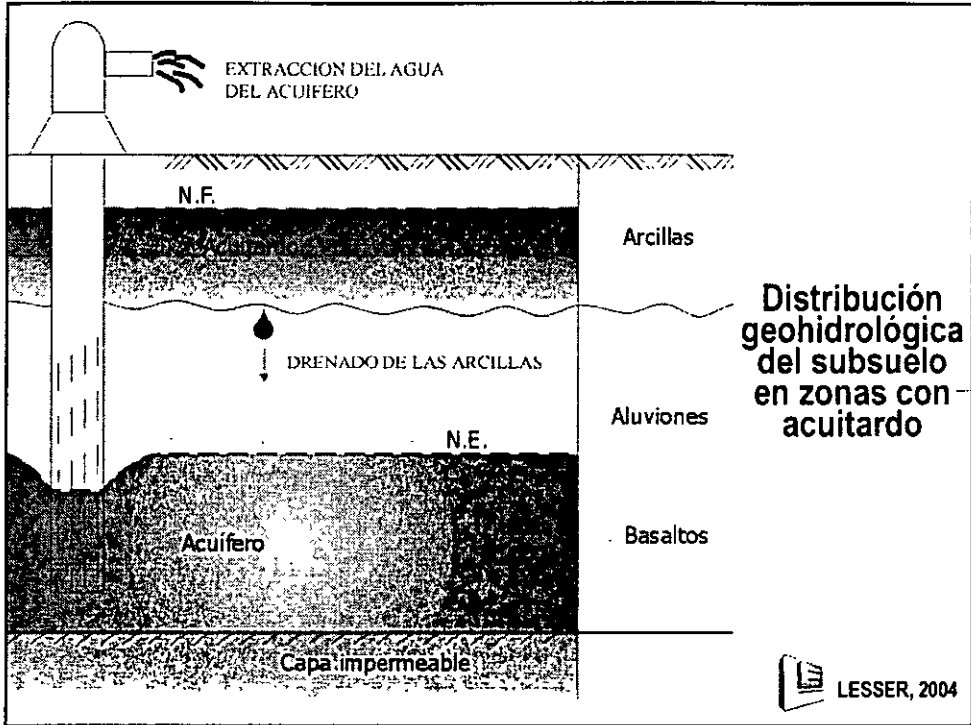
N.E.

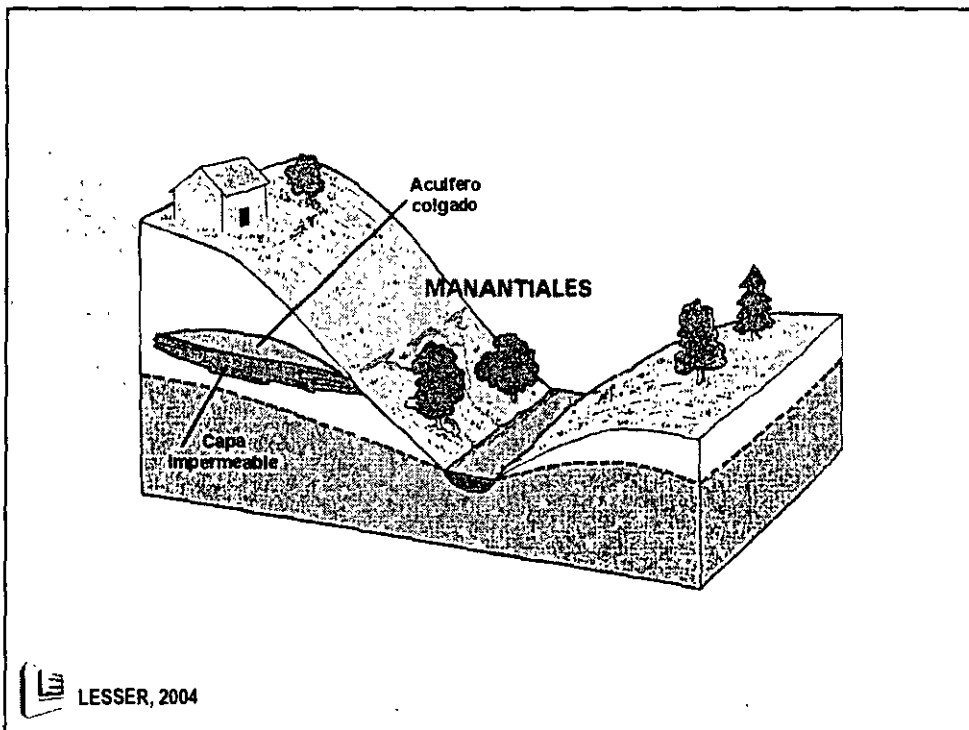
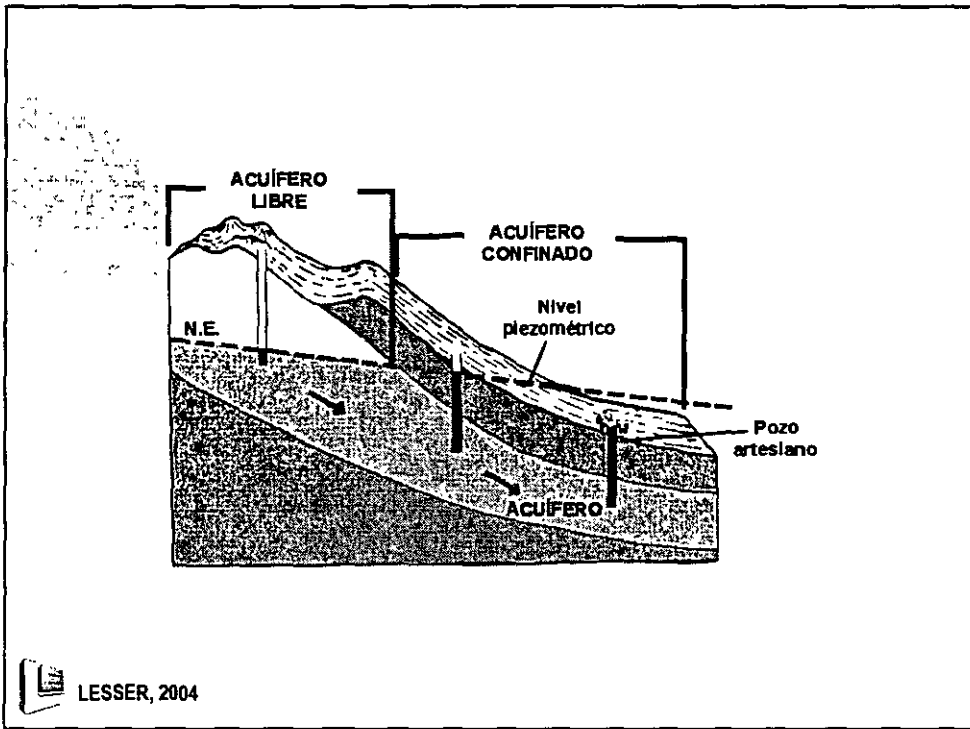


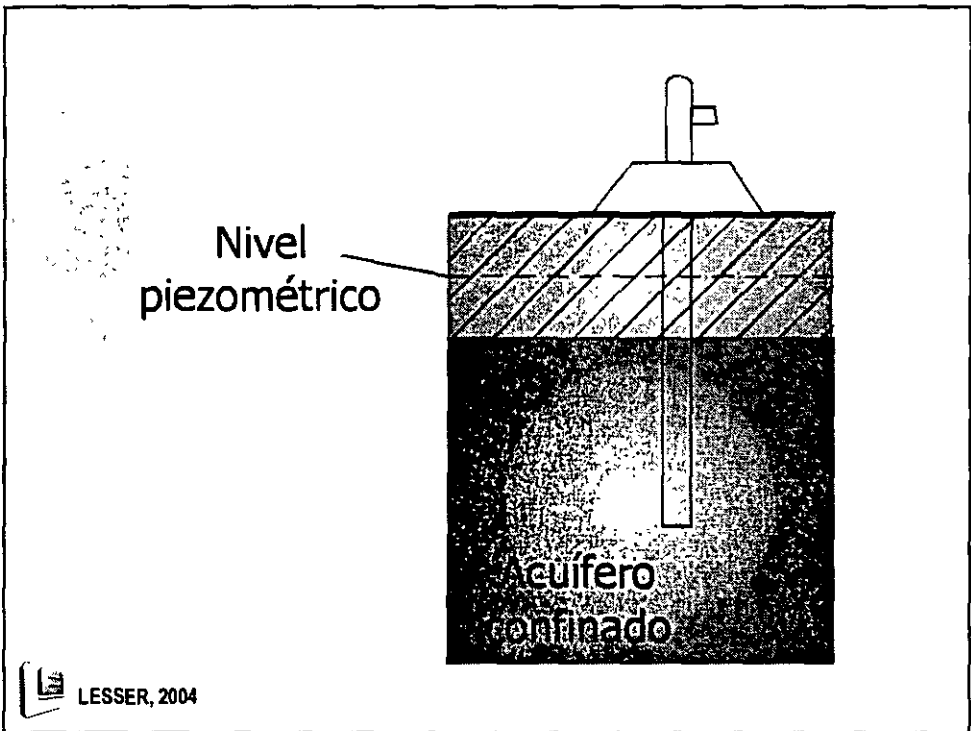
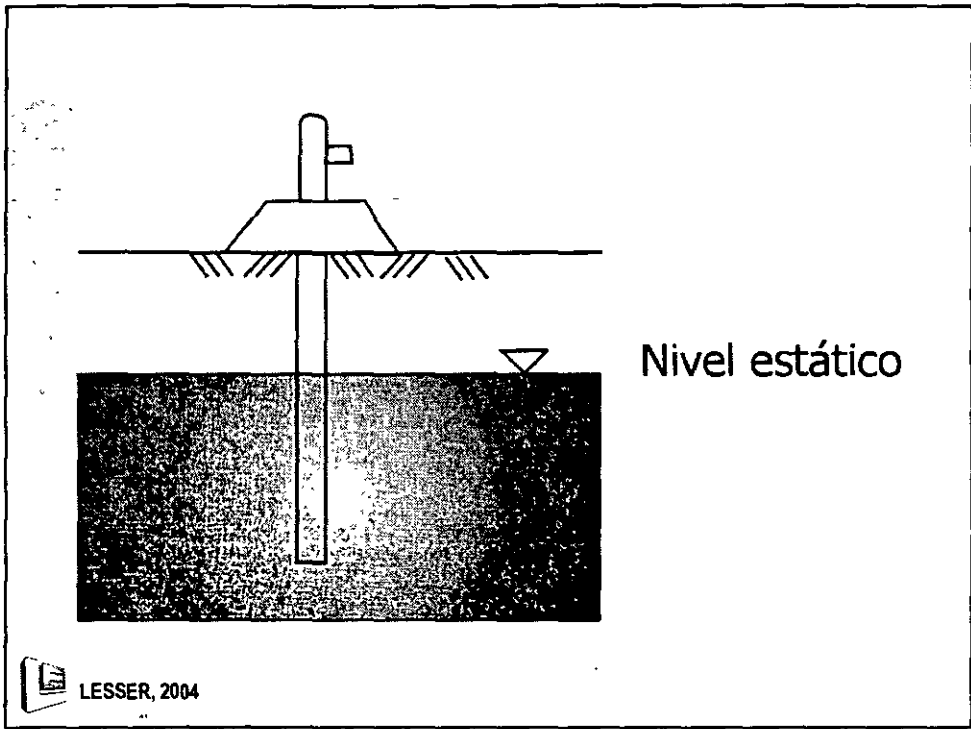
LESSER, 2004

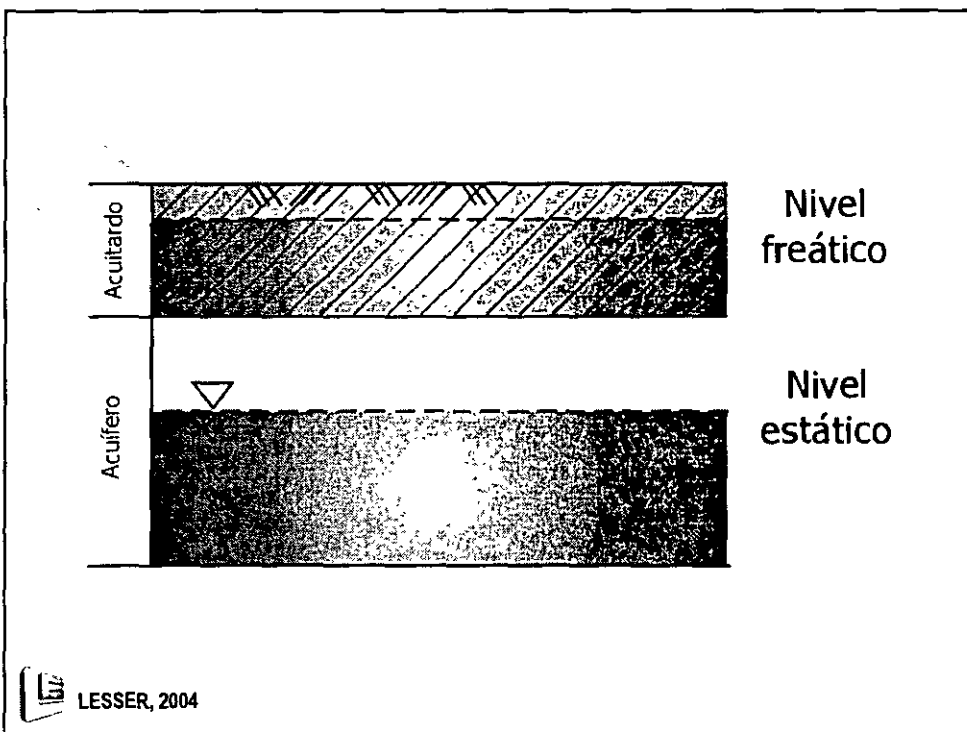
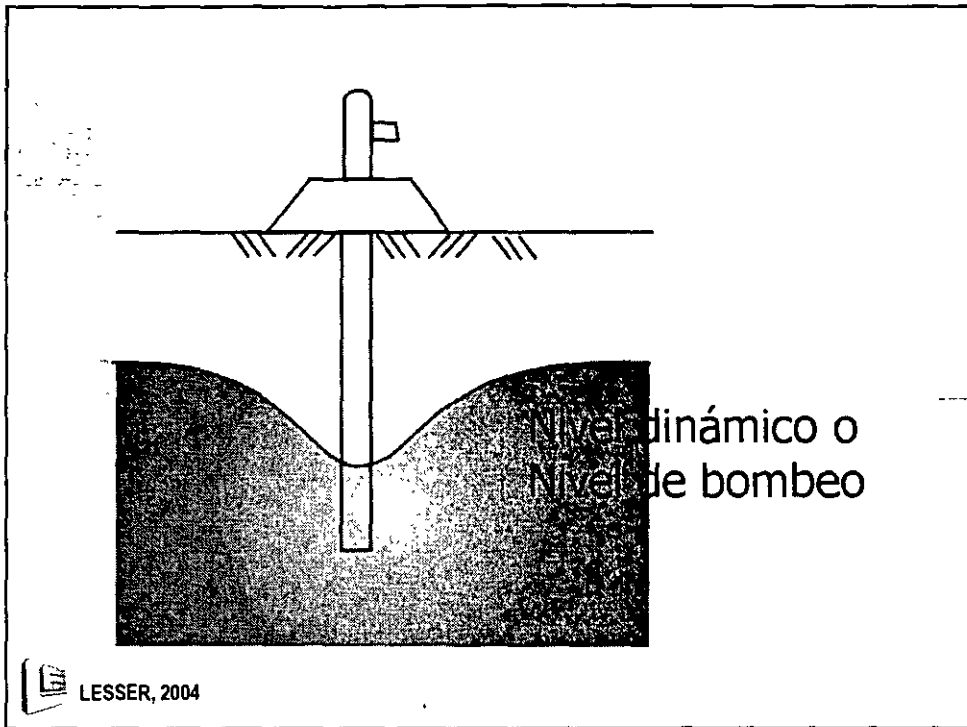


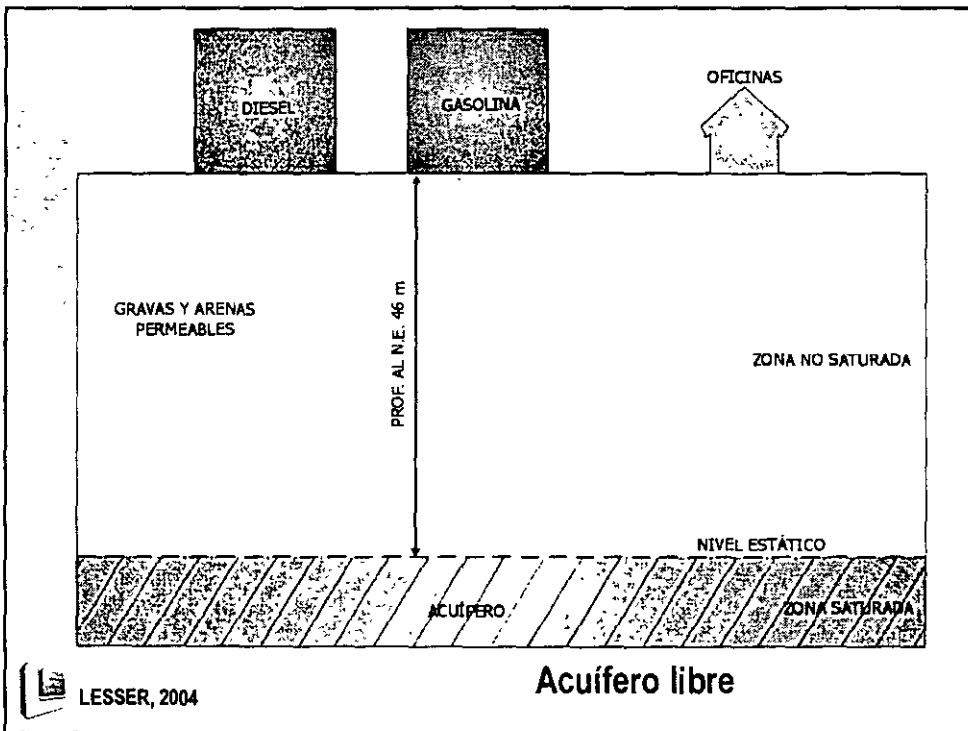
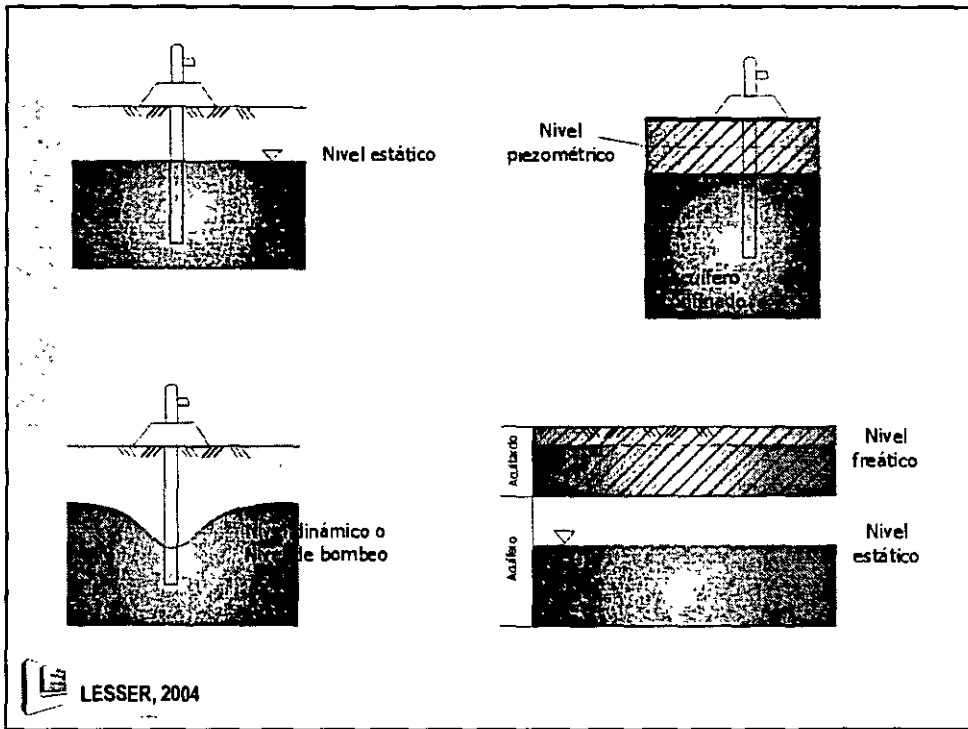


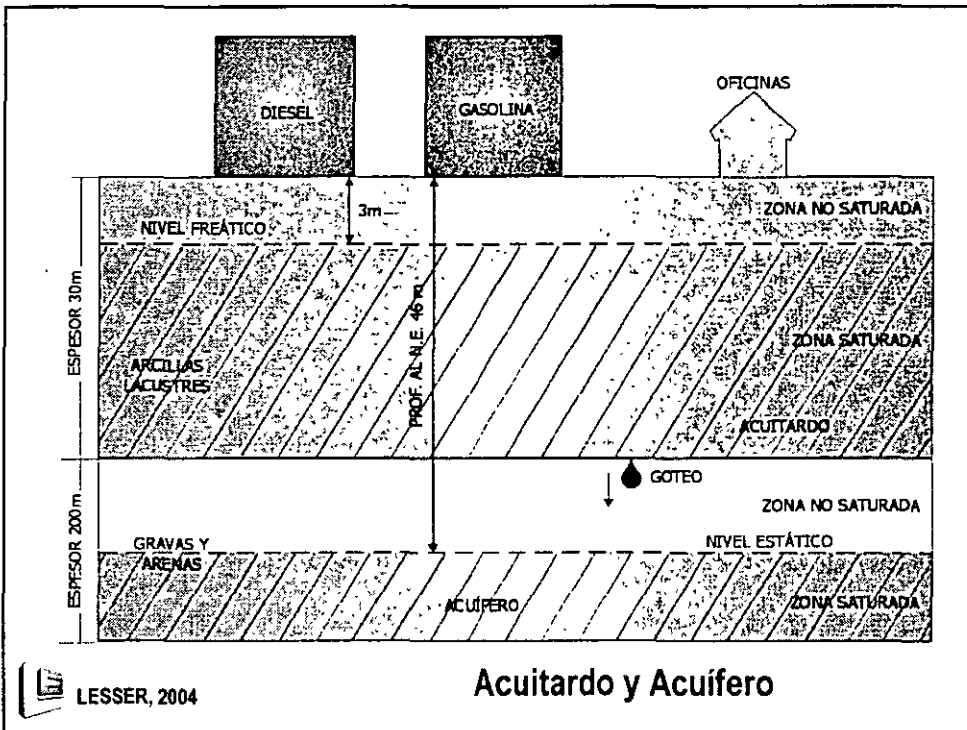
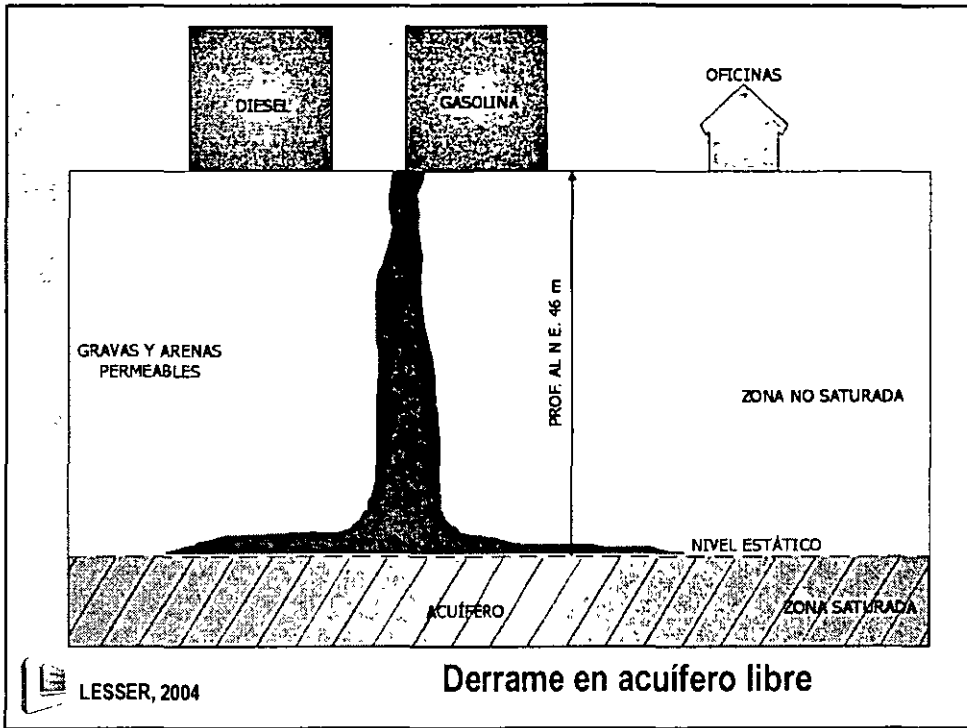


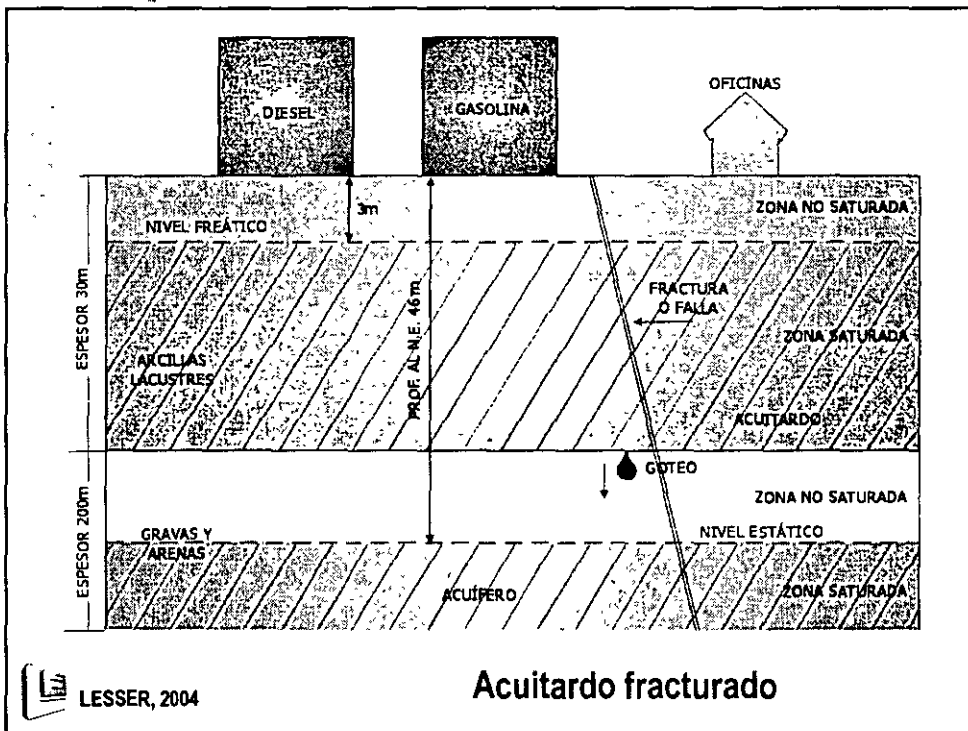
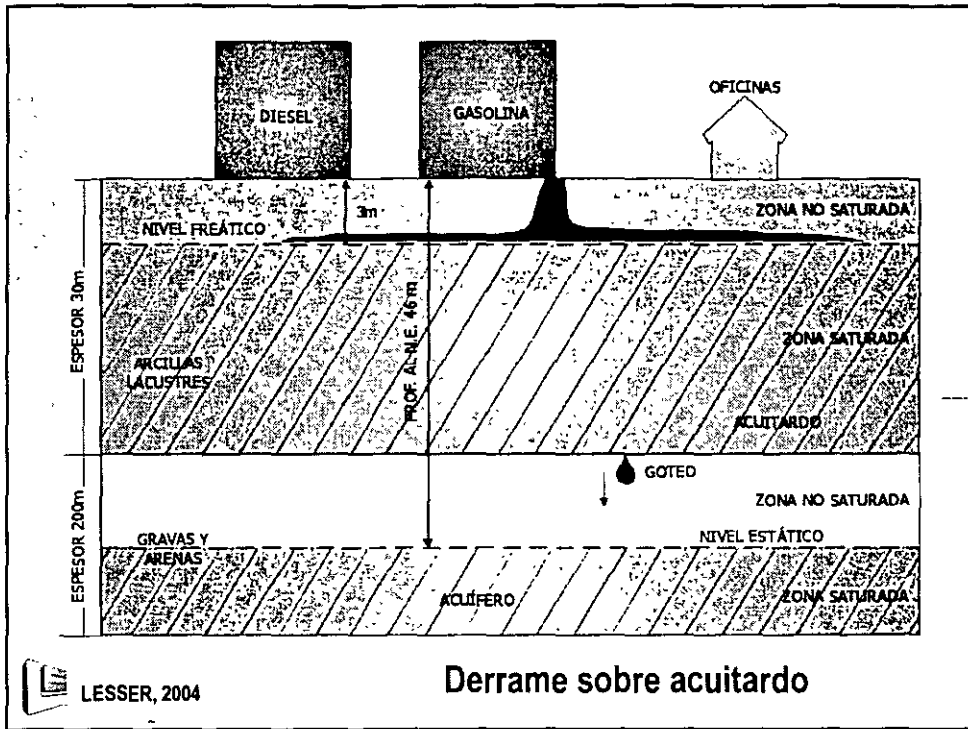


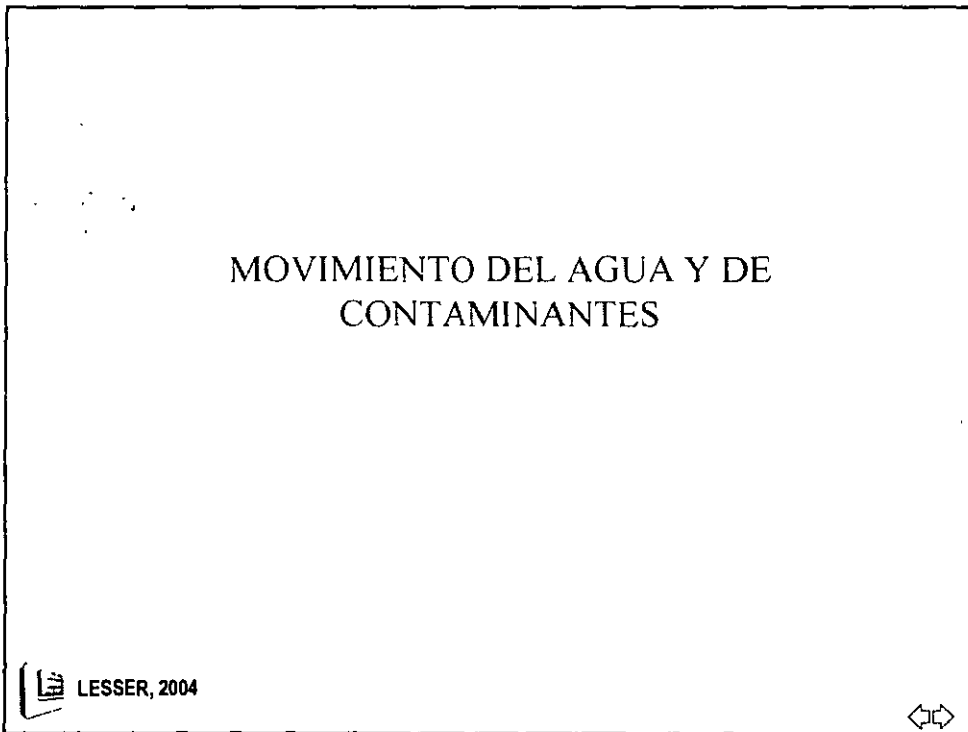
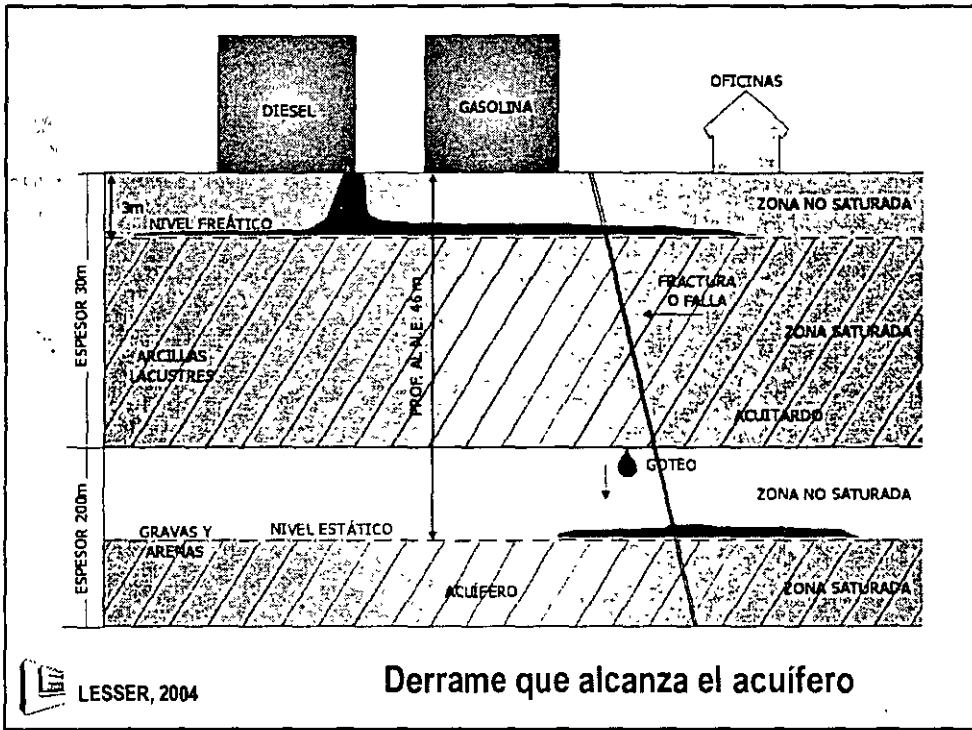




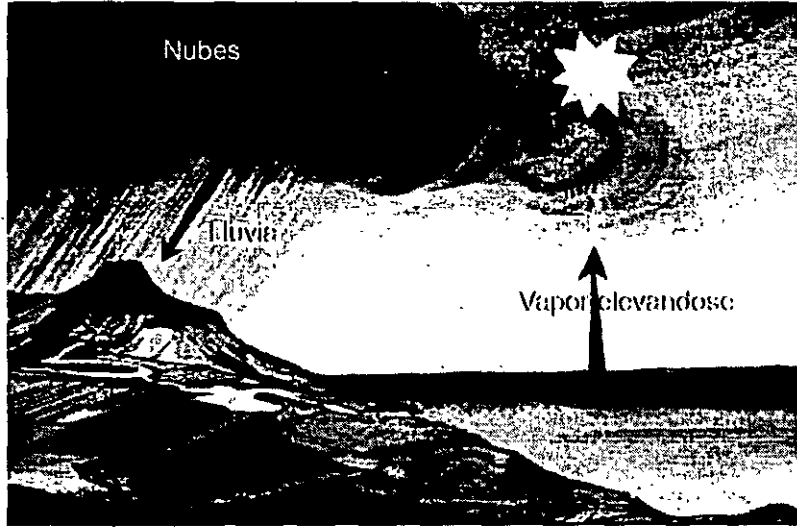




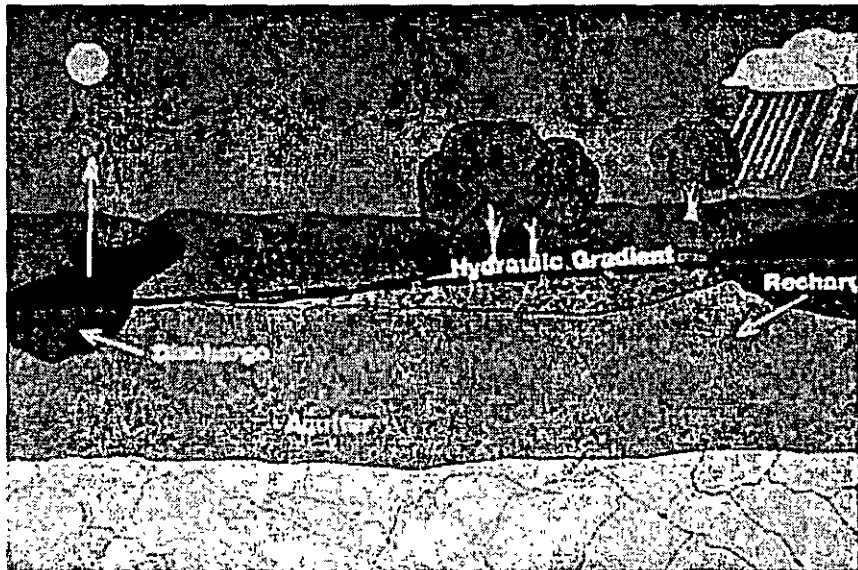




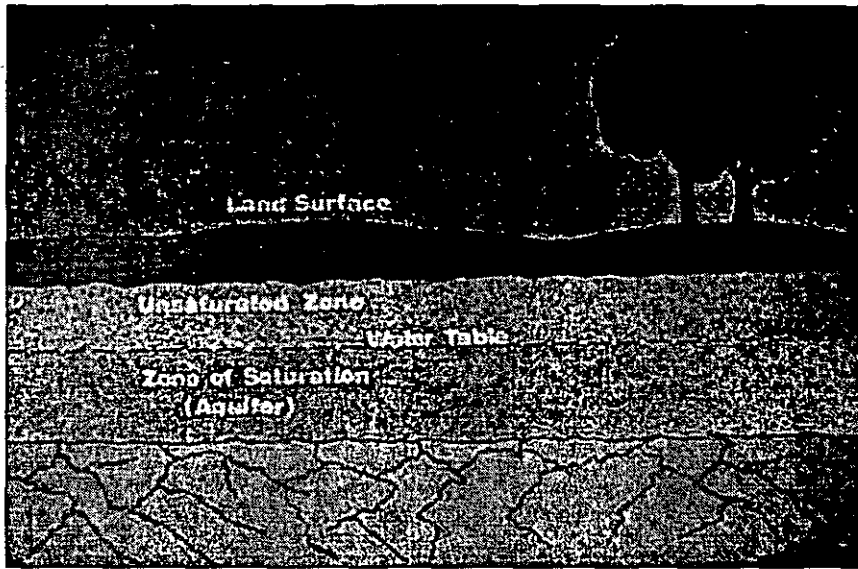




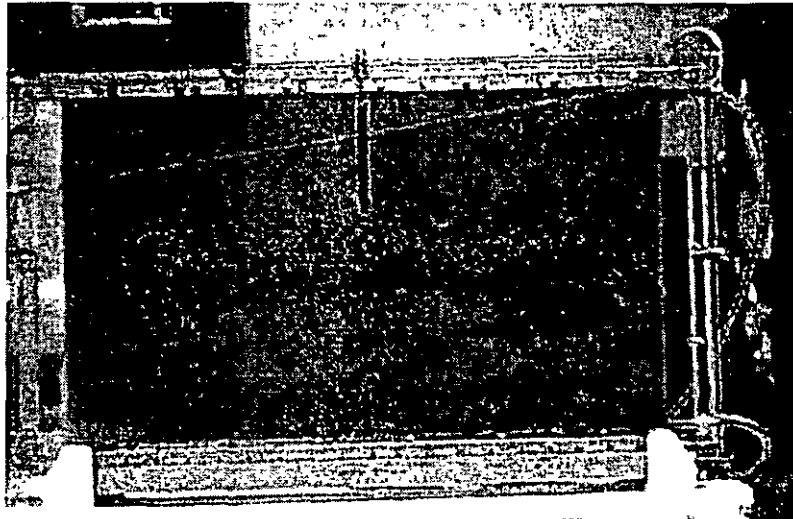
Ciclo hidrológico



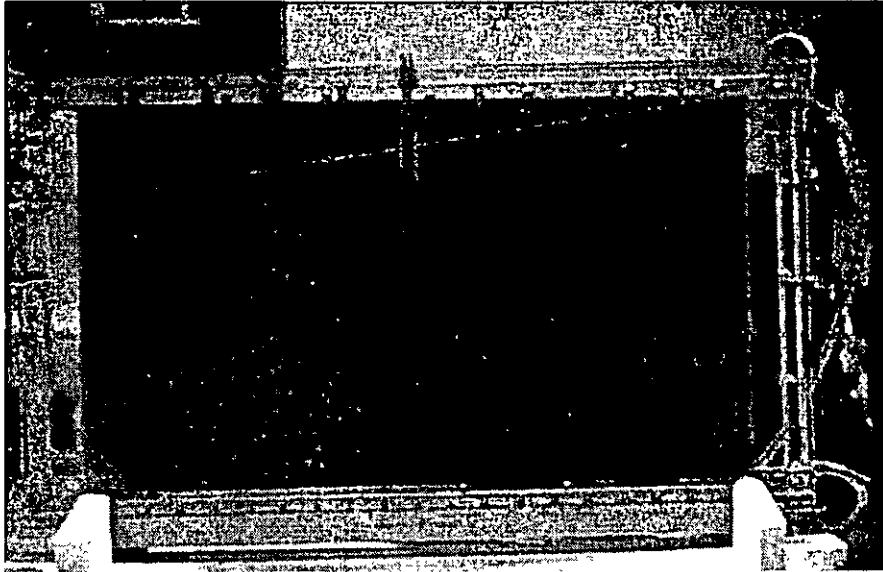
Gradiente hidráulico



Acuifero

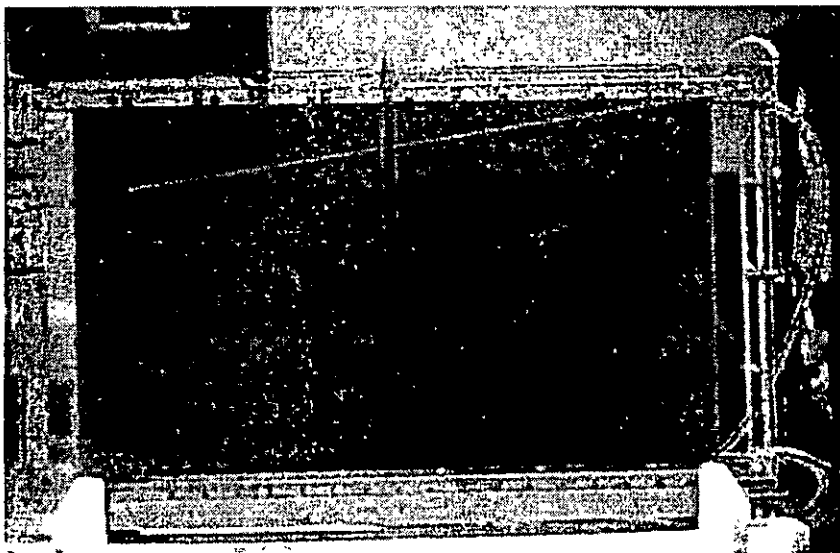


**Modelo de laboratorio**



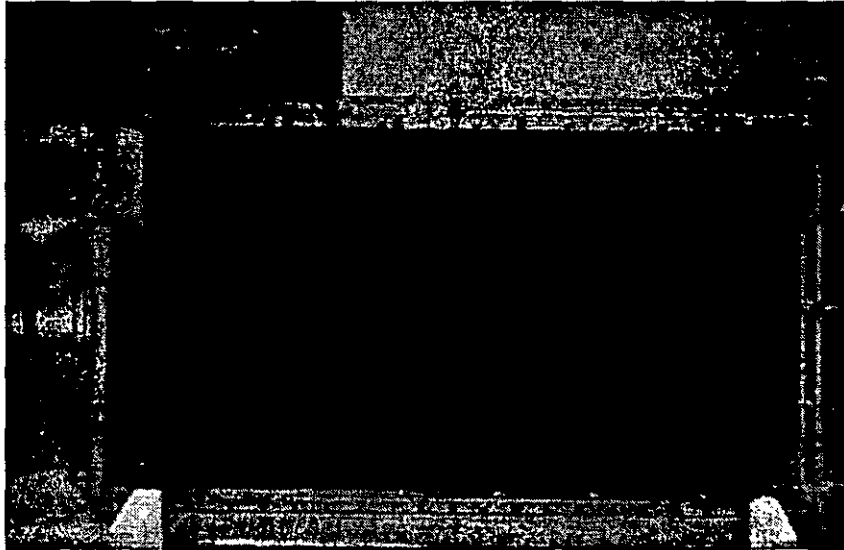
**Continua flujo (2)**

**Modelo de laboratorio**



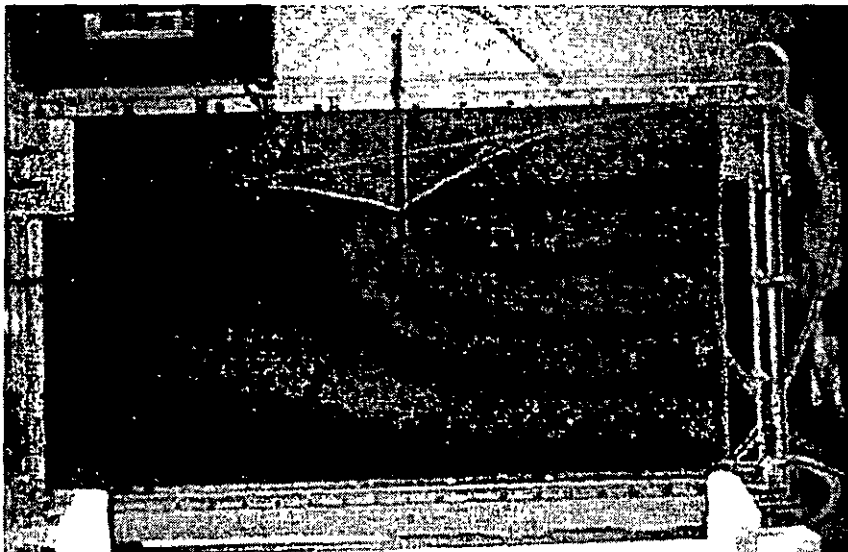
**Continua flujo (3)**

**Modelo de laboratorio**

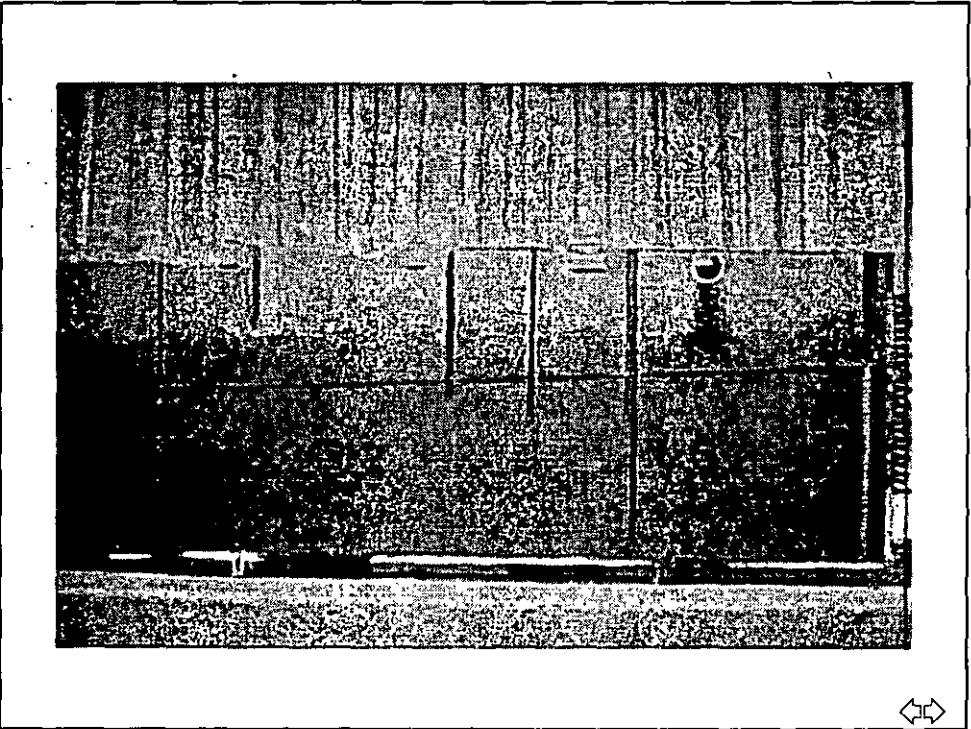
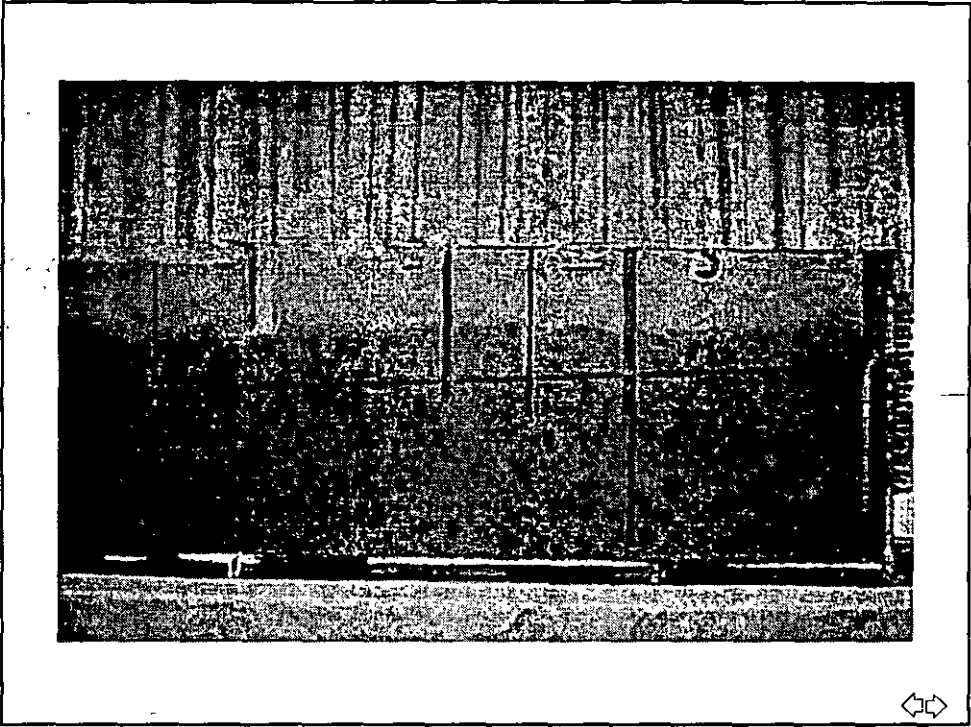


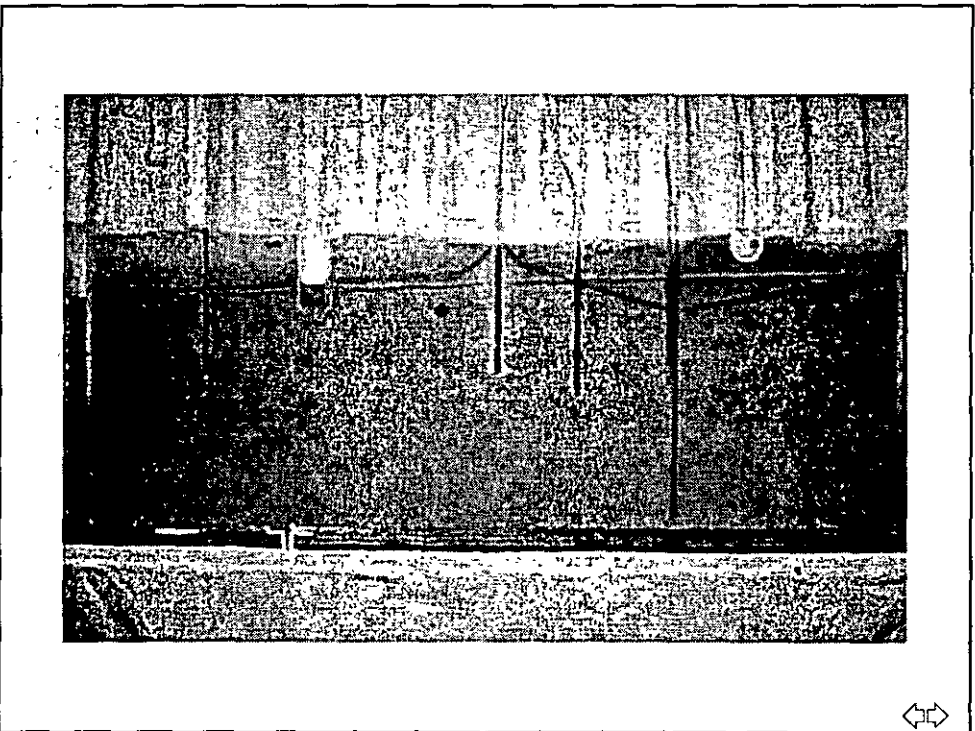
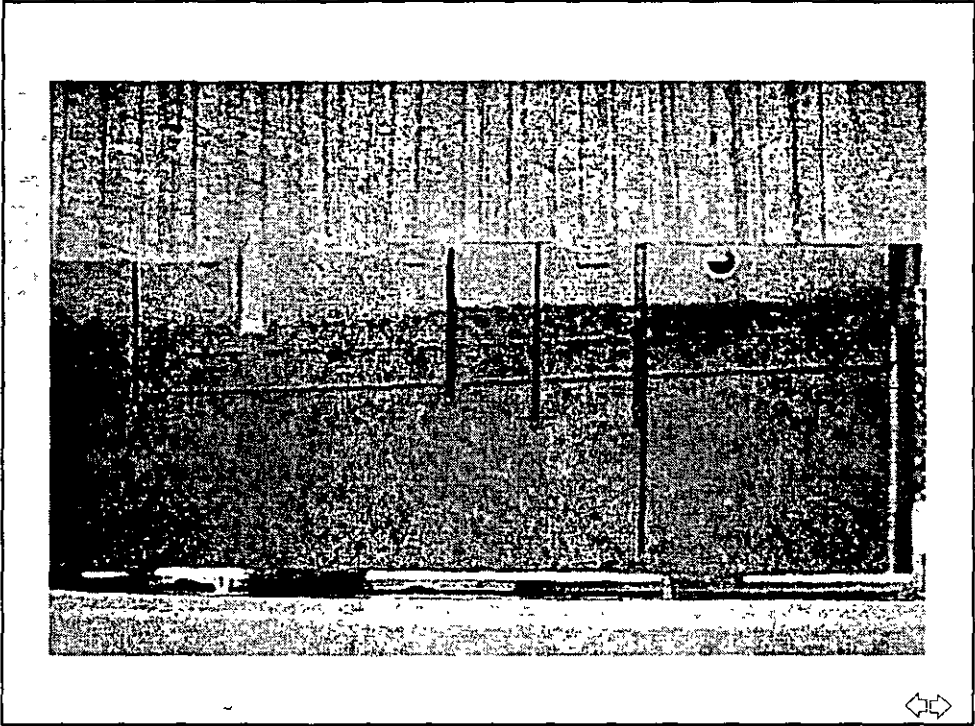
**Continua flujo (4)**

**Modelo de laboratorio**

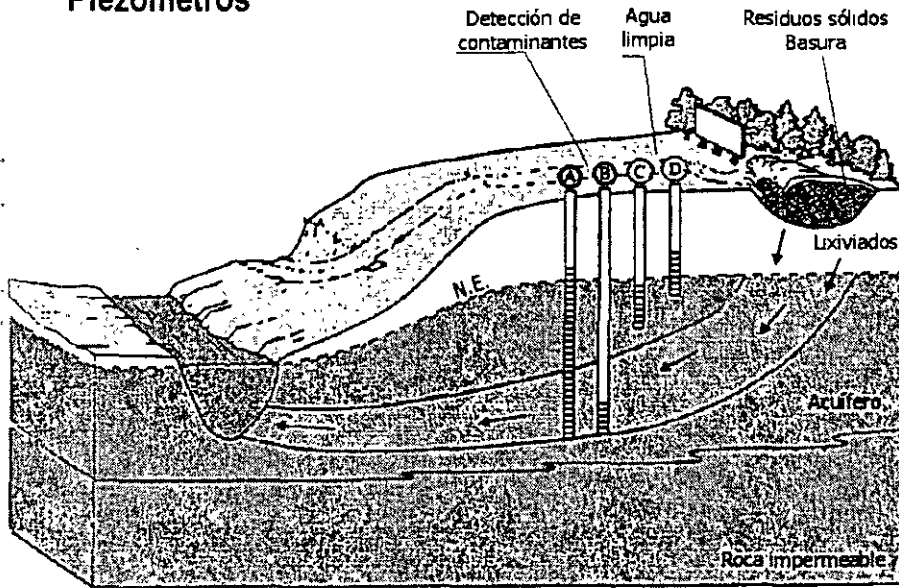


**Modificación del esquema de flujo por bombeo**

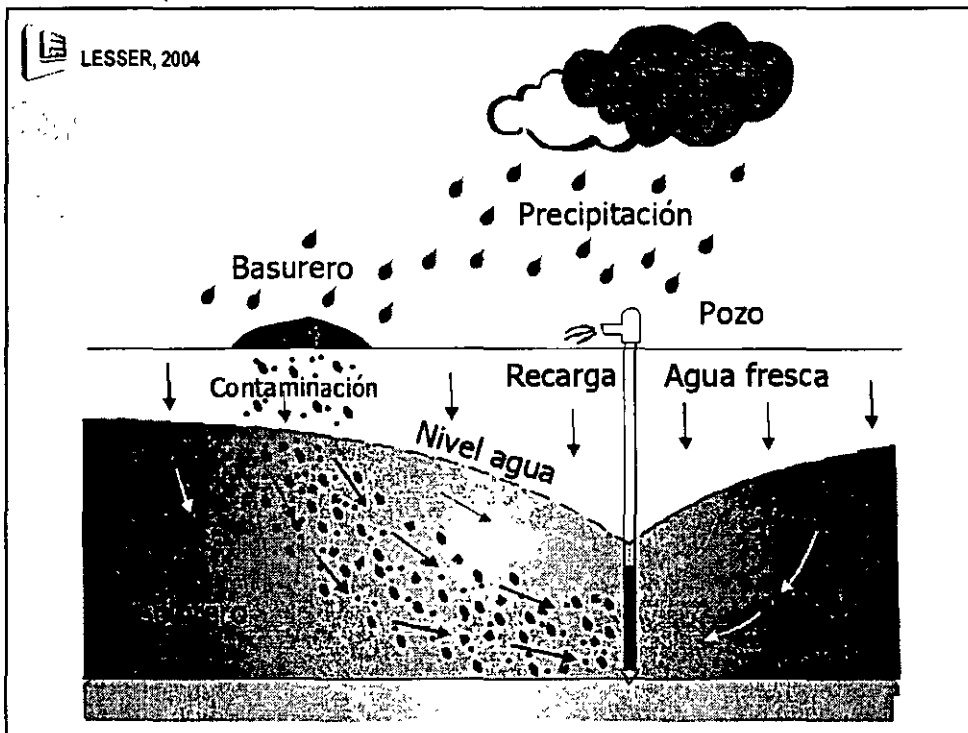




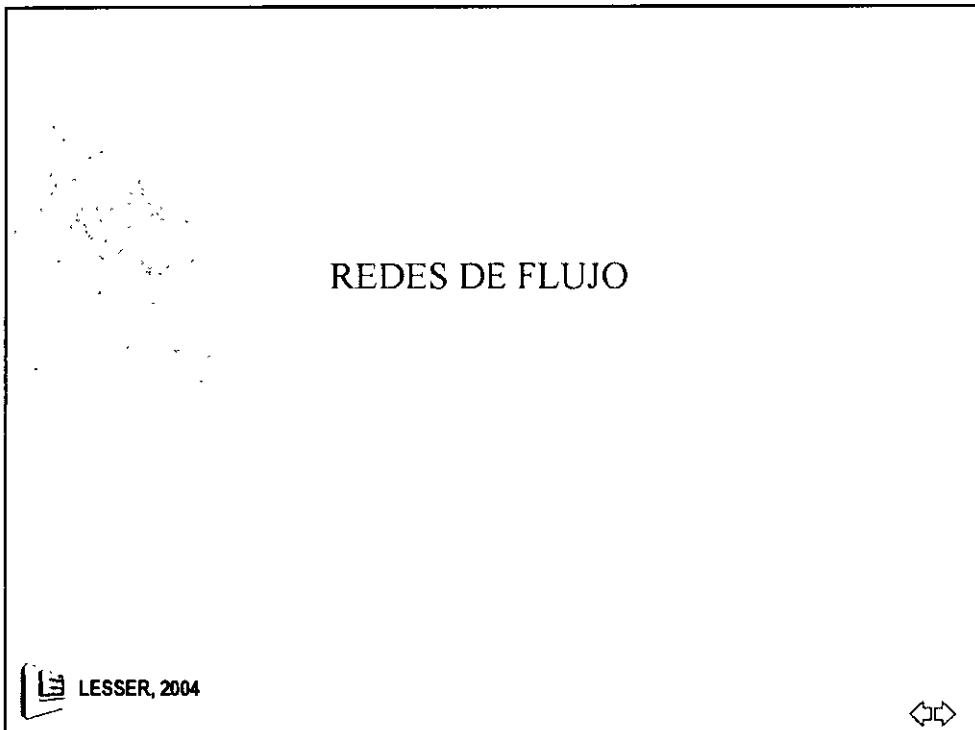
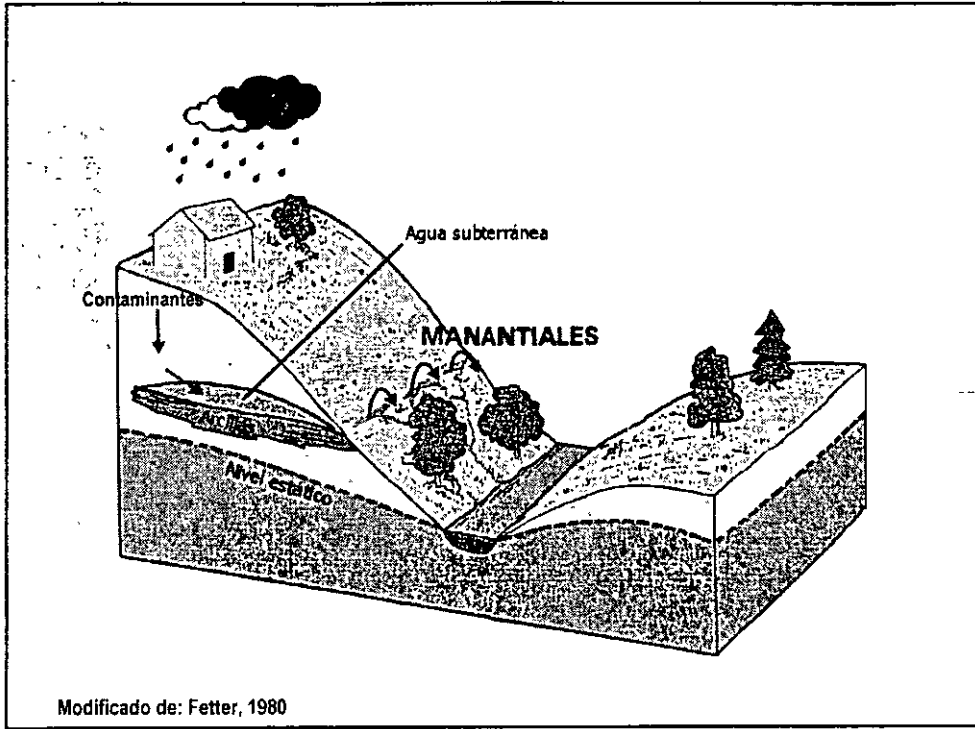
# Piezómetros



Modificado de: Fetter, 1993

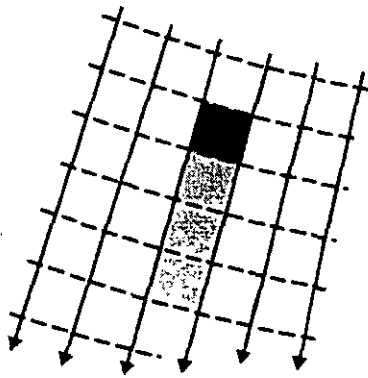


LESSER, 2004

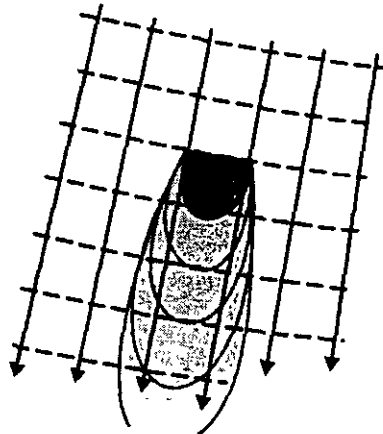




## Movimiento de contaminantes



Por transporte o advección

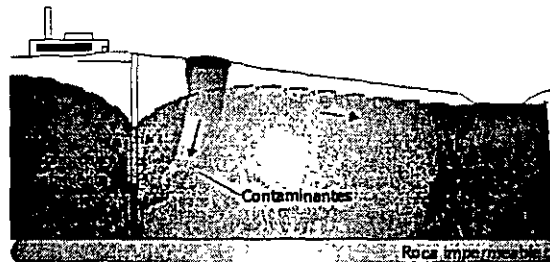
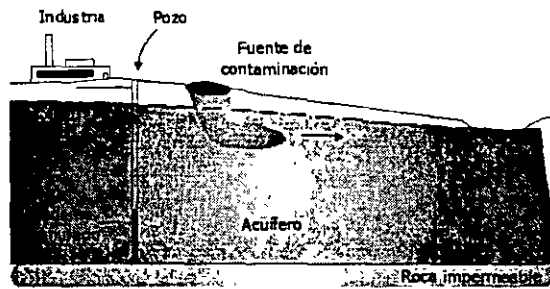


Por transporte + dispersión

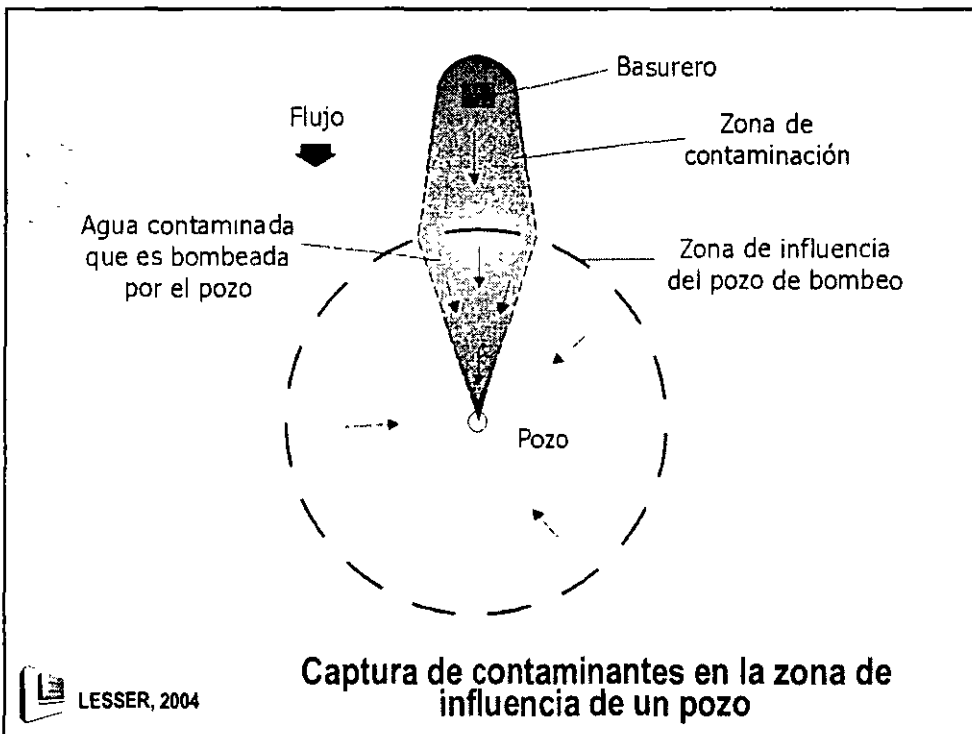
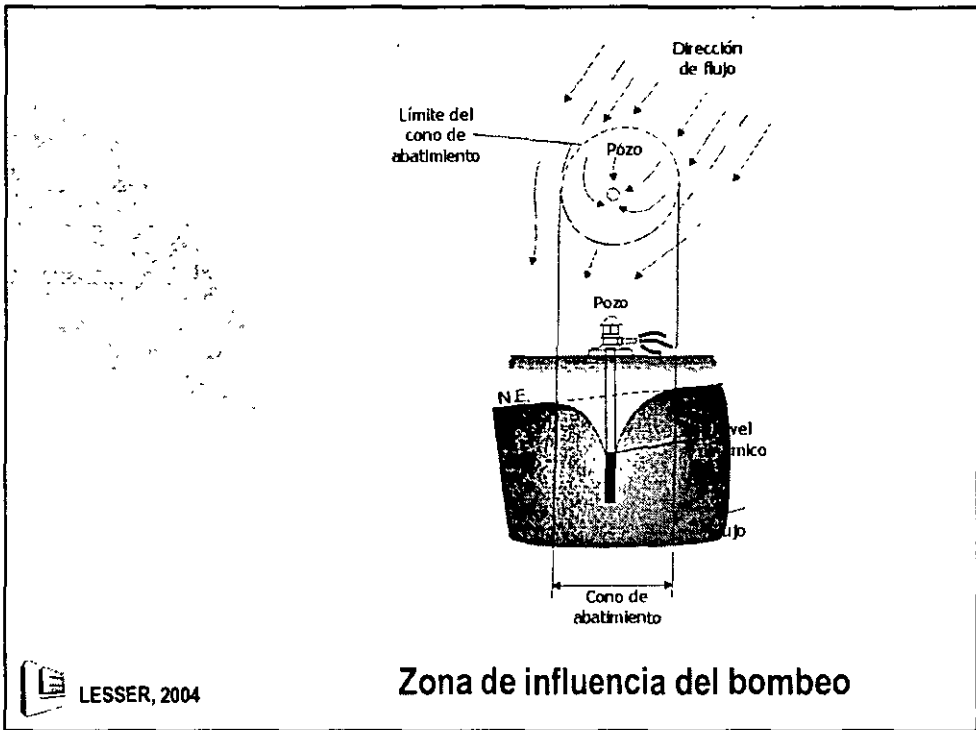


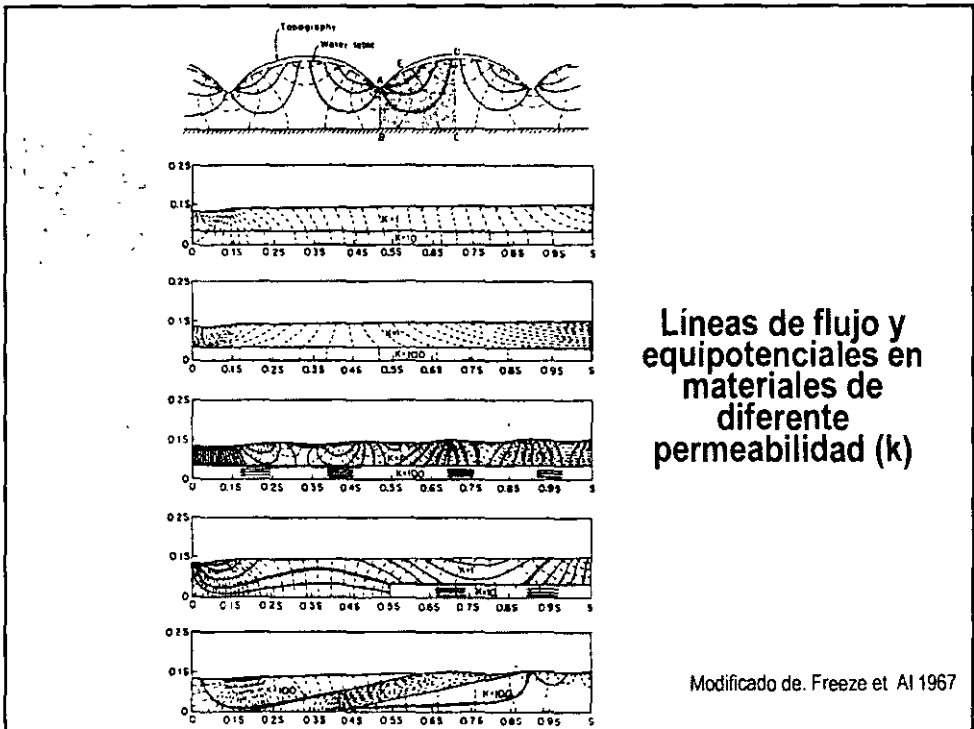
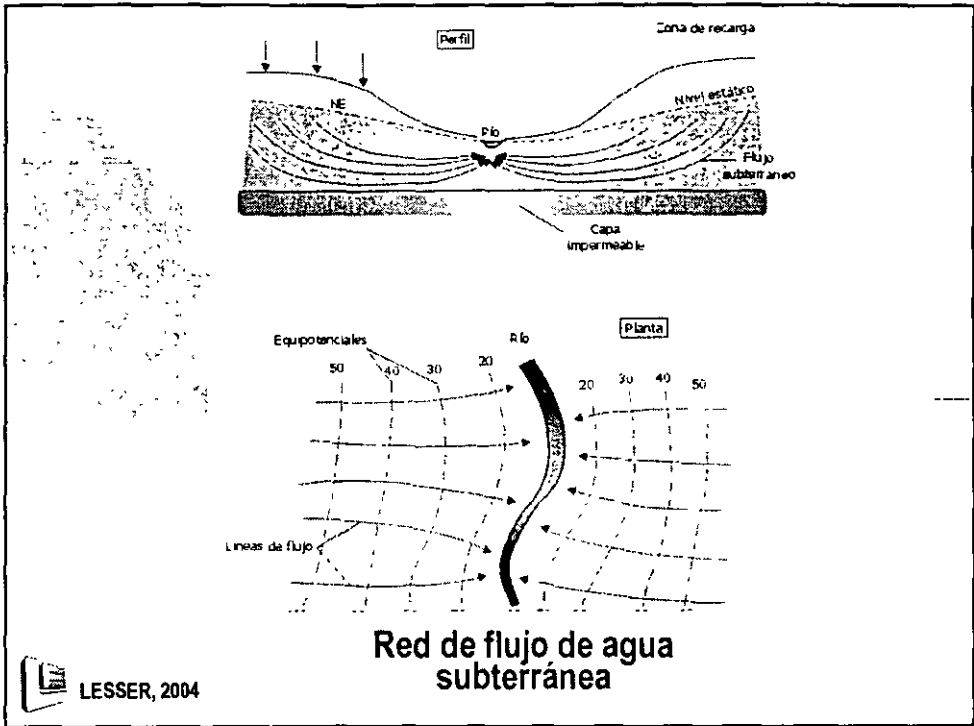
LESSER, 2004

## Contaminación y dirección del flujo subterráneo



LESSER, 2004



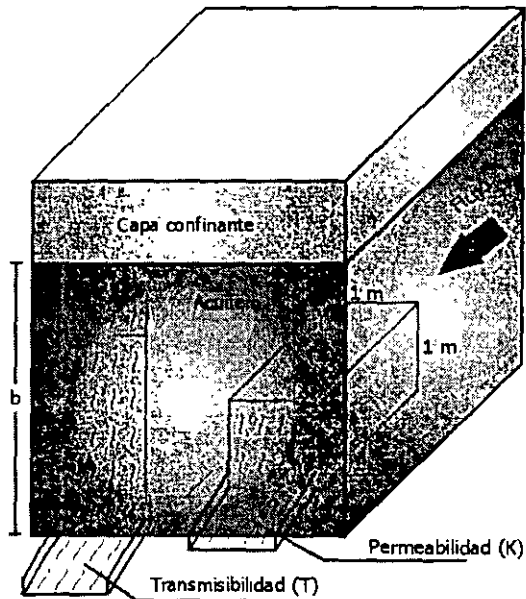


## DEFINICIÓN DE TÉRMINOS



## Transmisibilidad y Permeabilidad

$b$  = Espesor del acuífero  
 $S$  = Coeficiente de almacenamiento  
 $S_s$  = Coeficiente específico =  $S/b$



# Rangos de permeabilidad

Table 2.2 Range of Values of Hydraulic Conductivity and Permeability

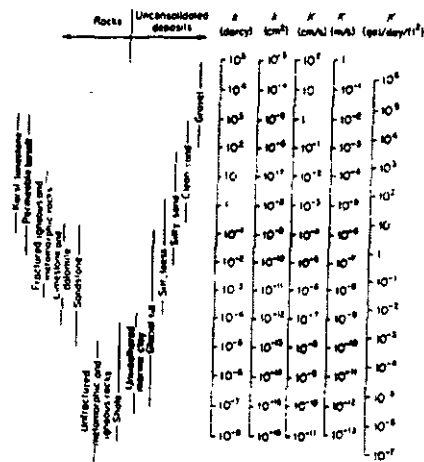


Table 2.3 Conversion Factors for Permeability and Hydraulic Conductivity Units

Permeability $k_f$	Hydraulic conductivity $k$				
	cm/s	ft/d	dm/dy	m/s	ft/s
cm <sup>2</sup>	1	$1.01 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^3$	$9.86 \times 10^{-2}$	$3.22 \times 10^2$
ft <sup>2</sup>	$9.29 \times 10^2$	1	$9.42 \times 10^{10}$	$9.11 \times 10^3$	$2.99 \times 10^4$
darcy	$9.87 \times 10^{-9}$	$1.04 \times 10^{-11}$	1	$9.86 \times 10^{-9}$	$3.17 \times 10^{-8}$
m <sup>2</sup>	$1.02 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-8}$	$1.04 \times 10^3$	1	3.28
ft <sup>2</sup>	$3.11 \times 10^{-4}$	$3.33 \times 10^{-7}$	$3.12 \times 10^3$	$3.03 \times 10^{-4}$	1
U.S. gal. day <sup>-1</sup> ft <sup>2</sup>	$4.2 \times 10^{-10}$	$3.83 \times 10^{-13}$	$3.49 \times 10^{-7}$	$4.72 \times 10^{-10}$	$1.55 \times 10^{-9}$

De: Freeze y Cherry, 1979

\*To obtain  $k$  in ft/d, multiply  $k$  in cm/s by  $1.01 \times 10^{-3}$ .

Porosidad (n)

$$n = V_h/V_t$$

$V_h$  = Volumen de huecos  
 $V_t$  = Volumen total



LESSER, 2004

Porosidad efectiva ( $S_y$ ) = Rendimiento específico

$$S_y = V_d/V_t$$

$V_d$  = Volumen drenado

Coefficiente de almacenamiento (S)

Acuífero libre entre 0.02 y 0.30

Acuífero confinado entre 0.001 y 0.00001

(K) Permeabilidad = Conductividad hidráulica

(T) Transmisibilidad

Flujo en una franja de espesor b (ver figura)

b = espesor del acuífero;  $T = kb$

$S_s$  = Coeficiente específico =  $S / b$

CUANTIFICACIÓN DEL AGUA  
SUBTERRÁNEA

 LESSER, 2004

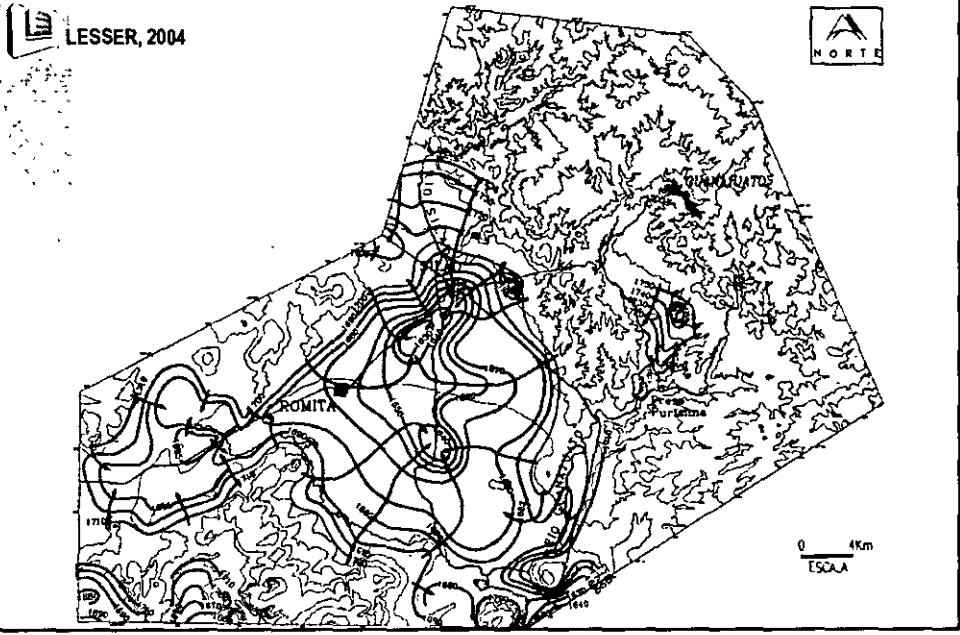


CUANTIFICACIÓN DEL AGUA  
SUBTERRÁNEA

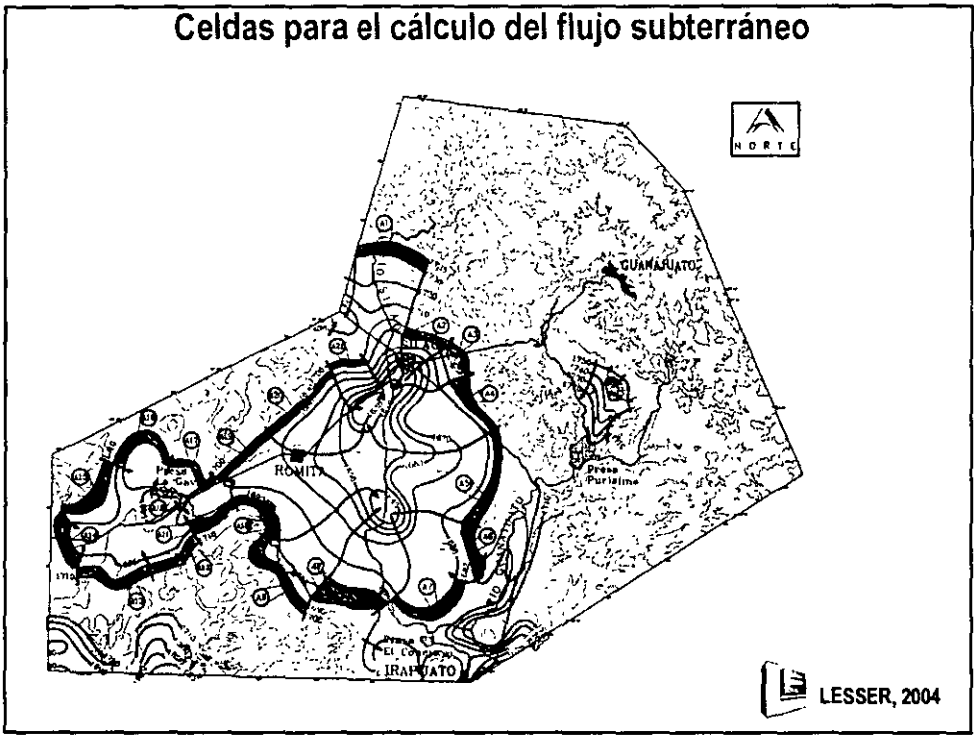
 LESSER, 2004



### Configuración de la elevación del NE y dirección del flujo subterráneo (Silao, Gto.)



### Celdas para el cálculo del flujo subterráneo



## Cálculo de entradas de agua por flujo subterráneo

CELDA	LARGO (L) km.	ANCHO (b) km.	GRADIENTE HIDRAULICO x E-03	TRANSMISI BILIDAD m <sup>2</sup> /seg x 10	CAUDAL m <sup>3</sup> /seg.	VOLUMEN x 10 <sup>6</sup> M <sup>3</sup> /año
A-1	1.000	6.500	5.00	0.0030	0.098	3.074
A-2	0.700	4.000	14.28	0.0015	0.086	2.701
A-3	0.250	3.100	40.00	0.0010	0.124	3.910
A-4	0.750	5.500	13.33	0.0010	0.073	2.312
A-5	0.750	8.700	13.33	0.0010	0.116	3.657
A-6	1.000	4.500	10.00	0.0020	0.090	2.838
A-7	0.900	7.200	2.22	0.0040	0.064	2.016
A-8	1.500	5.500	3.33	0.0040	0.073	2.310
A-9	0.800	8.000	6.25	0.0040	0.200	6.306
A-10	0.900	6.000	11.11	0.0030	0.200	6.305
A-11	0.700	4.300	14.28	0.0030	0.184	5.808
A-12	0.700	5.000	14.28	0.0040	0.286	9.005
A-13	0.750	6.500	13.33	0.0040	0.347	10.928
A-14	1.000	4.000	5.00	0.0030	0.060	1.892
A-15	1.100	6.300	9.09	0.0040	0.229	7.223
A-16	0.700	7.000	14.28	0.0030	0.300	9.455
A-17	0.500	5.200	20.00	0.0030	0.312	9.837
A-18	0.500	3.500	20.00	0.0030	0.210	6.621
A-19	0.600	5.800	16.66	0.0040	0.387	12.187
A-20	0.600	7.500	16.66	0.0040	0.500	15.759
A-21	0.500	3.200	20.00	0.0030	0.192	6.054

130.197



LESSER, 2004

## VULNERABILIDAD O RIESGO GEOHIDROLÓGICO



LESSER, 2004





## Vulnerabilidad o riesgo geohidrológico

### PARÁMETROS UTILIZADOS

Profundidad al nivel del agua	D
Recarga	R
Tipo de roca	A
Tipo de suelo	S
Pendiente del terreno	T
Zona vadosa	I
Permeabilidad	C

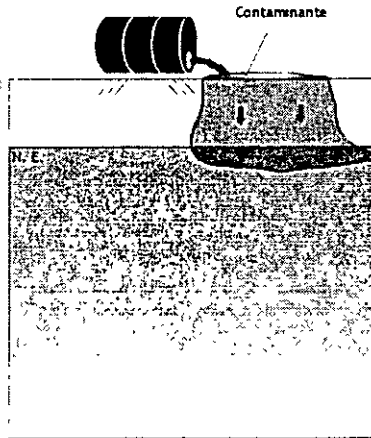


LESSER, 2004

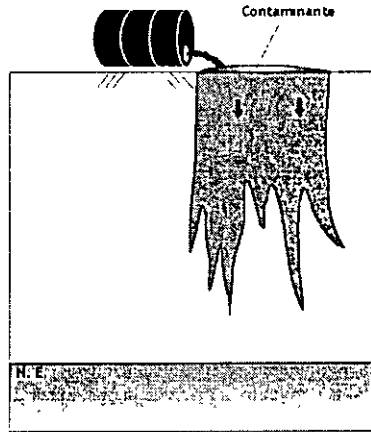
### Valores de vulnerabilidad de acuerdo a la profundidad al nivel estático

Rango en metros	Valor
0-1.5	10
1.5-4.5	9
4.5-9.0	7
9.0-15.2	5
15.2-23.0	3
23.0-30.0	2
30.0-0+	1
Peso específico: 5	

### Profundidad al nivel estático



Nivel estático somero  
contaminación directa



Nivel estático profundo  
disminuye el grado de  
contaminación al acuífero

LESSER, 2004



LESSER, 2004

### Valores de vulnerabilidad de acuerdo a la profundidad al nivel estático

#### EJEMPLO

Profundidad al nivel del agua  
3m  
 $9 \times 5 = 45$

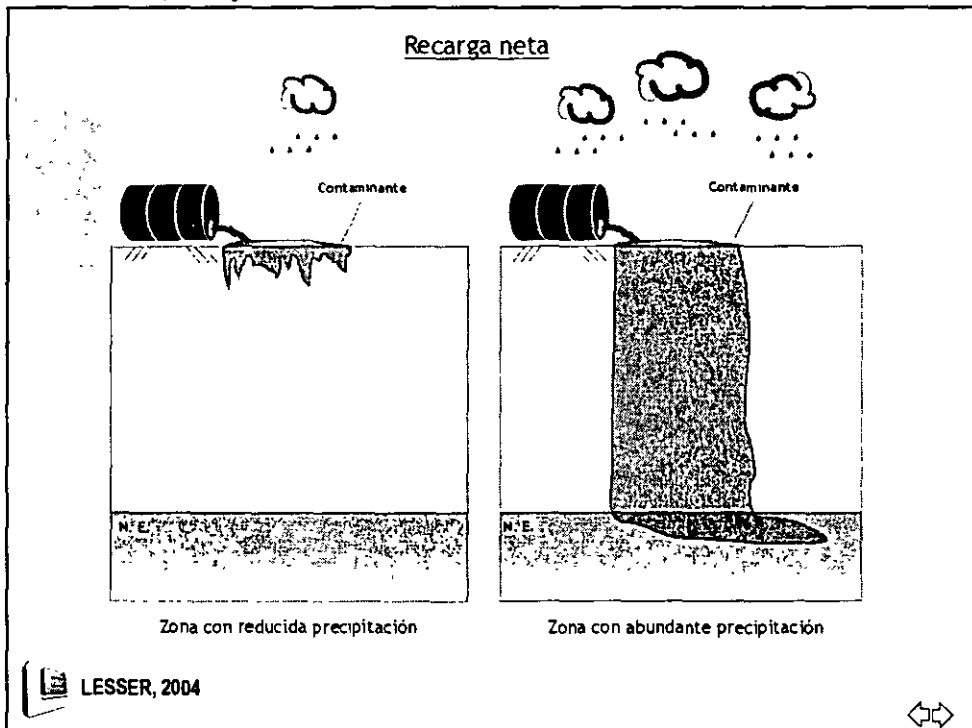
Rango en metros	Valor
0-1.5	10
1.5-4.5	9
4.5-9.0	7
9.0-15.2	5
15.2-23.0	3
23.0-30.0	2
30.0-0+	1
Peso específico: 5	



LESSER, 2004

## Recarga neta

Rango en mm	Valor
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250+	9
Peso específico: 4	





LESSER, 2004

## Recarga neta

Rango en mm	Valor
0-50	1
50-100	3
100-175	6
175-250	8
250-+	9
Peso específico: 4	

Recarga
300m
$9 \times 4 = 36$

EJEMPLO

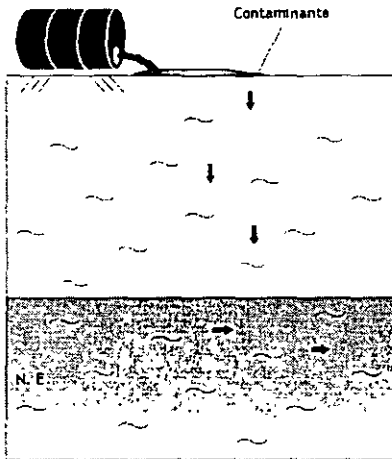


LESSER, 2004

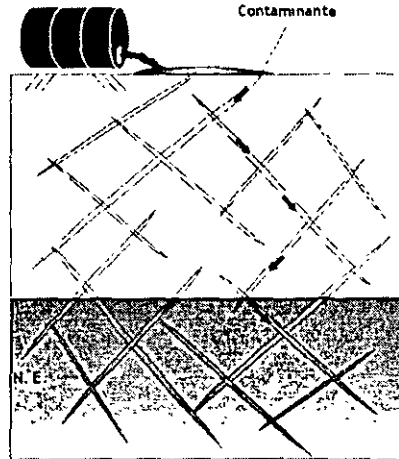
## Tipo de roca

Tipo	Rango	Valor Típico
Lutita	1-3	2
Rocas ígneas y metamórficas	2-5	3
Rocas ígneas y metamórficas intemperizadas	3-5	4
Secuencias de capas de arenisca, caliza y lutita	4-6	5
Tilita	5-9	6
Arenisca	4-9	6
Caliza	4-9	6
Arena y grava	4-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza cástica	9-10	10
Peso específico: 3		

### Tipo de roca acuífera



Lutitas, areniscas  
contaminación lenta



Basaltos, calizas y aren,  
contaminación rápida

LESSER, 2004



LESSER, 2004

### Tipo de roca

#### EJEMPLO

Tipo de roca  
Arena y grava  
 $6 \times 3 = 18$

Tipo	Rango	Valor Típico
Lutita	1-3	2
Rocas ígneas y metamórficas	2-5	3
Rocas ígneas y metamórficas intemperizadas	3-5	4
Secuencias de capas de arenisca, caliza y lutita	4-6	5
Tilita	5-9	6
Arenisca	4-9	6
Caliza	4-9	6
Arena y grava	4-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza cástica	9-10	10
Peso específico: 3		



LESSER, 2004

### Tipo de suelo

Tipo	Valor
Capa delgada o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Carbón	8
Agregado de arcillas	7
Mezcla Arenosa	6
Mezcla	5
Mezcla limosa	4
Mezcla arcillosa	3
Abono	2
Arcilla	1
Peso específico: 2	



LESSER, 2004

### Tipo de suelo

Tipo	Valor
Capa delgada o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Carbón	8
Agregado de arcillas	7
Mezcla Arenosa	6
Mezcla	5
Mezcla limosa	4
Mezcla arcillosa	3
Abono	2
Arcilla	1
Peso específico: 2	

### EJEMPLO

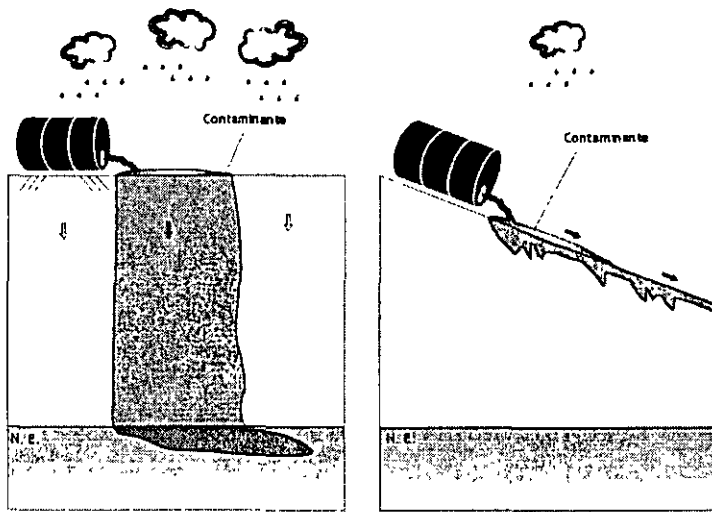
Tipo de suelo
Arcilla
$1 \times 2 = 2$

## Pendiente del terreno (ángulo de inclinación en %)

Rango	Valor
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1
Peso específico: 1	



## Pendiente del terreno



Baja pendiente  
facilita infiltración

Fuente pendiente  
agua tiende a escurrir  
por la superficie



**Pendiente del terreno  
(ángulo de inclinación en %)**

Pendiente  
del terreno

0-2%

$10 \times 1 = 10$

EJEMPLO

Rango	Valor
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
18+	1
Peso específico: 1	



LESSER, 2004



**Zona vadosa**

Tipo	Rango	Valor típico
Capa confinante	1	1
Limo o arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca		
Horizontes de caliza, arenisca y lutita	4-8	6
Arena y grava con alto contenido de limo y arcilla	4-8	6
Rocas ígneas y metamórficas	4-8	4
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza cárstica	8-10	10
Peso específico: 5		

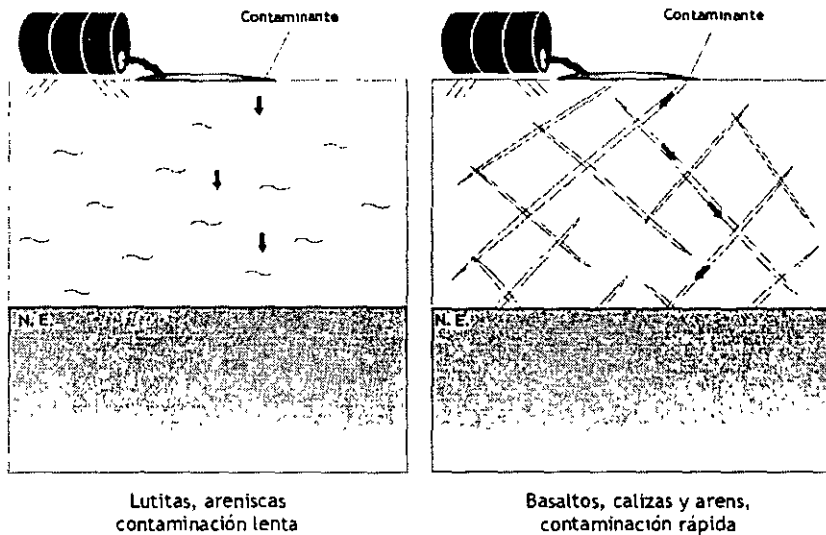


LESSER, 2004





### Zona vadosa



LESSER, 2004



### EJEMPLO

Zona vadosa  
Arena y grava  
 $8 \times 5 = 40$

### Zona vadosa

Tipo	Rango	Valor típico
Capa confinante	1	1
Limo o arcilla	2-6	3
Lutita	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca		
Horizontes de caliza, arenisca y lutita	4-8	6
Arena y grava con alto contenido de limo y arcilla	4-8	6
Rocas ígneas y metamórficas	4-8	4
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza carstica	8-10	10
Peso específico: 5		

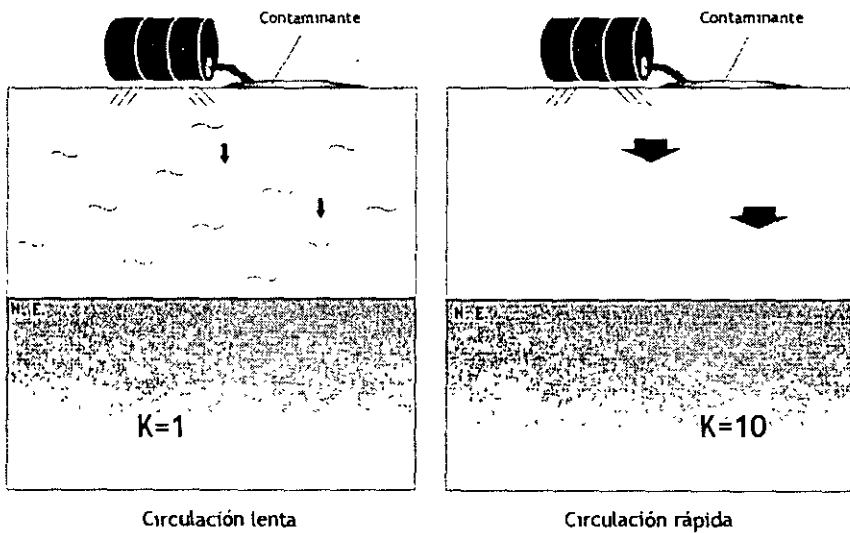
LESSER, 2004



### Permeabilidad en varios tipos de roca Conductividad hidráulica (m/s)

Rango	Valor
$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5}$	1
$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	2
$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$	4
$3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$	6
$5 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$	8
$9 \times 10^{-4} +$	10
Peso específico: 3	

### Permeabilidad





LESSER, 2004

Permeabilidad

$1 \times 10^{-4}$  m/seg

$4 \times 3 = 12$

EJEMPLO

### Permeabilidad en varios tipos de roca Conductividad hidráulica (m/s)

Rango	Valor
$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-5}$	1
$5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$	2
$1 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$	4
$3 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$	6
$5 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$	8
$9 \times 10^{-4} +$	10
Peso específico: 3	



LESSER, 2004

### Ejemplo de cálculo de vulnerabilidad

Factor	Sierra de basaltos	Valle de material granular Cubierto por arcillas
Nivel estático	5	5
Recarga neta	36	4
Tipo de roca	27	6
Tipo de suelo	20	2
Pendiente del terreno	1	10
Zona vadosa	45	5
Permeabilidad	30	3
Suma	164	35
Clasificación	altamente vulnerable	reducida vulnerabilidad

## CLASIFICACIÓN PROPUESTA

MENOR DE 50, VULNERABILIDAD BAJA  
ENTRE 50 Y 100, VULNERABILIDAD MEDIA  
ENTRE 100 Y 150, VULNERABILIDAD ALTA  
MAYOR DE 150, VULNERABILIDAD MUY ALTA



## LA GEOHIDROLOGIA EN LA CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE ACUIFEROS

- TIPOS DE ACUÍFEROS
- MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÉNEA
- REDES DE FLUJO
- DEFINICIÓN DE TÉRMINOS
- VULNERABILIDAD





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

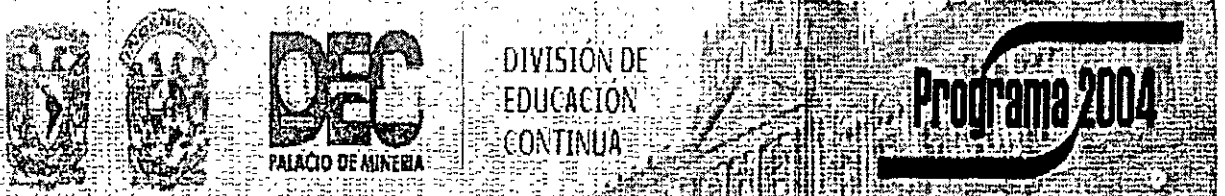


**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACION DE  
SUELOS ACUIFEROS  
MÓDULO II.**

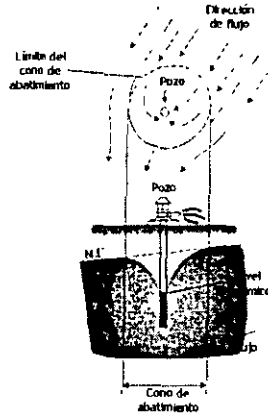
**CA165 RESTAURACION DE SUELOS Y  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
ESQUEMAS GENERALES III**

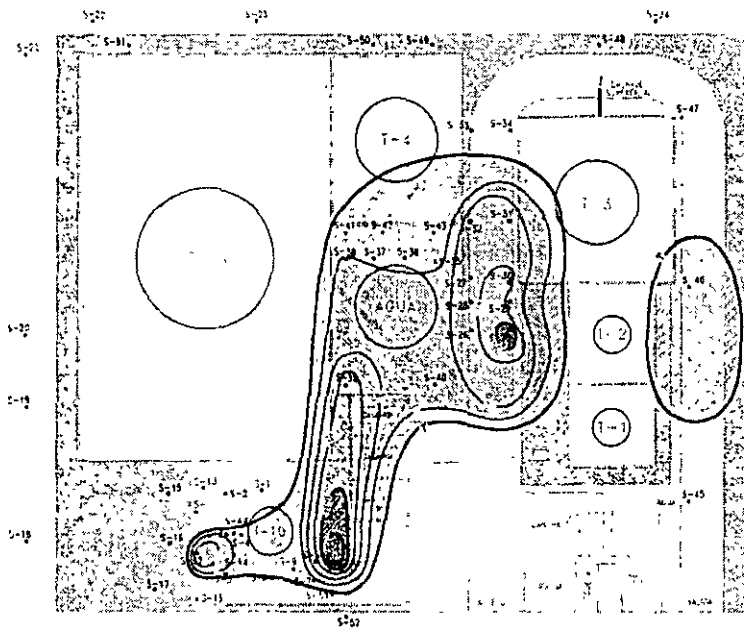
**EXPOSITORES: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES  
DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**

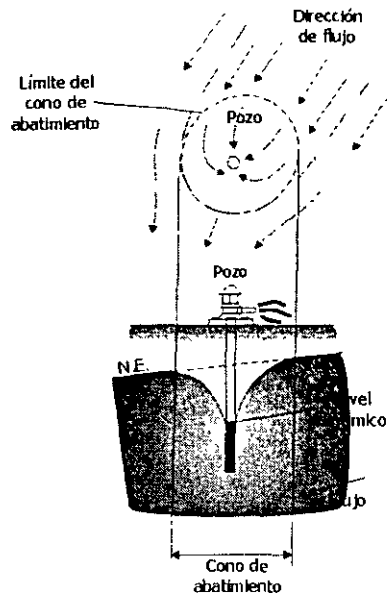


## CALCULO DEL RADIO DE INFLUENCIA



## CONFIGURACION DEL ESPESOR DE PRODUCTO LIBRE





LESSER, 2004

## Zona de influencia del bombeo

### CALCULO DEL RADIO DE INFLUENCIA

$$R = (2.25 * T * t / S)^{1/2}$$

R = Radio de influencia

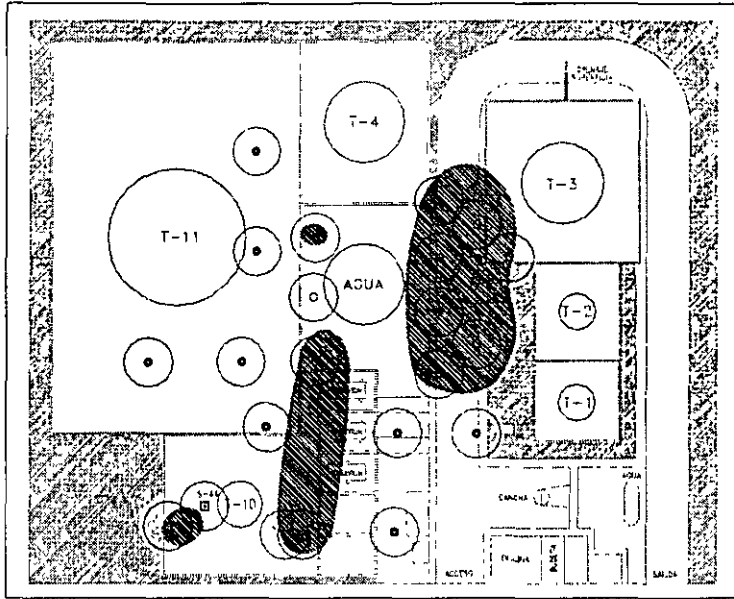
T = Transmisibilidad

t = Tiempo de estabilizacion

S = Coeficiente de almacenamiento

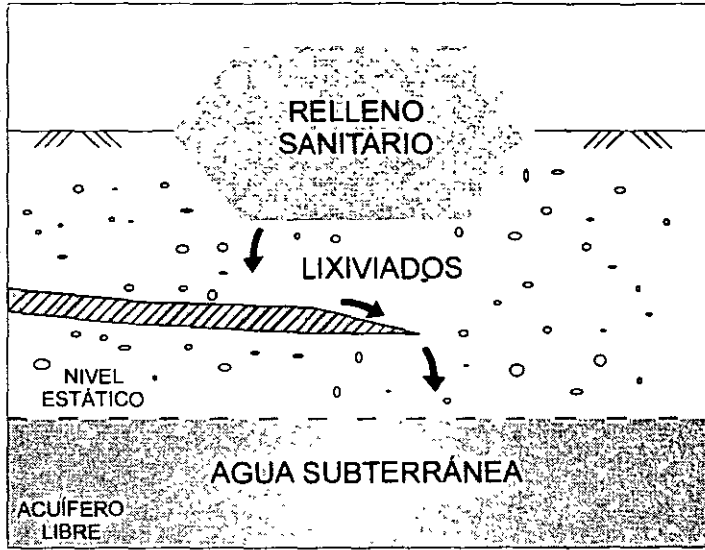


LOCALIZACION DE POZOS PARA EXTRACCION DE PRODUCTO LIBRE

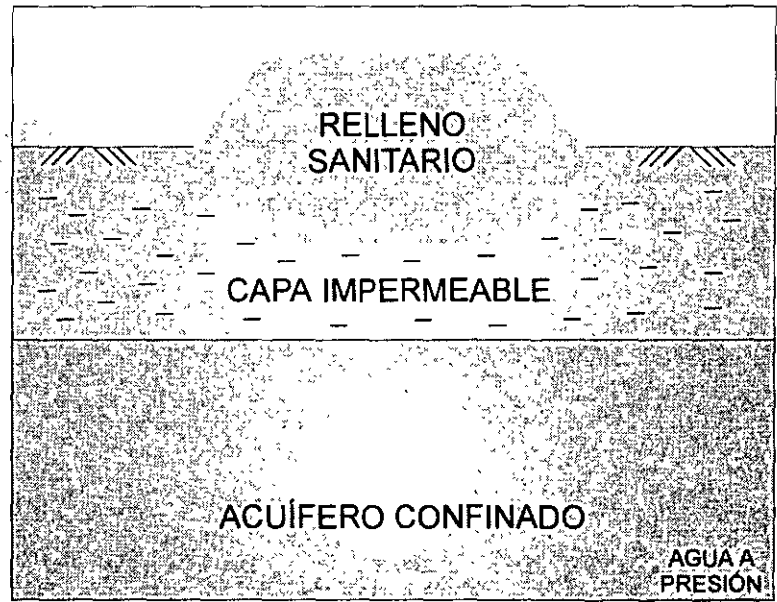




# RELLENOS SANITARIOS



LESSER, 2002



LESSER, 2002



Los lagos, lagunas, acuíferos, ríos y sus afluentes, directos e indirectos, permanentes o intermitentes, presas o embalses, cenotes, manantiales, lagunas floridas, estuarios, esteros, marismas, y en general las zonas marismas mexicanas y otras corrientes de agua.

**3.4 Descripción estratigráfica**

La descripción de los estratos del suelo, en cuanto a su espesor y características físicas y químicas.

**3.5 Peña geológica**

El área que presenta desplazamientos por una falla longitudinal o transversal de origen tectónico o tectónico las cuales producen porosidad y permeabilidad de tipo secundario, dependiendo de su origen.

**3.6 Geología**

El estudio de la formación, evolución, distribución, correlación y comparación de los materiales litológicos.

**3.7 Geohidrología**

El estudio del comportamiento de las aguas subterráneas y su composición química.

**3.8 Hidrología superficial**

El estudio del comportamiento de las aguas superficiales de una cuenca hidrográfica.

**3.9 Nivel freático**

La superficie de agua que se encuentra únicamente bajo el efecto de la fuerza de gravitación y que delimita la zona de aireación, de la de saturación.

**3.10 Topografía**

Las características del relieve que presenta el terreno natural.

**3.11 Permeabilidad**

La propiedad que tiene una sección unitaria de terreno para permitir el paso de un fluido a través de él sin deformar su estructura, bajo la carga producida por un gradiente hidráulico.

**3.12 Reteno sanitario**

La obra de ingeniería que reúne características específicas para la disposición final y segura de residuos sólidos municipales.

**3.13 Residuo sólido municipal**

El residuo sólido que proviene de actividades que se desarrollan en casas-habitación, sitios y servicios públicos, demoliciones, construcciones, establecimientos comerciales y de servicios, así como residuos industriales que no se deriven de su proceso.

**3.14 Zona de aireación**

El arco localizada debajo de la superficie del terreno, en la que las aperturas están parcialmente llenas de aire y parcialmente de agua retenida por atracción molecular.



## ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS EN SITIOS SELECCIONADOS PARA LA INSTALACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS MUNICIPALES

### TEMA DE ACUERDO A LA NOM-083-96

#### A Evidencia y uso del agua subterránea

- Definir las ubicación y distribución de todas las evidencias de aguas subterráneas a escala regional y local
- Volúmenes y extracción
- Tendencias de la explotación
- Planes de desarrollo

#### B Identificación del tipo de acuífero

- Identificar unidades hidrogeológicas
- Extensión y geometría
- Tipo de acuíferos
- Relación entre unidades hidrogeológicas



**ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS EN SITIOS  
SELECCIONADOS PARA LA INSTALACIÓN  
DE RELLENOS SANITARIOS MUNICIPALES**

**TEMA DE ACUERDO A  
LA NOM-083-96**

**C Parámetros hidráulicos, análisis de agua y características elementales de los estratos del subsuelo**

- Profundidad al nivel estático
- Dirección del agua subterránea
- Conductividad hidráulica
- Porosidad efectiva
- Composición química del agua subterránea
- Fracción de carbono orgánico
- Capacidad de intercambio catiónico
- Extensión del área de influencia de pozos en operación

**D Análisis del sistema de flujo**

- Zonas de recarga y descarga
- Flujo local y regional

**E Evaluación potencial de contaminación**

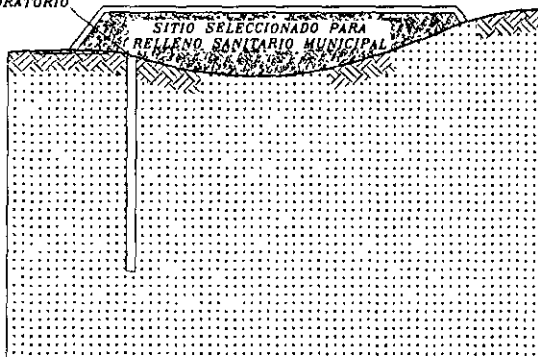
- Determinar si el sitio es apto
- Factor de tránsito de la infiltración



**DATOS BASICOS REQUERIDOS  
PARA CONOCER UN SITIO**

*DONDE NO EXISTE NIVEL PIEZOMETRICO*

POZO  
EXPLORATORIO



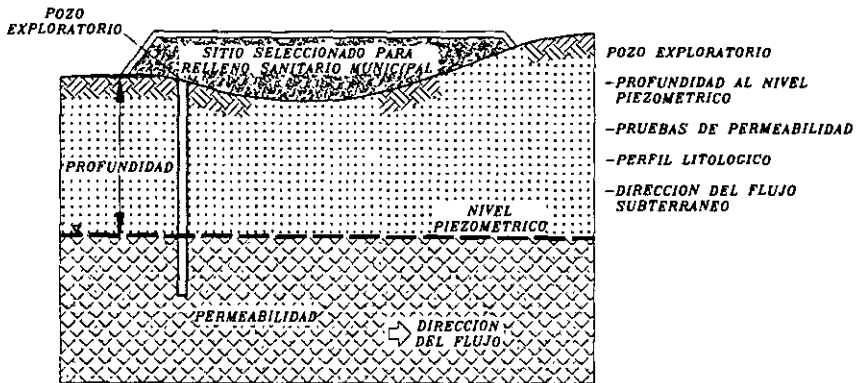
POZO EXPLORATORIO

- CERTIFICAR QUE NO HAYA NIVEL DE AGUA
- PROFUNDIDAD (A CRITERIO)
- PRUEBAS DE PERMEABILIDAD
- PERFIL LITOLÓGICO



## DATOS BASICOS REQUERIDOS PARA CONOCER UN SITIO

*DONDE SE ENCUENTRA NIVEL PIEZOMETRICO*



**LESSER,**  
2002



## FACTOR DE TRÁNSITO

$$f = (k i) / (u * d)$$

f = factor de tránsito  
 k = conductividad hidráulica  
 i = gradiente hidráulico  
 u = porosidad efectiva  
 d = espesor de la zona no saturada

$$f < 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$$



**LESSER,**  
2004



f Debe de ser  $10^{-10}$   
menor de  $3 \times 10^{-10}$

### EJEMPLO 1 ARENAS

$$k = 10^{-4} \text{ m/seg}$$

$$i = 1$$

$$u = 0.10$$

$$d = 20 \text{ m}$$

$$f = \frac{1 \times 10^{-4} \text{ m/seg}}{20 \text{ m}}$$

$$f = 0.5 \times 10^{-4} / \text{seg}$$

### EJEMPLO 2 ARCILLAS

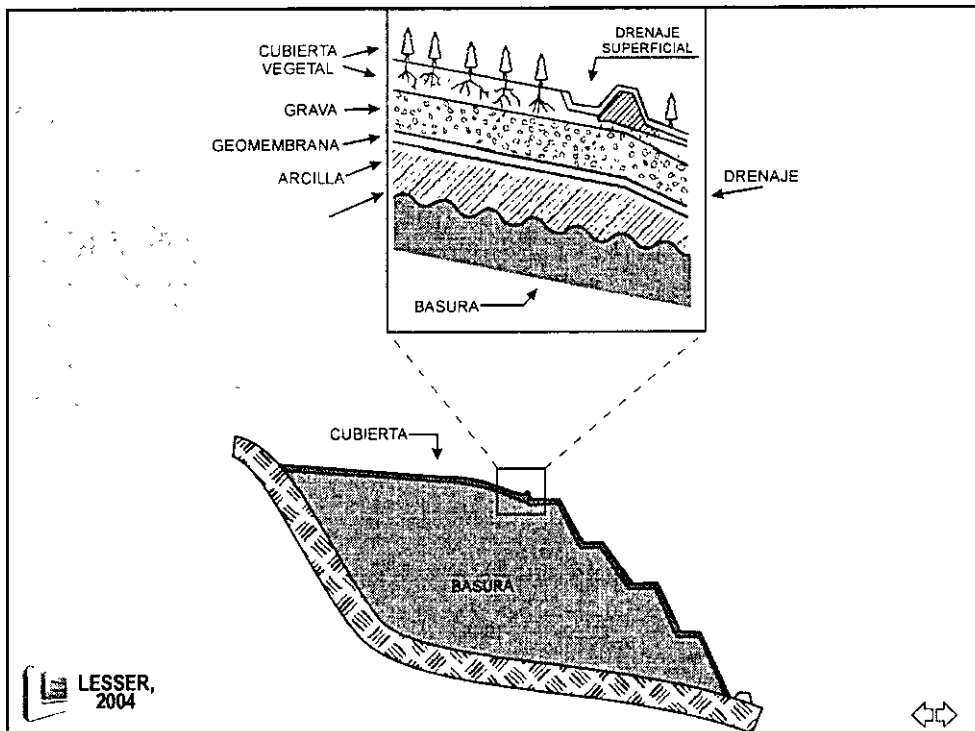
$$k = 10^{-10} \text{ m/seg}$$

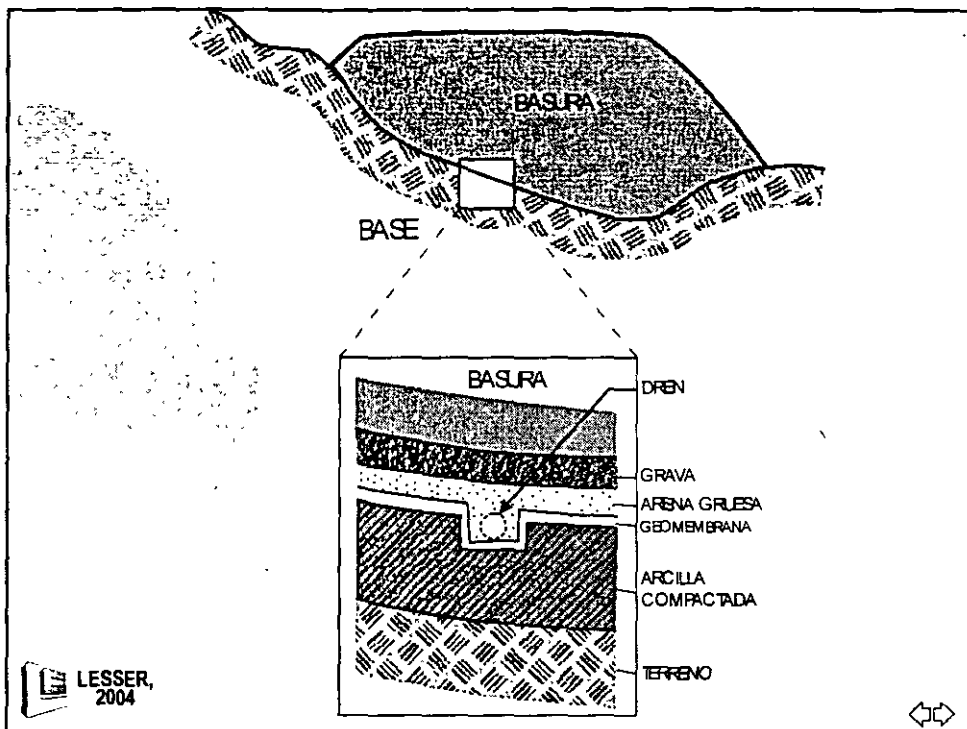
$$i = 1$$

$$u = 0.3$$

$$d = 20 \text{ m}$$

$$f = \frac{10^{-10} \text{ m/seg}}{20 \text{ m}} = 0.16 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$$





## FACTORES QUE AFECTAN EL RELLENO

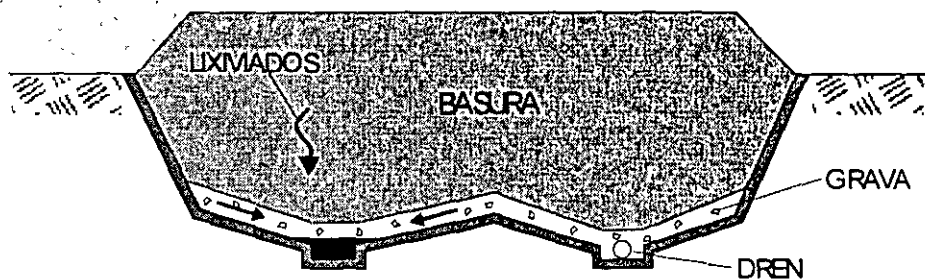
- TIPO DE BASURA
- TIEMPO
- TEMPERATURA AMBIENTE
- HUMEDAD
- OXIGENO

## FACTORES QUE AFECTAN LA CANTIDAD DE LIXIVIADO

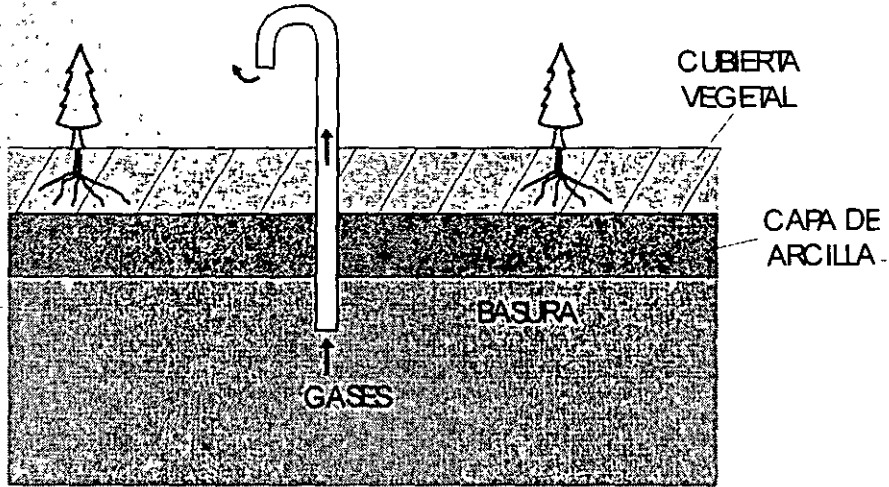
- PRECIPITACION
- NIVEL ESTATICO SOMERO
- CUBIERTA



## DRENAJE DENTRO DEL RELLENO SANITARIO



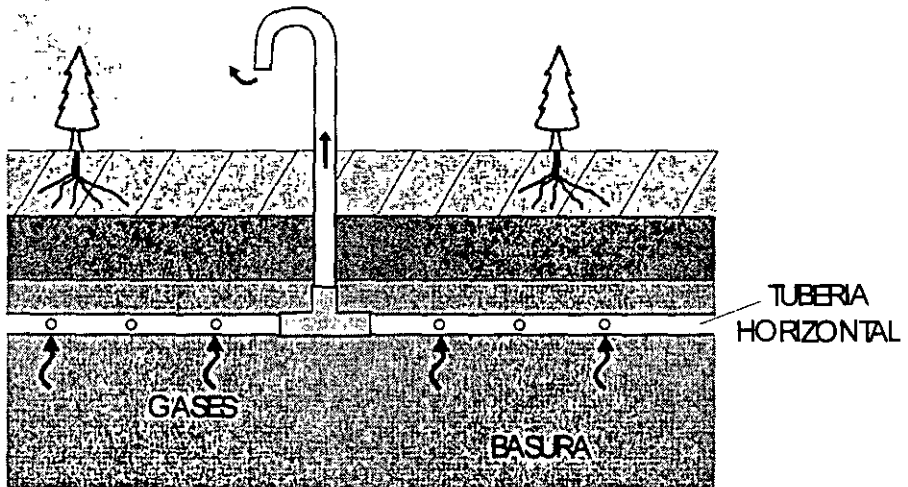
### SISTEMA DE VENTILACION



LESSER,  
2004



### SISTEMA DE VENTILACION

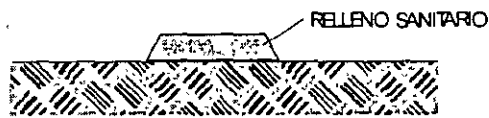
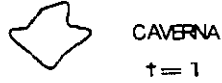
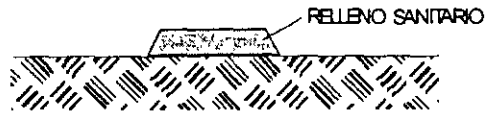


LESSER,  
2004

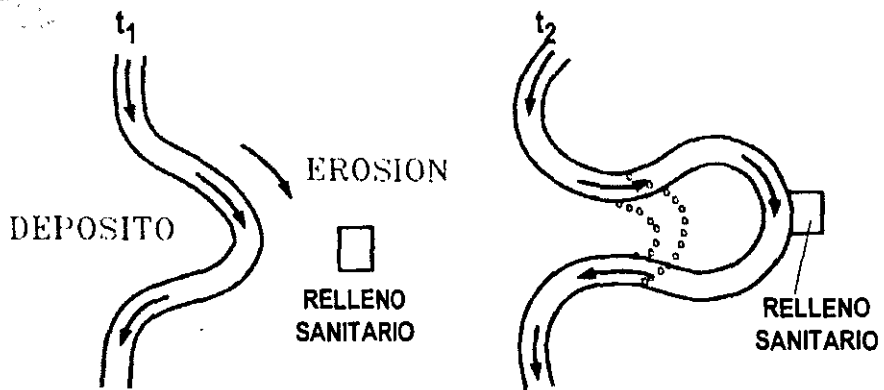




### INFLUENCIA DEL TIEMPO GEOLOGICO



### INFLUENCIA DEL TIEMPO GEOLOGICO



FUENTE:  
 BAGCHI, AMALENDU, 1990  
 DESIGN, CONSTRUCTION,  
 AND MONITORING OF  
 SANITARY LANDFILL

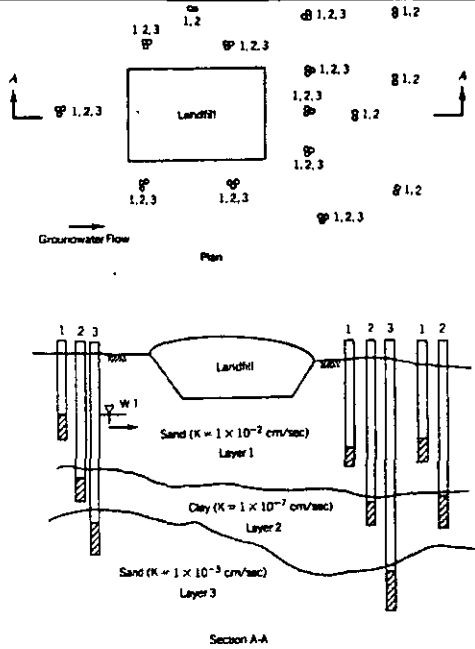


FIG. 10.11 Monitoring of an interbedded aquifer

FUENTE:  
 BAGCHI, AMALENDU, 1990  
 DESIGN, CONSTRUCTION,  
 AND MONITORING OF  
 SANITARY LANDFILL

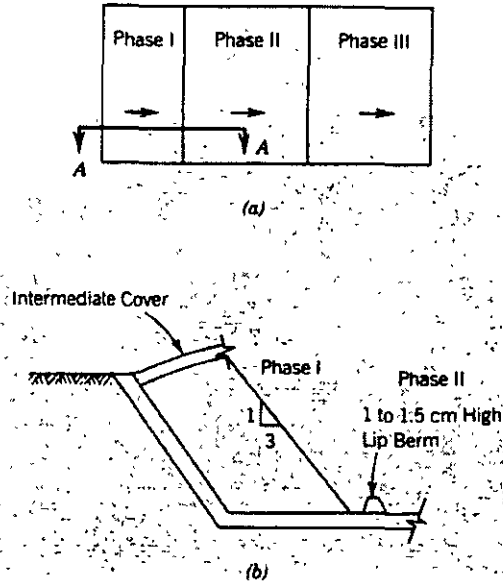


FIG. 11.3 Phasing plan for single stage landfill:  
 (a) plan; (b) cross section A-A.

FUENTE:  
 GEOTECHNICAL PRACTICE  
 FOR WASTE DISPOSAL,  
 POR DAVID E. DANIEL

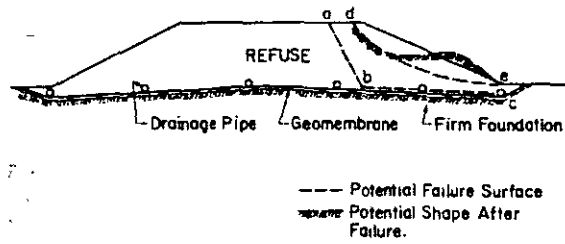


FIG. 11.1 Stability of a landfill on firm base

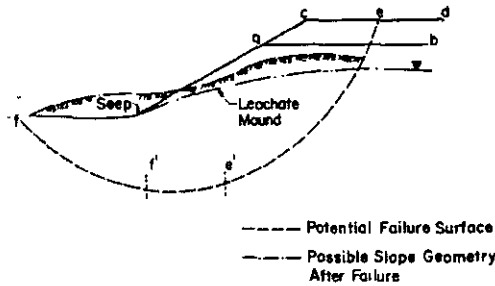


FIG. 11.2 Stability of a landfill expansion on soft base

FUENTE:  
 GEOTECHNICAL PRACTICE  
 FOR WASTE DISPOSAL,  
 POR DAVID E. DANIEL

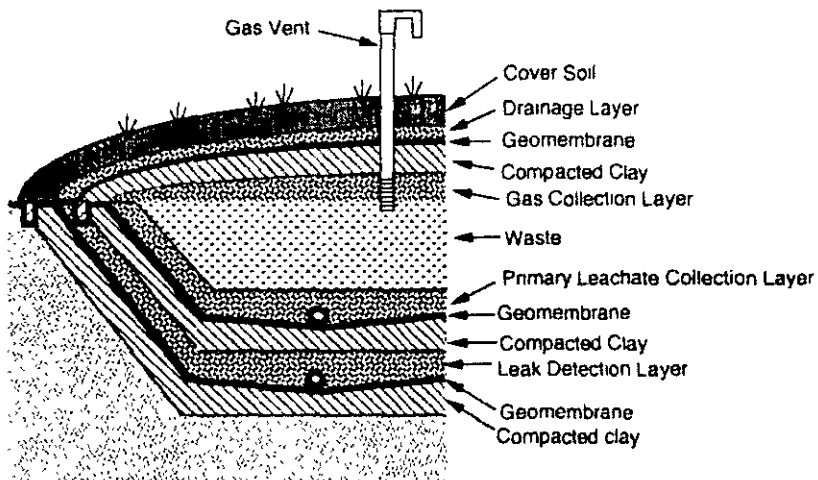


FIG. 5.6 Double composite liner system and multiple-component cover system in a waste containment unit

FUENTE:  
 GEOTECHNICAL PRACTICE  
 FOR WASTE DISPOSAL,  
 POR DAVID E. DANIEL

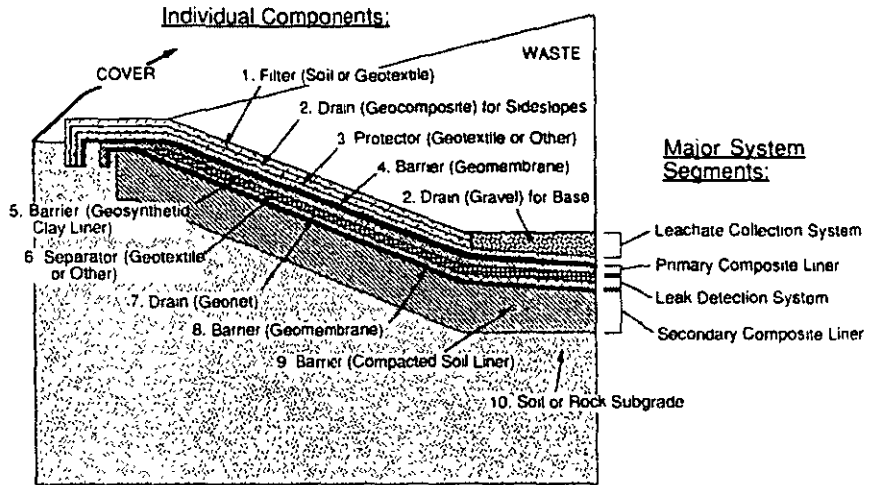


FIG. 5.7 Lining system recommended by Daniel and Koerner (1991)

FUENTE:  
 GEOTECHNICAL PRACTICE  
 FOR WASTE DISPOSAL,  
 POR DAVID E. DANIEL

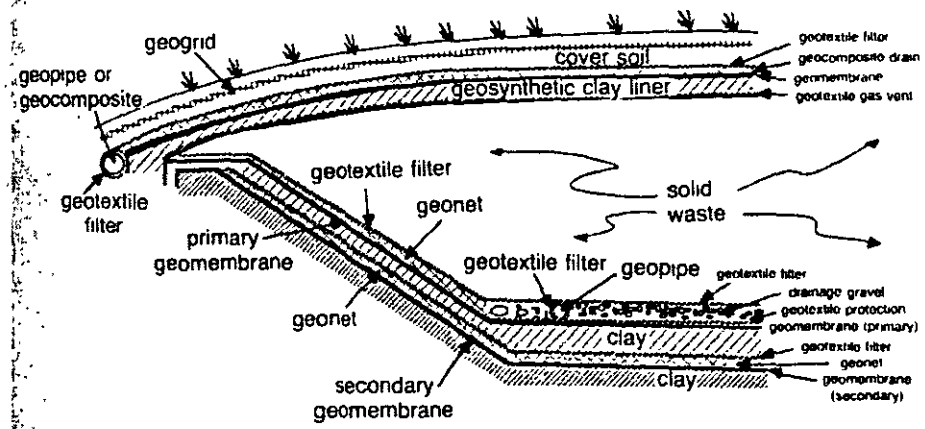


FIG. 8.2 Cross-section of solid waste landfill liner system and closure system illustrating the major use of geosynthetics



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



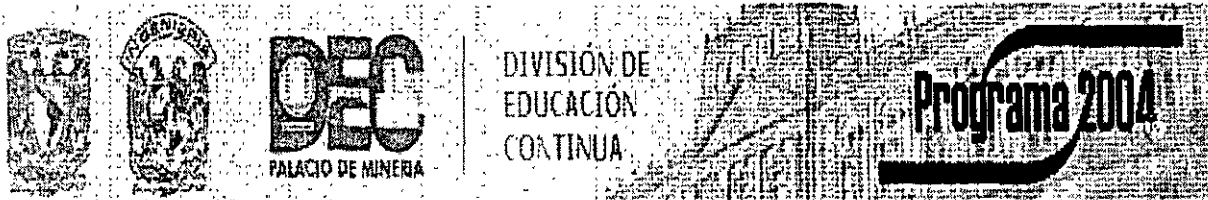
**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
LA CONTAMINACIÓN.**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

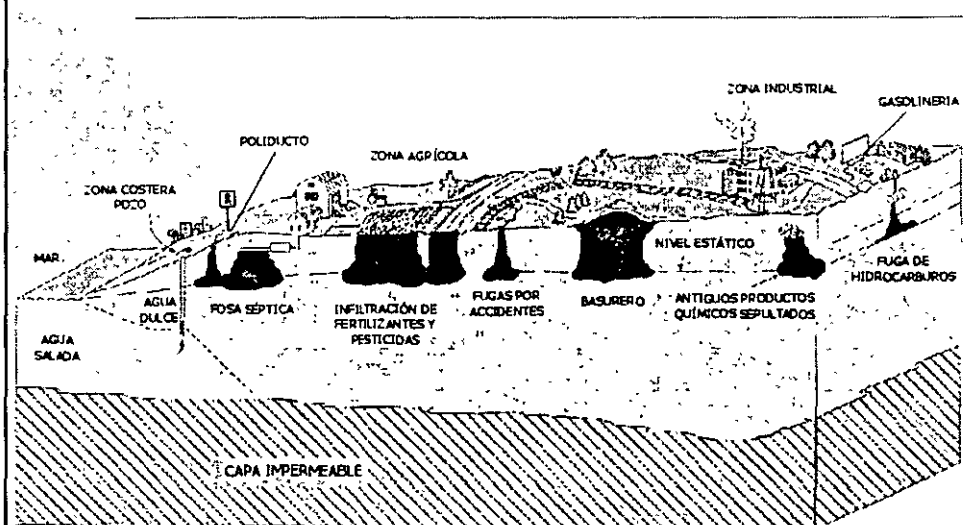
**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**



# La contaminación

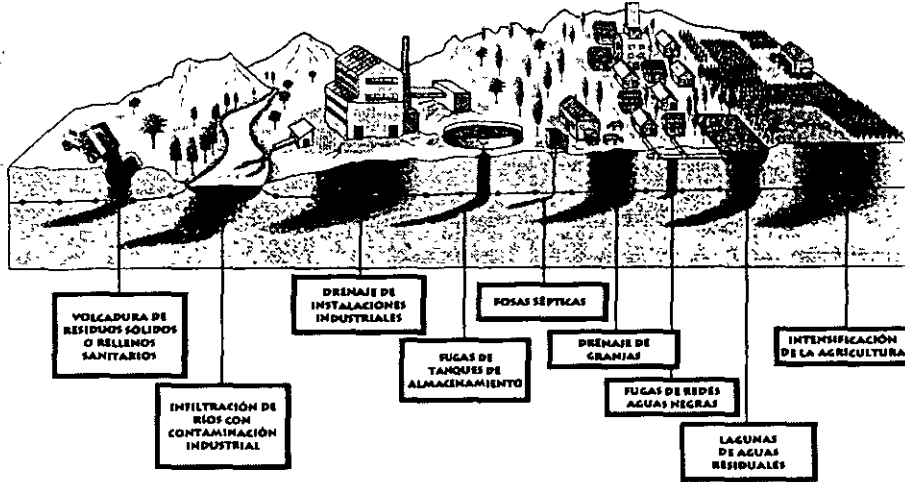
• Por: Ing. Juan Manuel Lesser

## Fuentes comunes de contaminación



MODIFICADA DE: Fetter, 1993

Procesos comunes de contaminación del agua subterránea



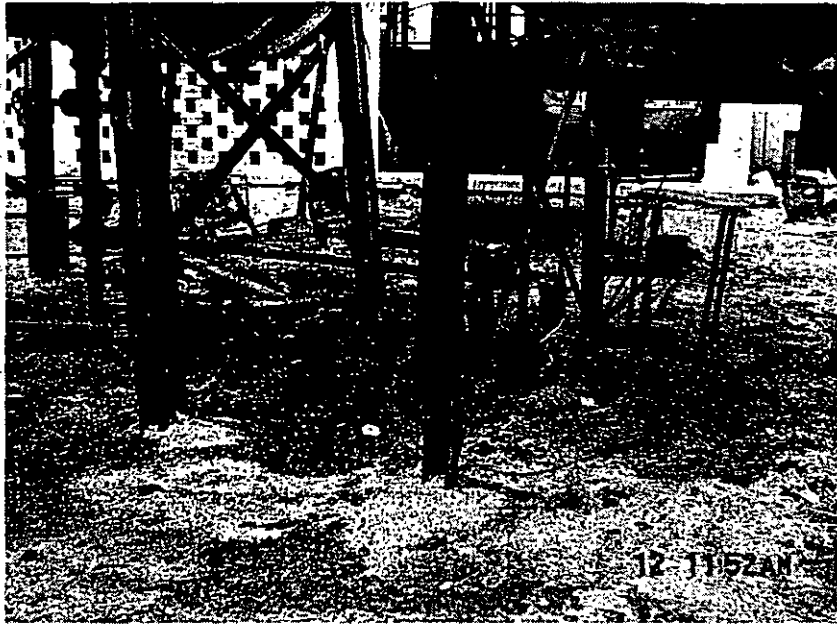
DE: S. FOSTER, 2002



LESSER, 2004







 LESSER, 2004

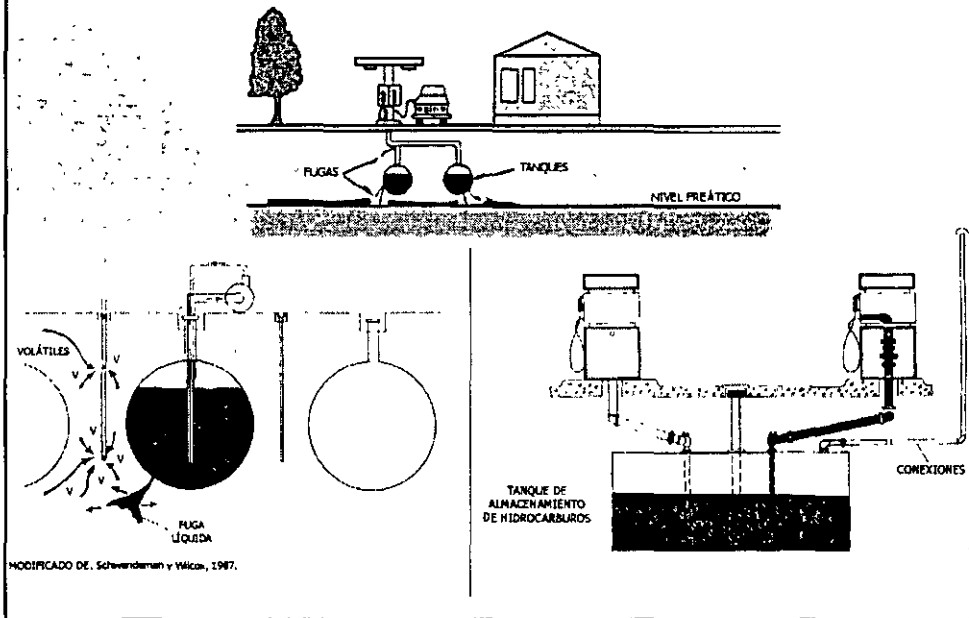


 LESSER, 2004

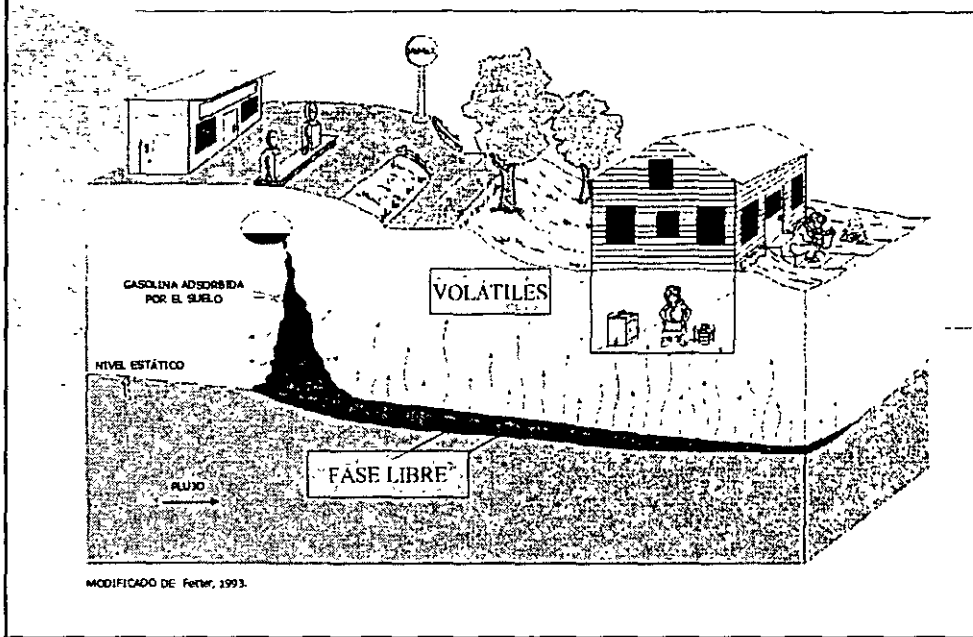
# FORMAS EN QUE SE ENCUENTRAN LOS HIDROCARBUROS EN EL SUBSUELO

## Fugas de tanques en gasolineras

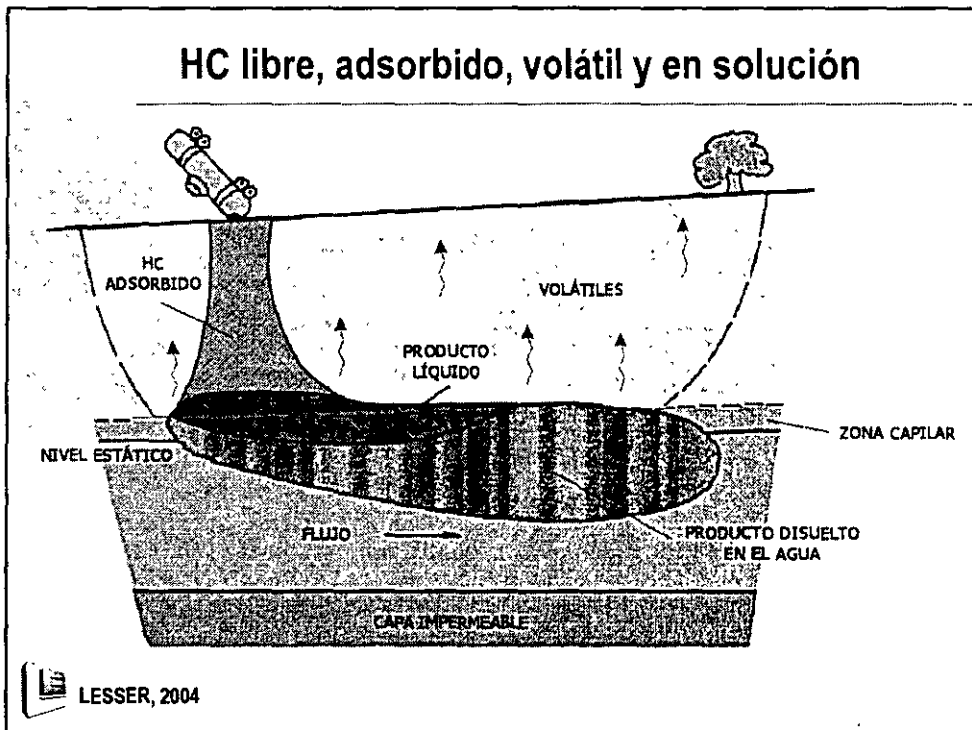
GASOLINERÍA



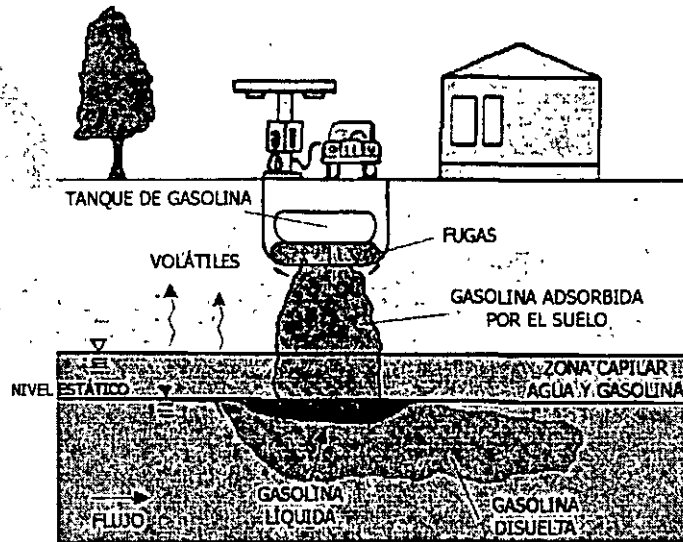
## Fugas, fase libre y volátiles



## HC libre, adsorbido, volátil y en solución



## Contaminación de suelo y agua



LESSER, 2004

## Capacidad de adsorción, volatilización y solubilidad de los componentes más comunes de las gasolinas

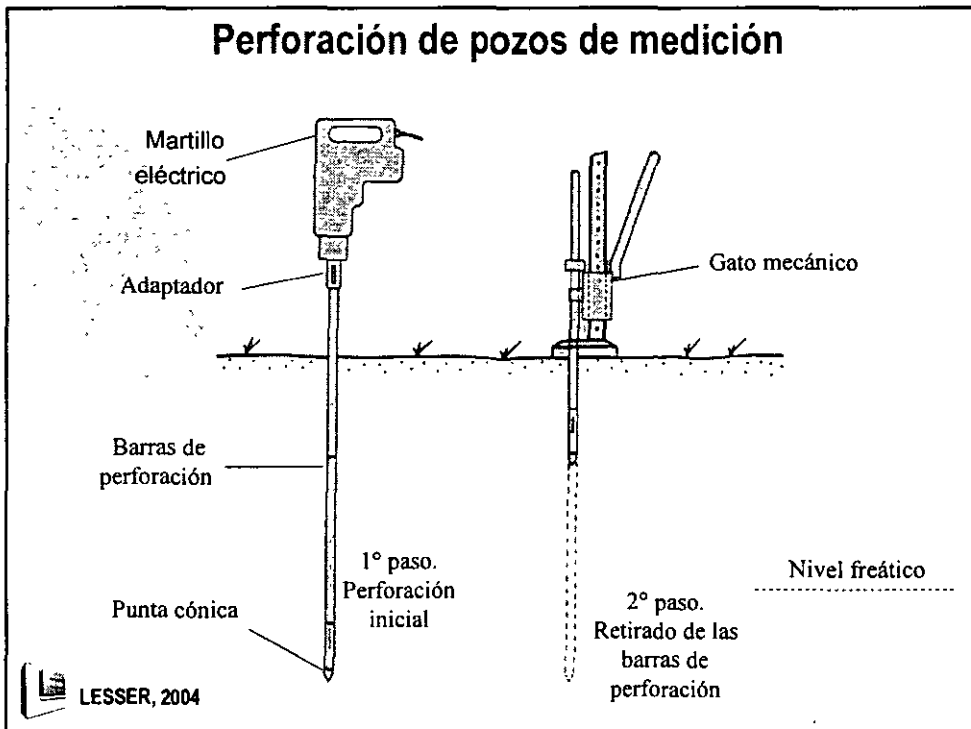
	ADSORCIÓN POR EL SUELO (%)	CAPACIDAD DE VOLATILIZACIÓN (%)	SOLUBILIDAD (%)
Benceno	3	62	35
Etilbenceno	21	59	20
(n) Heptano	0.1	99.8	0.1
(n) Hexano	0.1	99.8	0.1
(n) Pentano	0.1	99.8	0.1
Benc (a)	100	0	0
Antraceno	100	0	0
Benc (a) Pireno	61	8	31
Naftaleno	88	2	10
Fenántreno	0.1	99.8	0.1
1 - pentano	9	0.01	91
Fenol	3	77	20
Tolueno	15	54	31
Xileno			

De Fleischer et al. 1986

LESSER, 2004

## PERFORACION DE POZOS DE MEDICION

 LESSER, 2004



## Perforaciones de medición

Espacio requerido:  
3 x 3 m

Tiempo por perforación:  
30 minutos por pozo



LESSER, 2004



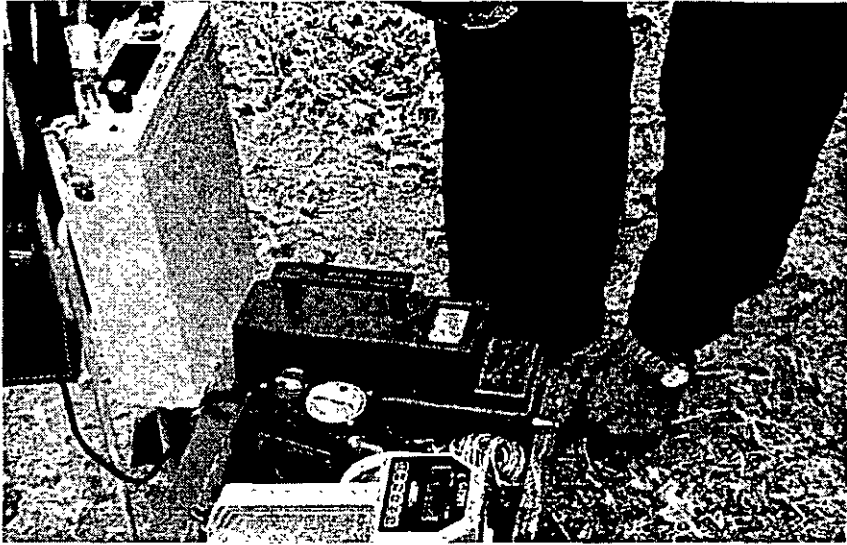
LESSER, 2004



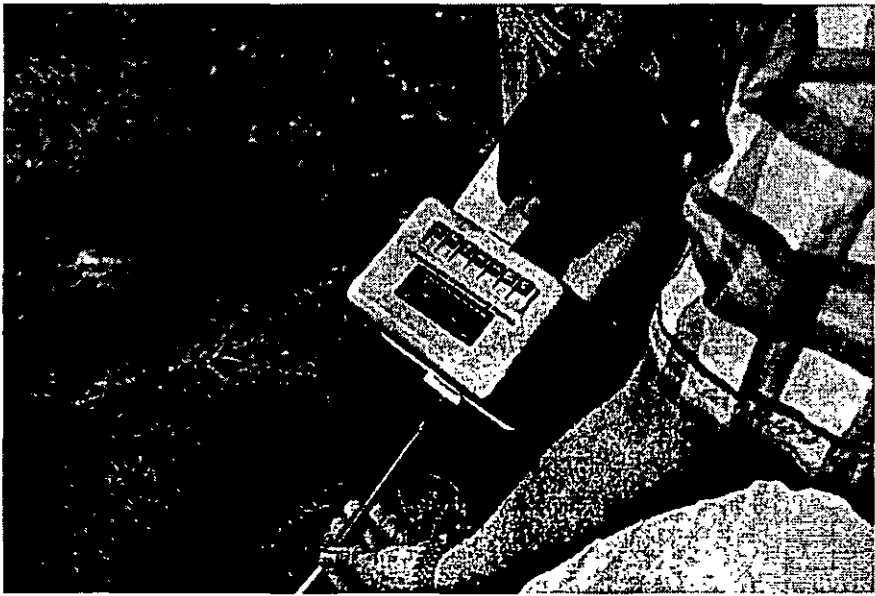
 LESSER, 2004

- MEDICION DE VOLATILES,  
EXPLOSIVIDAD, NIVEL  
ESTATICO Y ESPESOR DE  
PRODUCTO LIBRE

 LESSER, 2004



 LESSER, 2004



 LESSER, 2004





 LESSER, 2004



 LESSER, 2004

- HIDROCARBUROS VOLÁTILES = 8,000 ppm
- EXPLOSIVIDAD = 100%



HIDROCARBUROS VOLÁTILES = 55 ppm  
EXPLOSIVIDAD = 0%

 LESSER, 2004

### RESPUESTA DE LOS MEDIDORES DE VOLÁTILES


EN GASOLINA

RESPUESTA FRANCA,  
CLARA


EN DIESEL

RESPUESTA LENTA,  
SE MUEVE EL  
MARCADOR

 LESSER, 2004


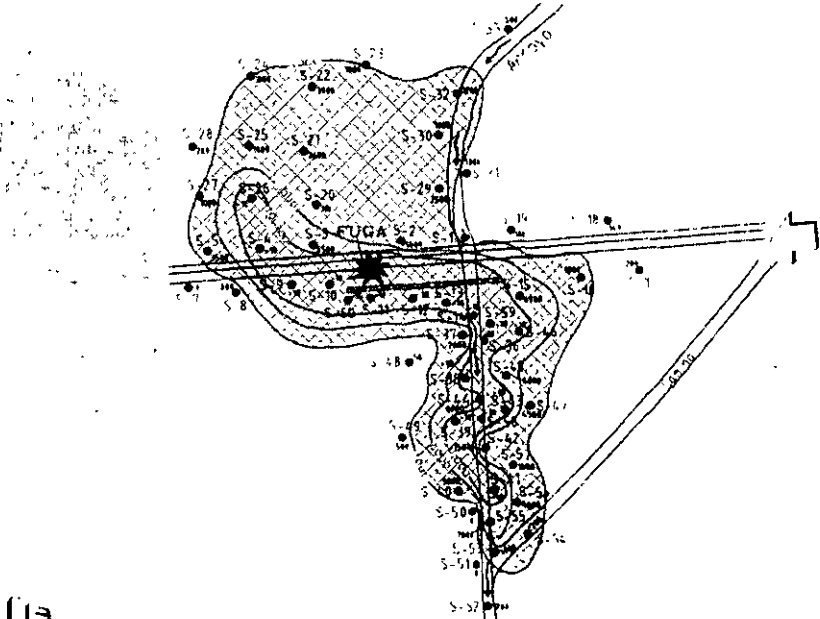


■ Delimitación de plumas



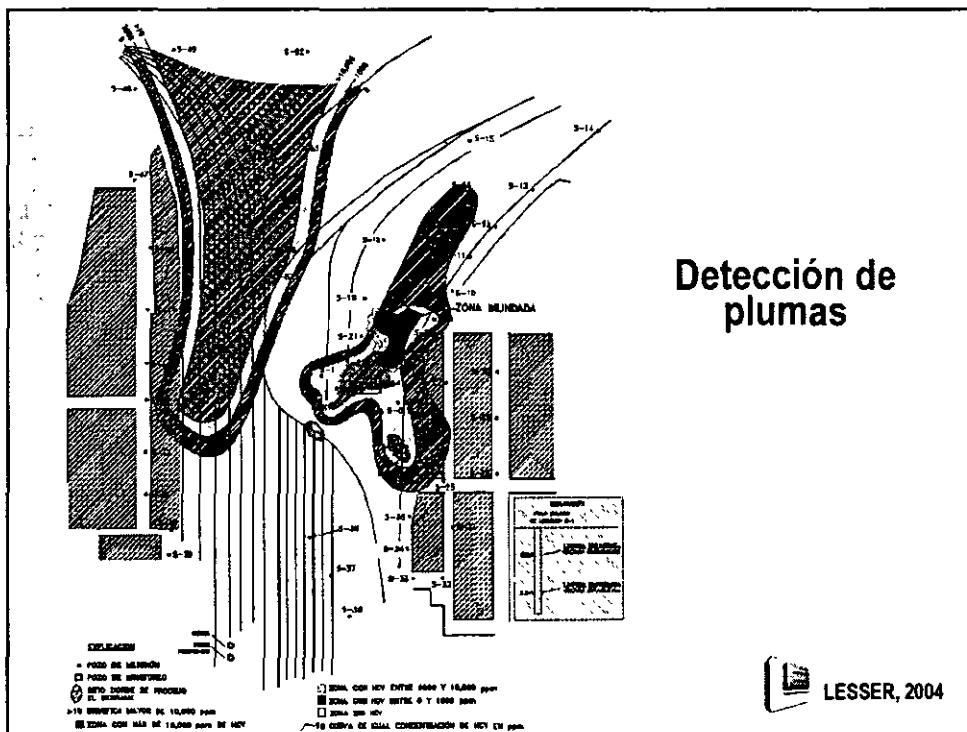
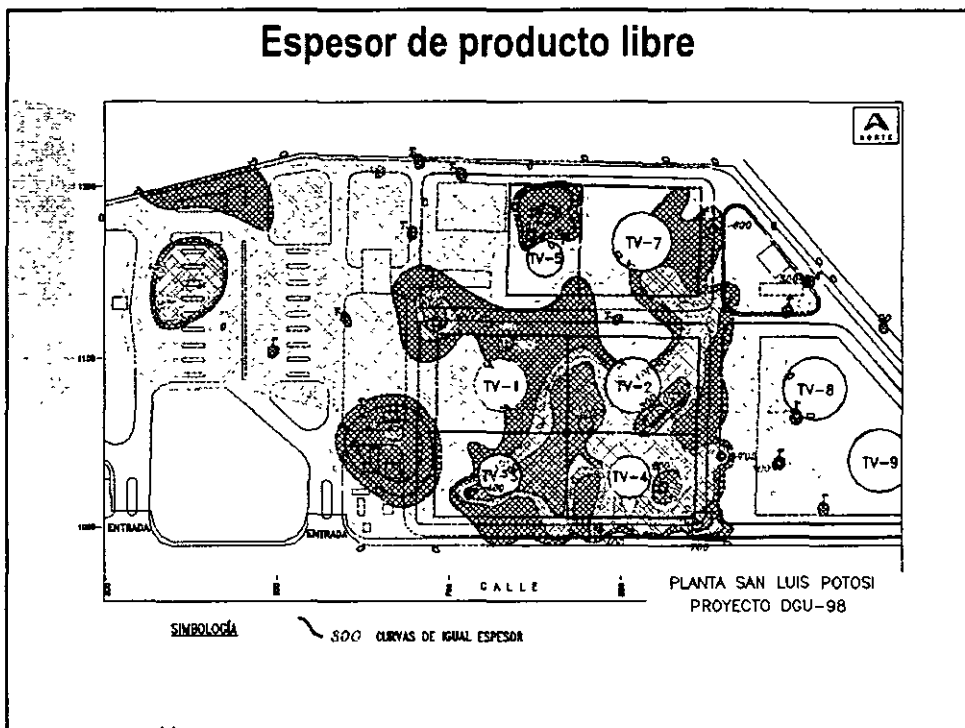
LESSEER, 2004

### Detección de pluma



LESSEER, 2004

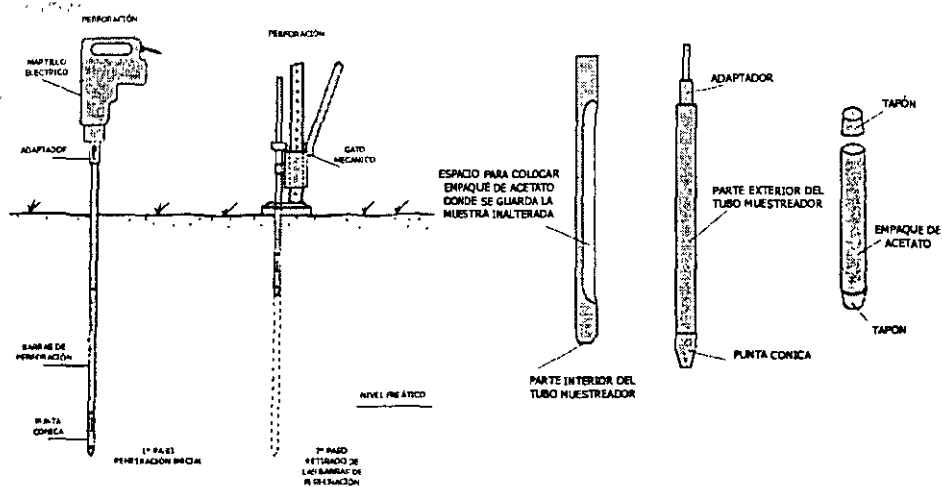
## Espesor de producto libre



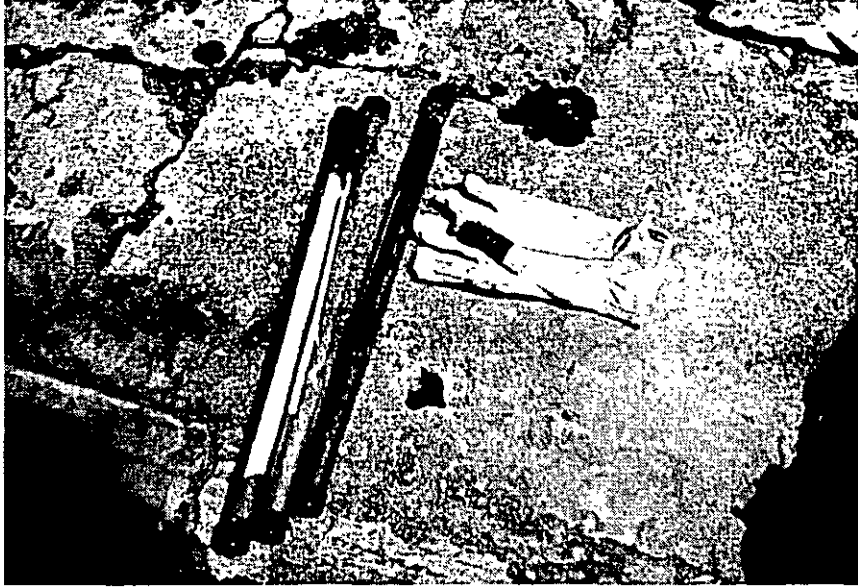
## Muestreo de suelo inalterado

 LESSER, 2004

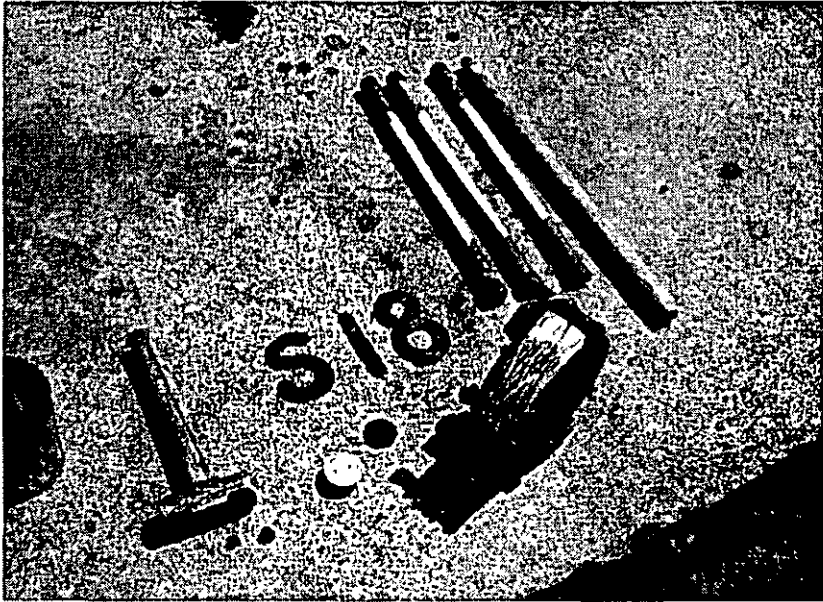
## Muestreo de suelos



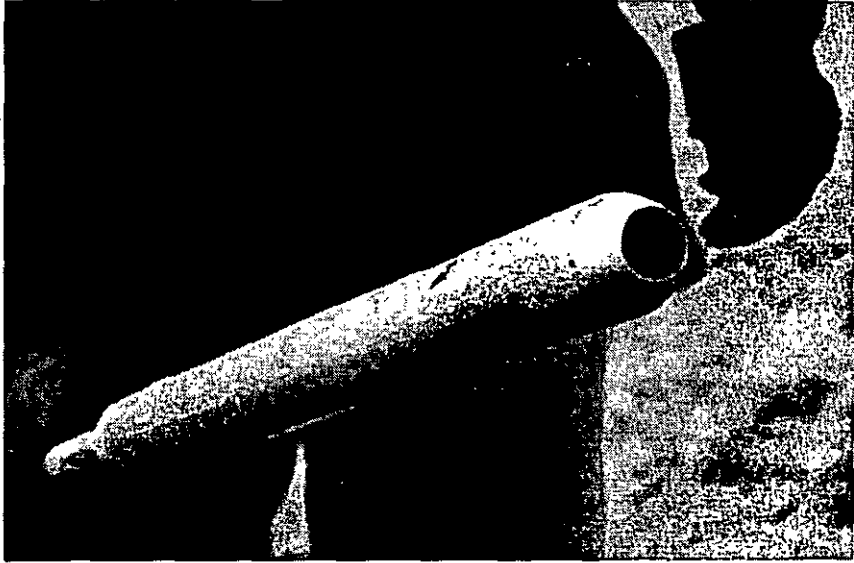
 LESSER, 2004



 LESSER, 2004



 LESSER, 2004



LESSER, 2004



LESSER, 2004



 LESSER, 2004

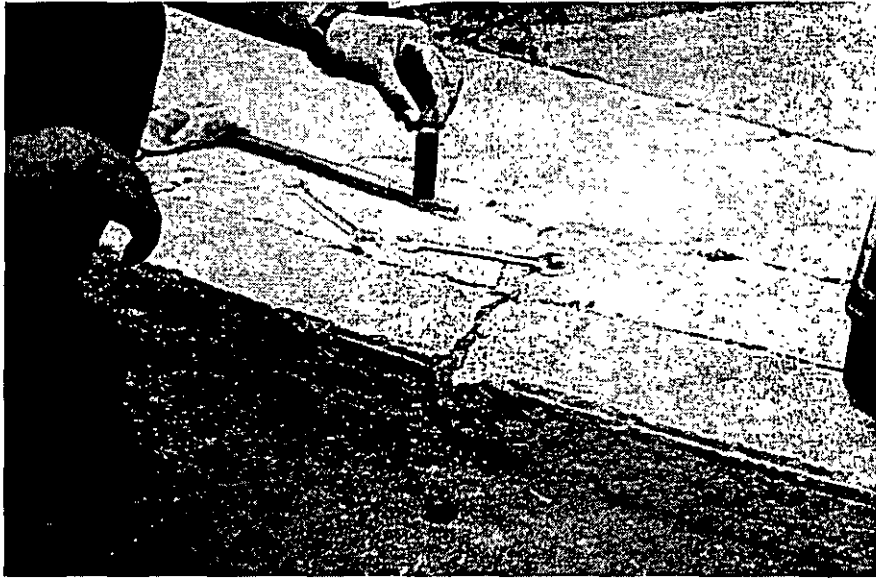
- Muestreo de producto libre

 LESSER, 2004





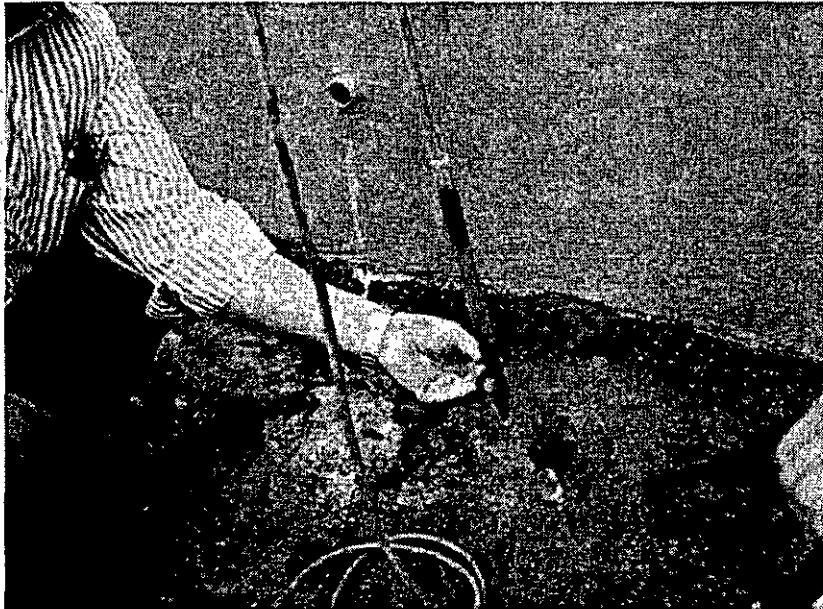
 LESSER, 2004



 LESSER, 2004



LESSER, 2004



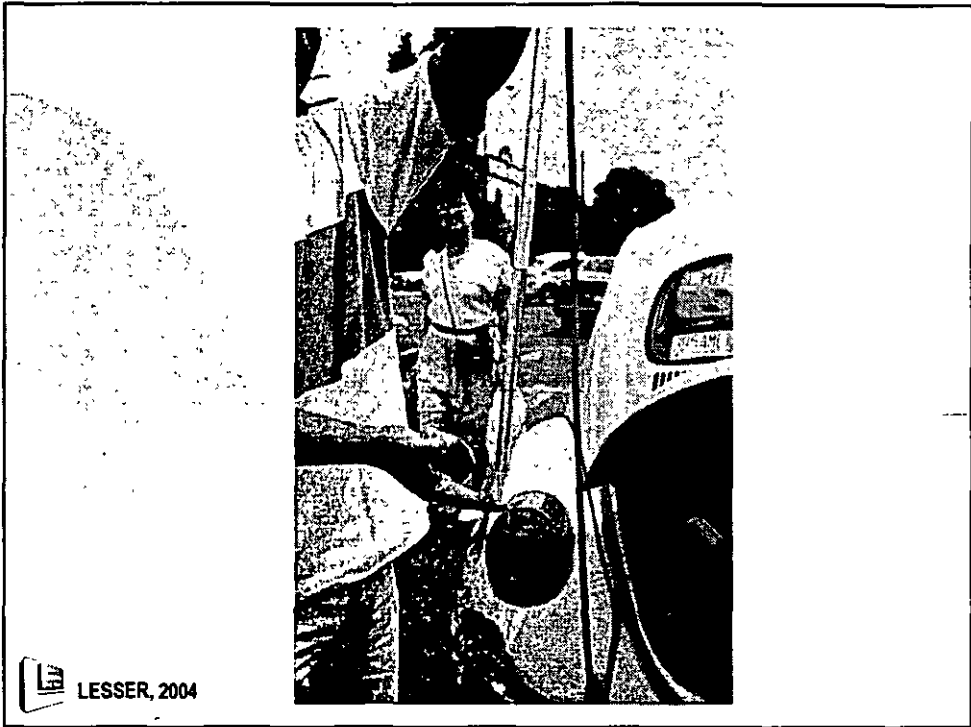
LESSER, 2004



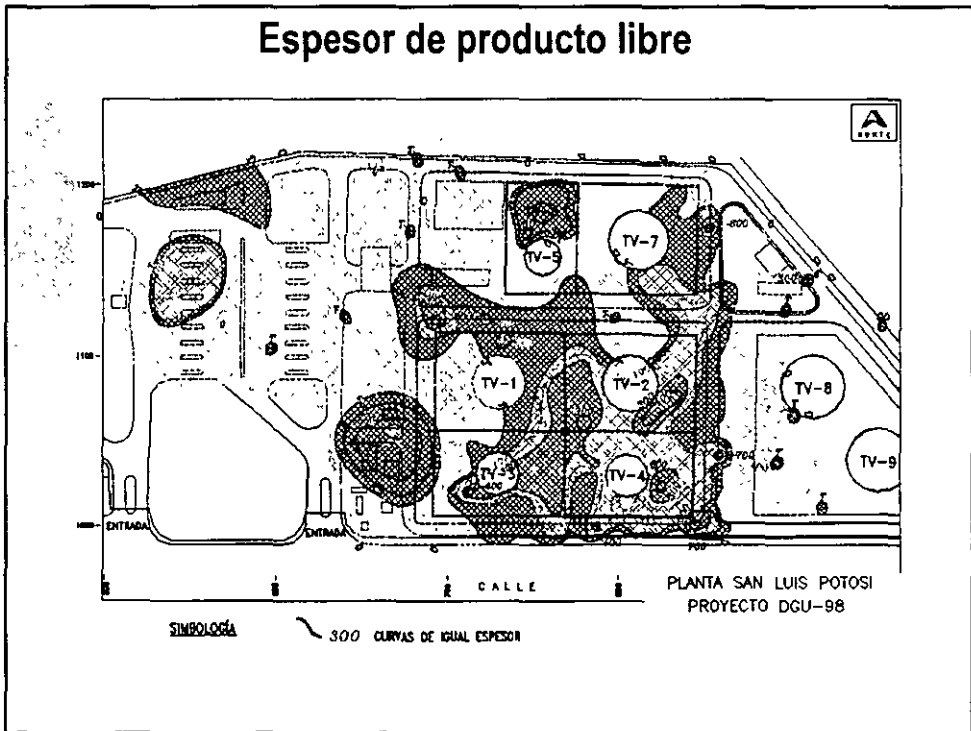
 LESSER, 2004

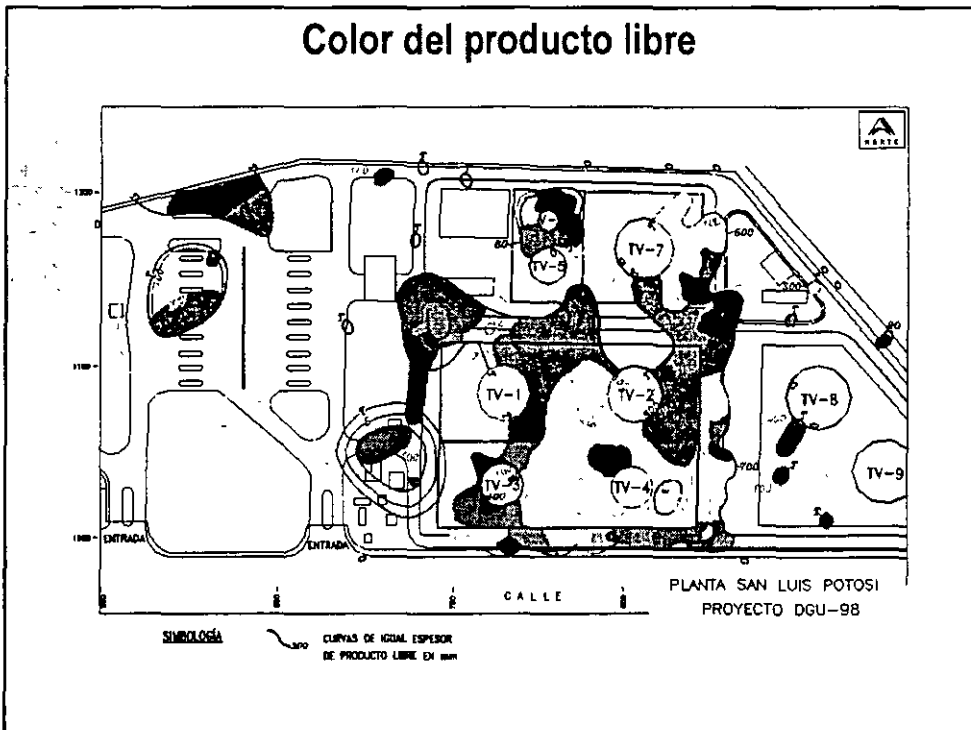
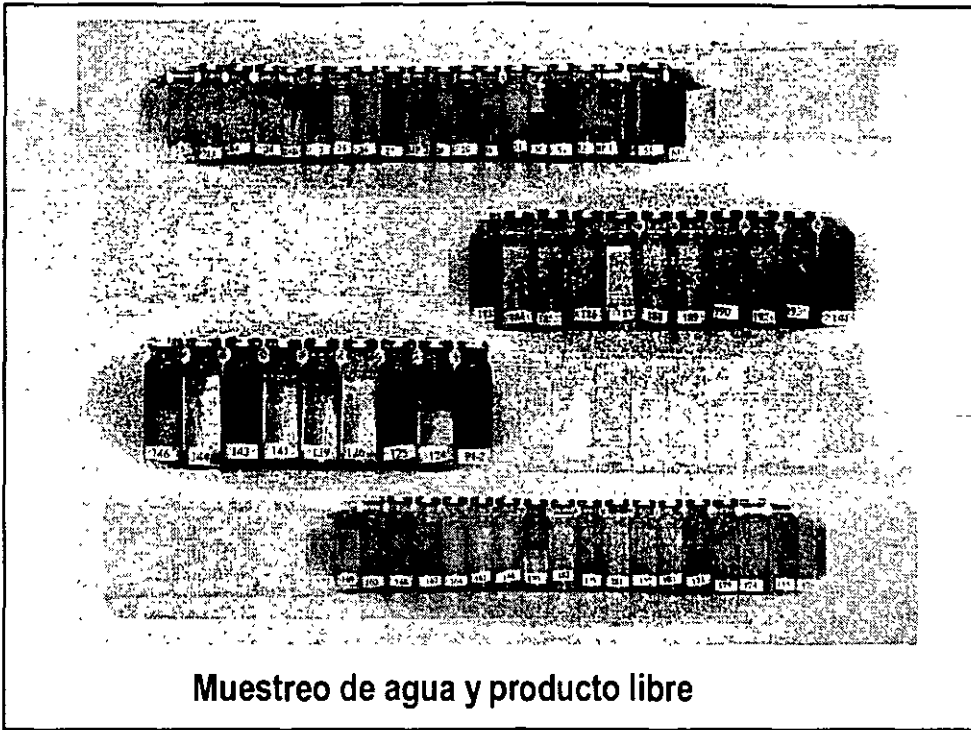


 LESSER, 2004



 LESSER, 2004







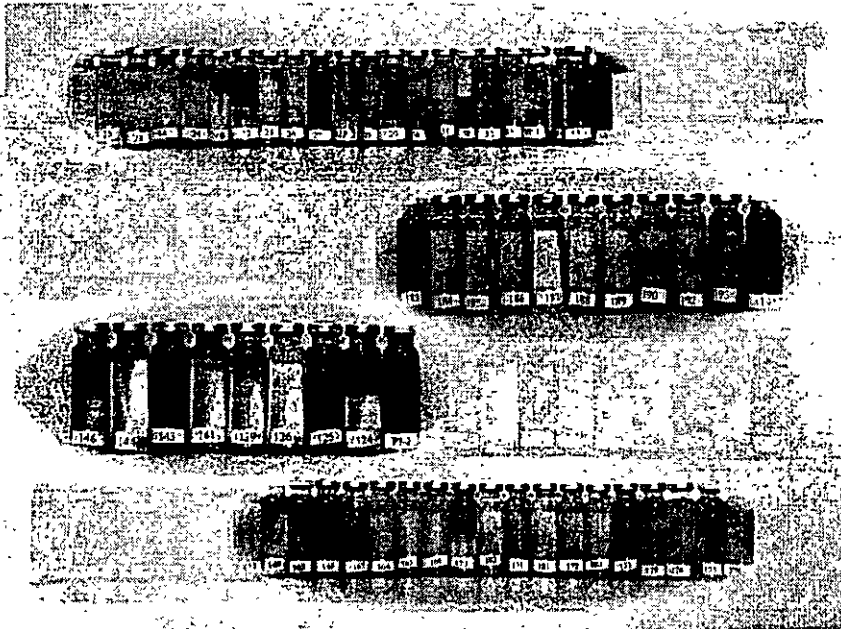
 LESSER, 2004



 LESSER, 2004



LESSER, 2004

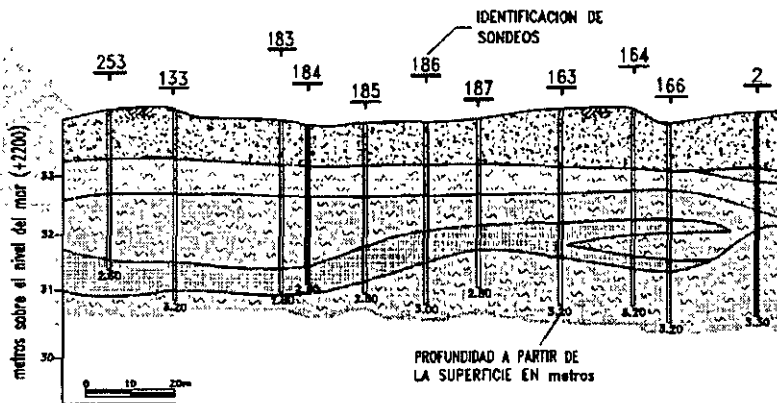


Muestreo de agua y producto libre

## ■ Construcción de secciones litológicas

 LESSER, 2004

### Sección litológica



#### SIMBOLOGIA

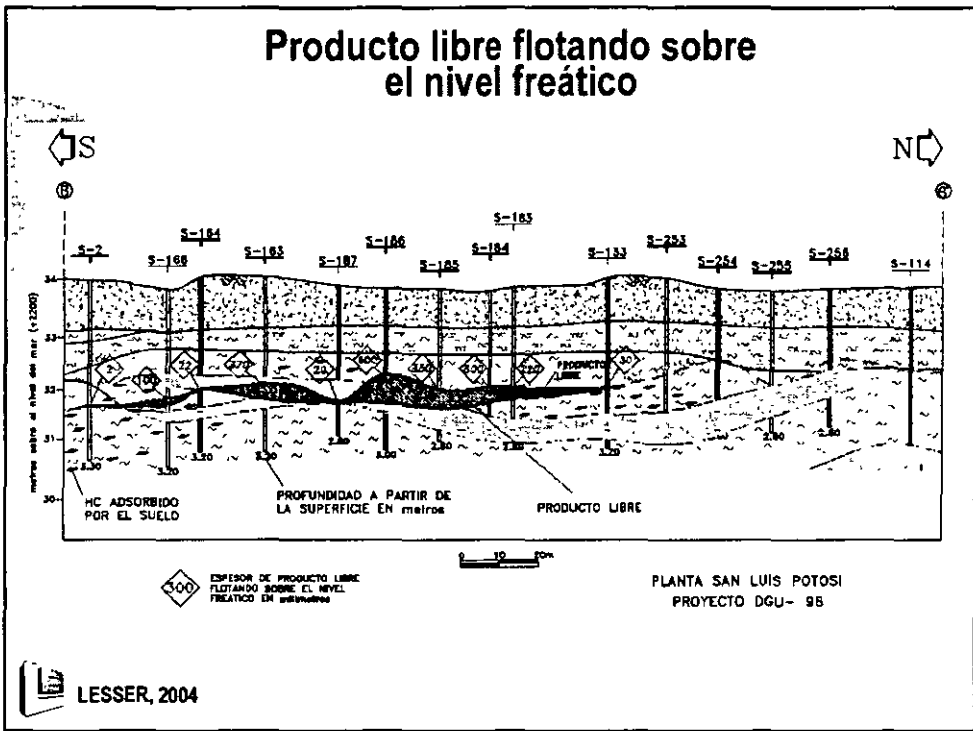
 LOSA SUPERFICIAL DE CONCRETO Y/O ASFALTO	 ARENA
 ARENA Y ARCILLA	 ARCILLA

UBICACION: SECCION ESTE-OESTE AL CENTRO DEL PREDIO

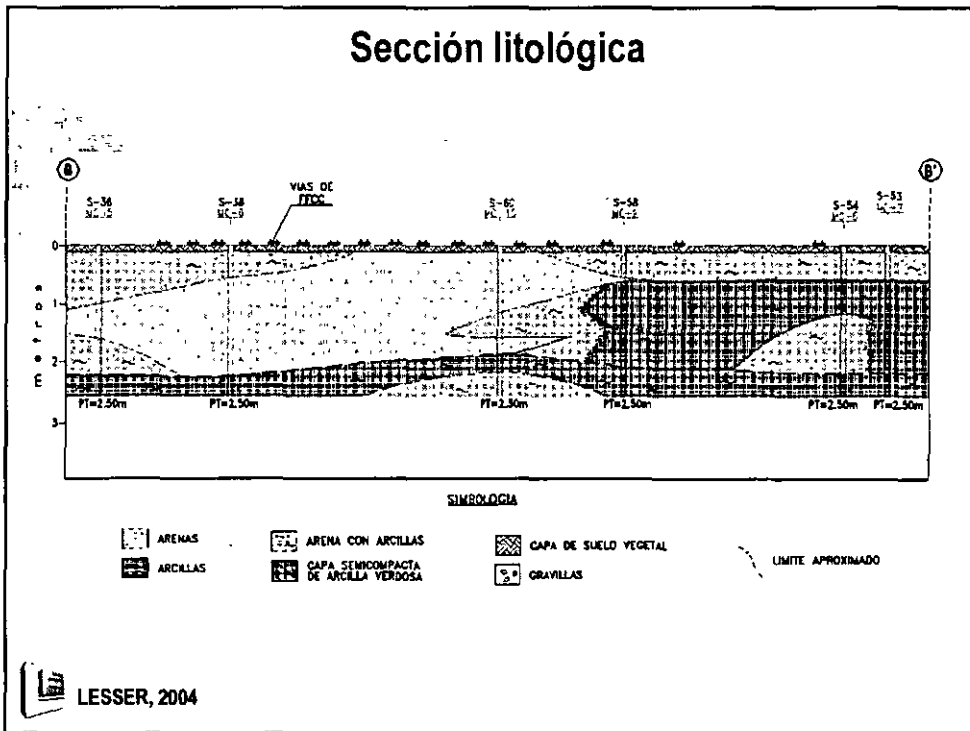
LESSER Y SAVAL, 2000



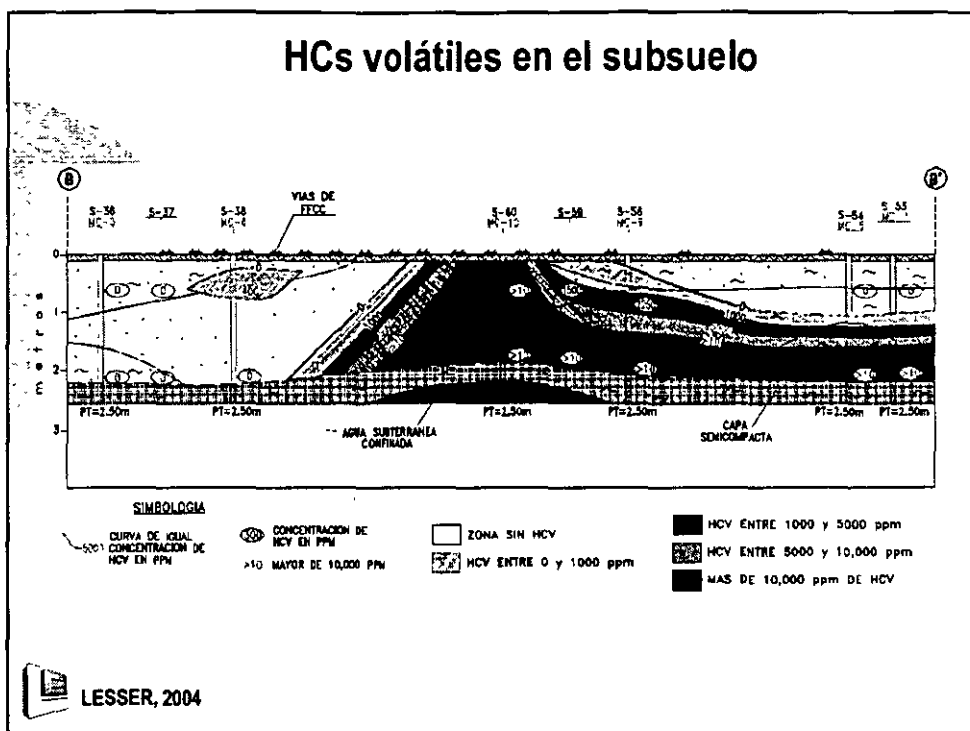
## Producto libre flotando sobre el nivel freático



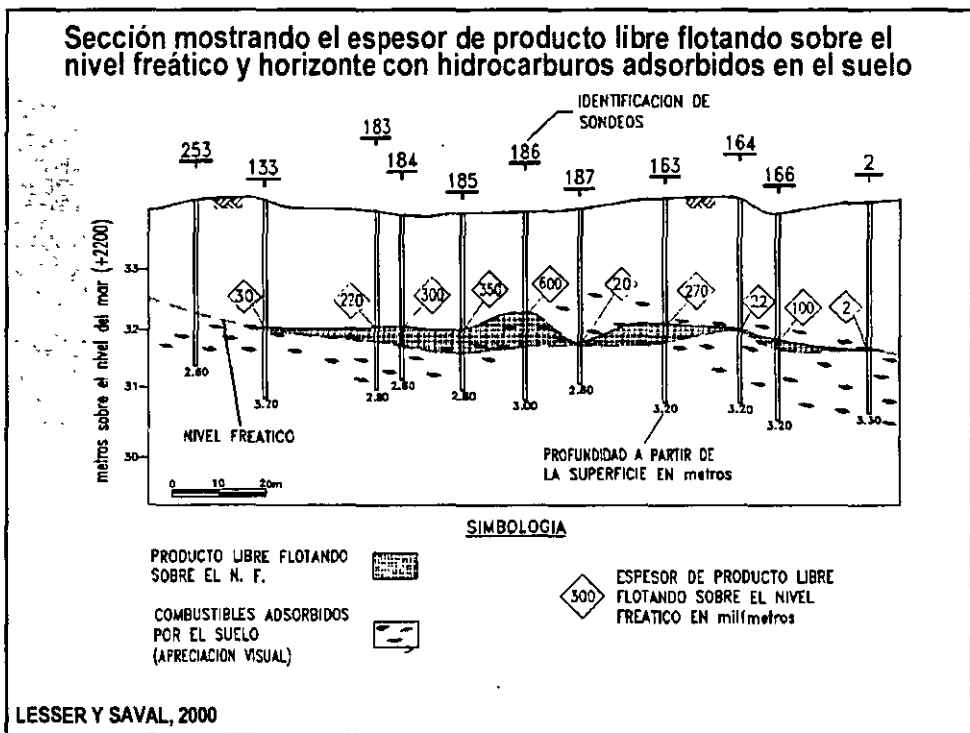
## Sección litológica



## HCs volátiles en el subsuelo



## Sección mostrando el espesor de producto libre flotando sobre el nivel freático y horizonte con hidrocarburos adsorbidos en el suelo





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



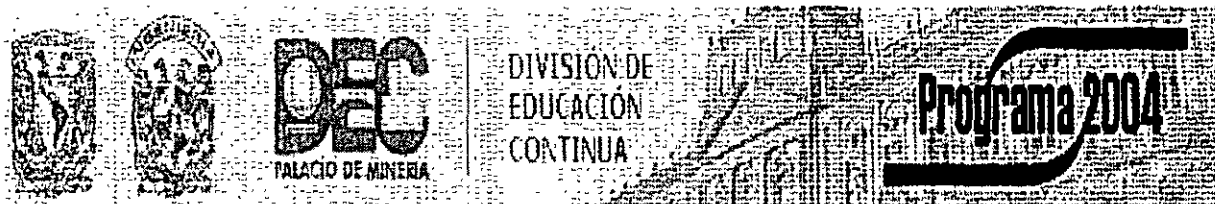
**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

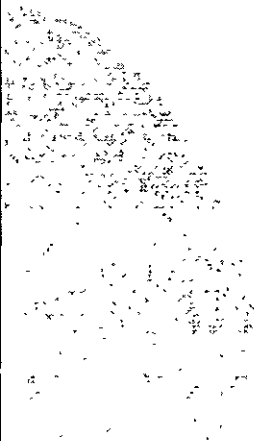
**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
METODOS DE PROSPECCIÓN Y PERFORACIÓN**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**





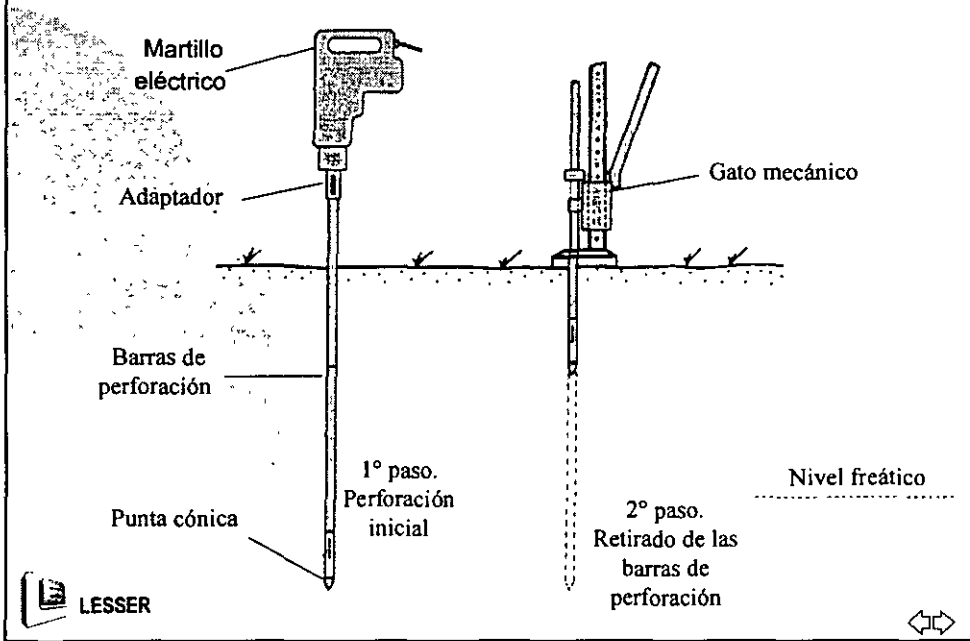
# METODOS DE PROSPECCION Y PERFORACION



# PERFORACION DE POZOS DE MEDICION



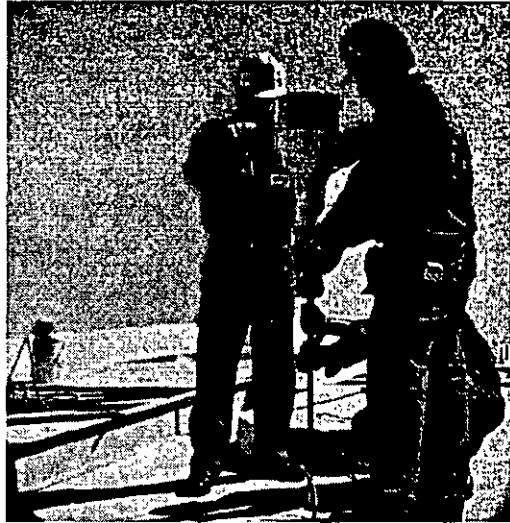
## Perforación de pozos de medición



## Perforaciones de medición

Espacio requerido:  
3 x 3 m

Tiempo por perforación:  
30 minutos por pozo



LESSER, 2004



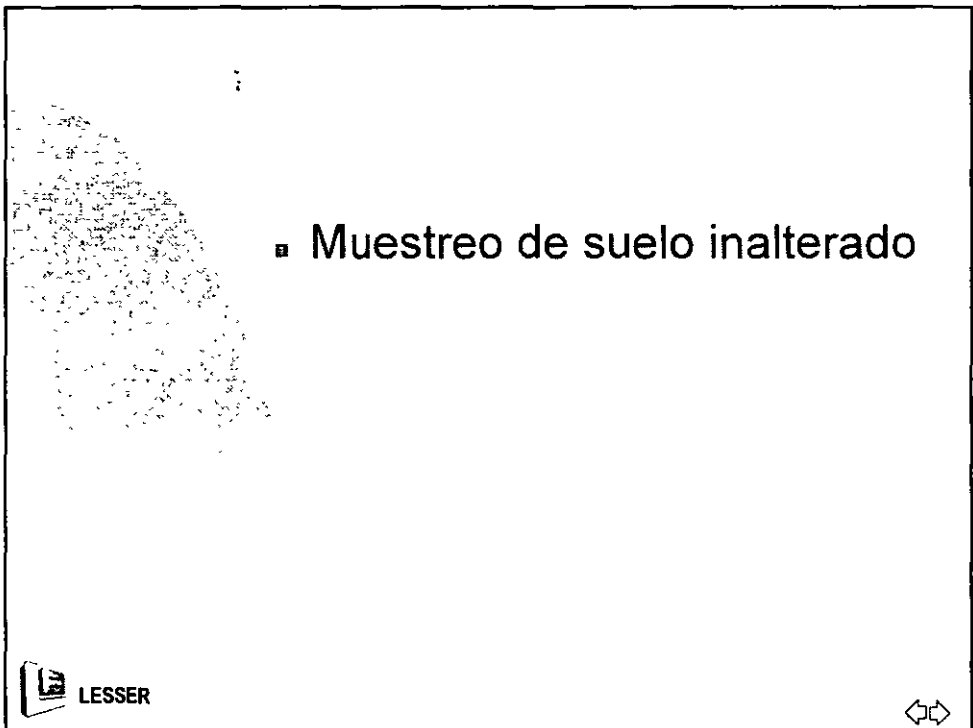
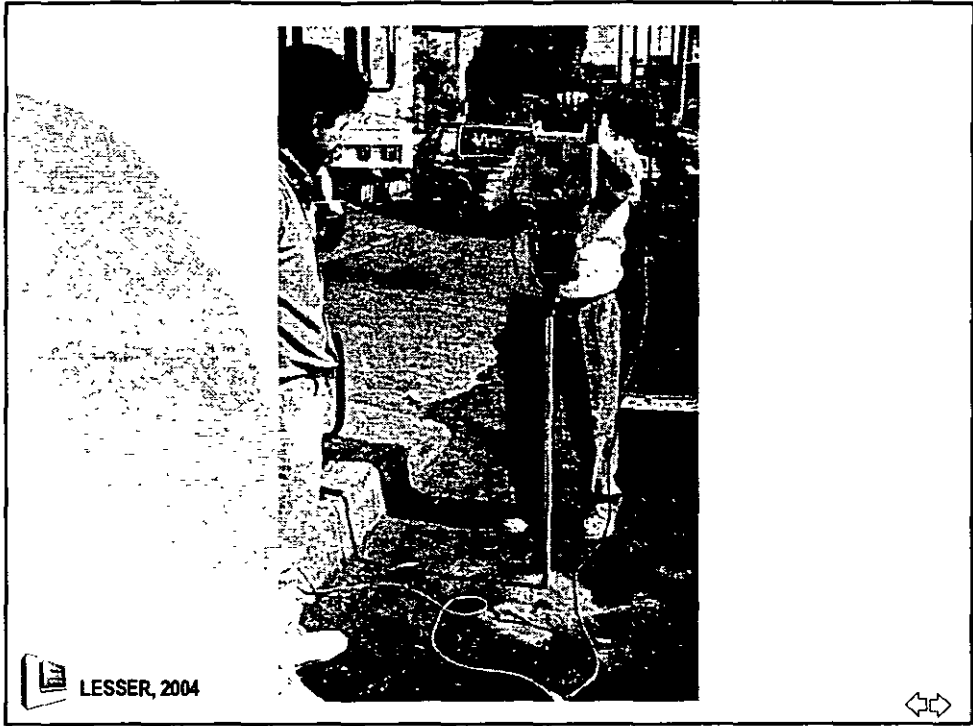


LESSER, 2004



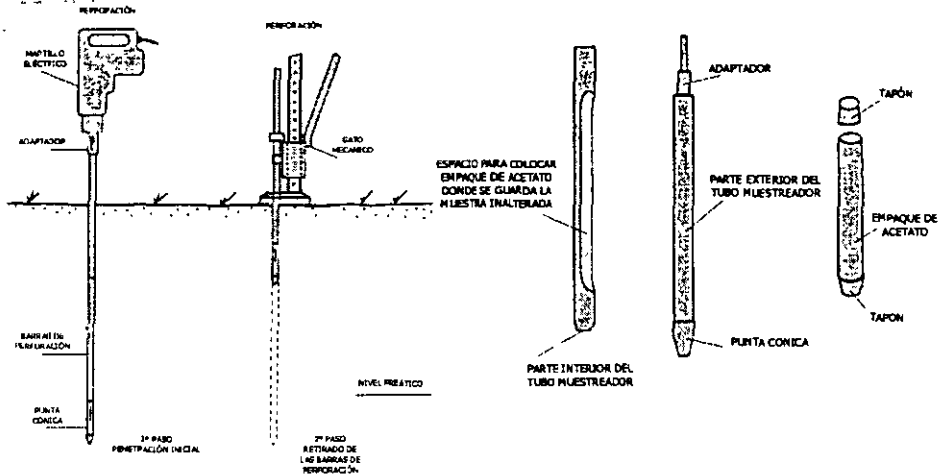
LESSER, 2004



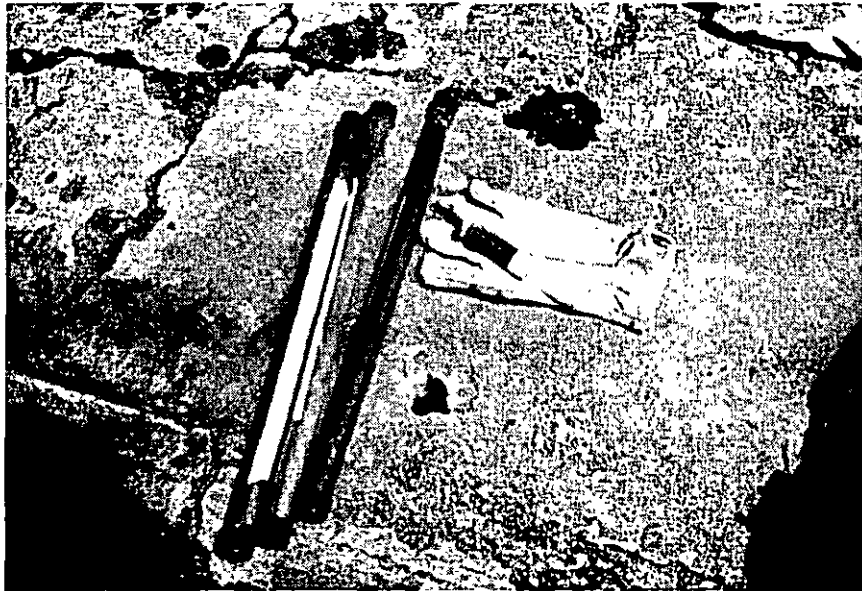




# Muestreo de suelos

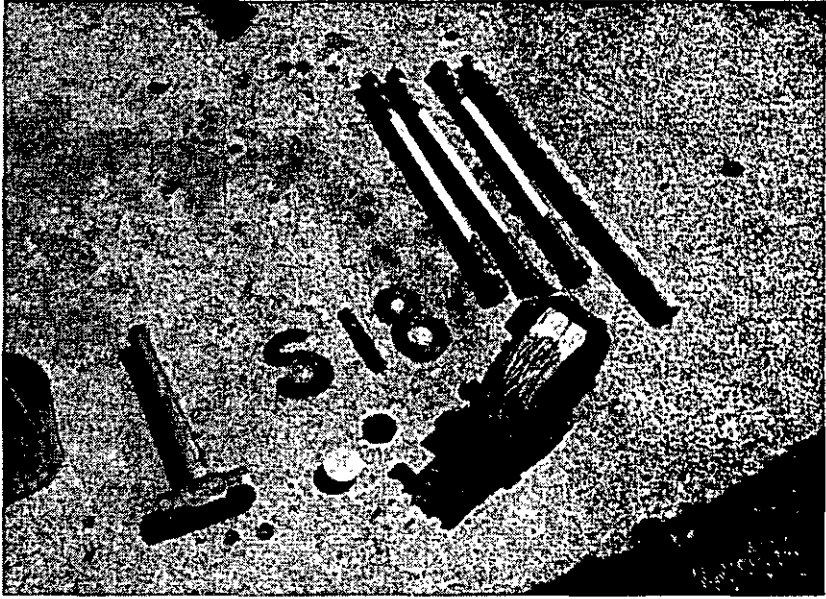


 LESSER

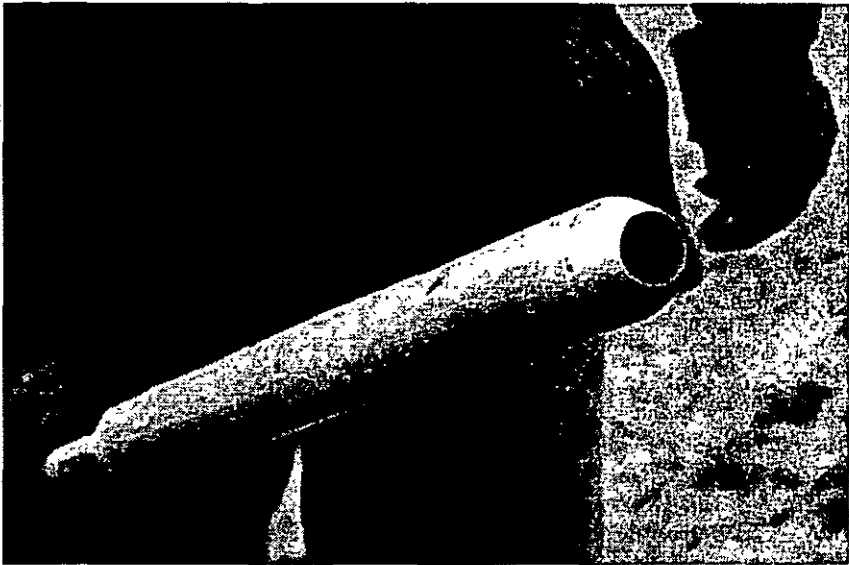


 LESSER





 LESSER



 LESSER





 LESSER



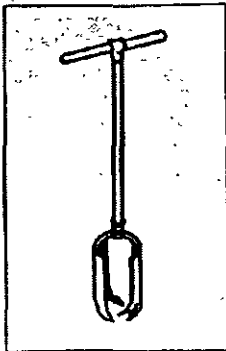
 LESSER



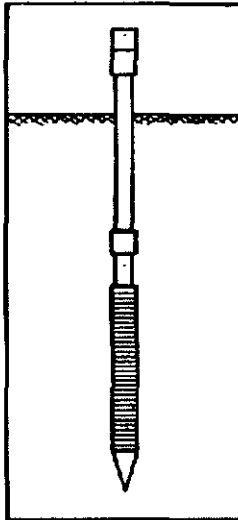
## ■ Otras herramientas de perforación



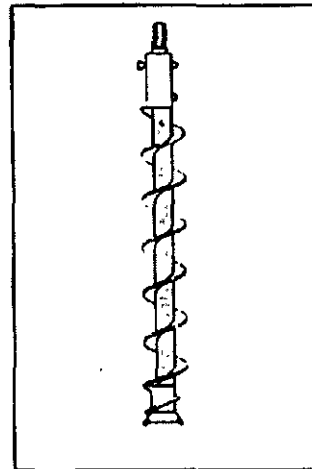
Muestreador manual

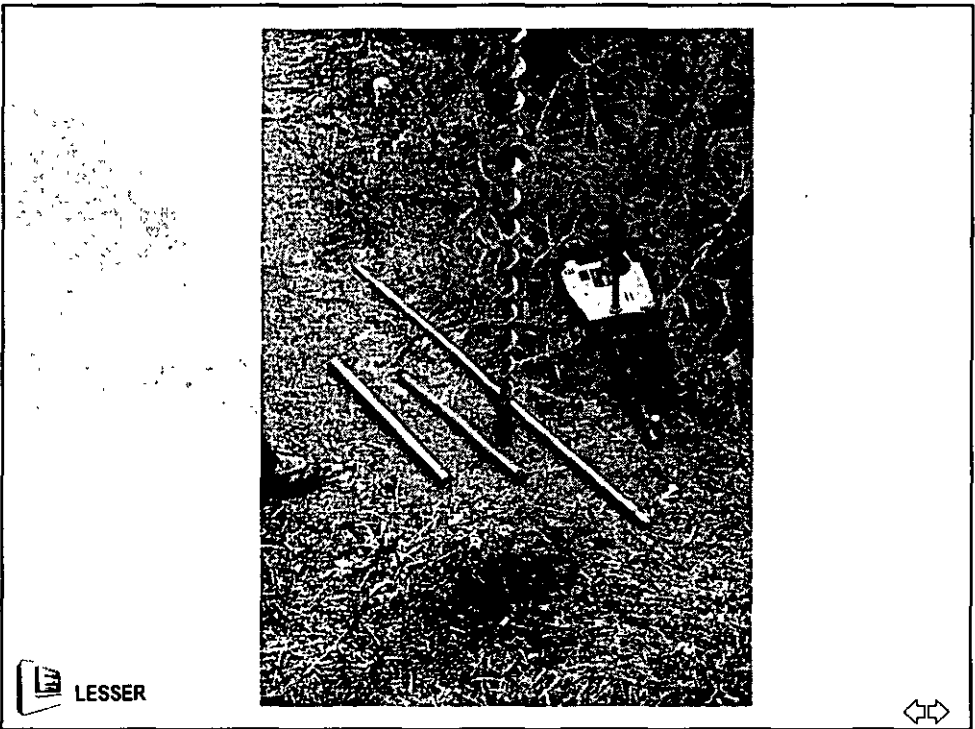
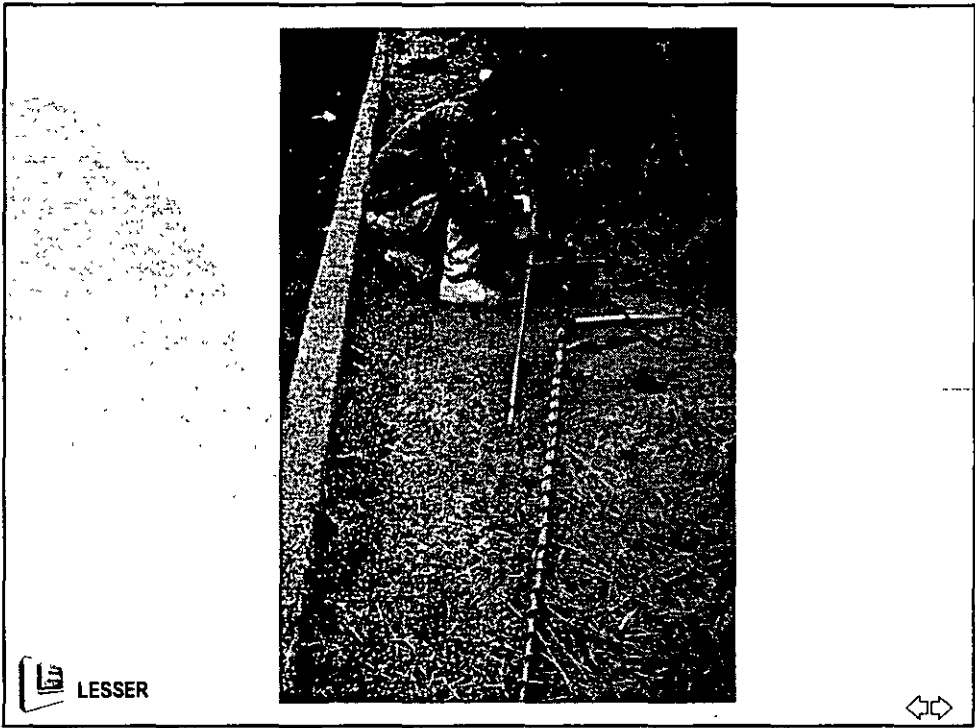


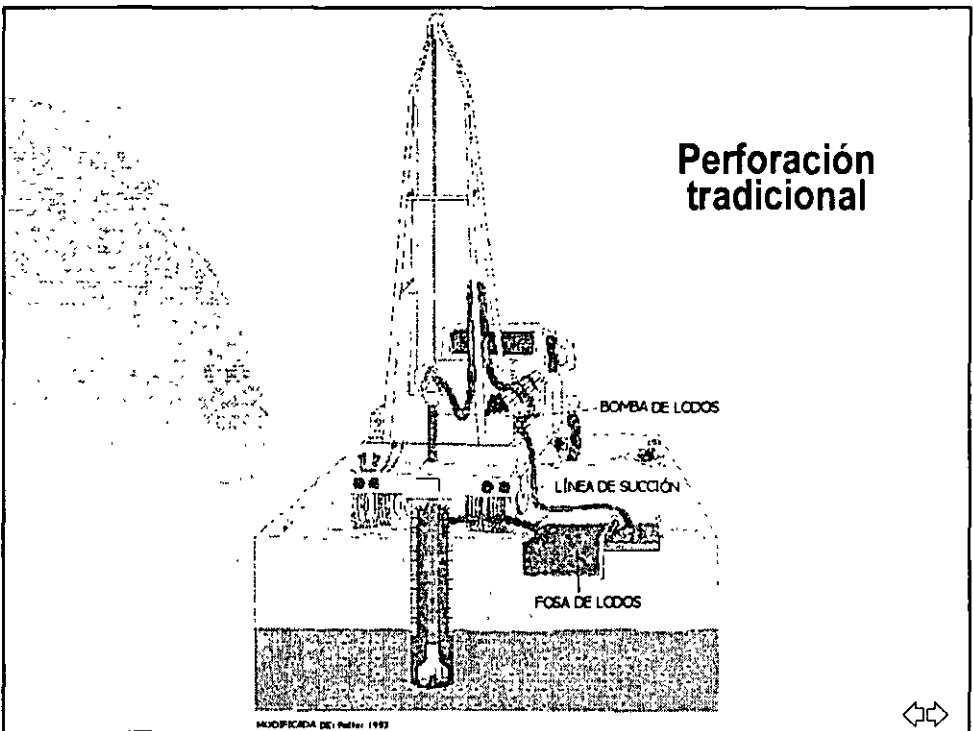
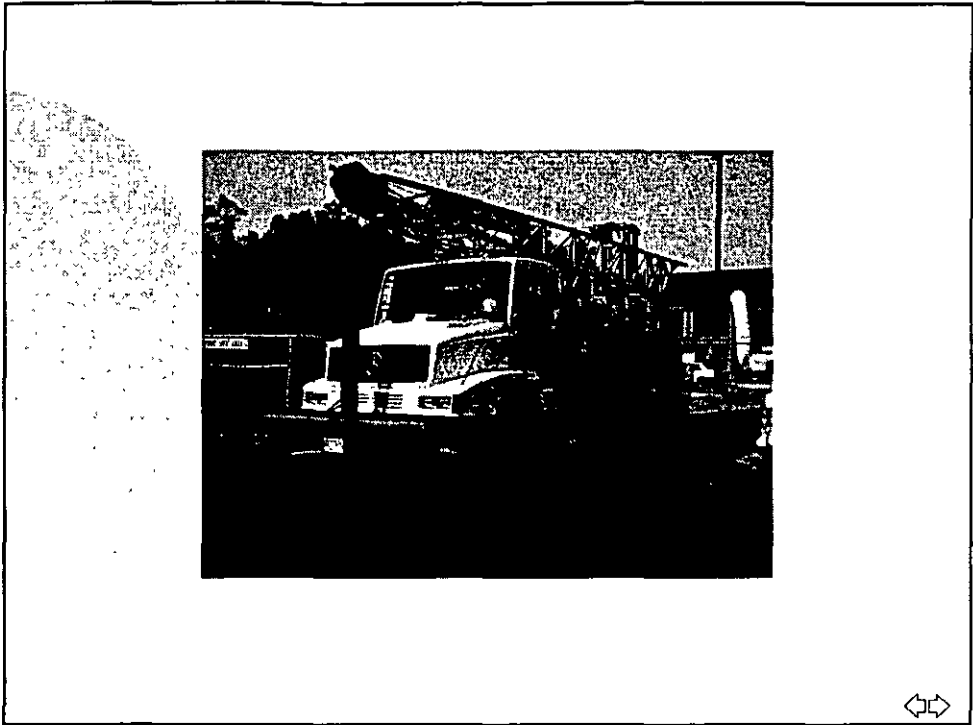
Muestreador mediante  
incado de tubería

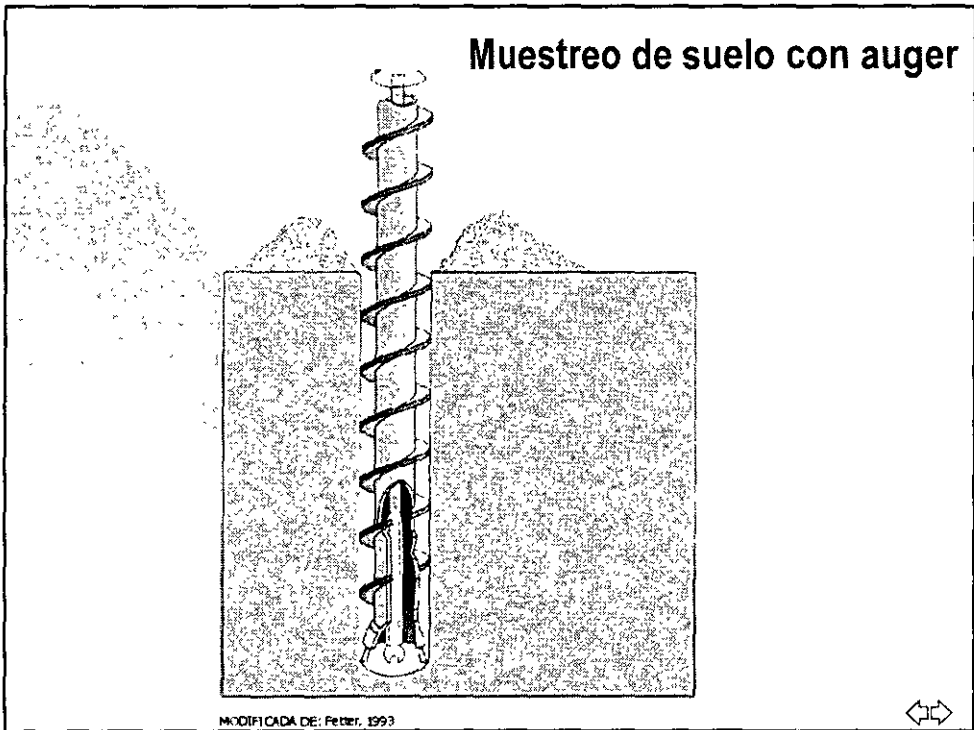
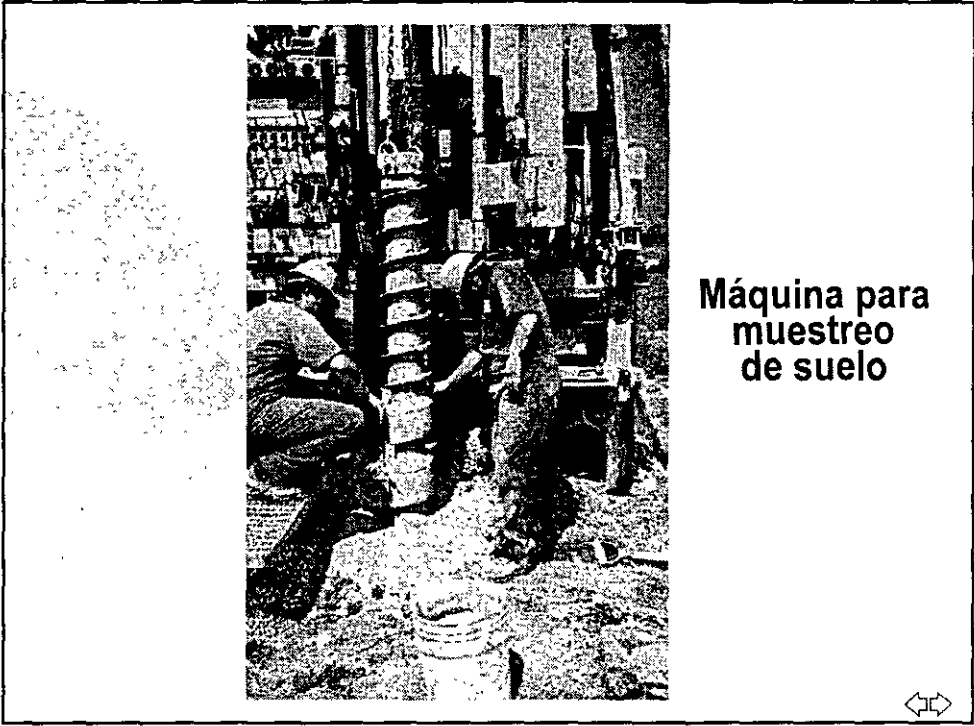


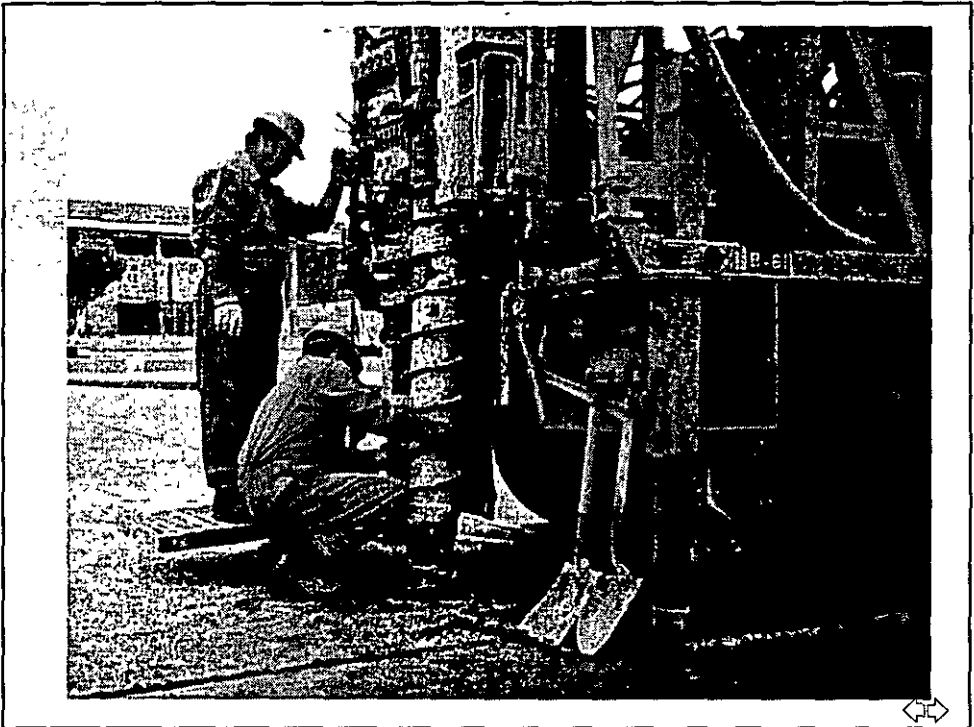
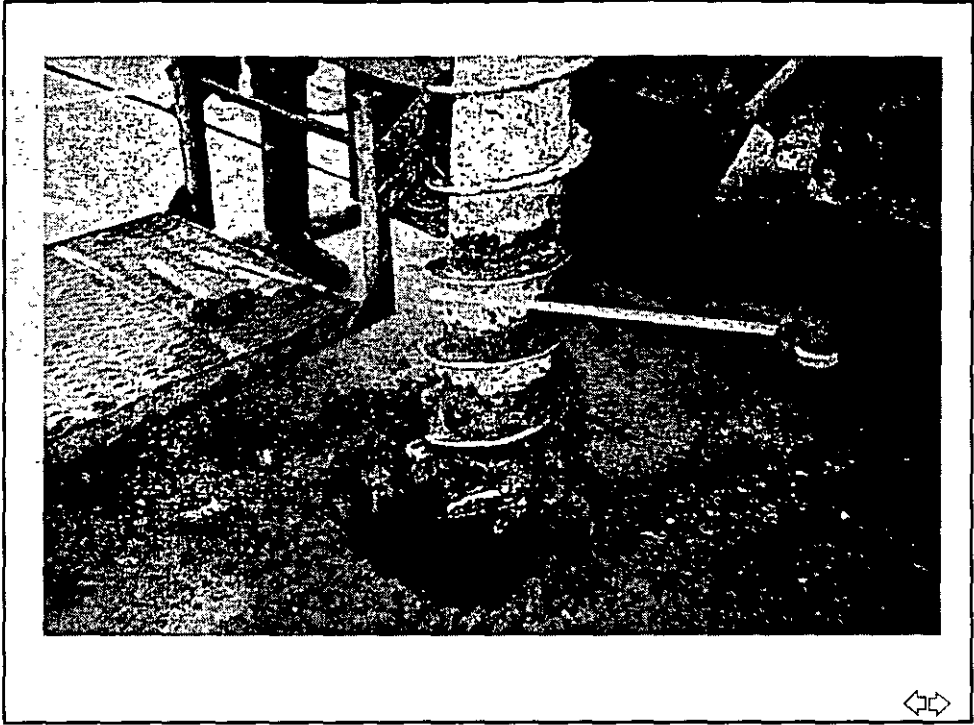
Muestreador de  
máquina rotaria







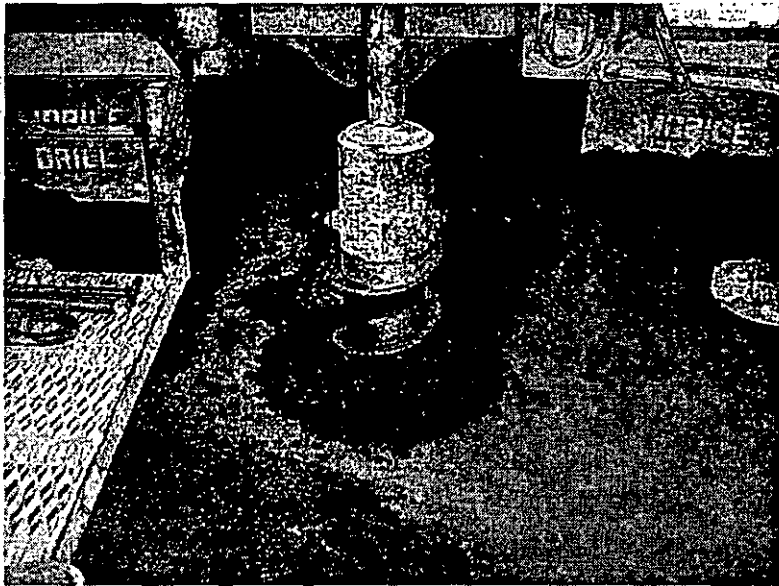
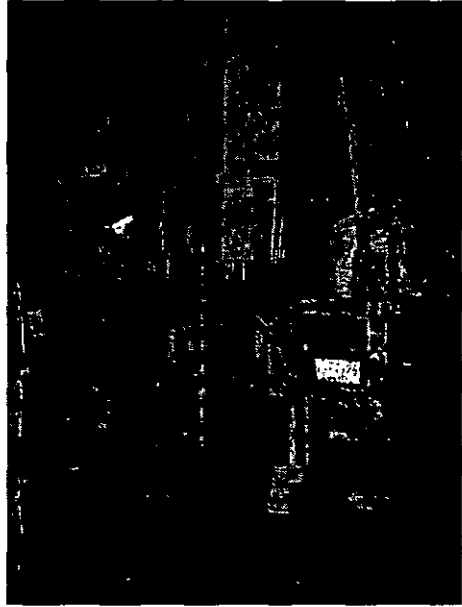


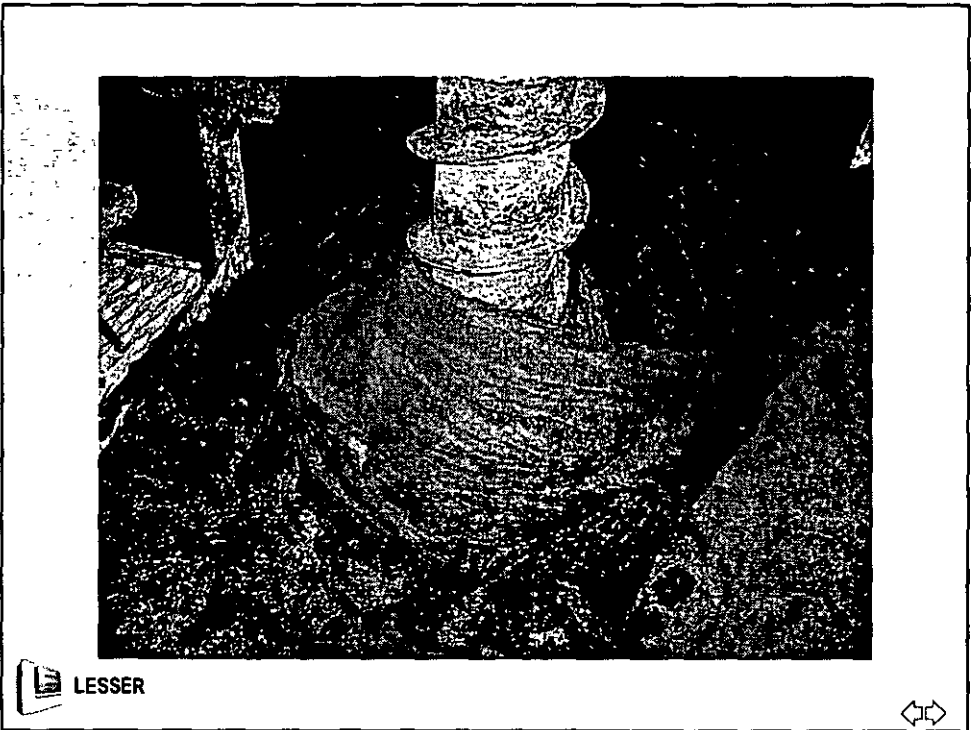




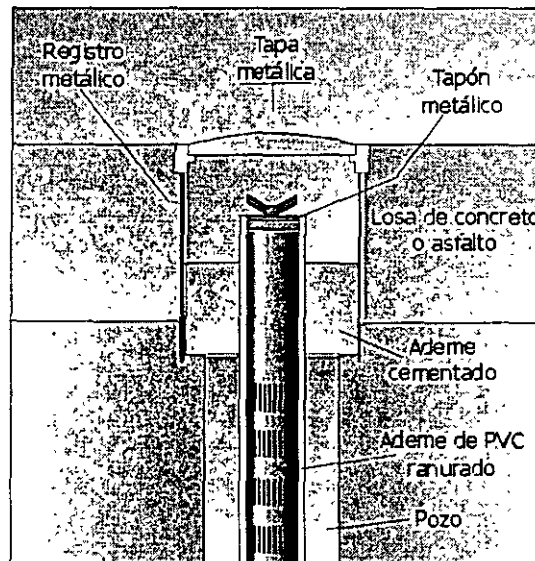


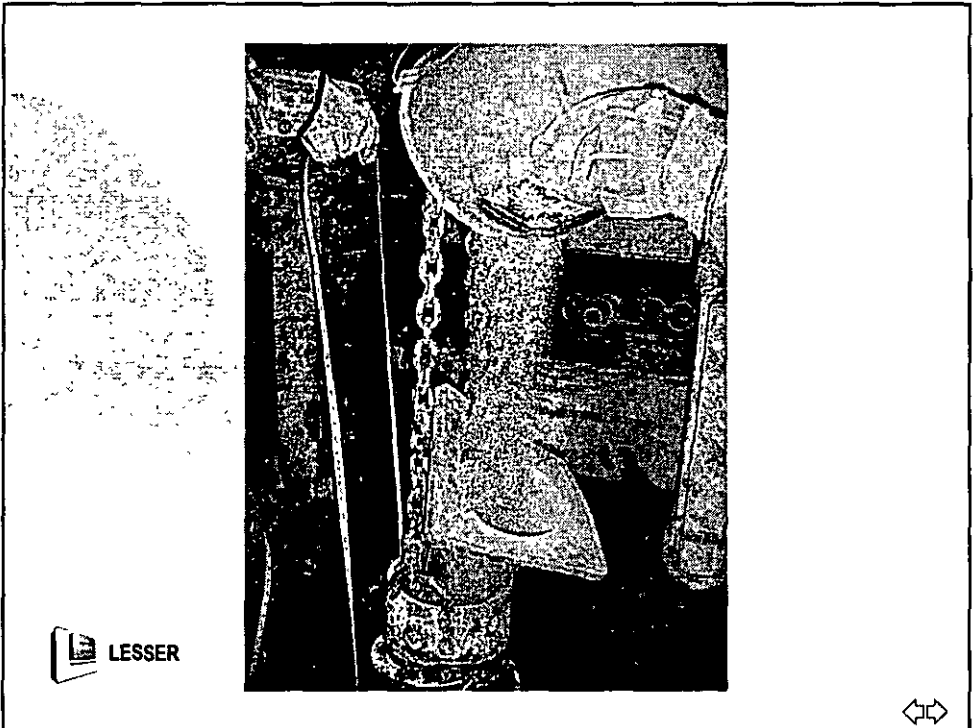
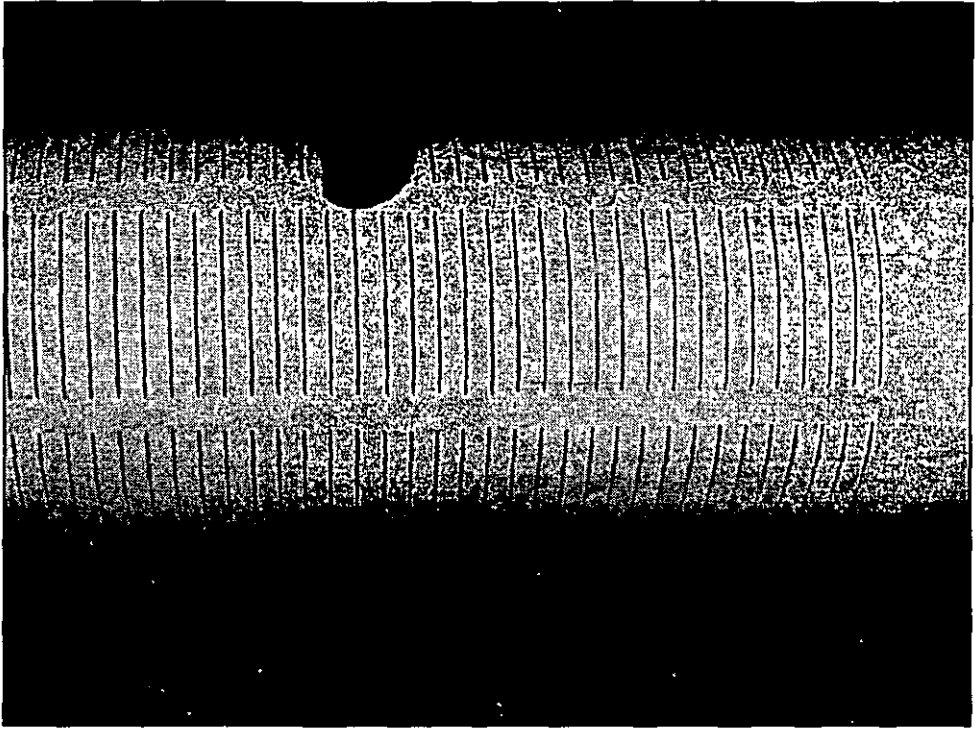
PERFORACION  
DE POZOS PARA  
EXTRACCION DEL  
PRODUCTO LIBRE

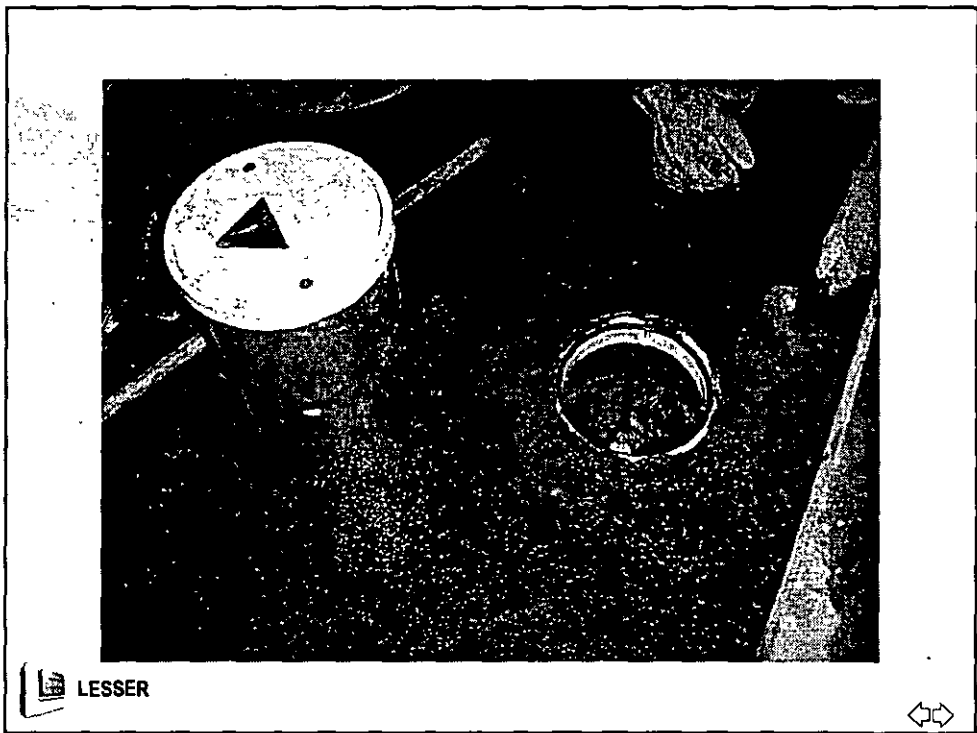
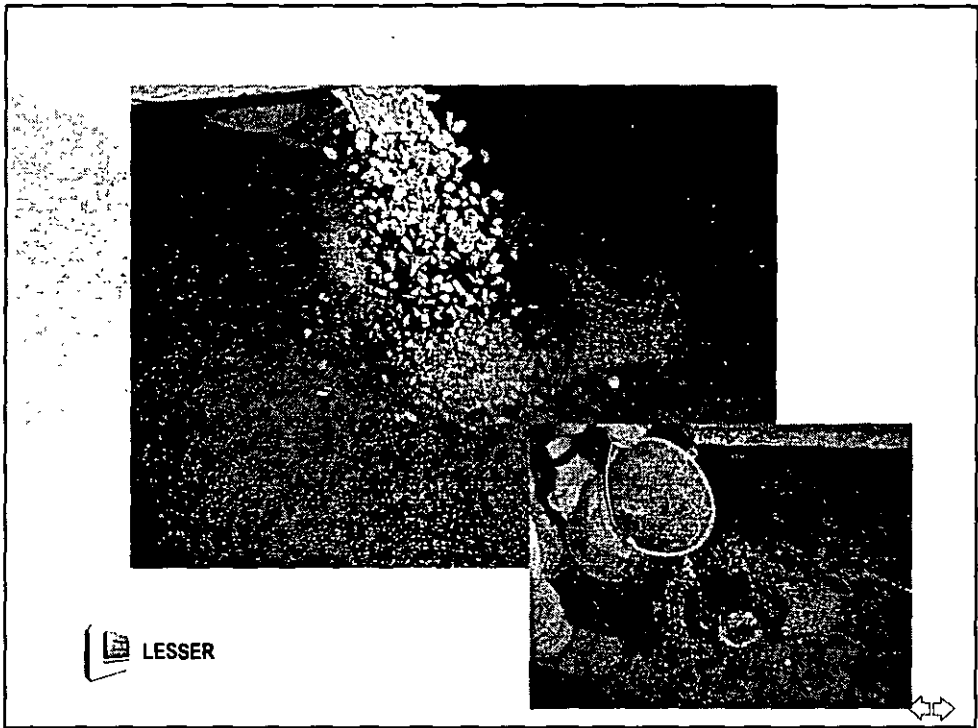


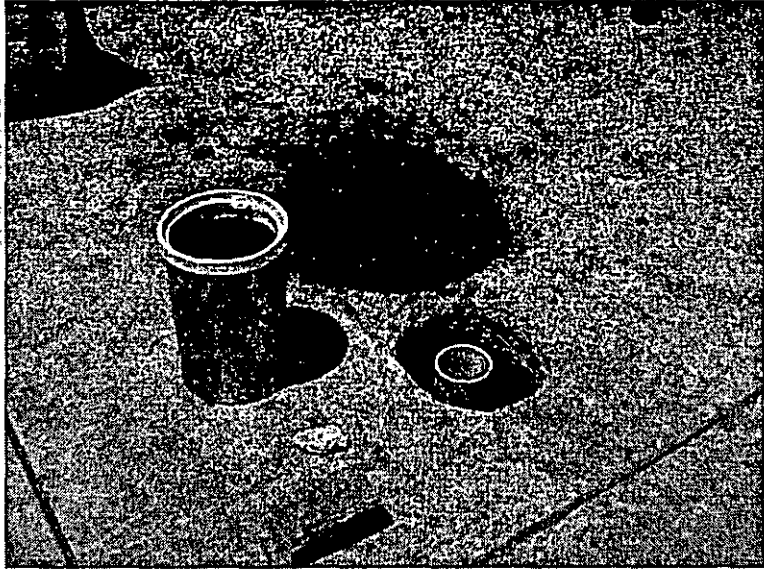


## ■ Terminación de los pozos

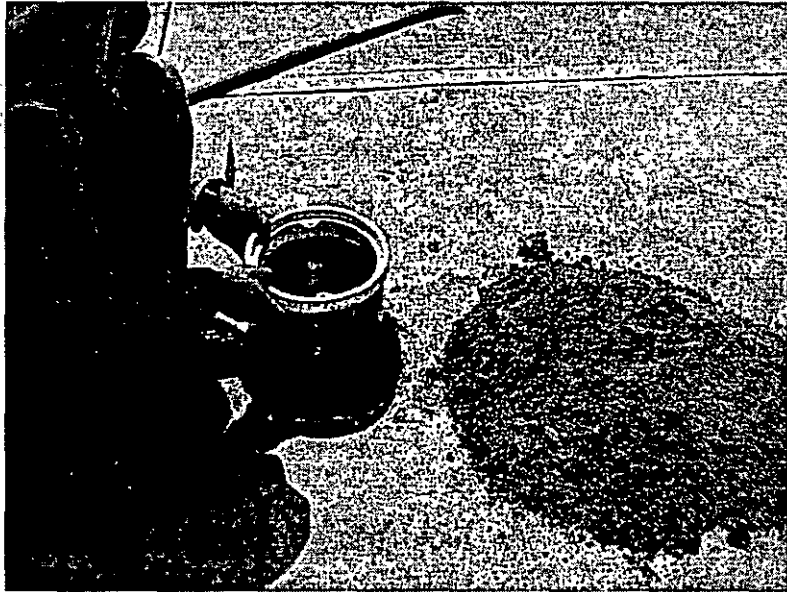






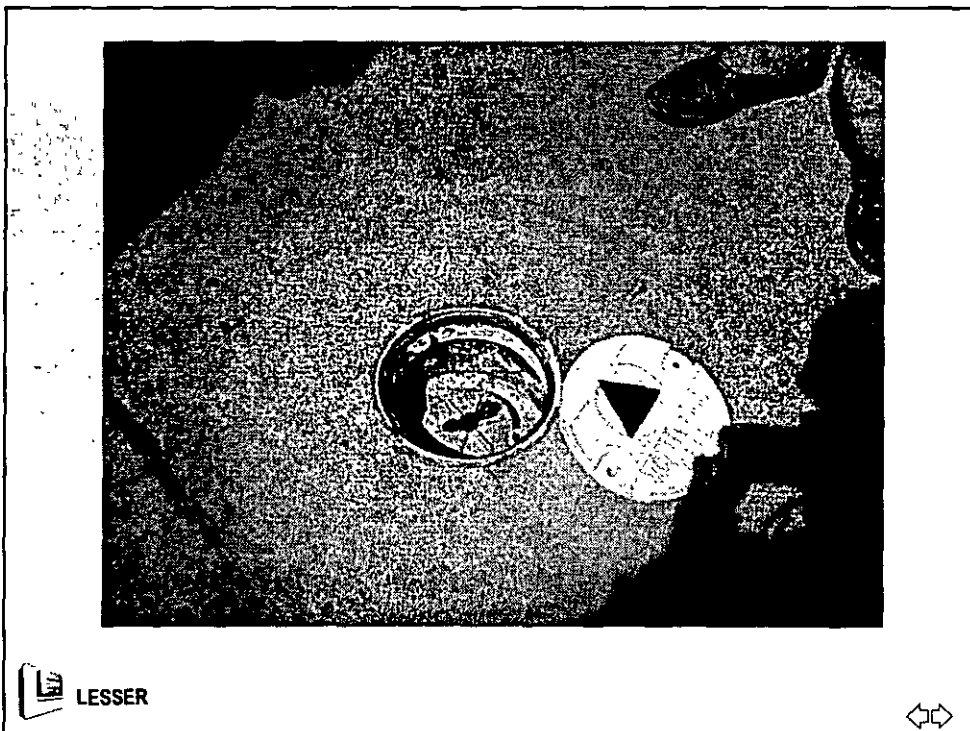
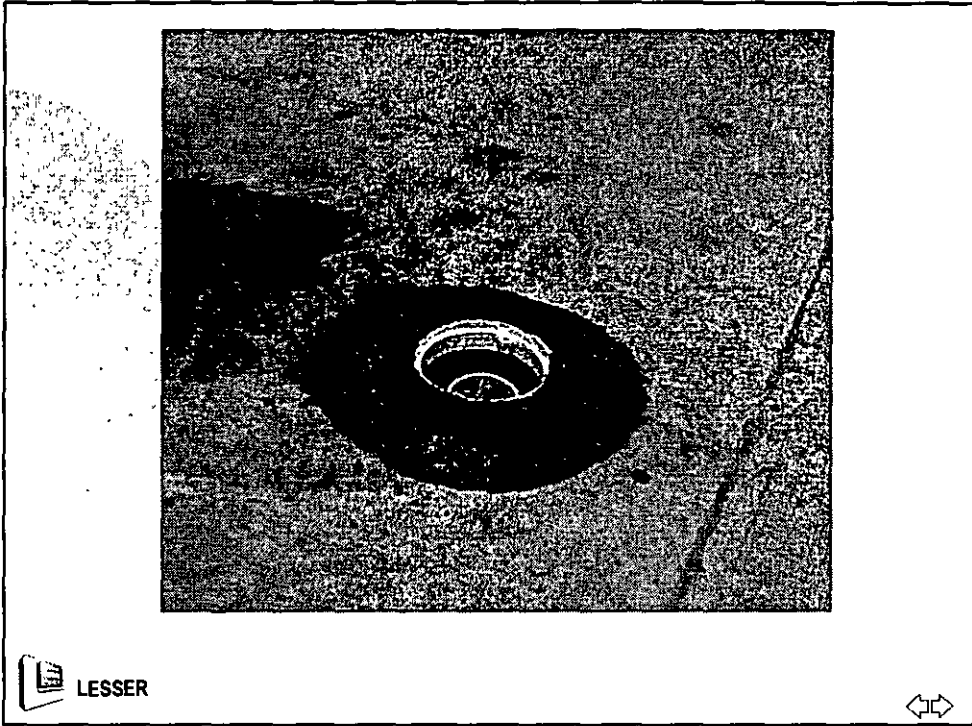


 LESSER



 LESSER







**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

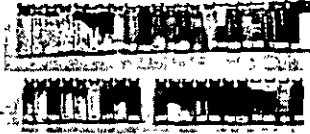
**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
PRINCIPALES HIDROCARBUROS CONTAMINANTES DE  
SUELOS Y ACUÍFEROS.**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

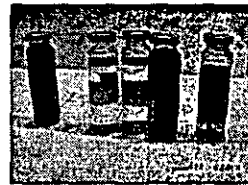
**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**



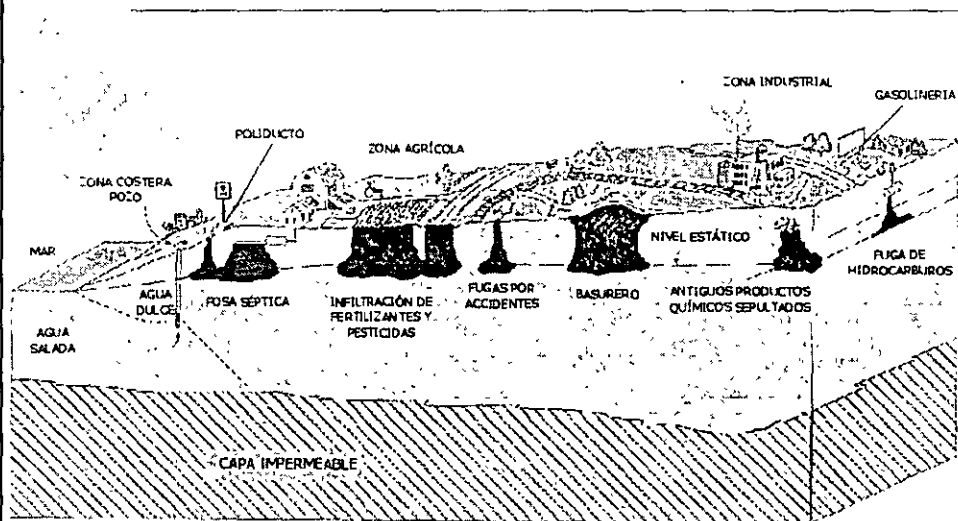


## PRINCIPALES HIDROCARBUROS CONTAMINANTES DE SUELOS Y ACUIFEROS: IDENTIFICACION Y CARACTERISTICAS

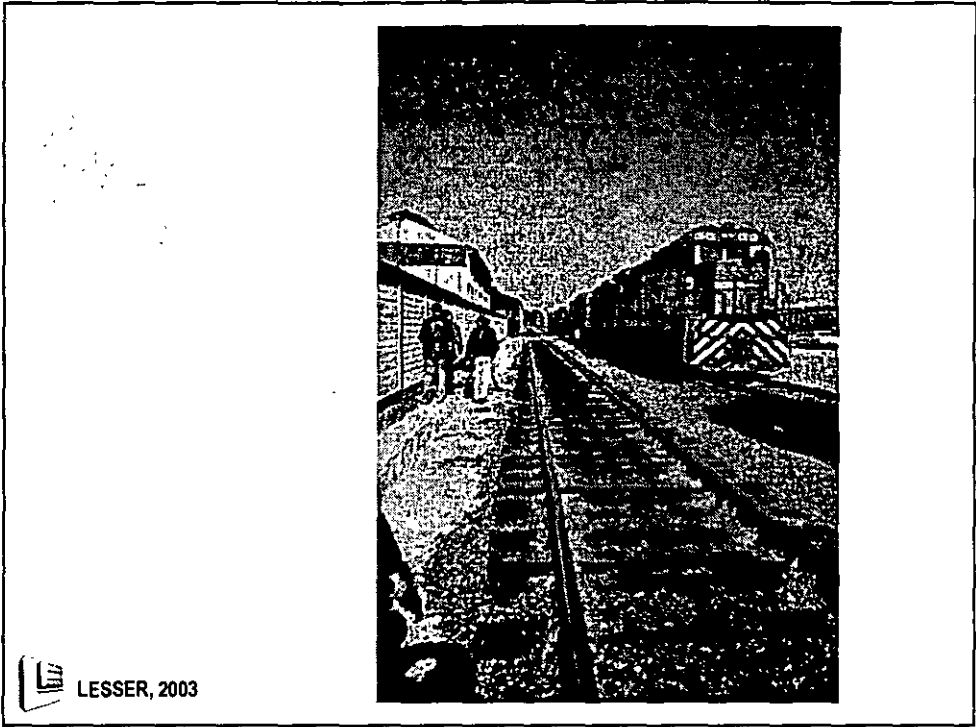
- Por:
- Ing. Juan Manuel Lesser
- Dra Susana Saval Bohorquez



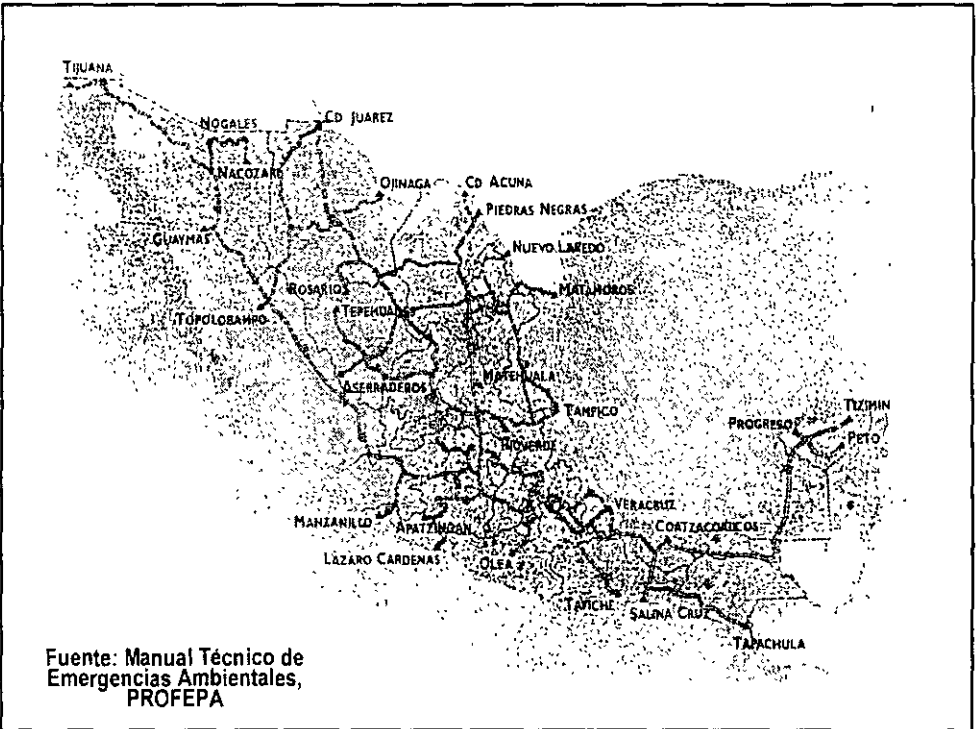
## Fuentes comunes de contaminación



MODIFICADA DE Fetter, 1993.



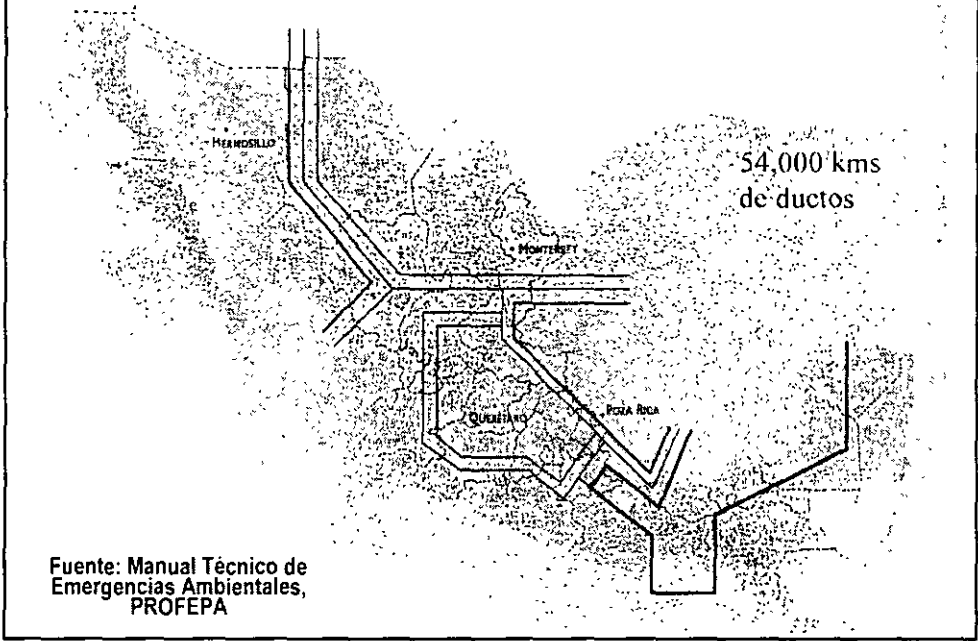
 LESSER, 2003



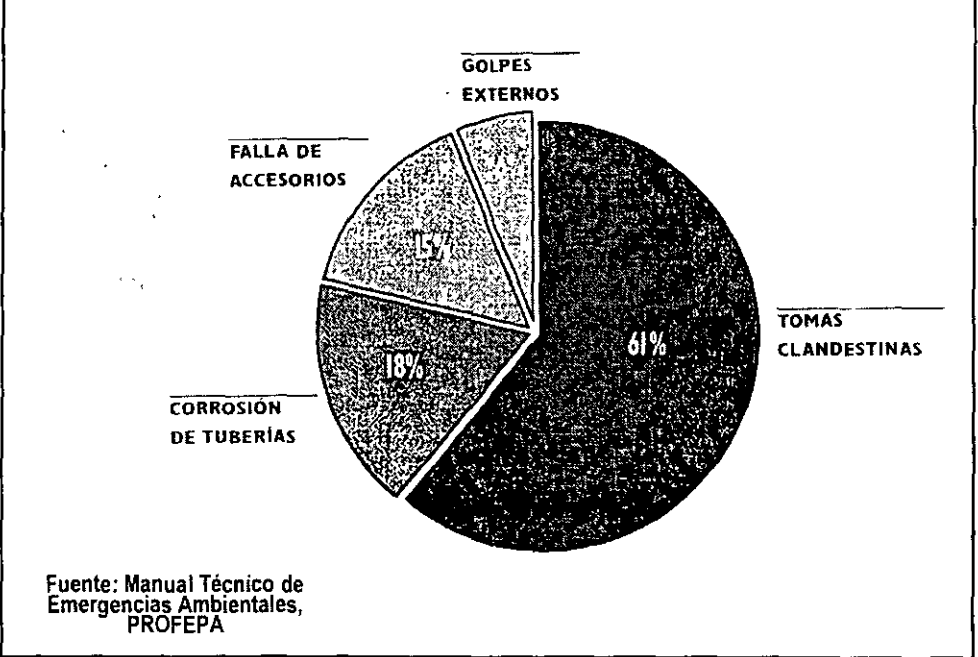
Fuente: Manual Técnico de Emergencias Ambientales, PROFEPA



### Principales sistemas de transporte de hidrocarburos por ductos de Pemex



### Causa de fugas comunes en ductos





 LESSER, 2003



COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

MAS COMUNES:

Gasolina

Automoviles



COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

MAS COMUNES:

Gasolina

Automoviles

Diesel

Ferrocarriles



COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

MAS COMUNES:

Gasolina Automoviles

Diesel Ferrocarriles

Kerosina Ferrocarriles  
estufas



LESSER, 2003

COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

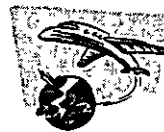
MAS COMUNES:

Gasolina Automoviles

Diesel Ferrocarriles

Kerosina Ferrocarriles

Turbosina Aviones



LESSER, 2003

## COMBUSTIBLES DESTILADOS DEL PETROLEO

### MAS COMUNES:

Gasolina      Automoviles

Diesel      Ferrocarriles

Kerosina      Ferrocarriles

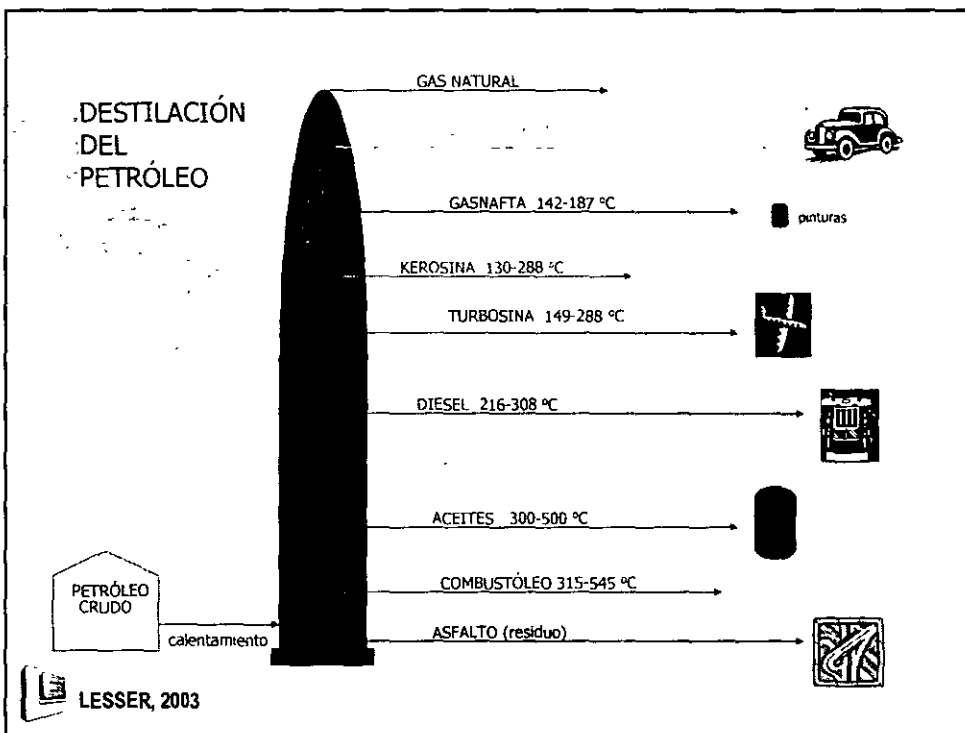
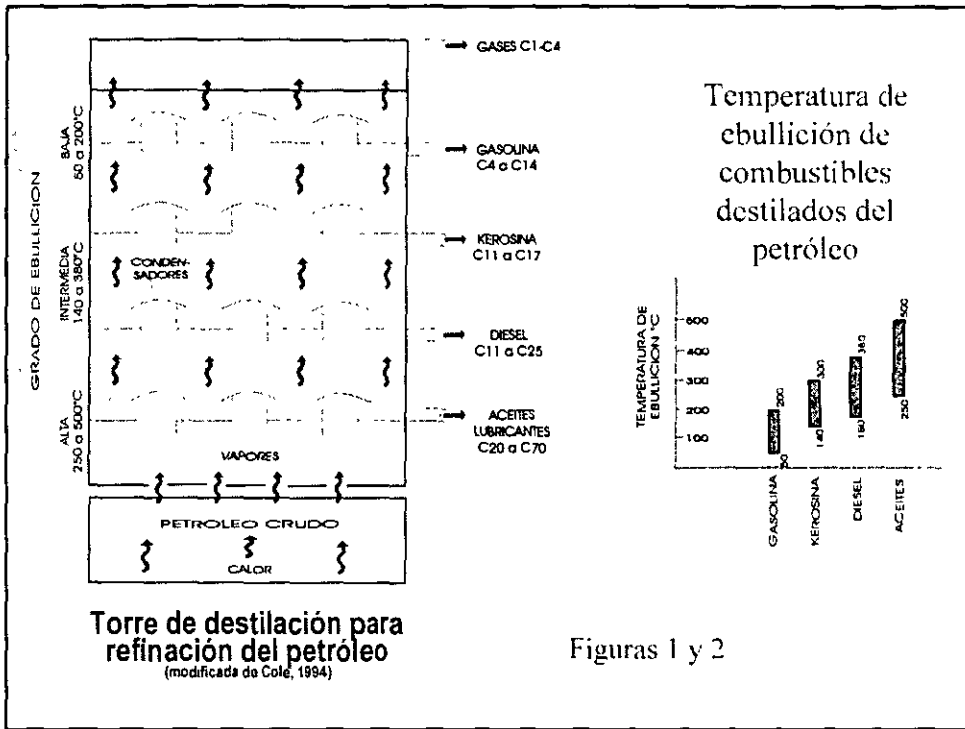
Turbosina      Aviones

Combustoleo      Industrias

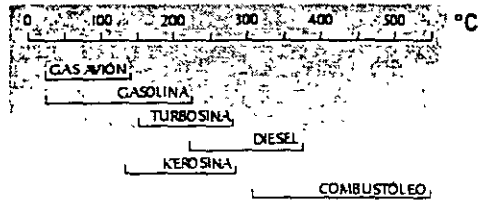


### ▫ Destilacion del petroleo





# TEMPERATURA DE DESTILACION DE LOS HIDROCARBUROS MAS COMUNES



 LESSER, 2003

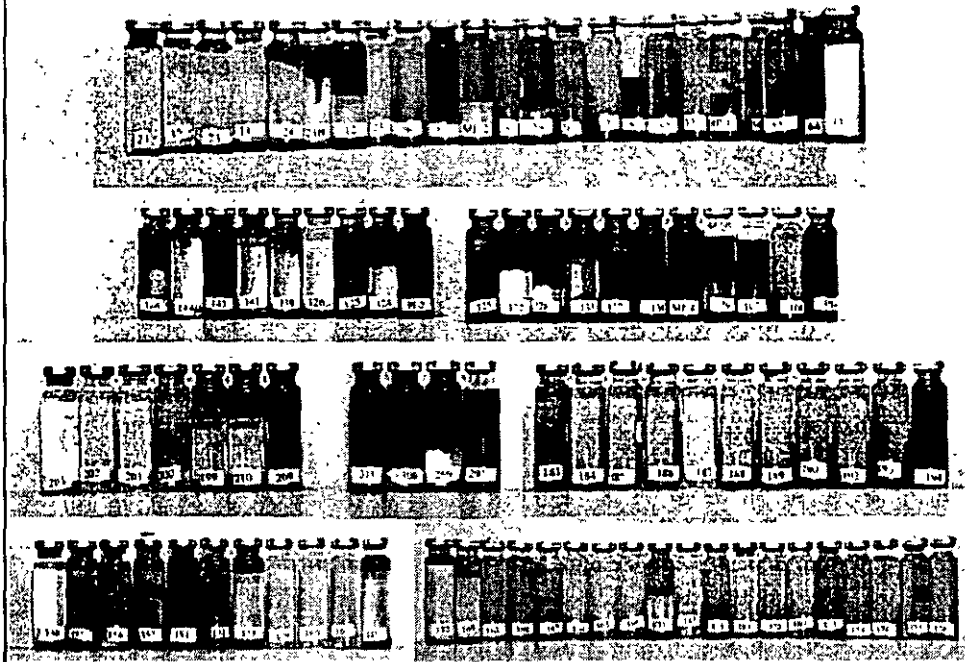


 LESSER, 2003



 LESSER, 2003

### Muestras de agua y producto libre



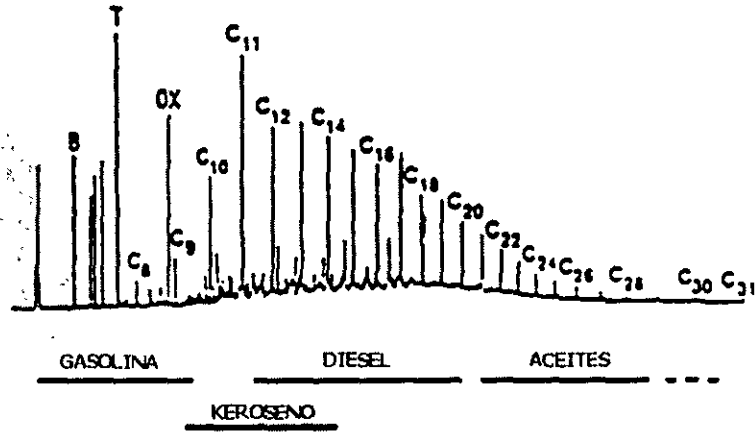


 LESSER, 2003

## ■ Identificación de hidrocarburos mediante cromatografía

 LESSER, 2003

## Cromatograma de mezcla de hidrocarburos



CROMATOGRAMA DE MEZCLA DE  
HIDROCARBUROS (MODIFICADA  
DE SENN AND JOHNSON, 1995)

Figura 3



LESSER, 2003

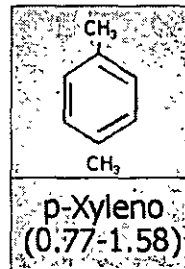
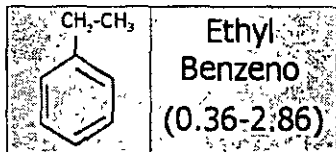
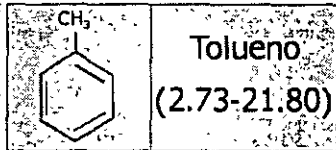
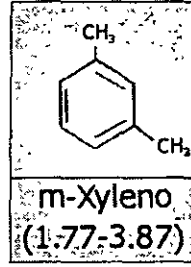
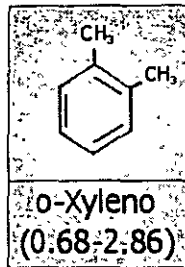
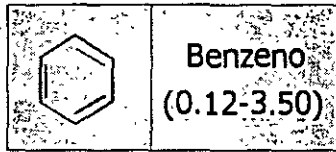
## GASOLINAS

- Hidrocarburos Monoaromaticos



LESSER, 2003

# BTEX



 LESSER, 2003

Cromatograma  
de una gasolina

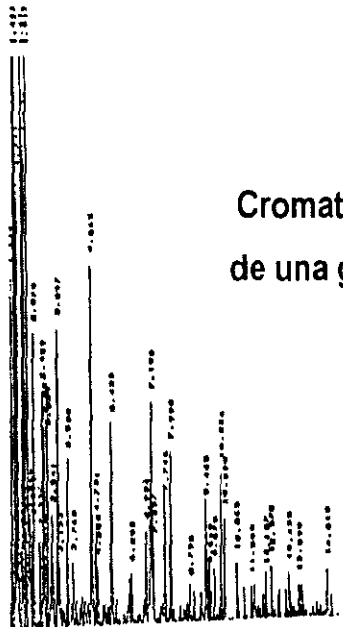


Figura 4

 LESSER, 2003

# DIESEL

Hidrocarburos poliaromaticos

Antraceno

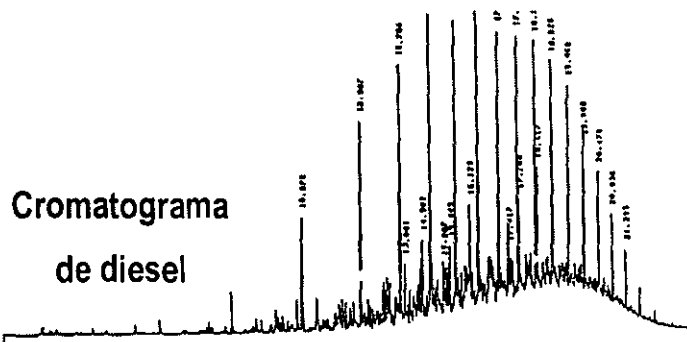
Fenantreno

Naftaleno

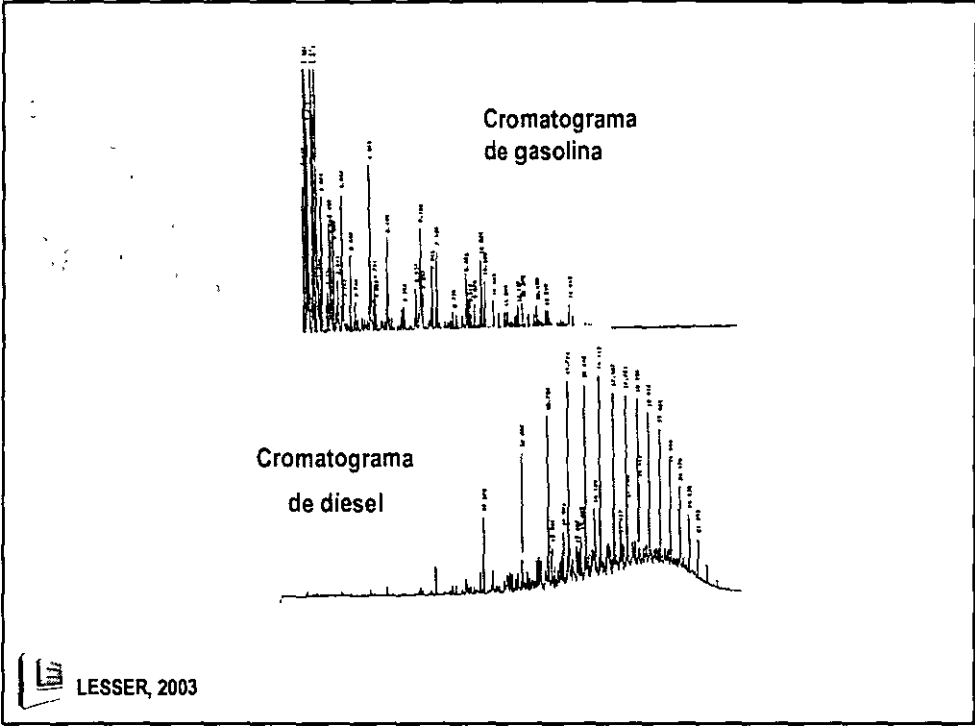


LESSER, 2003

Figura 5



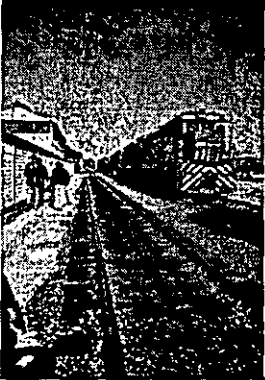
LESSER, 2003



# KEROSINA

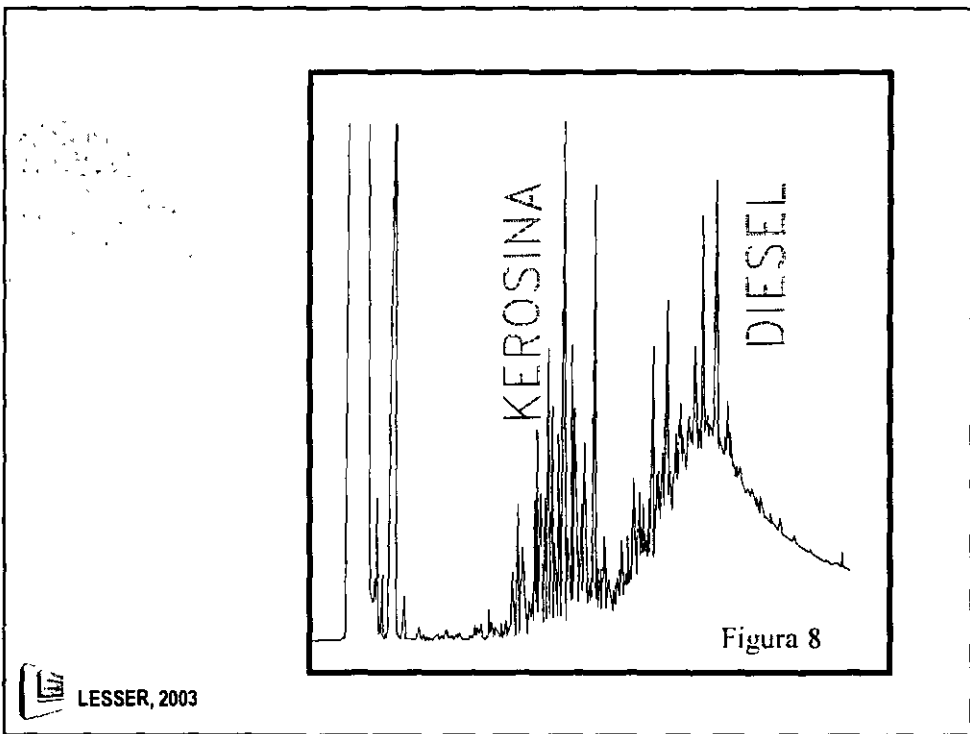
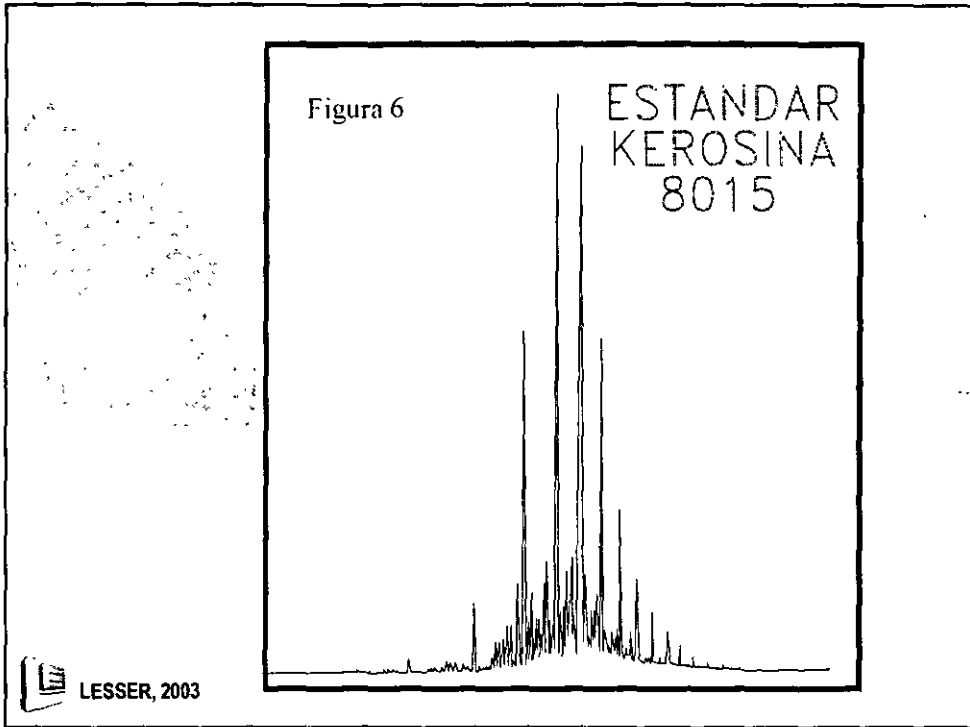
Hidrocarburos poliaromaticos

- Antraceno
- Fenantreno
- Naftaleno



LESSER, 2003





# TURBOSINA

Hidrocarburos poliaromaticos

Antraceno

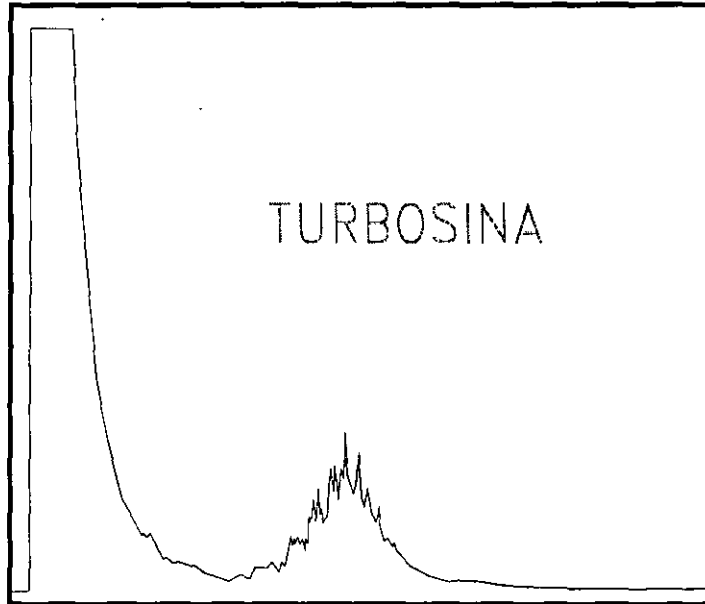
Fenantreno

Naftaleno



 LESSER, 2003

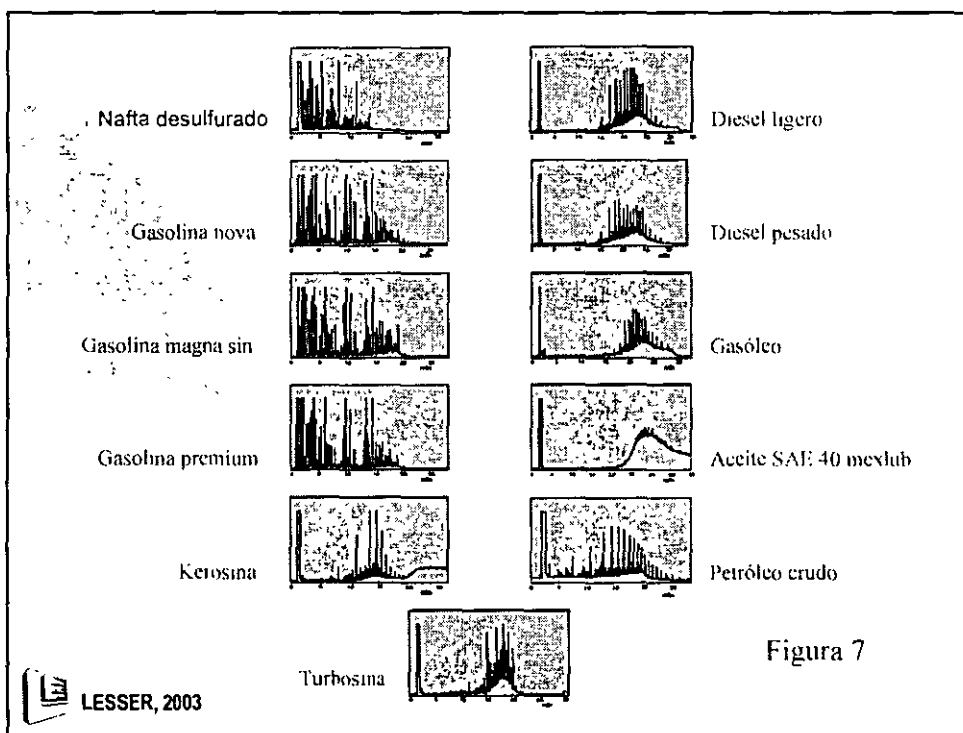
TURBOSINA

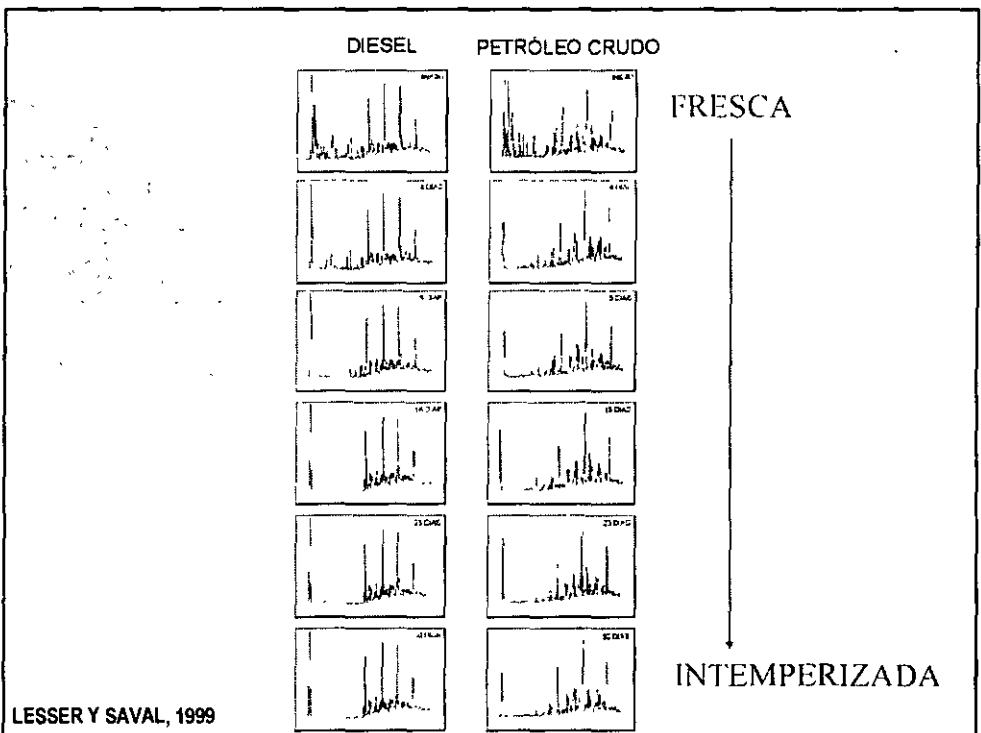
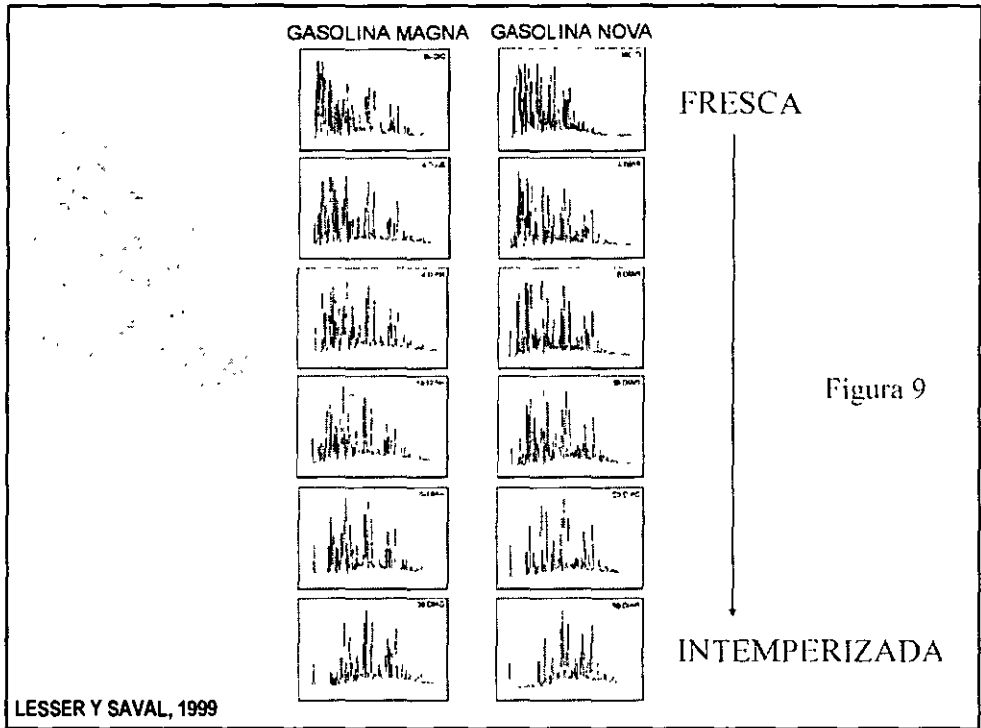


 LESSER, 2003

## ■ Estandares ( Huellas digitales )

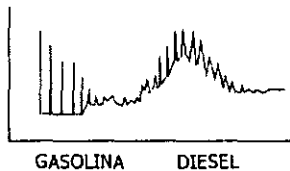
 LESSER, 2003





MÉTODOS DE ANÁLISIS  
PARA DETERMINACIÓN  
DE HIDROCARBUROS EN  
MUESTRAS DE SUELO Y AGUA

HTP ACEITES COMBUSTOLEO	EPA-418-1
HTP GASOLINA DIESEL	EPA-8015
(HC LIGEROS) MONOAROMÁTICOS BTX, MTBE	EPA-8260
(HC PESADOS) POLIAROMÁTICOS	EPA-8310/8270



GASOLINA

MEZCLA DE MAS DE 150 Hcs LIGEROS DIFERENTES

DIESEL

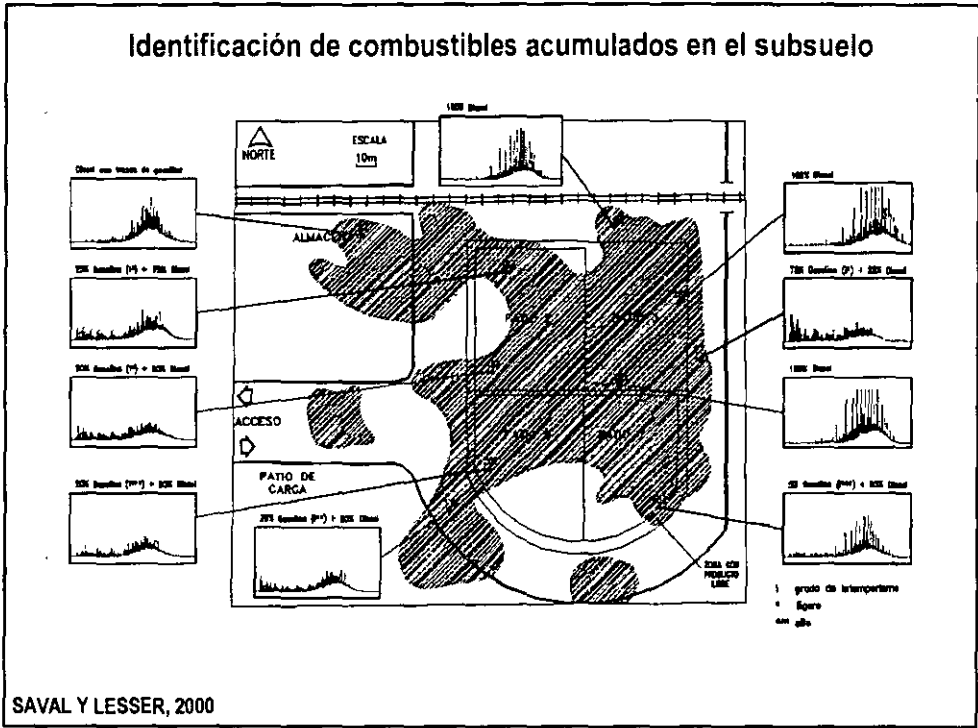
MEZCLA DE MAS DE 140 Hcs INTERMEDIOS DIFERENTES

SUMA 290 Hcs EN SUELO

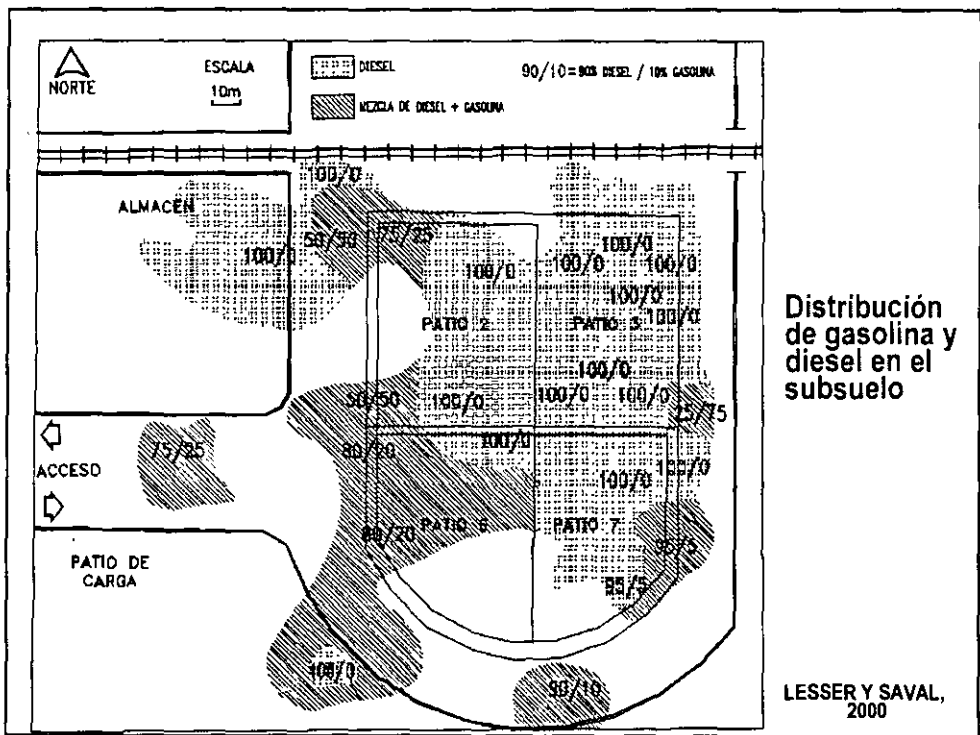
DE ELLOS ±8 SON LOS QUE SE ENCUENTRAN EN EL AGUA



### Identificación de combustibles acumulados en el subsuelo



SAVAL Y LESSER, 2000



Distribución de gasolina y diesel en el subsuelo

LESSER Y SAVAL, 2000



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS**

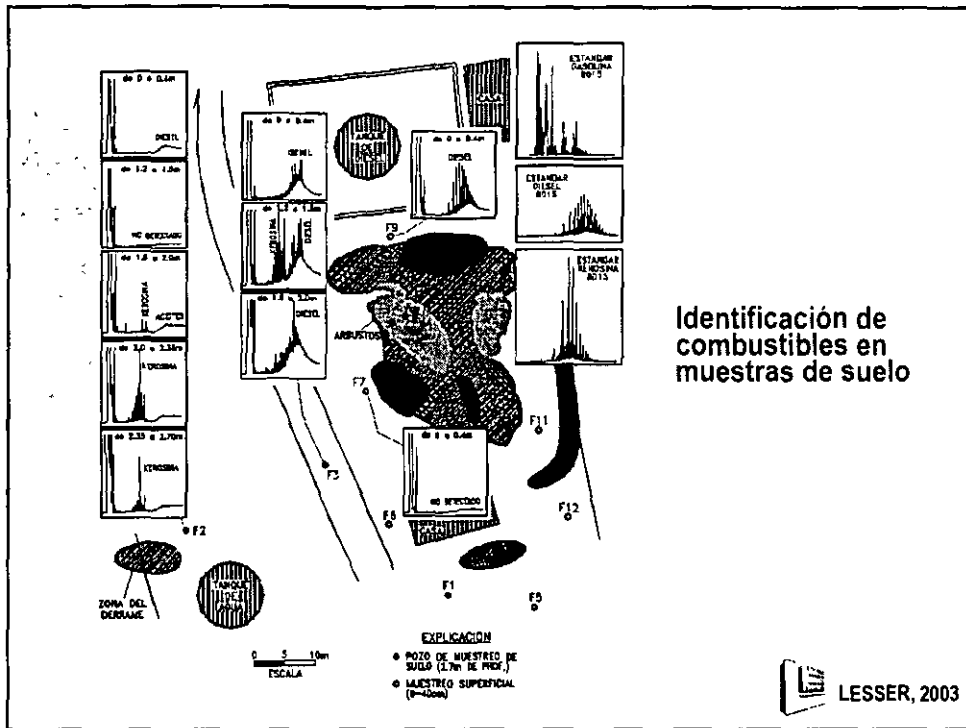
**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**



**DIVISIÓN DE  
EDUCACIÓN  
CONTINUA**

**Programa 2004**



## CONCLUSIONES

Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina.

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.

Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasolinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.

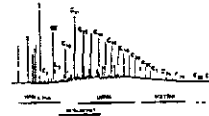




## CONCLUSIONES

Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina.

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.



Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado.

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasolinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.

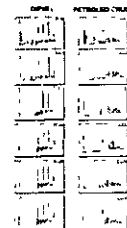


LESSER, 2003

## CONCLUSIONES

Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina.

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.



Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado.

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasolinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.



LESSER, 2003

## CONCLUSIONES

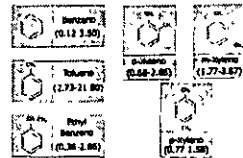
Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina.

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.

Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado.

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasolinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.



## CONCLUSIONES

Entre los principales combustibles contaminantes de acuíferos se encuentran la gasolina, el diesel, la kerosina y la turbosina.

Para la identificación y cuantificación de combustibles se realizan análisis por cromatografía de gases.

Con un perfil cromatográfico es posible determinar si corresponde a un producto fresco o intemperizado.

El BTEX, en especial el benceno, son constituyentes de las gasolinas. Es soluble en agua, tóxico y cancerígeno.

Los poliaromáticos, constituyentes del diesel, kerosina y turbosina, por ser de solubilidad limitada, su riesgo en agua es menor.

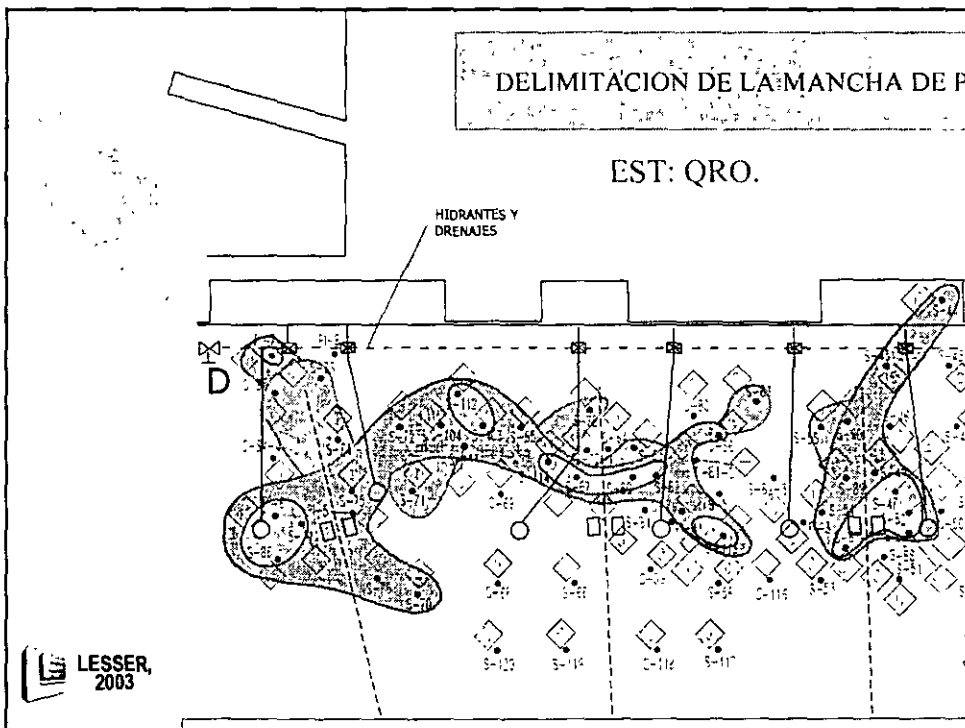


CONTAMINACION POR HIDROCARBUROS;  
IDENTIFICACION DE PRODUCTO LIBRE  
EN EL SUBSUELO

3

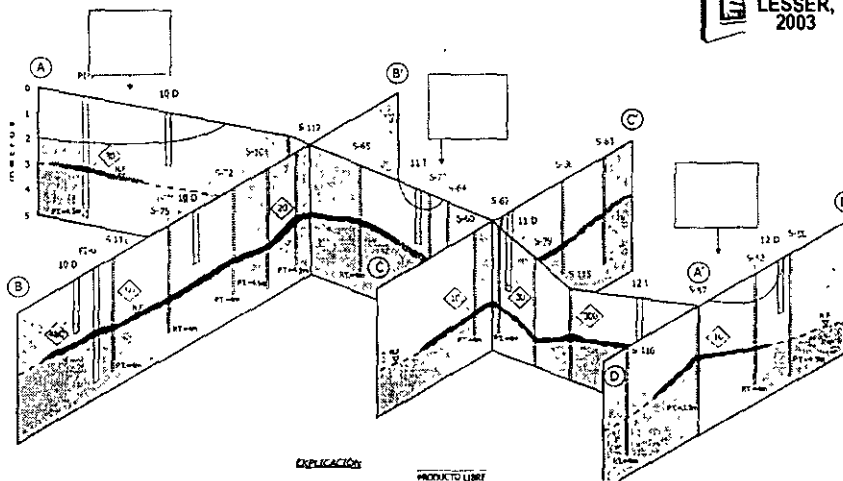


LESSER, 2003



ISOMETRICO MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE  
VOLATILES Y PRODUCTO LIBRE EN EL SUBSUELO

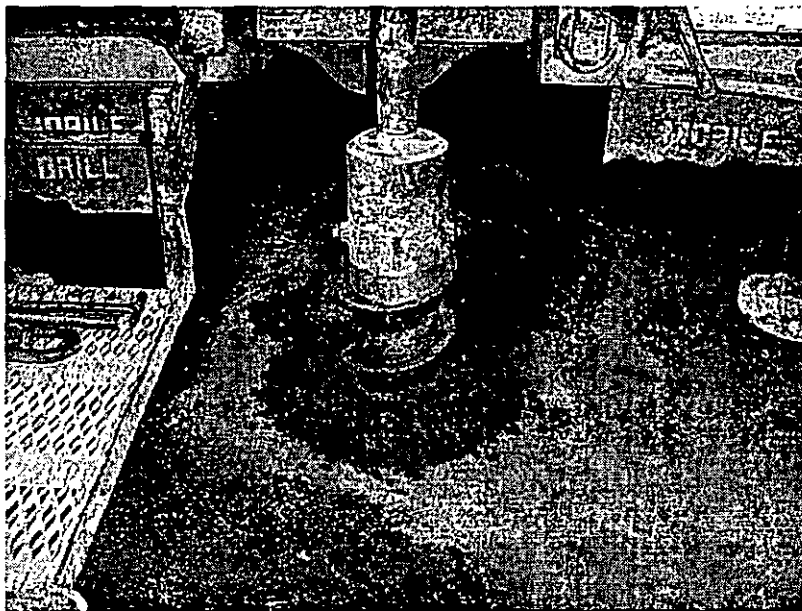
LESSER,  
2003



LESSER, 2003



 LESSER, 2003

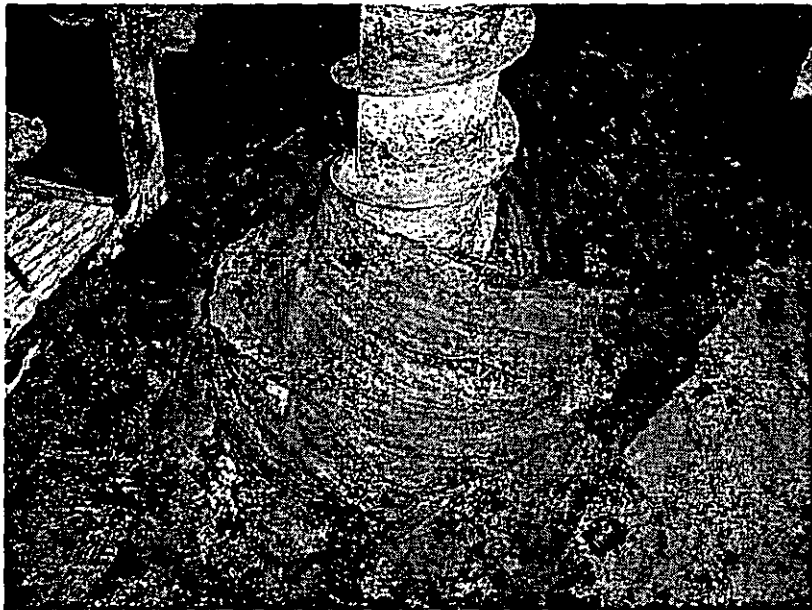


 LESSER, 2003



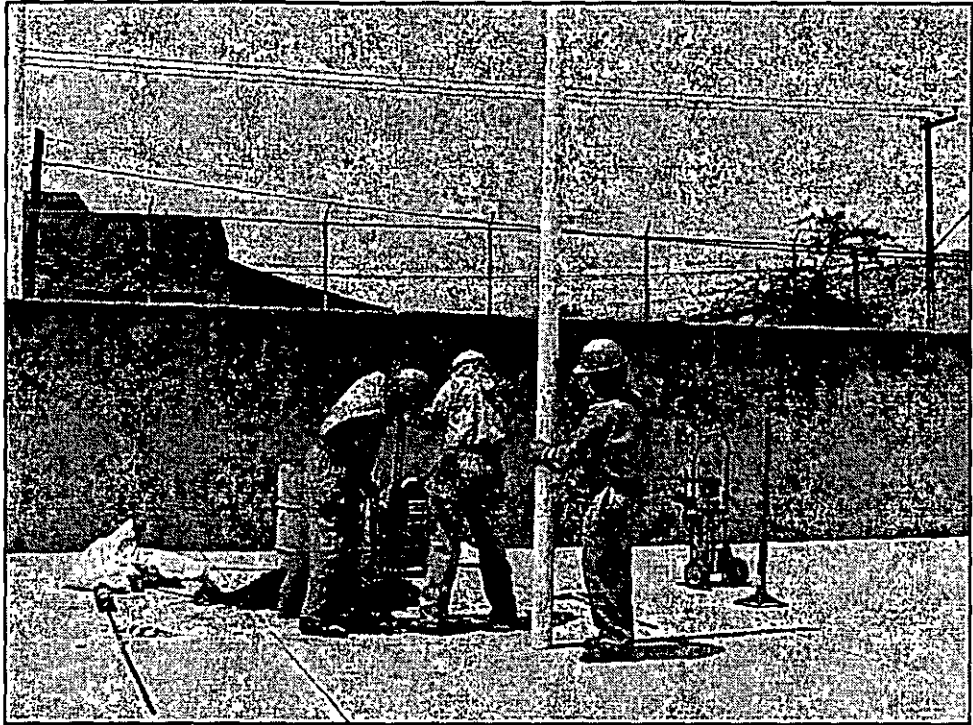


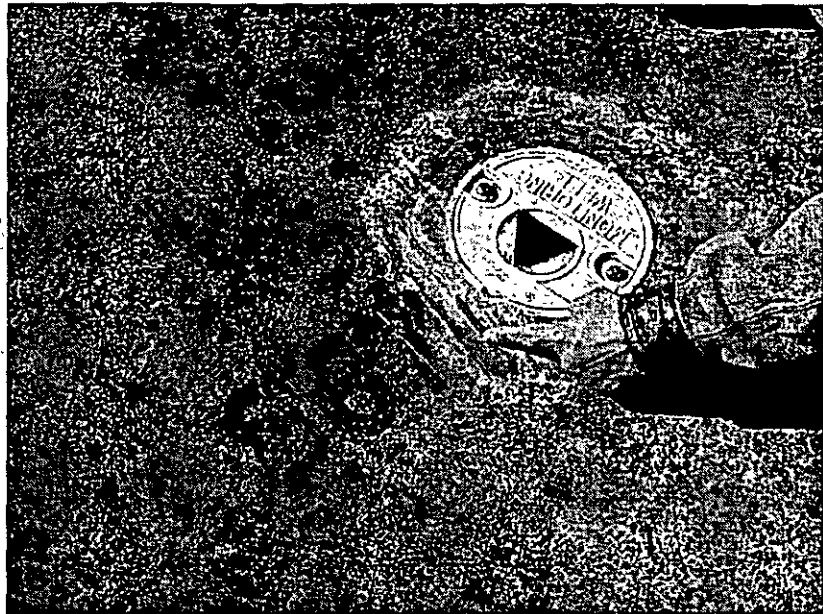
LESSER, 2003



LESSER, 2003



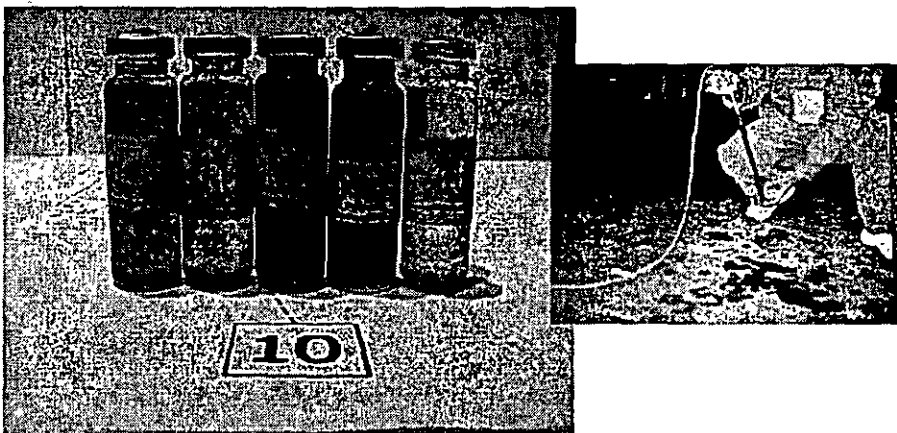




 LESSER, 2003



## CARACTERISTICAS DEL PRODUCTO LIBRE

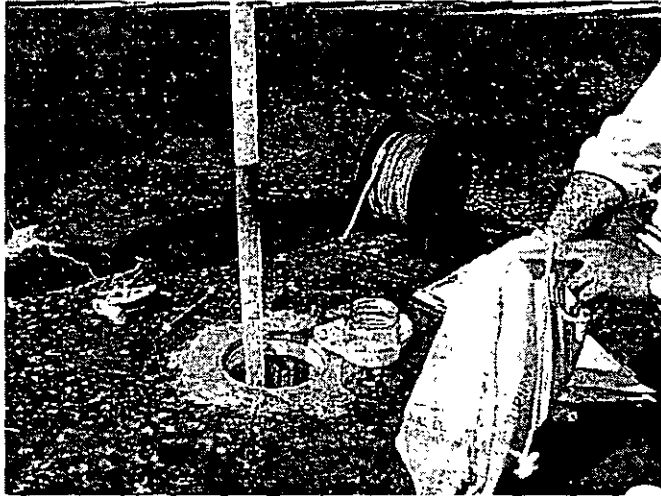


 LESSER, 2003





RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

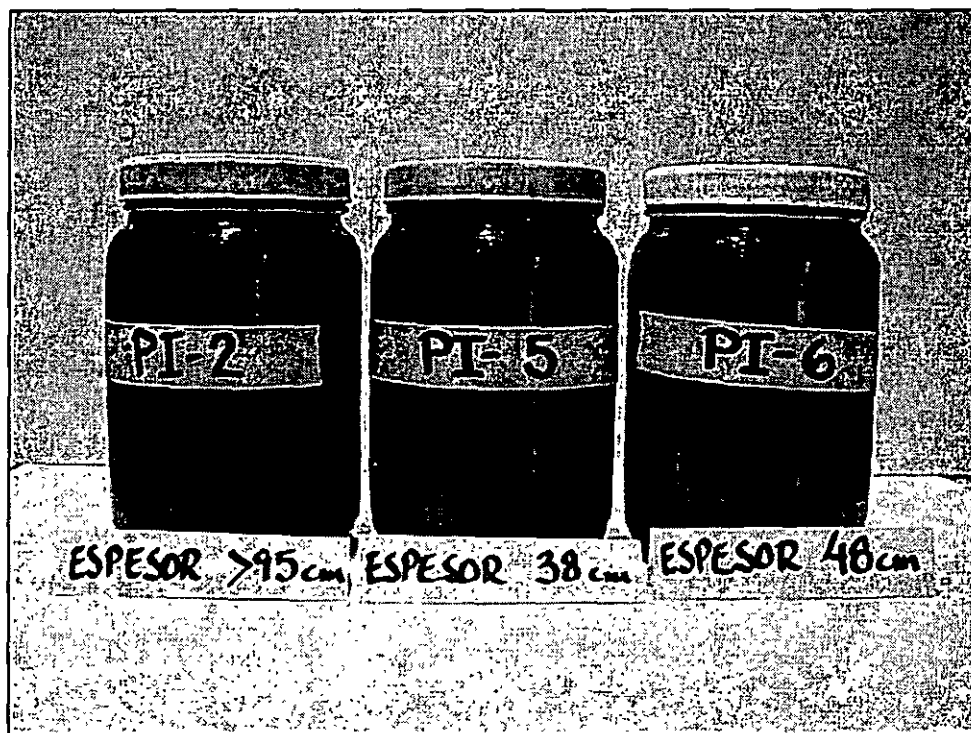
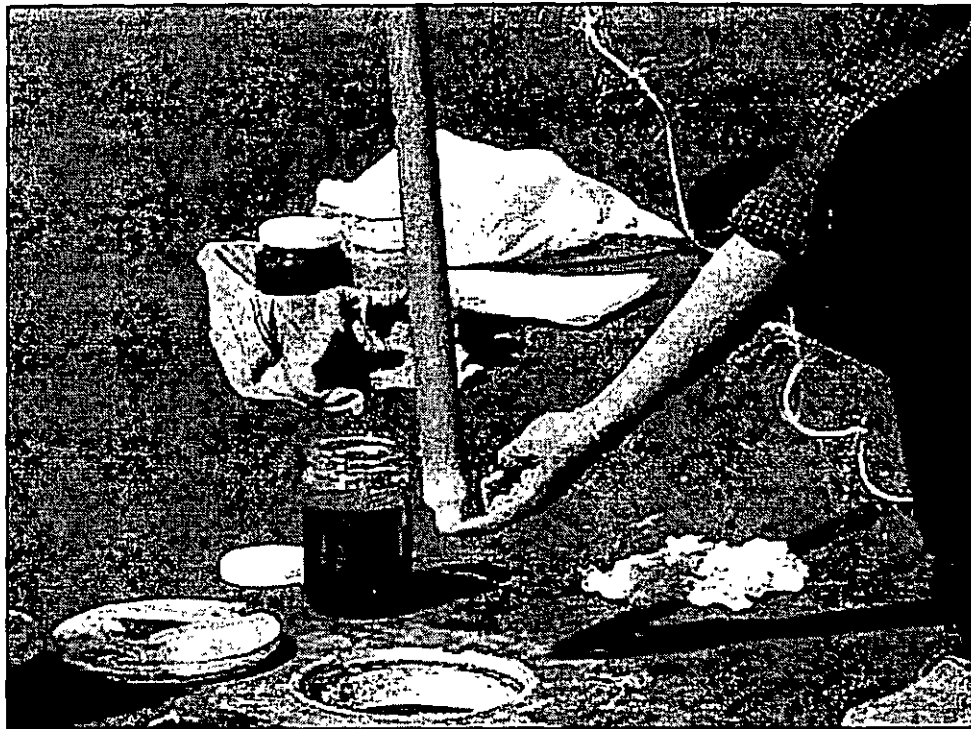


 LESSER, 2003



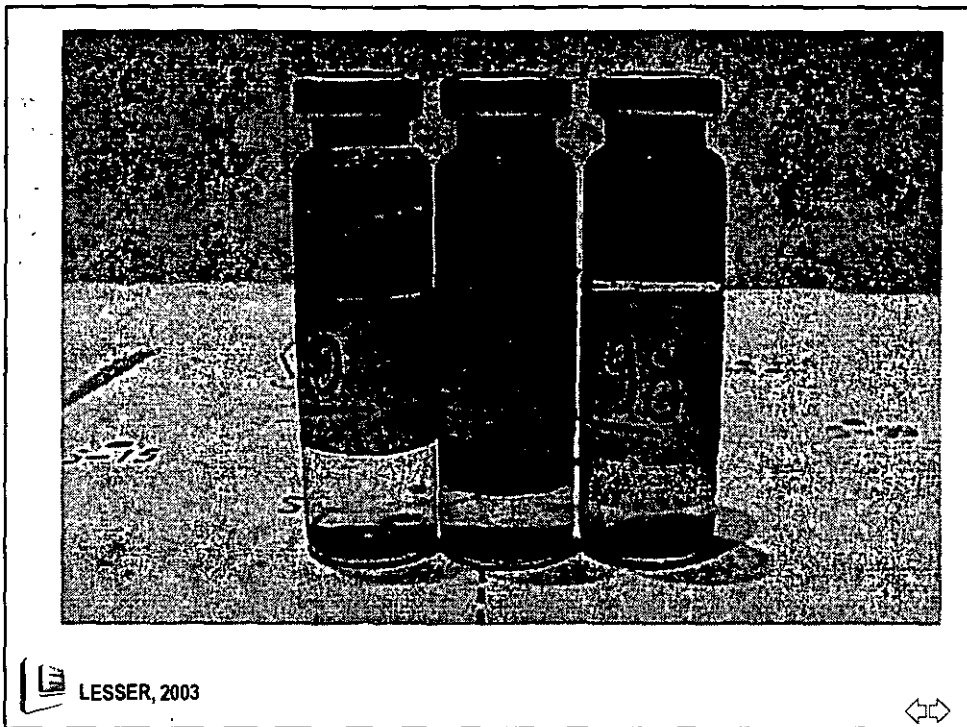
 LESSER, 2003





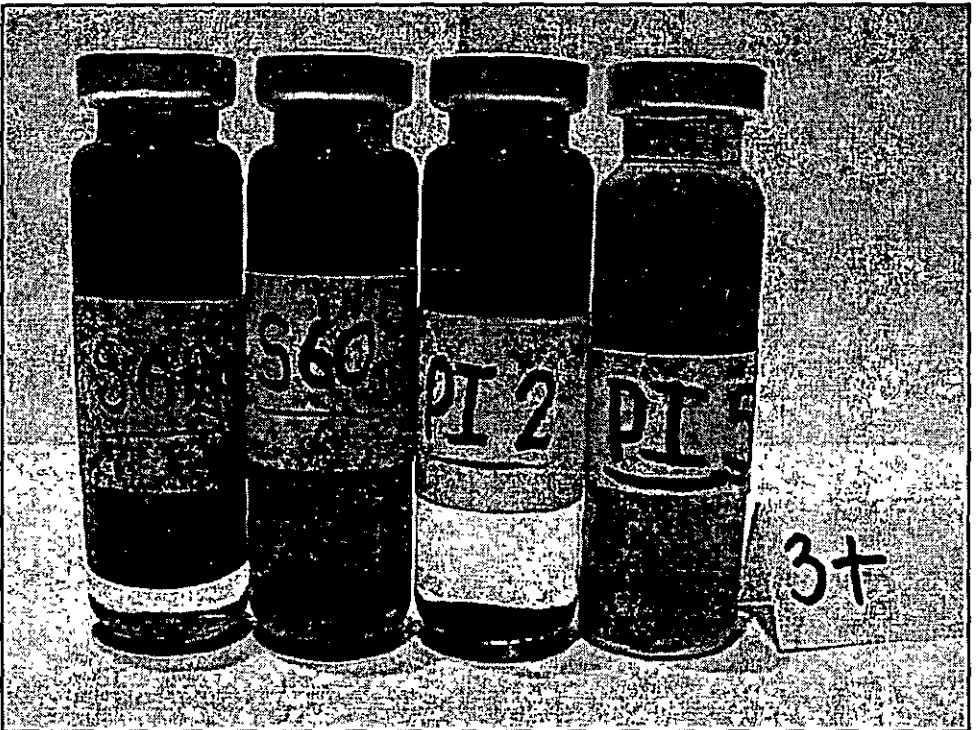






## IDENTIFICACION POR COLOR













Muestras de agua y producto libre



# IDENTIFICACION POR CROMATOGRAFIA



Cromatograma  
de una gasolina

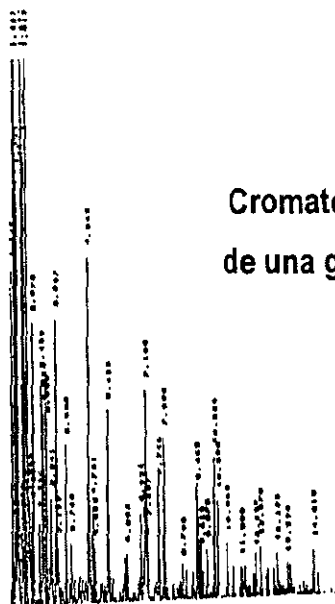
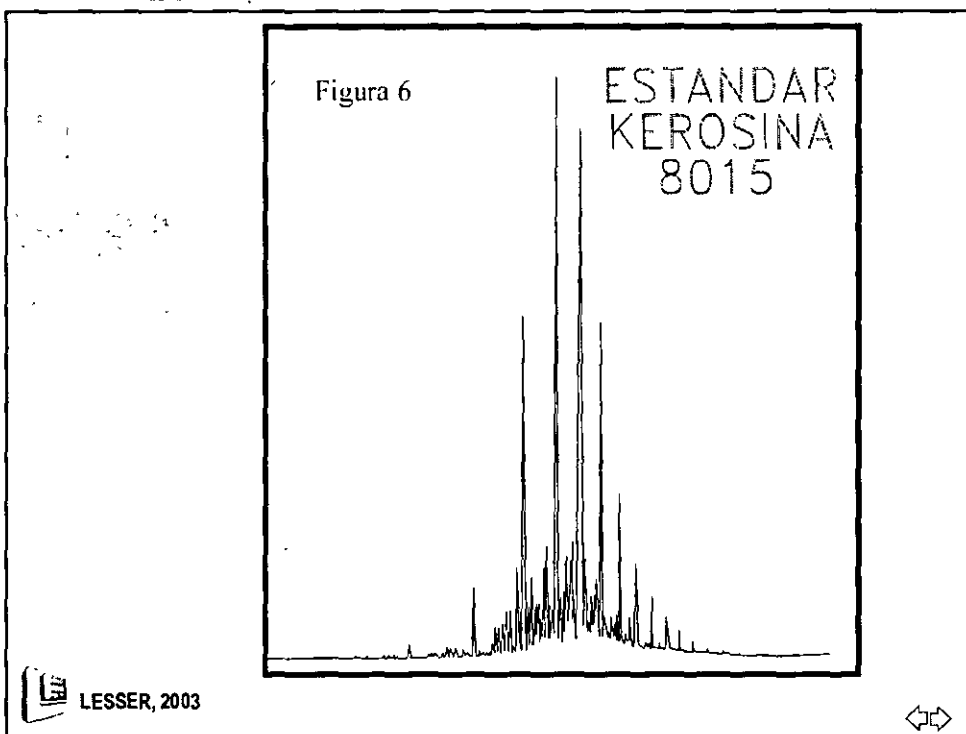
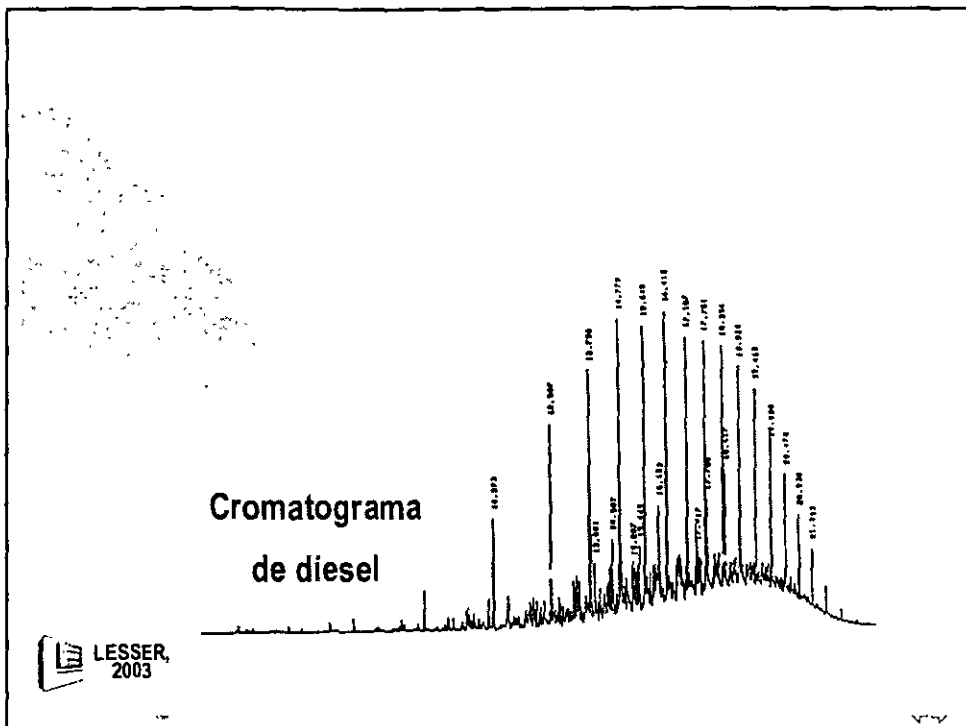
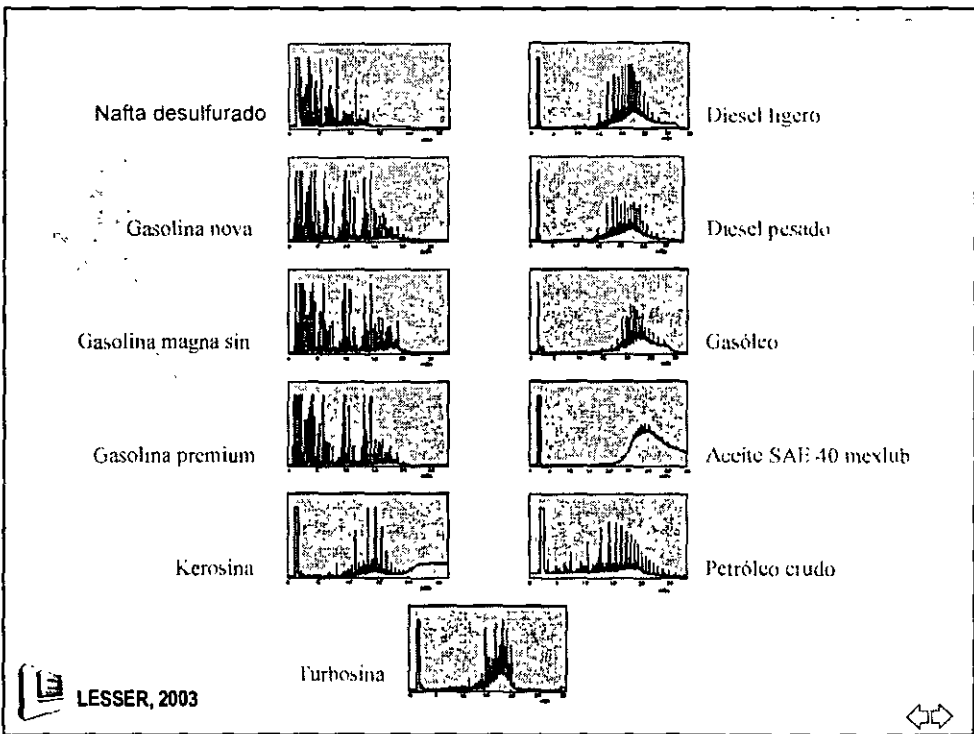
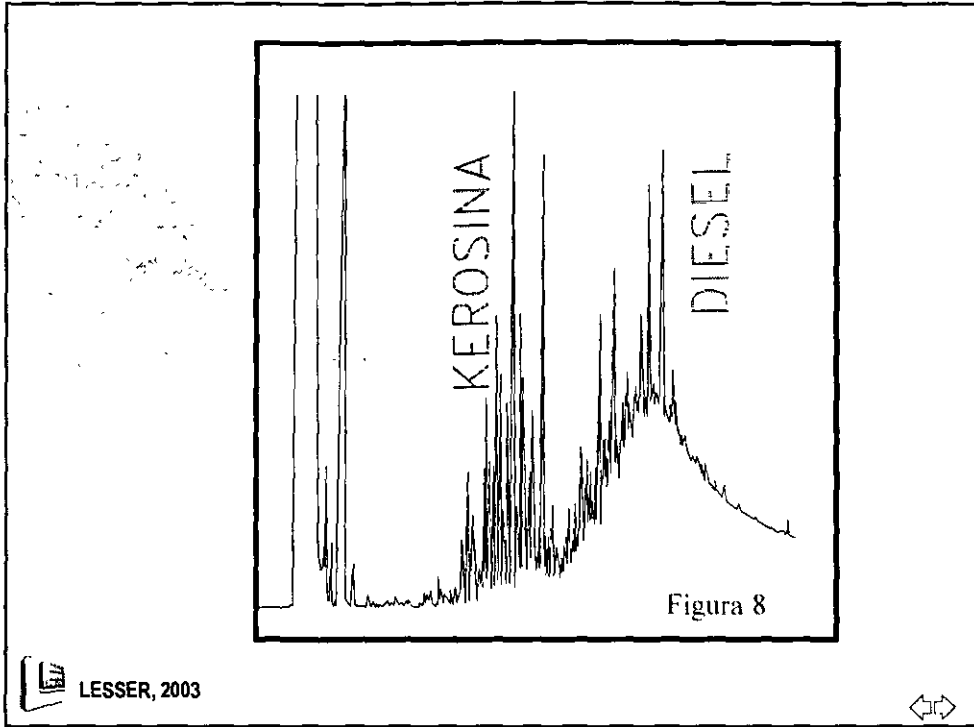


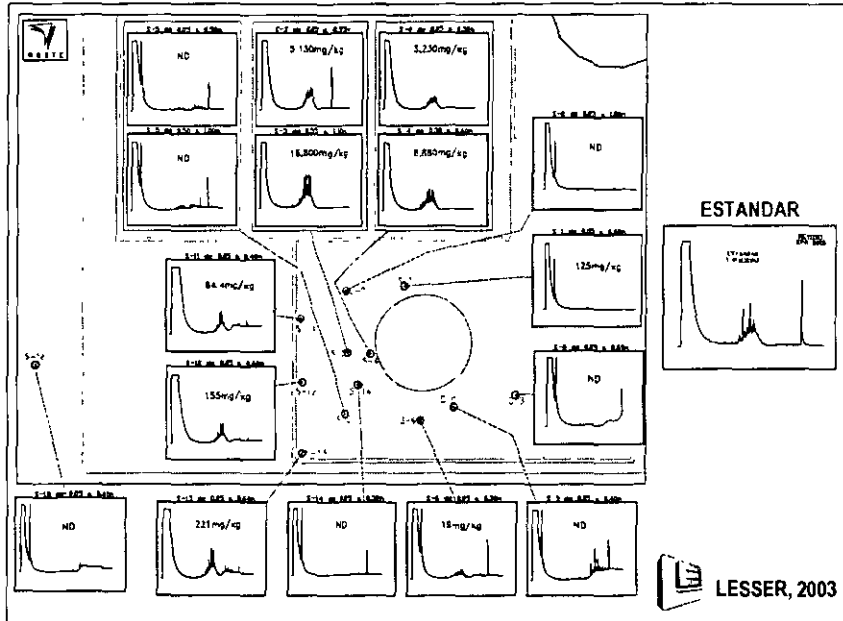
Figura 4

LESSER,  
2003



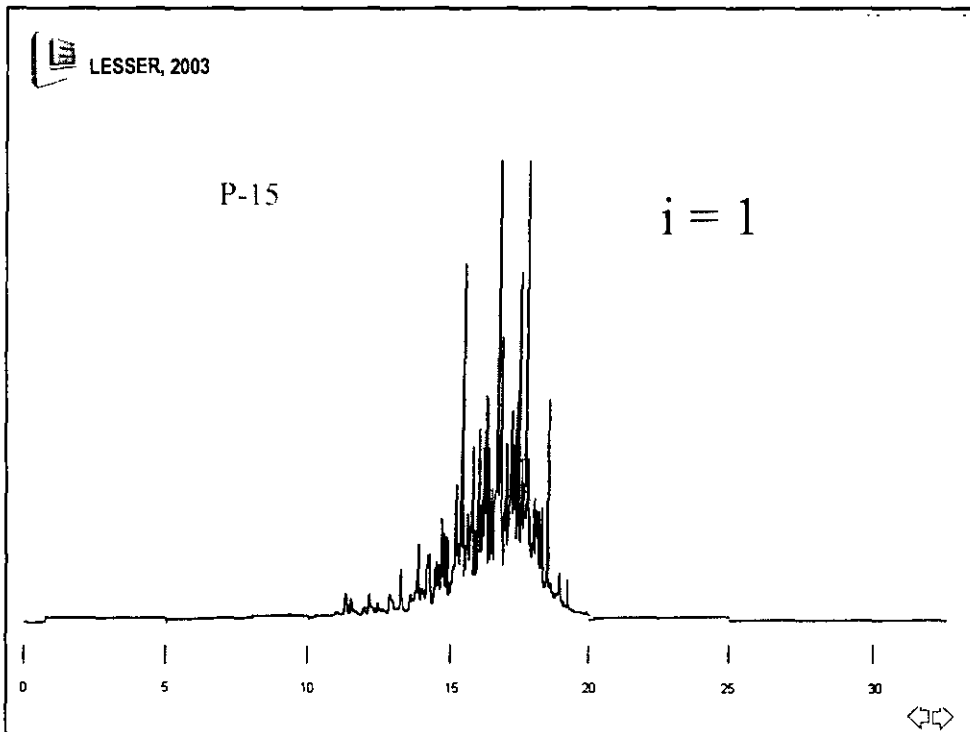
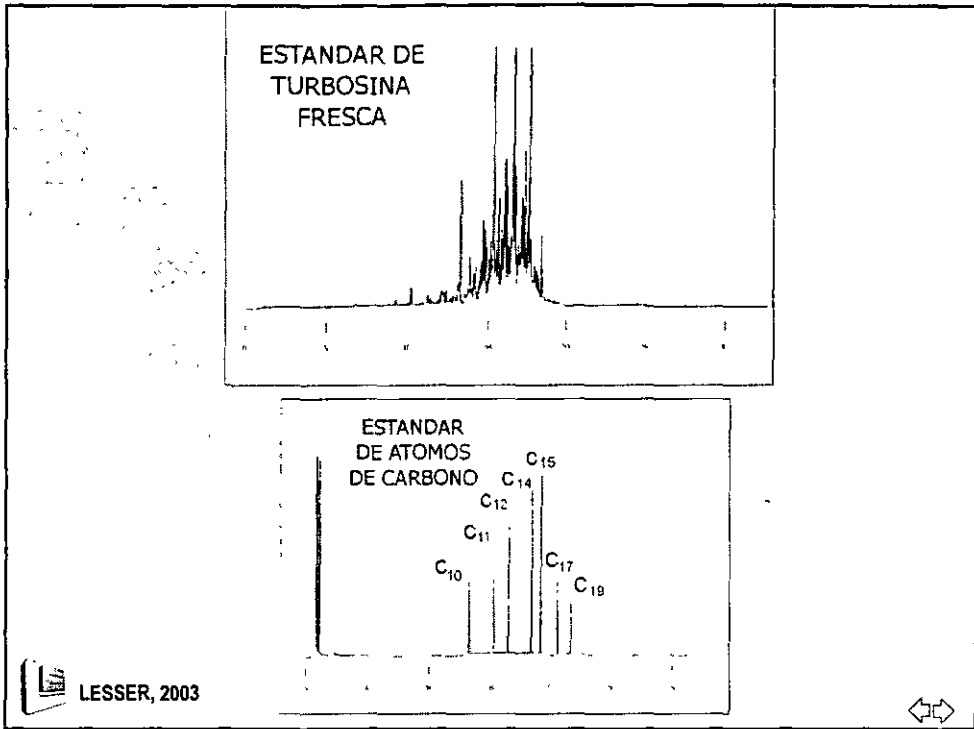


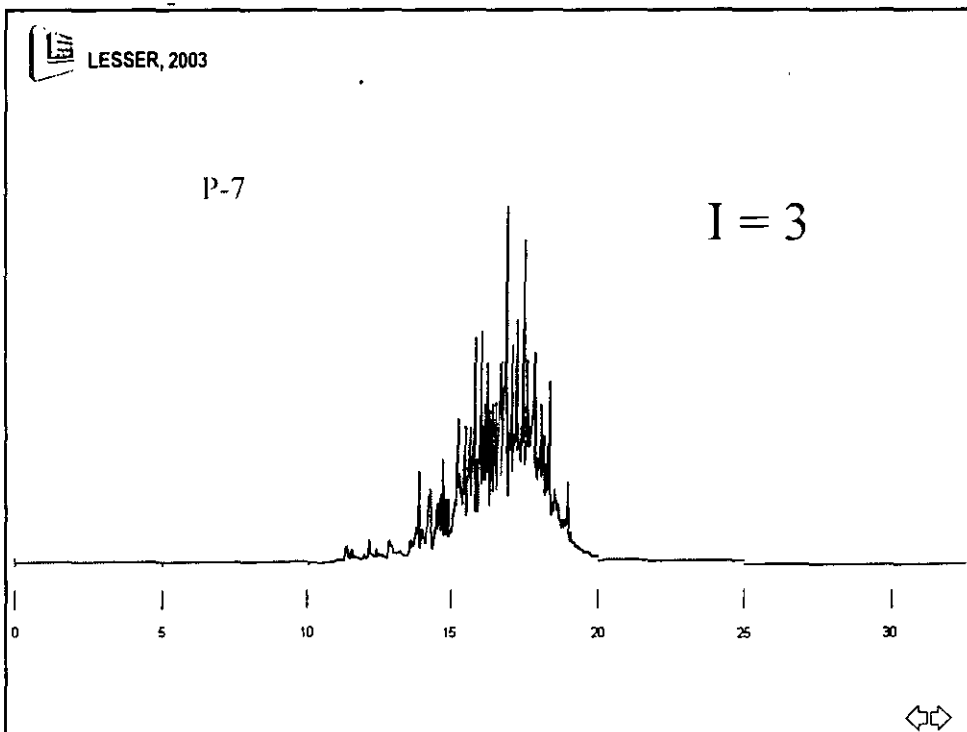
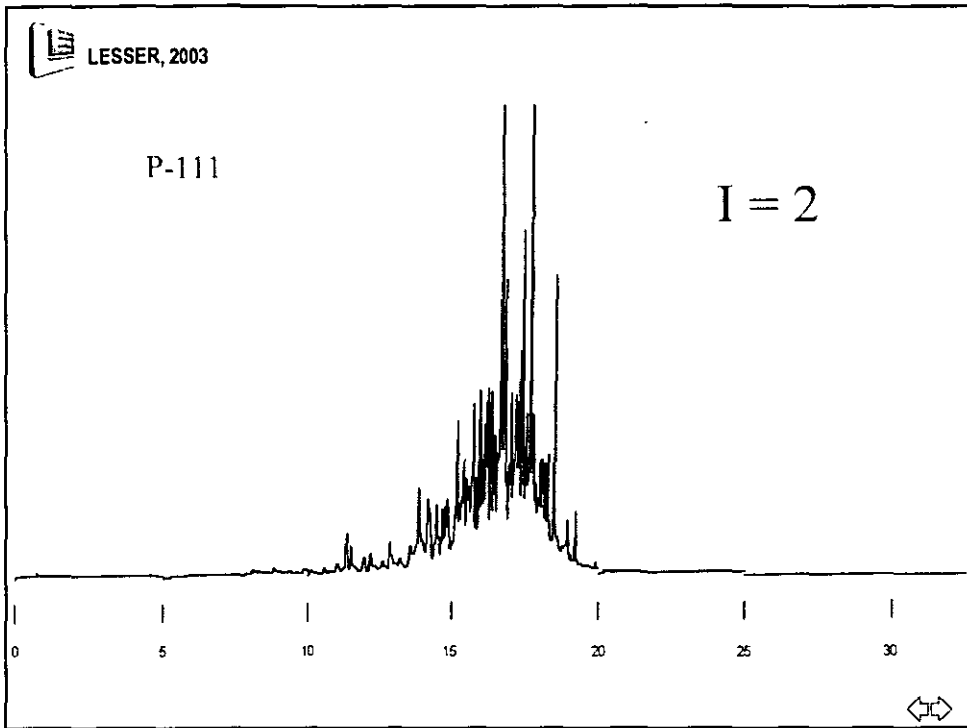
### CROMATOGRAMAS DE TURBOSINA EN SUELO (8015)

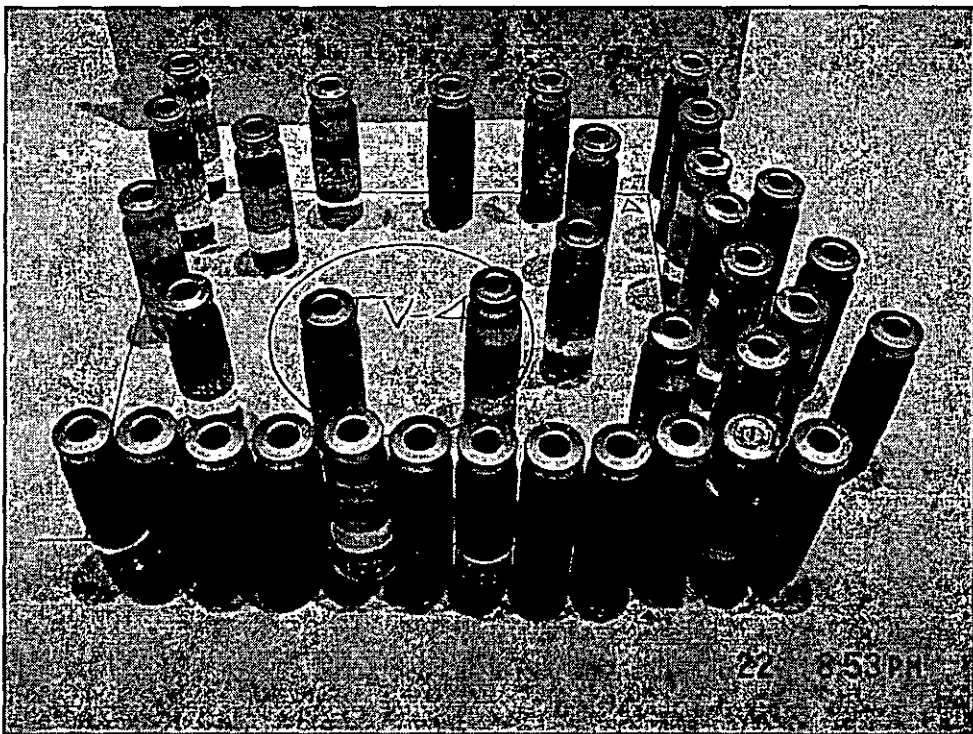
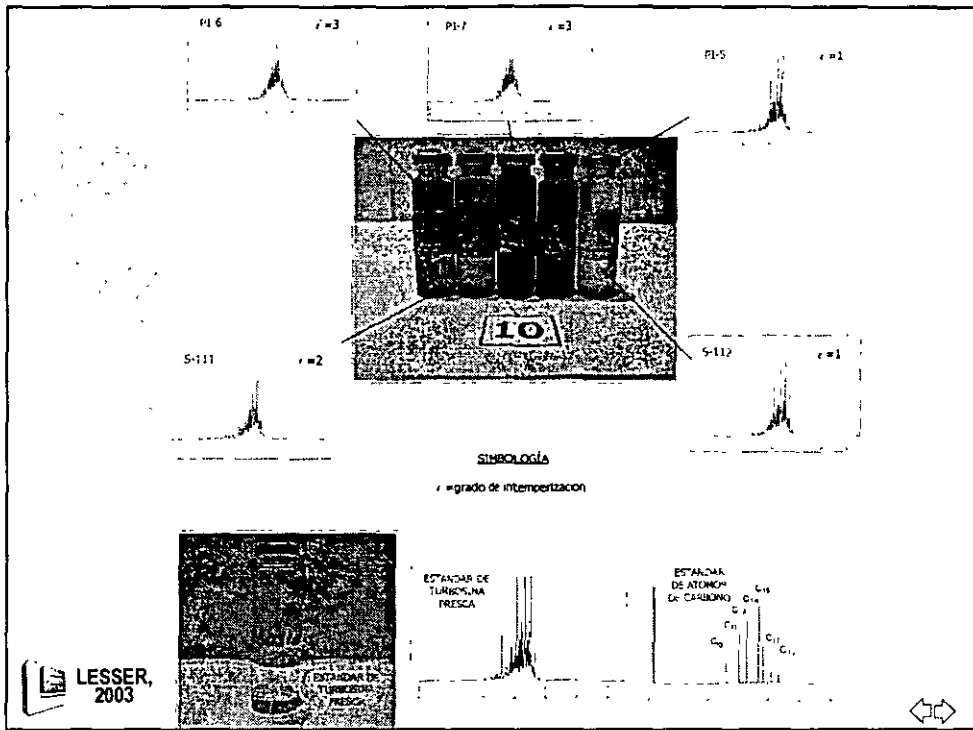


### DETERMINACION DEL GRADO DE INTEMPERISMO DEL PRODUCTO LIBRE











## CONCLUSIONES

El producto libre puede ser clasificado mediante cromatografía.

Se puede deducir su grado de intemperismo.

En este trabajo, la clasificación de producto libre por color y análisis cromatográfico, permitió determinar que:

El color que adquieren las muestras es un indicativo del tiempo que el combustible ha permanecido en el subsuelo, pero no es regla general.

Otro factor que influye en el color, es la facilidad con que la materia orgánica de las arcillas libera compuestos pigmentados.



LESSER, 2003



LESSER, 2003





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
MTBE**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**

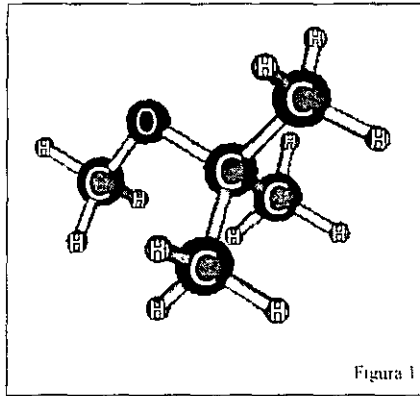


**DIVISIÓN DE  
EDUCACIÓN  
CONTINUA**

**Programa 2004**

# MTBE

## (METILTERBUTILETER)



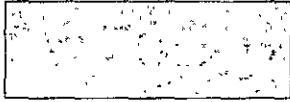
Asociacion Geohidrologica Mexicana  
Torreon, Coah.      Noviembre 2001

Por:  
ING. JUAN MANUEL LESSER I.  
DRA. SUSANA SAVAL BOHORQUEZ  
M. EN C. LUIS ERNESTO LESSER C.

## JUSTIFICACION

- El MTBE forma parte de las gasolinas
- Contamina rapidamente los acuíferos



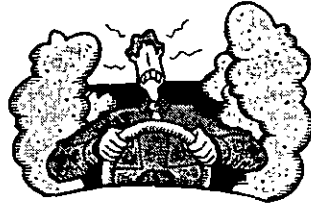


## **MTBE** (Metilterbutileter)

**-ADITIVO UTILIZADO EN LAS NUEVAS  
GASOLINAS PARA EVITAR LA  
CONTAMINACION DEL AIRE**

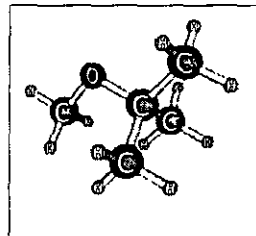
**-DISMINUYE LA GENERACION DE  
CO<sub>2</sub> y OZONO**

**-GASOLINAS MAGNA y PREMIUM**



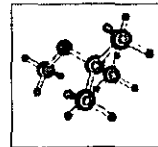
## **INICIO DE SU USO COMERCIAL**

- En E.U. 1979
- En Mexico 1990



## CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

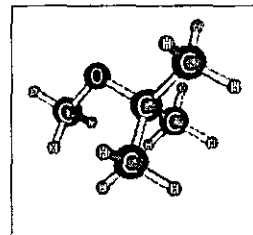
- En 1990 empezo a ser notable y alarmante la presencia de MTBE en el agua subterranea de E.U.
- Actualmente se da marcha atras por problemas de contaminacion



271

## CARACTERISTICAS DEL MTBE

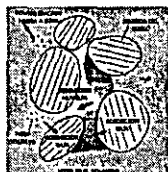
- ORIGEN.- Producto industrial, sintesis de metanol e isobutileno



272

## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-PROPORCION DE MTBE EN LA GASOLINA.- 10%

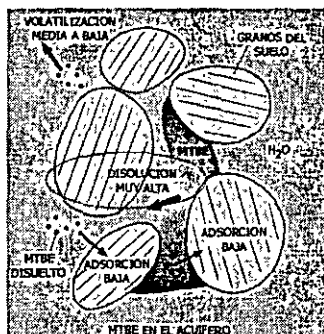


## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-SOLUBILIDAD, en agua entre 48,000 y 51,000mg/l

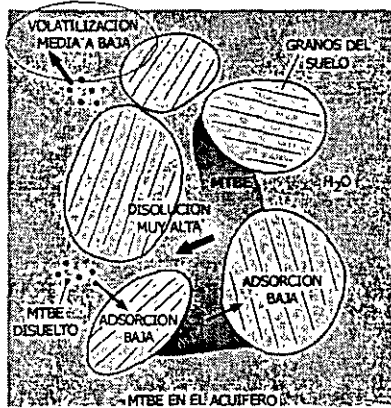
Es 30 veces mas soluble que el benceno

Es 100 veces mas soluble que el tolueno



## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-VOLATILIDAD.- Disuelto en el agua es 10 veces menos volatil que el benceno



## CARACTERISTICAS DEL MTBE

-ADSORCION.- Muy baja capacidad

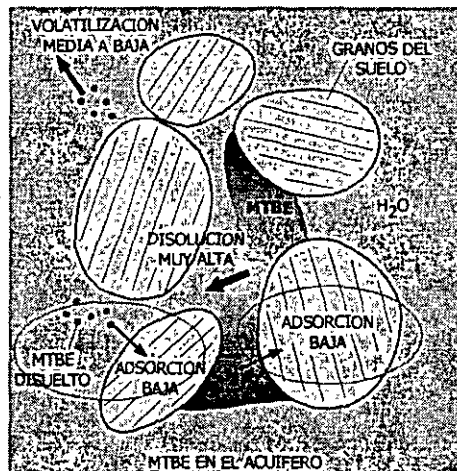
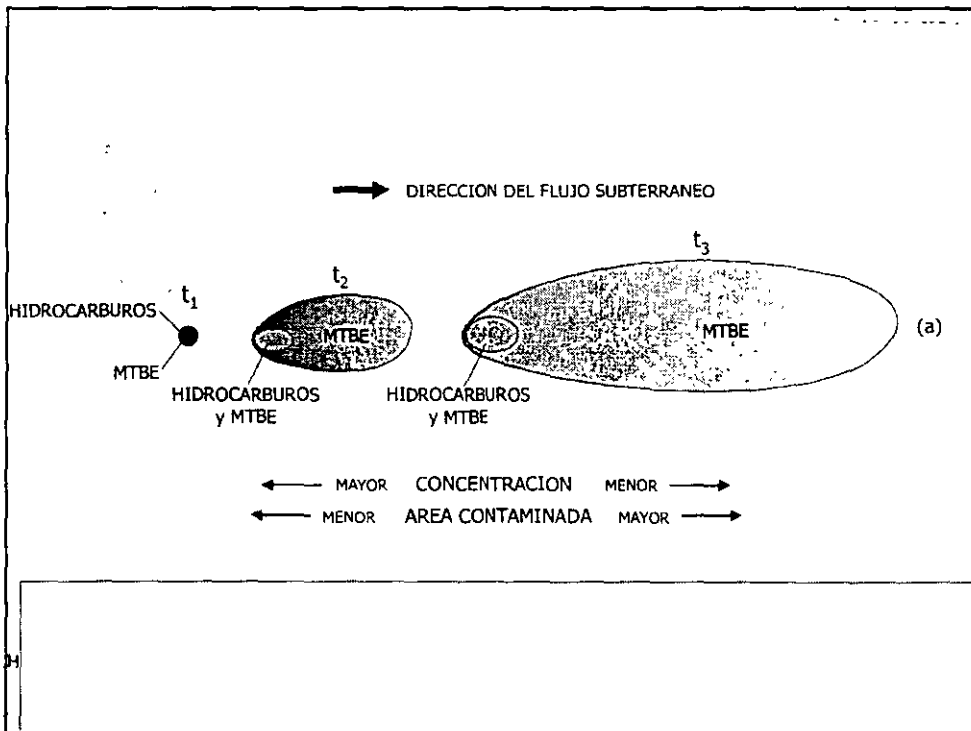
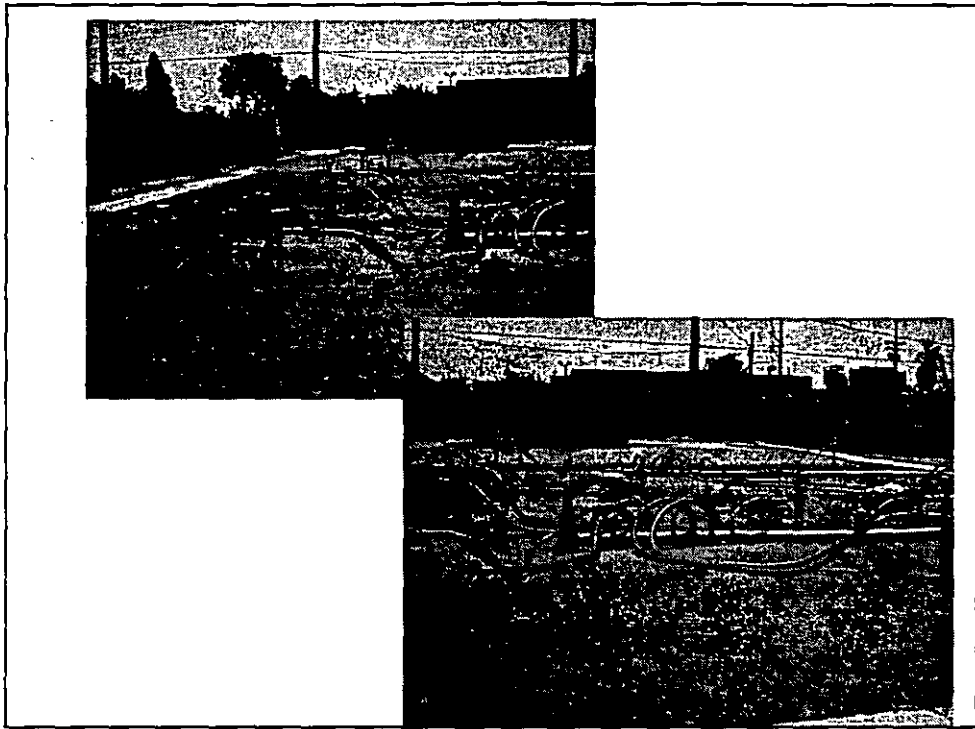
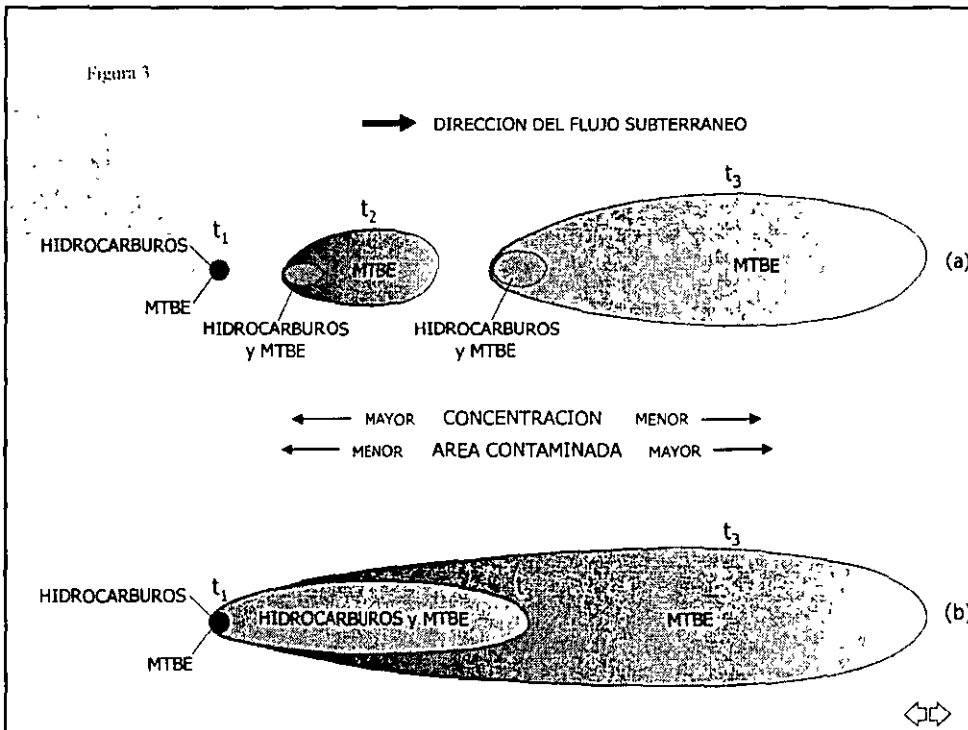
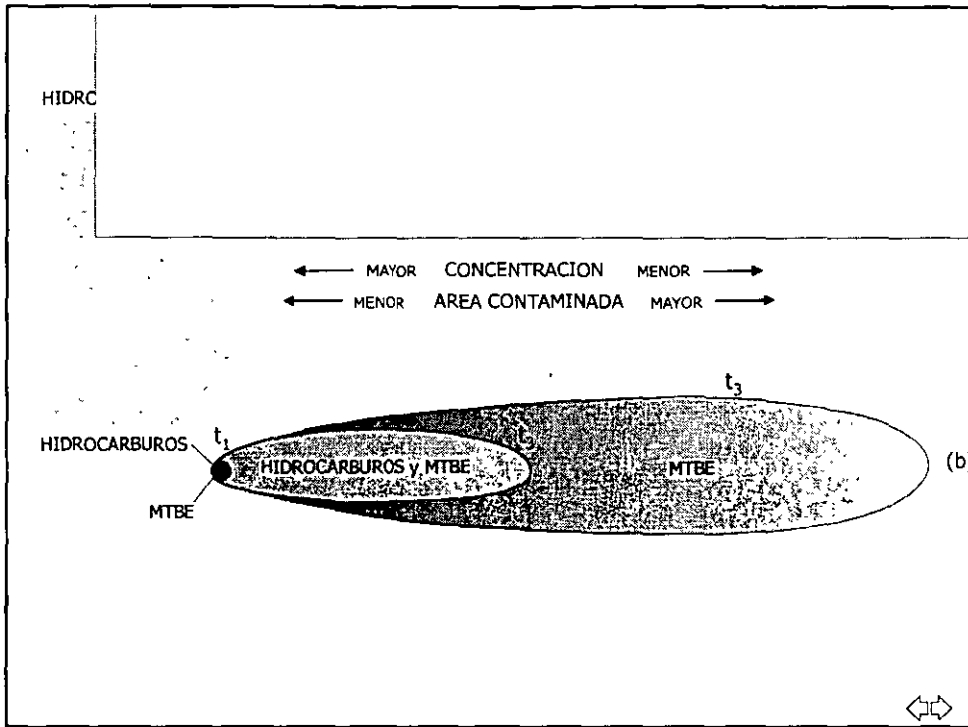


Figura 2

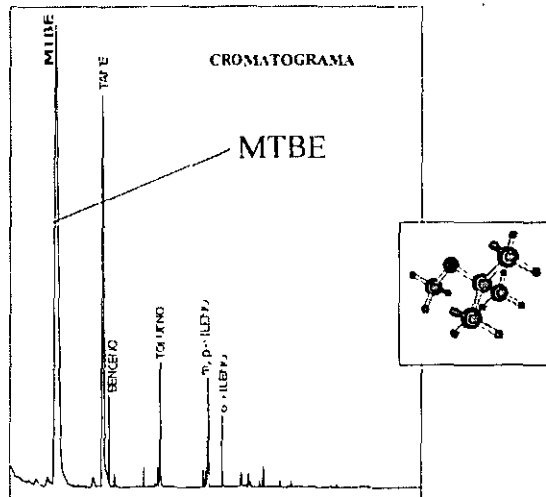






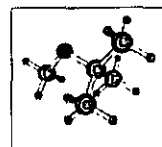
## DETERMINACIONES ANALITICAS

- SE ANALIZA POR EL METODO EPA 8020, EPA 8240 y EPA 8260, de manera simultanea a los BTEX



## LIMITES PERMISIBLES DE MTBE EN AGUA

- En 1997 el WSW de California recomendo entre 0.020 y 0.040 mg/l para reducir el desagradable olor y sabor
- En el 2000 el CAAHEA fijo como limite 0.013 mg/l
- En 40 estados de E. U. varia el limite entre 0.010 y 0.40mg/l





**OCTANE RATING  
92 METHOD**

**CONTAINS  
MTBE**

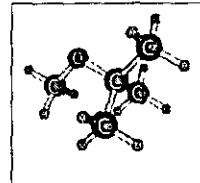
THE STATE OF CALIFORNIA HAS  
DETERMINED THAT THE USE OF THIS  
CHEMICAL PRESENTS A SIGNIFICANT  
RISK TO THE ENVIRONMENT.

**EL ESTADO DE CALIFORNIA HA DETERMINADO  
QUE EL USO DE ESTE QUIMICO  
PRESENTA RIESGO AL AMBIENTE**



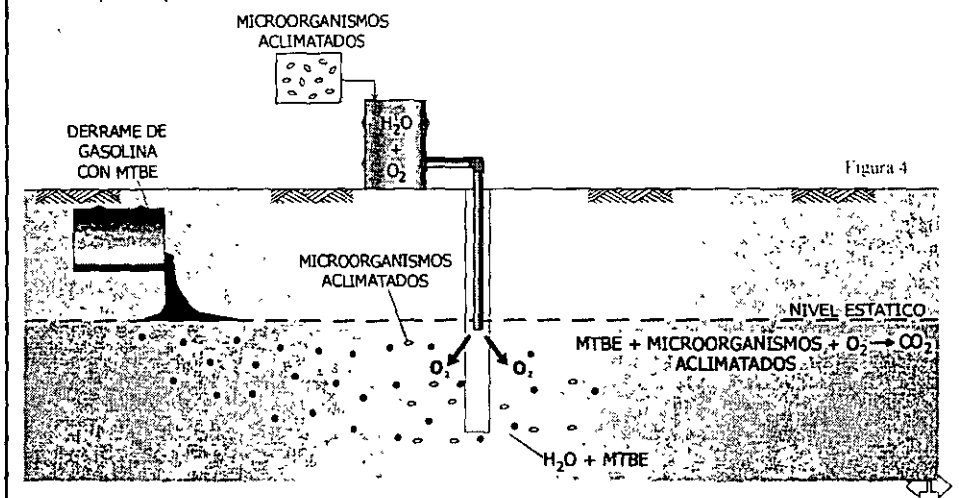
## TOXICIDAD Y RIESGO A LA SALUD DEL MTBE

- PRESENCIA DE OLOR Y SABOR DESAGRADABLES
- NO SE INCLUYE EN LA LISTA DE CANCERIGENOS DE LA USNTP, CP65C o la IARC
- SI SE INCLUYE COMO PROBABLE CANCERIGENO



## TECNICAS DE REMEDIACION

- BIOREMEDIACION.- 10 VECES MENOS EFICIENTE QUE PARA EL BENCENO



## TECNICAS DE REMEDIACION

- ADSORCION.- EFICIENCIA MEDIA A BAJA
- BARRERAS PERMEABLES DE TRATAMIENTO PASIVO
- PRODUCTOS ADSORBENTES U OXIDANTES.- EFICIENCIA MEDIA

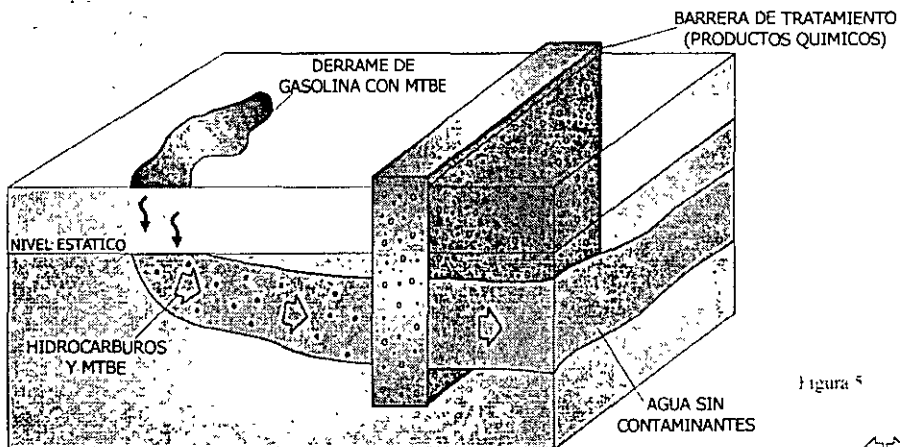


Figura 5



## TECNICAS DE REMEDIACION

- BOMBEO Y TRATAMIENTO EN SUPERFICIE.- EFICIENTE
- AEREACION.- POCO EFICIENTE

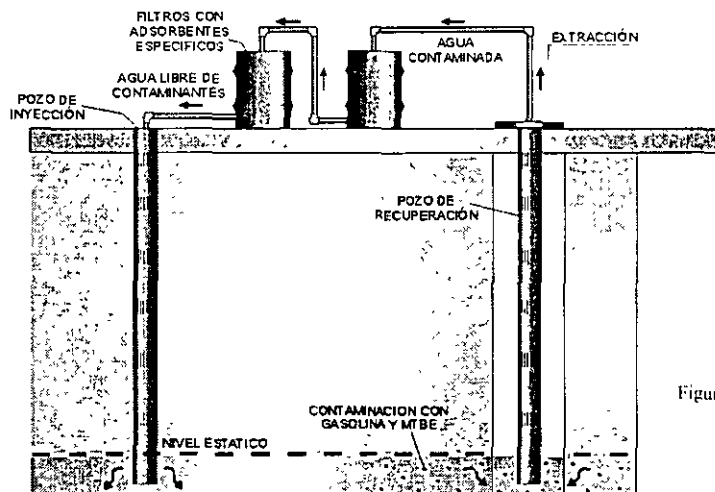
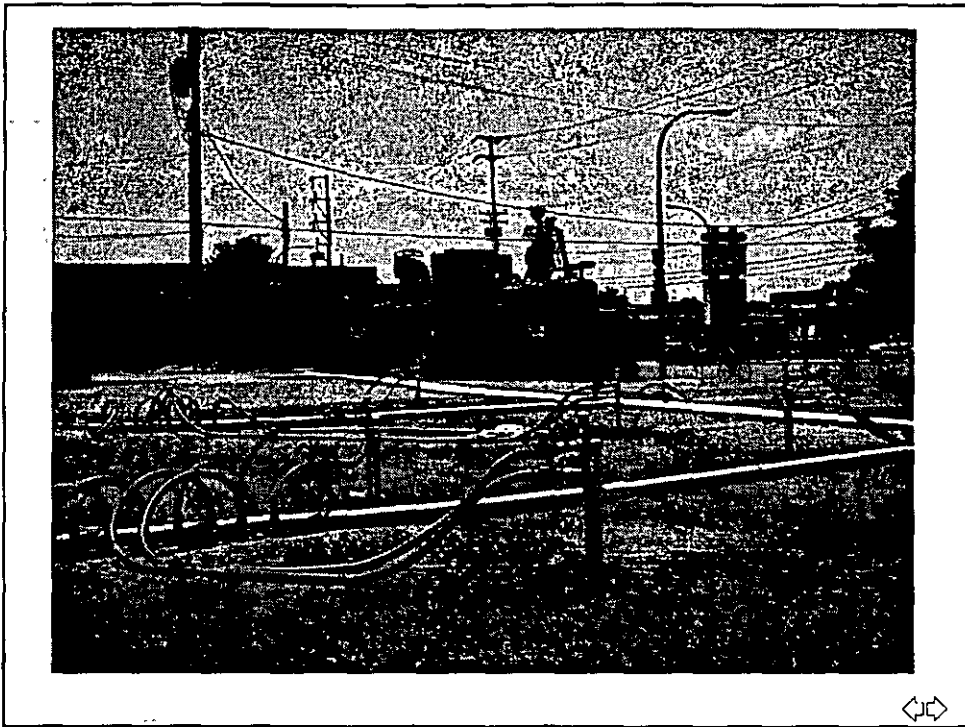


Figura 6



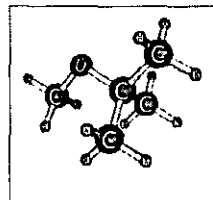


## SITUACION ACTUAL Y PERSPECTIVAS

EN MARZO 2001 USEPA RECOMENDO EVITAR EL USO  
DEL MTBE ( *COHS* )

SE ESTA PLANTEANDO SUSTITUIR EL MTBE POR OTROS  
OXIGENANTES (ETANOL, METANOL)

EN MEXICO, ?





FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.

CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.

TEMA:  
CONTAMINANTES ORGÁNICOS

COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.

DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA



DIVISION DE  
EDUCACIÓN  
CONTINUA

Programa 2004

# **CONTAMINANTES ORGÁNICOS:**

## **Características y comportamiento en el ambiente**

Dra. Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM

### **IDENTIFICACIÓN DEL ESCENARIO AFECTADO**

#### **SUELO SUPERFICIAL**

- TERRENO NATURAL
- LOSA DE CONCRETO O ASFALTO

#### **SUBSUELO**

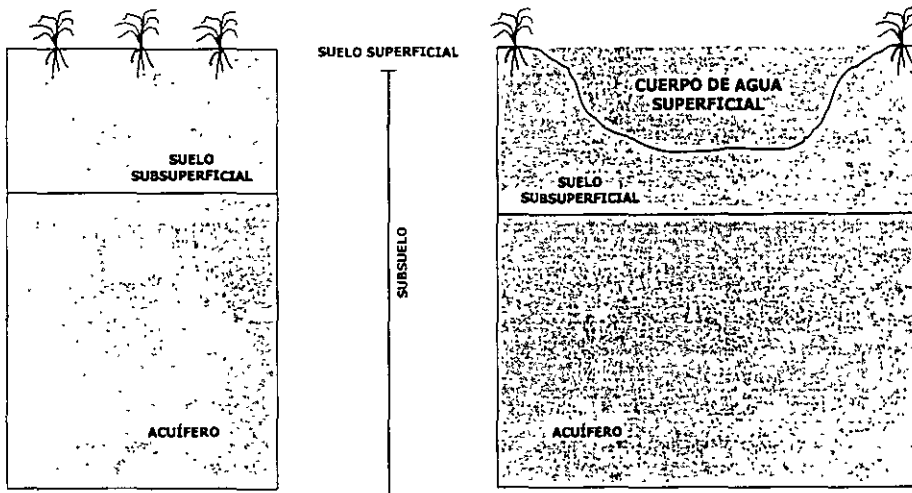
- ZONA VADOSA (no-saturada; suelo subsuperficial)
- ACUITARDO (acuífero no explotable)
- ACUÍFERO (agua de abastecimiento)

#### **CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL**

- PRESAS, LAGOS, RÍOS
- MANGLARES, PANTANOS
- ZONAS COSTERAS, MAR ABIERTO



## DIFERENTES ESCENARIOS DEL AMBIENTE



## HIDROCARBUROS CONTAMINANTES DE SUELOS Y ACUÍFEROS

### **petróleo crudo**


**combustibles destilados:** gasolina, gasnafta, gasolvente, turbosina, kerosina, diesel, gasóleo, combustóleo, aceites

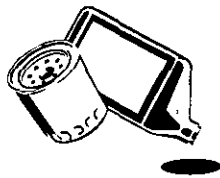
**desechos petroleros:** lodos aceitosos, lodos y recortes de perforación, lastres

**disolventes:** tolueno, xilenos, arominas

**Características físicas de los contaminantes líquidos que determinan el escenario afectado:**

**Densidad: determina su posición con respecto al agua**

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$




**Viscosidad: determina su migración en el subsuelo**

**CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS INSOLUBLES EN AGUA CON BASE EN SU DENSIDAD (NAPLs: Non-Aqueous Phase Liquids)**

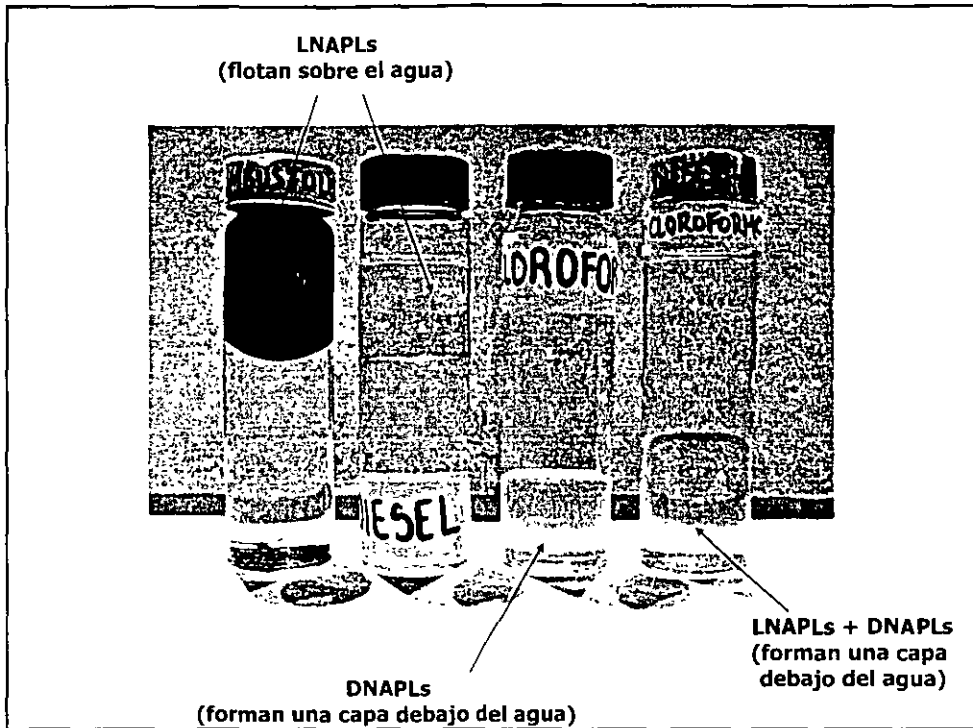
**LNAPLs: Más ligeros que el agua flotan sobre el agua**

petróleo crudo, combustóleo, aceites, diesel, gasolina, benceno, tolueno, xilenos

\*\*\*\*\*

**DNAPLs: Más densos que el agua forman una capa debajo del agua**

tetracloruro de carbono, cloroformo, cloruro de metileno, bifenilos policlorados, percloroetileno (PCE), tricloroetileno (TCE)



**PRODUCTOS VISCOSOS**  
**(FRACCIÓN PESADA):**

**CRUDO, COMBUSTÓLEO, ACEITES, DESECHOS PETROLEROS**

**PERMANECEN EN EL SUELO SUPERFICIAL**

\*\*\*\*\*

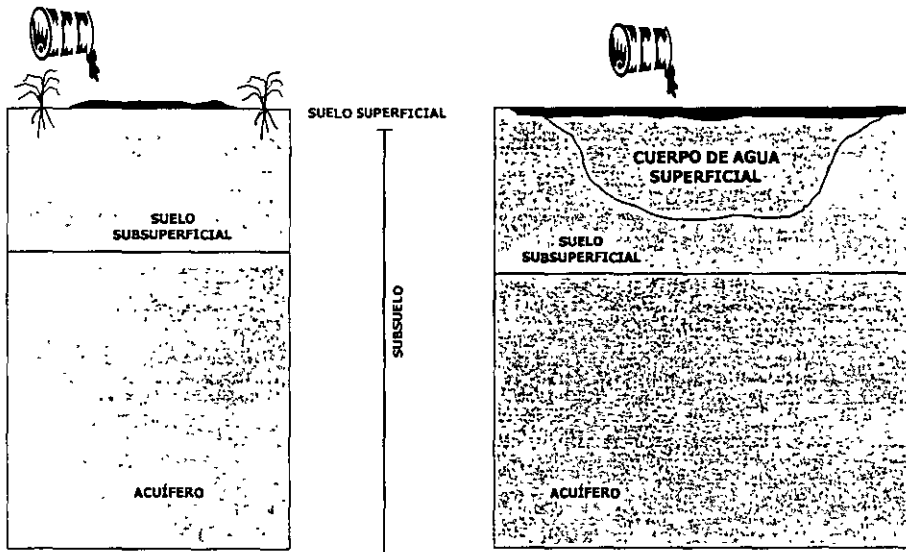
**PRODUCTOS FLÚIDOS**  
**(FRACCIONES LIGERA E INTERMEDIA)**

**COMBUSTIBLES: GASOLINA, GASAVIÓN, TURBOSINA,  
DIESEL, GASÓLEO**

**DISOLVENTES: XILENOS, AROMINAS**

**MIGRAN CON FACILIDAD HACIA EL ACUÍFERO**

**ESCENARIOS AFECTADOS POR DERRAME DE CRUDO, COMBUSTÓLEO,  
ACEITES, DESECHOS PETROLEROS**



**EJEMPLOS DE CONTAMINACIÓN DE SUELO SUPERFICIAL  
POR DERRAME DE PRODUCTOS PESADOS**



**COMBUSTÓLEO**

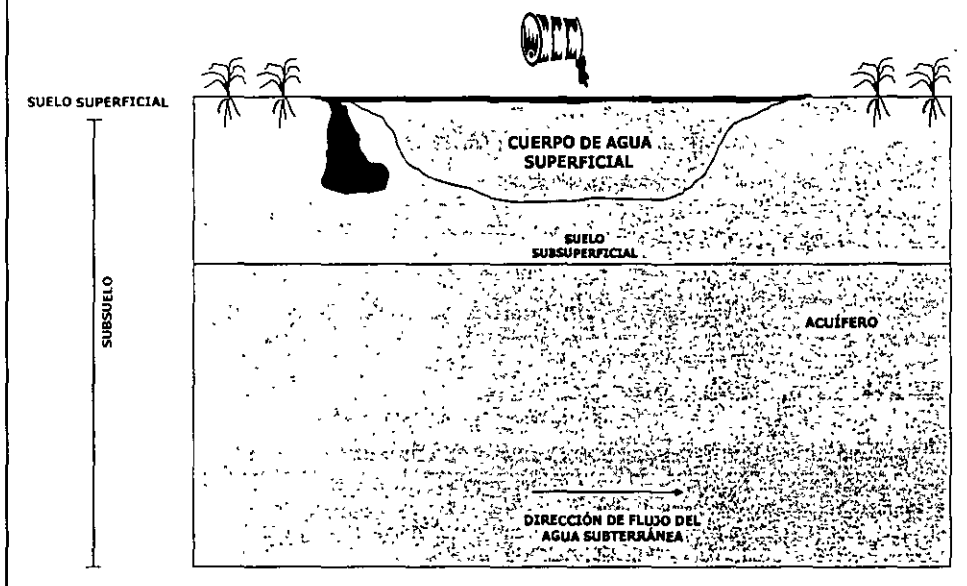
**DESECHOS PETROLEROS**



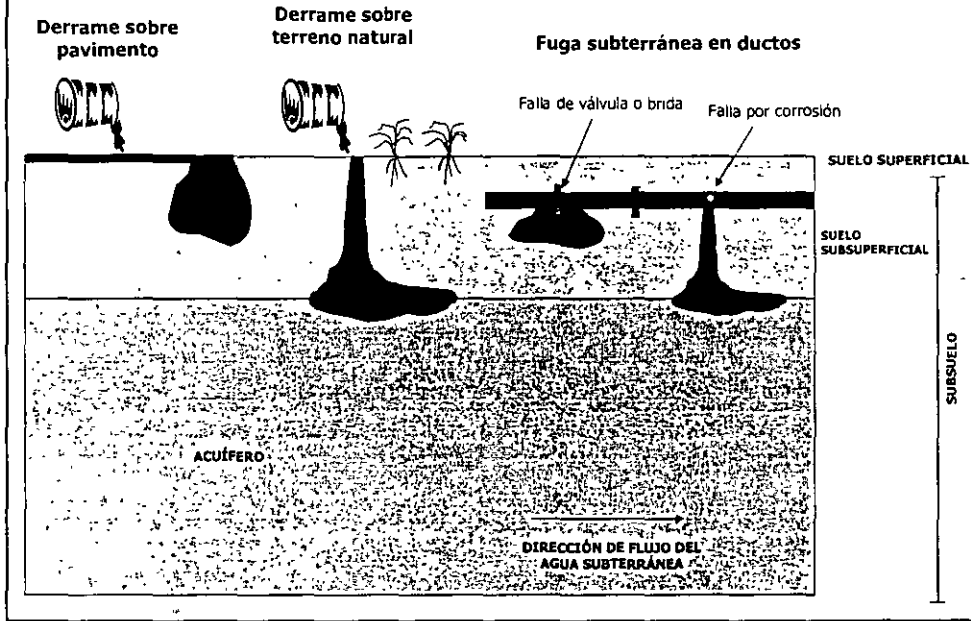
## PRINCIPALES EFECTOS DE LOS HIDROCARBUROS COMO CONTAMINANTES DEL SUELO SUPERFICIAL

- pérdida de varias características físicas y químicas
  - adsorción a las partículas del suelo
- pérdida de la fertilidad (suelos de uso agrícola)
  - falta de oxigenación
- muerte de la microflora y microfauna nativas
  - pérdida de su vocación natural

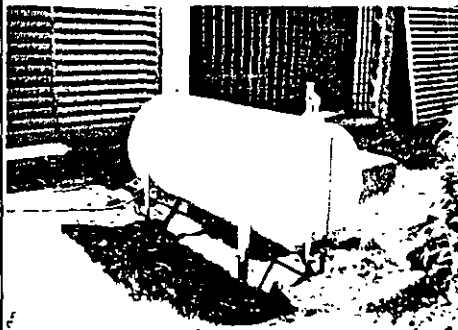
## ESCENARIOS AFECTADOS POR DERRAME DE COMBUSTIBLES DESTILADOS EN CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES



### ESCENARIOS AFECTADOS POR DERRAME DE COMBUSTIBLES DESTILADOS EN SUELO



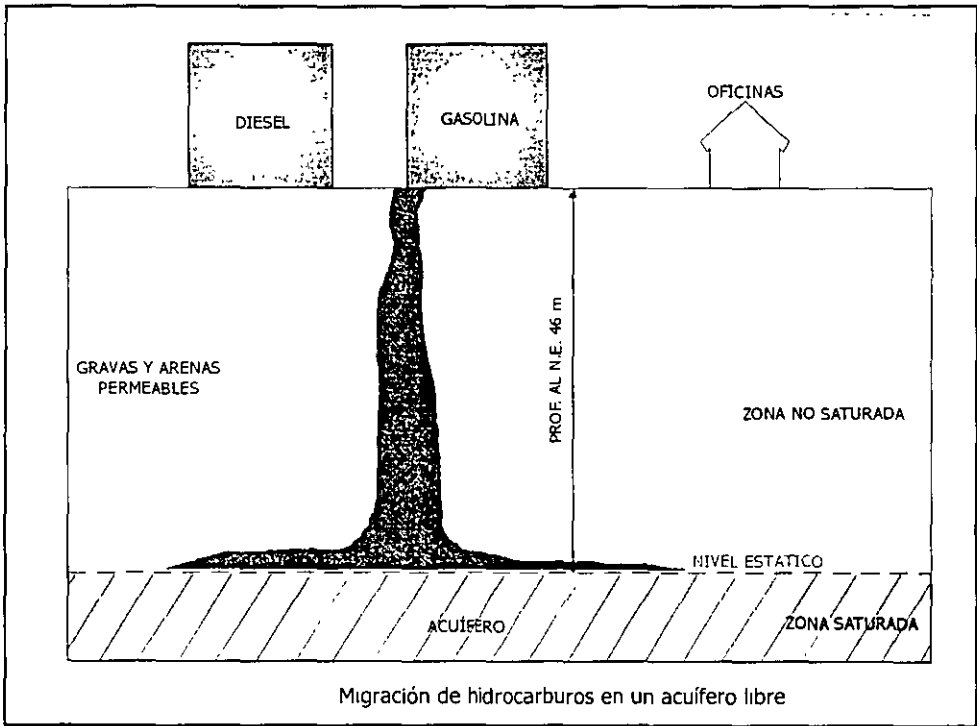
### EJEMPLOS DE CONTAMINACIÓN DE SUELO Y SUBSUELO POR DERRAME DE PRODUCTOS FLÚIDOS

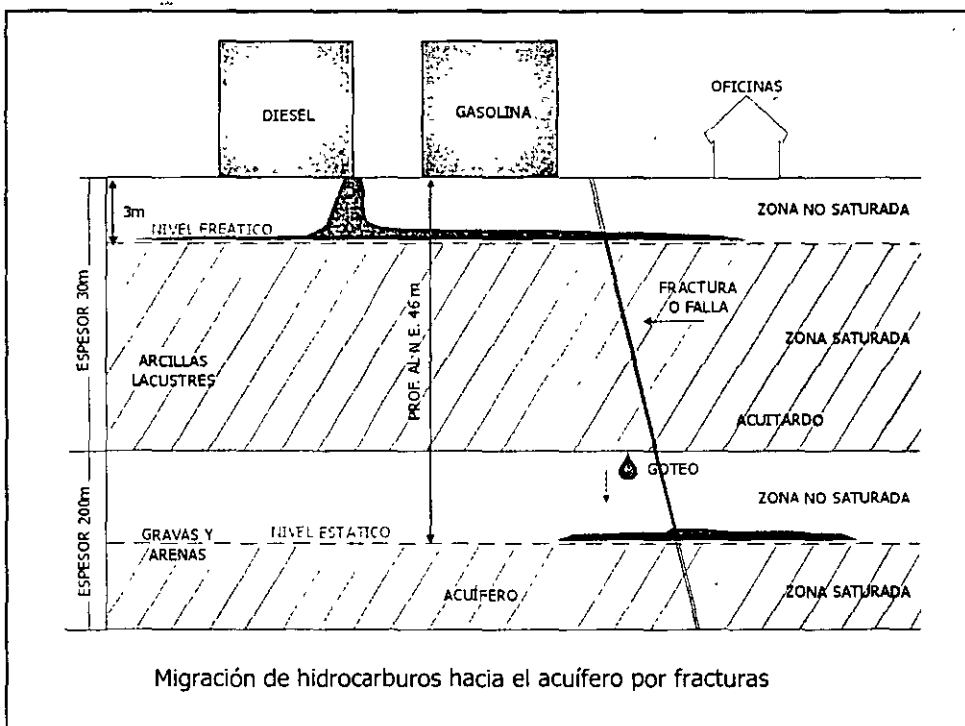
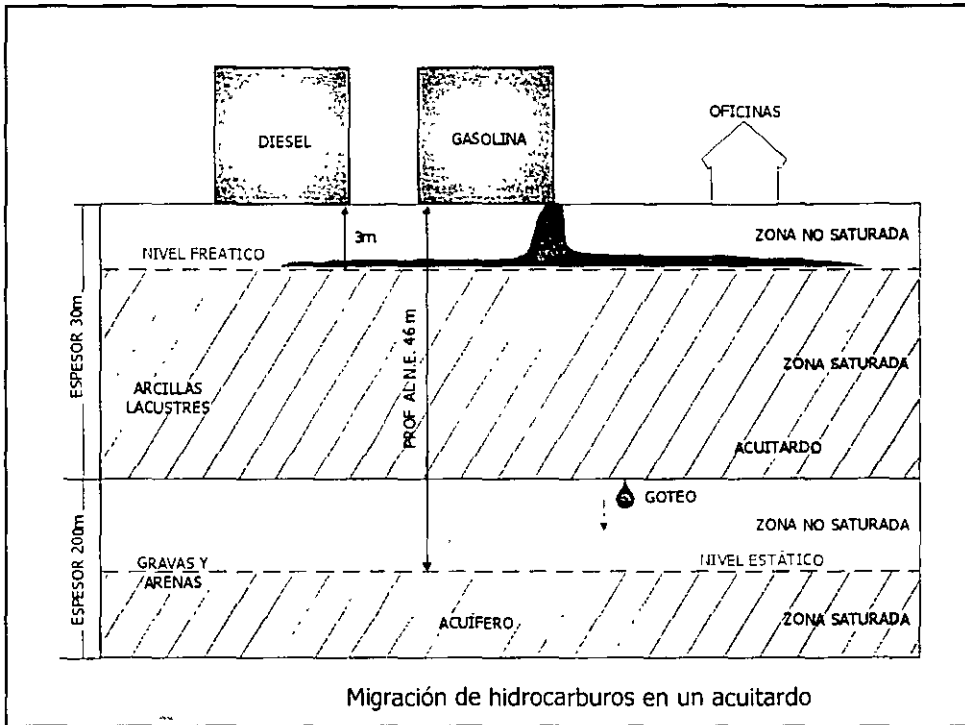


DIESEL EN SUELO SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL



TURBOSINA EN EL SUBSUELO







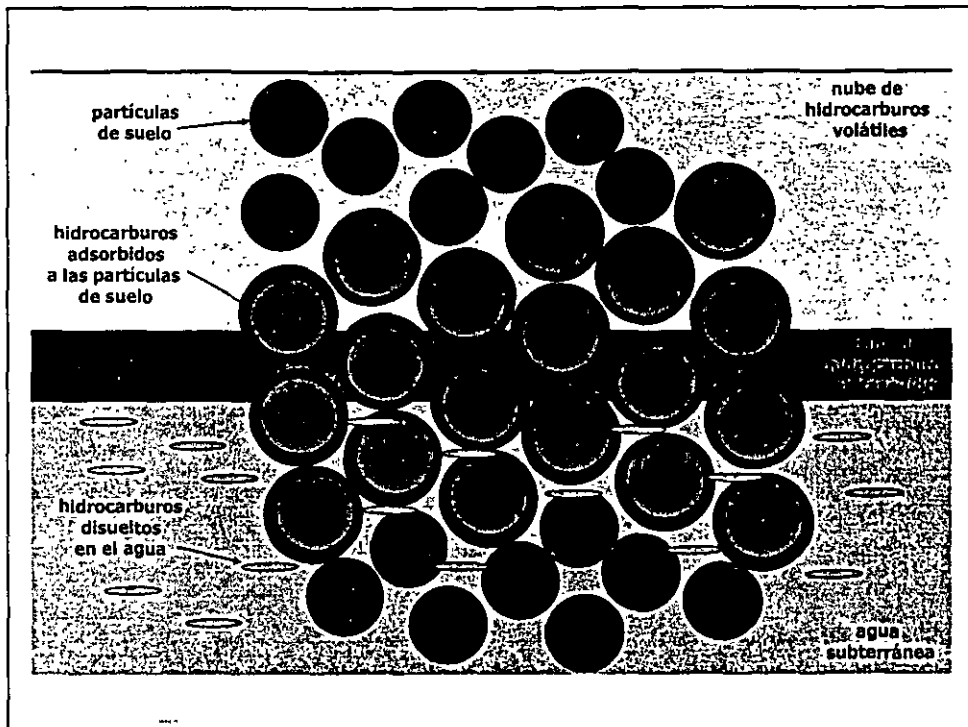


**FALLAS**

**FORMAS EN QUE SE PUEDEN ENCONTRAR LOS  
HIDROCARBUROS AL ENTRAR  
EN CONTACTO CON EL SUBSUELO**

---

- **adsorbidos a las partículas del suelo**  
**en fase gaseosa**
  - **disueltos en agua**  
**(intersticial y agua subterránea)**
  - **en fase libre flotando sobre el agua subterránea**
-



## CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL GEOLÓGICO

**CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA** (carbono orgánico)  
ARCILLAS > LIMOS > ARENAS

**CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE AGUA**  
ARCILLAS > LIMOS > ARENAS

**CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE HIDROCARBUROS**  
ARCILLAS > LIMOS > ARENAS

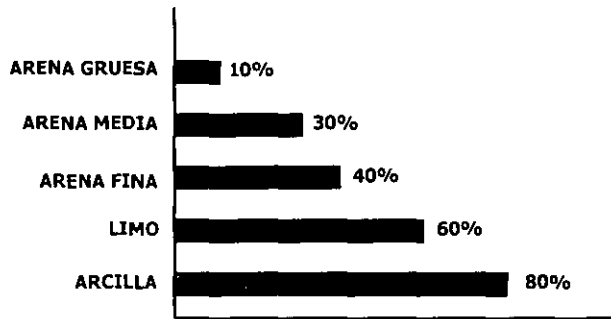
### CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS

TIPO DE SUELO	CARBONO ORGÁNICO (%)
Arcilla	70 - 90
Limo	8 - 28
Arena	< 1 - 28

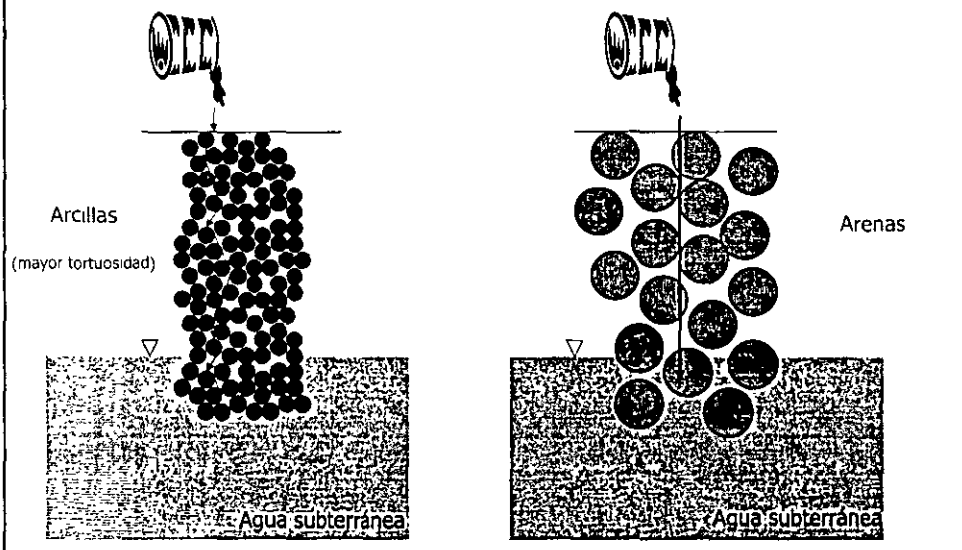
### CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES MATERIALES GEOLÓGICOS

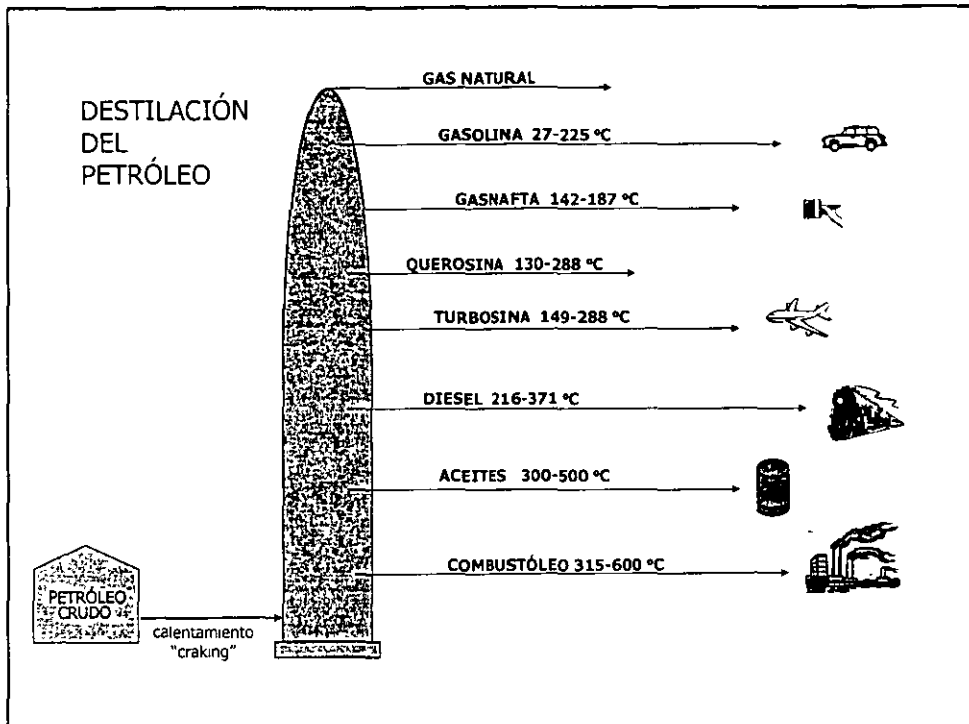
MATERIAL	TAMAÑO DE PARTÍCULA mm	POROSIDAD %	PERMEABILIDAD m/seg
Arcilla	< 0.002	45-55	$10^{-10}$
Limo	0.002 - 0.02	40-50	$10^{-8}$
Arena fina	0.02 - 0.2	30-35	$10^{-6}$
Arena media	0.2 - 2.0	35-40	$10^{-4}$
Grava	> 10	30-40	$10^{-2}$
Grava con arena	mezcla	20-35	$10^{-3}$
Caliza	roca	1-10	$10^{-1}$

## CAPACIDAD DE ADSORCIÓN O RETENCIÓN DE FLUIDOS



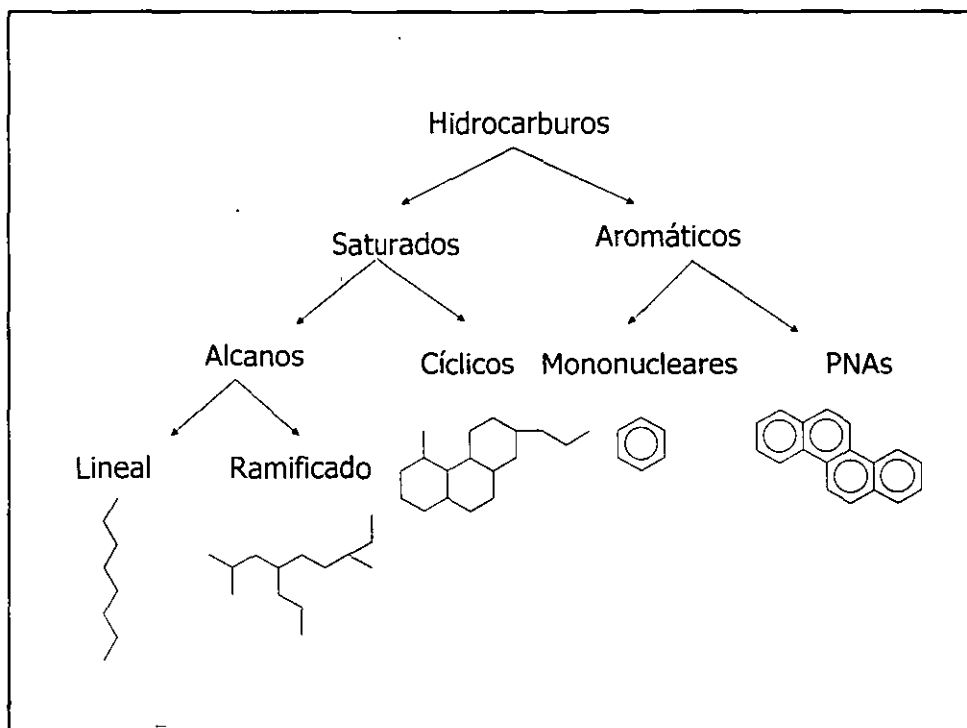
## INFLUENCIA DEL TIPO DE SUELO SOBRE EL TRANSPORTE Y DESTINO DE LOS HIDROCARBUROS EN EL SUBSUELO





**ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIBLES DESTILADOS**

COMBUSTIBLE	TEMPERATURA DE DESTILACIÓN (°C)	VISCOSIDAD CINEMÁTICA (centistoks)	DENSIDAD g/m <sup>3</sup> (20°C)
GASOLINA	27-225	0.5-0.65	0.680-0.760
GASAVIÓN	27-135	-	0.739
GASOLVENTE	77-138	-	0.761
GASNAFTA	142-187	-	0.768
QUEROSINA	130-288	-	0.800
TURBOSINA	149-288	-	0.810
GASÓLEO	216-308	-	0.848
DIESEL	216-371	2.2-2.4	0.850
ACEITES	300-500	65.0-194.0	0.860-0.950
COMBUSTÓLEO	315-600	-	0.960



### ALGUNAS PROPIEDADES DE HIDROCARBUROS PUROS

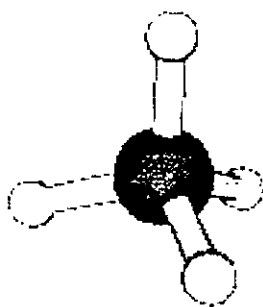
Nombre del hidrocarburo	Fórmula condensada	Punto de ebullición °C	Gravedad específica g/cm <sup>3</sup>
Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	36.1	0.626
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	68.9	0.660
Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	98.4	0.684
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	125.6	0.703
Nonano	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	150.8	0.718
Decano	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	174.1	0.730

HOJA 1 DE 2

### ALGUNAS PROPIEDADES DE HIDROCARBUROS PUROS

Nombre del hidrocarburo	Fórmula condensada	Punto de ebullición °C	Gravedad específica g/cm <sup>3</sup>
Pentadecano	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	270.0	0.769
Octadecano	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	316.1	0.777
Eicoseno	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	343.0	0.778
Triacontano	C <sub>30</sub> H <sub>62</sub>	449.7	0.775
Tetracontano	C <sub>40</sub> H <sub>82</sub>	–	–
Pentacontano	C <sub>50</sub> H <sub>102</sub>	–	0.794

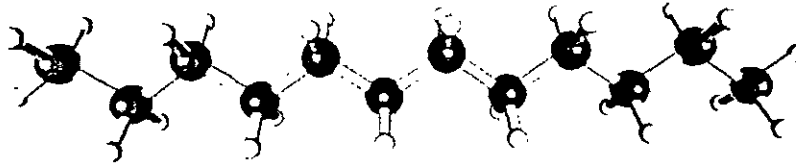
HOJA 2 DE 2



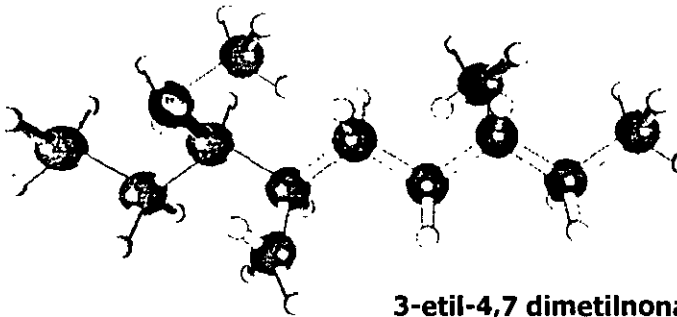
**metano**

ESTRUCTURA TÍPICA DEL  
CARBONO CON ENLACES  
SENCILLOS:  
**ALCANOS**  
(Parafinas)

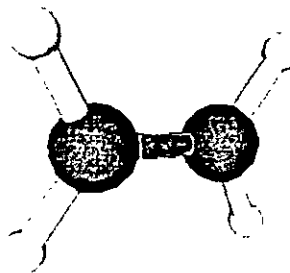
**EJEMPLOS DE n-ALCANOS**



**dodecano**

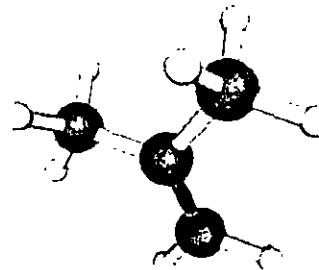


**3-etil-4,7 dimetilnonano**



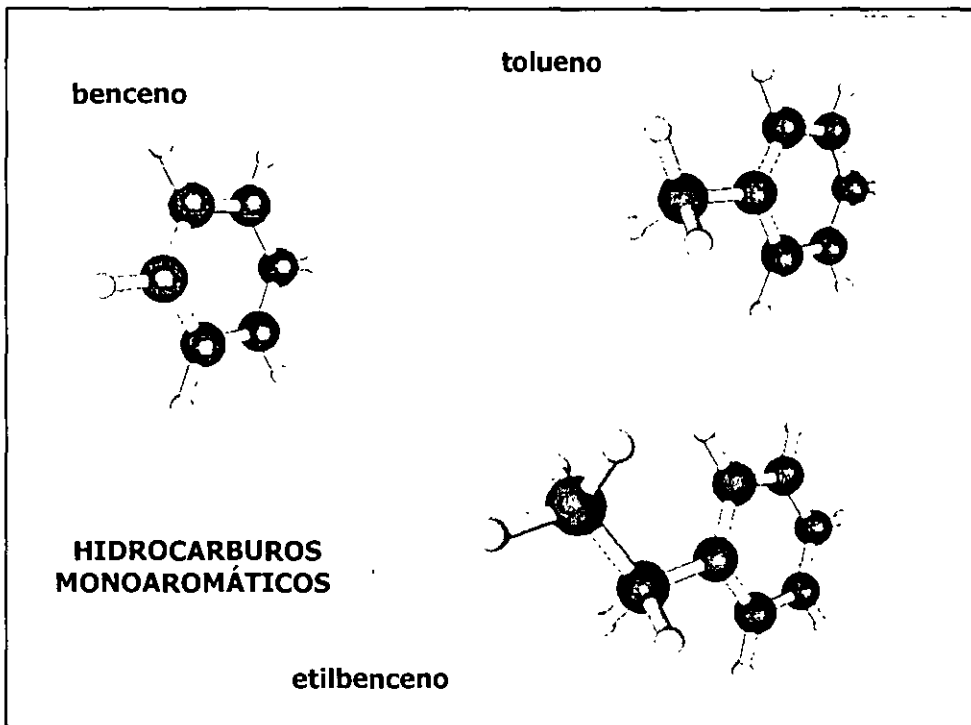
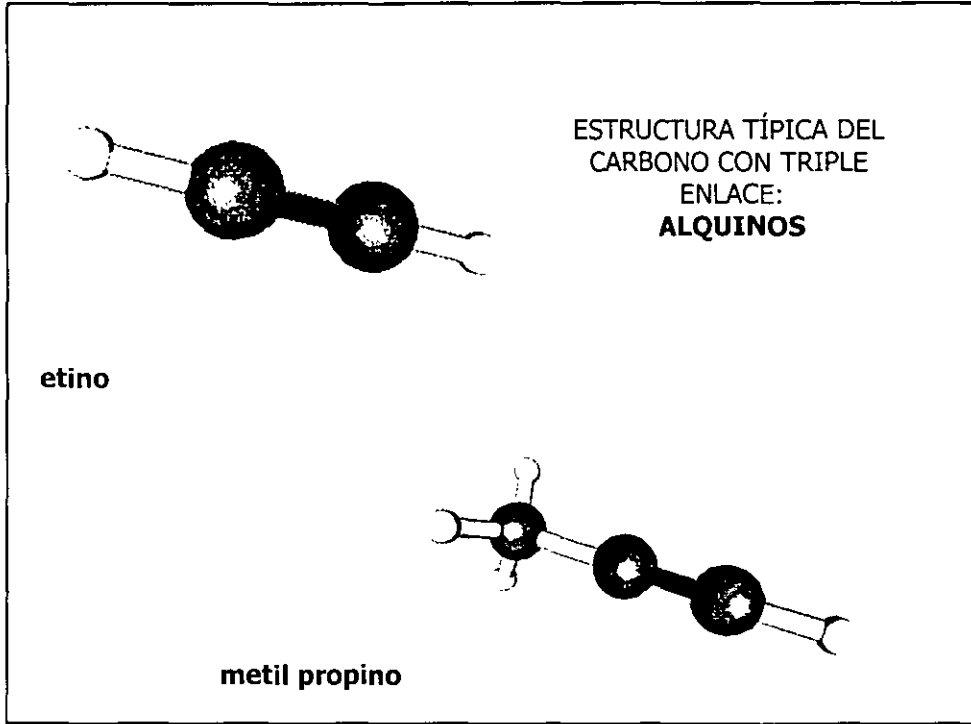
**eteno**

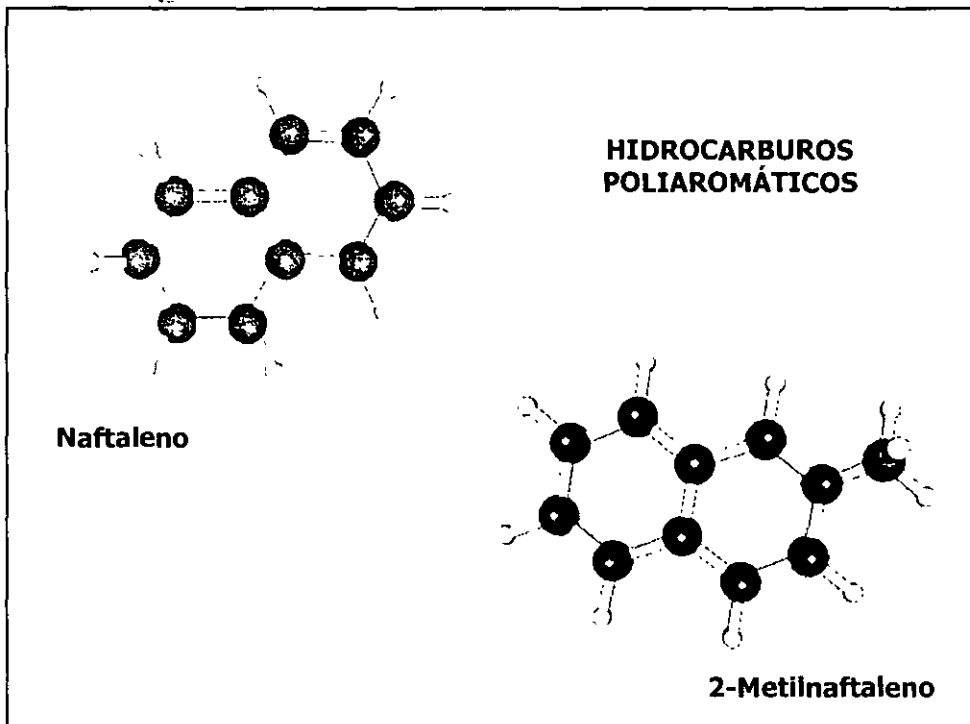
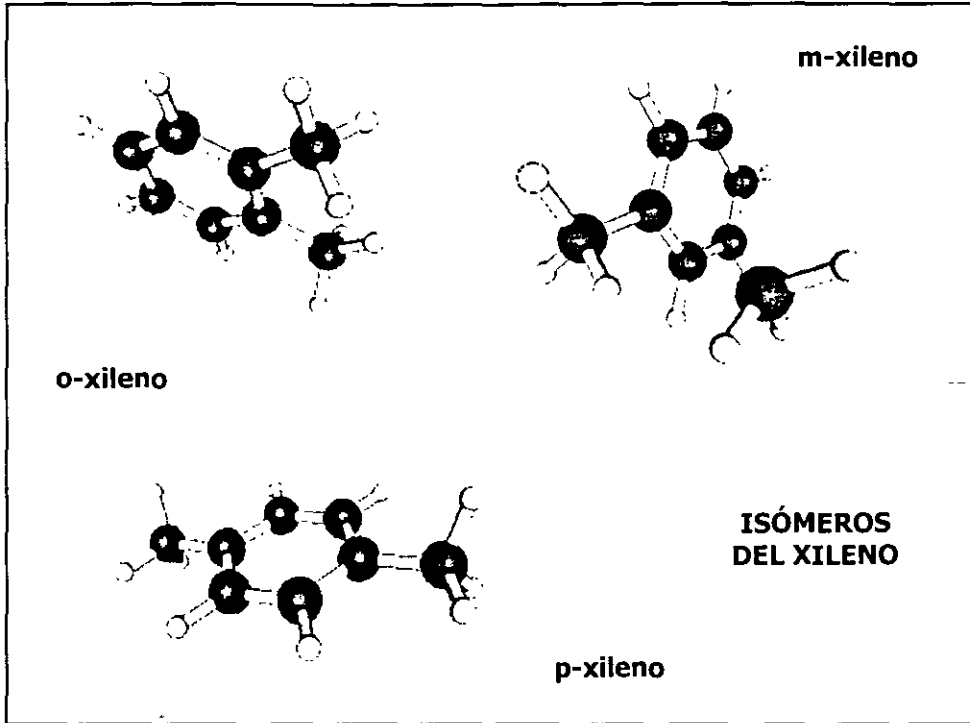
ESTRUCTURA TÍPICA DEL  
CARBONO CON DOBLE  
ENLACE:  
**ALQUENOS**  
(Olefinas)

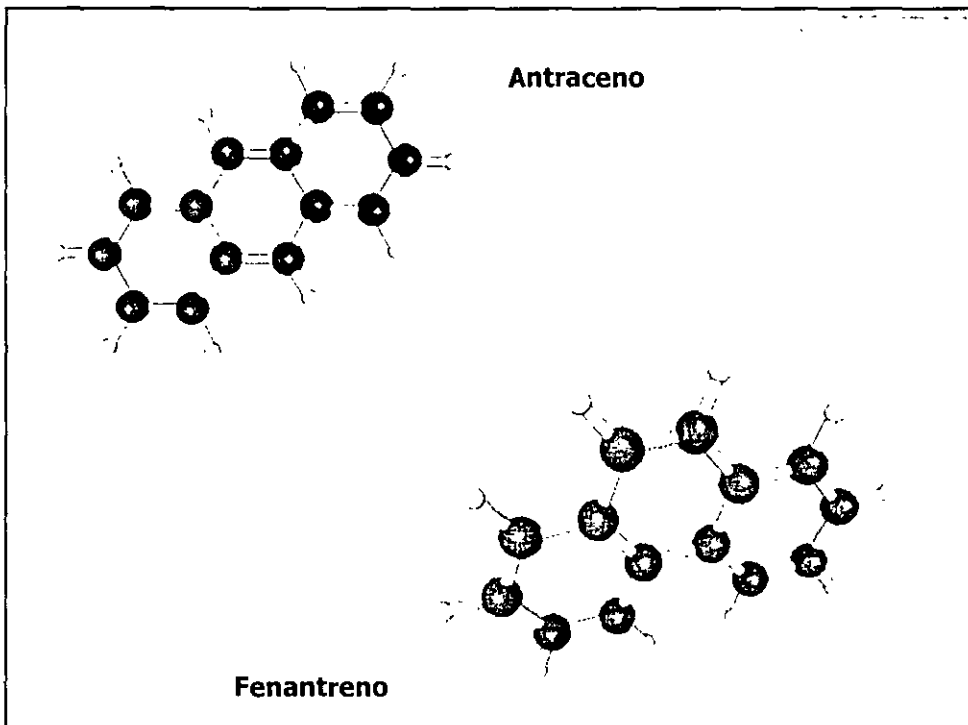
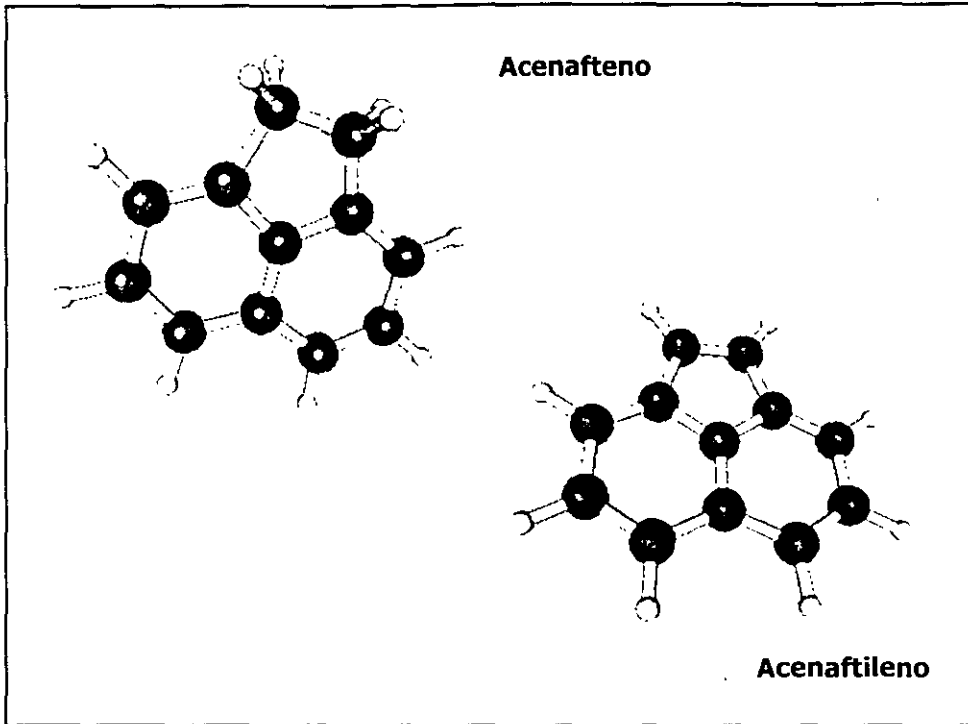


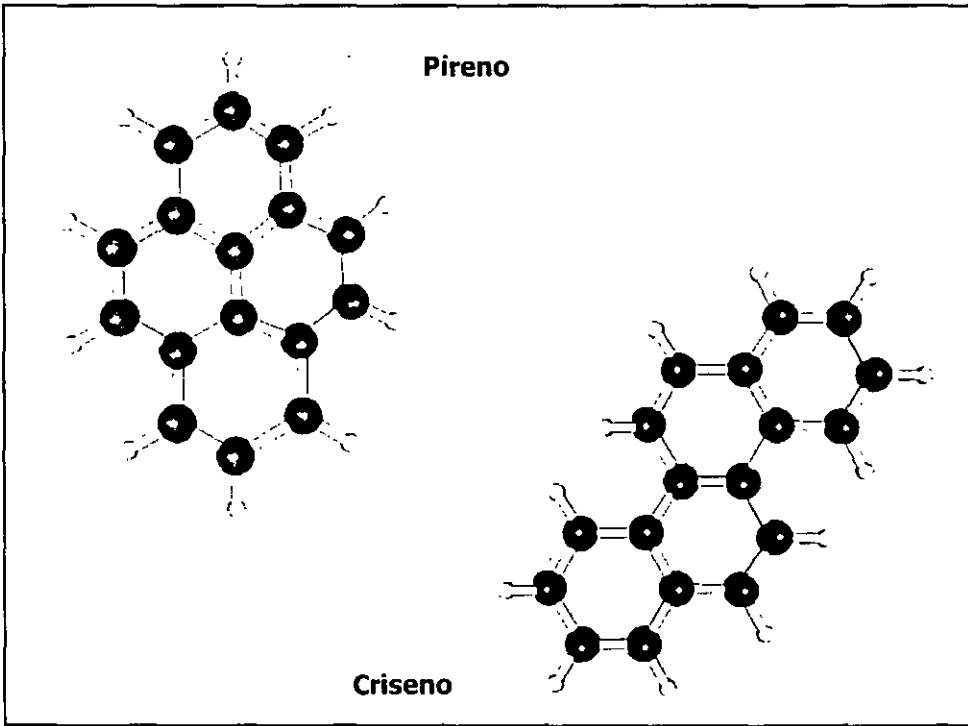
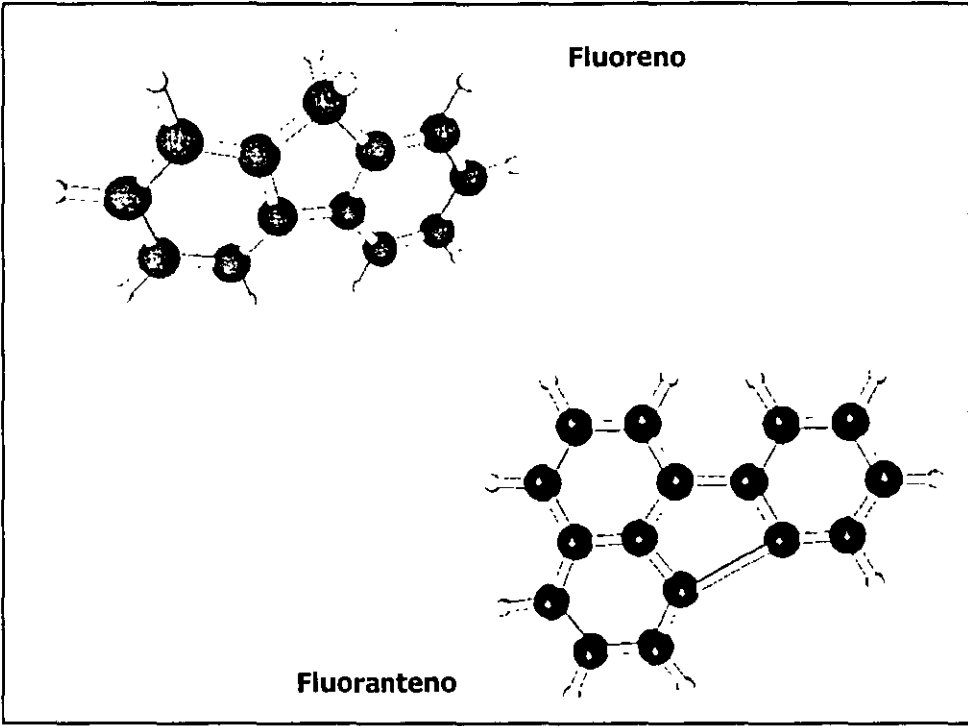
**metil propeno**

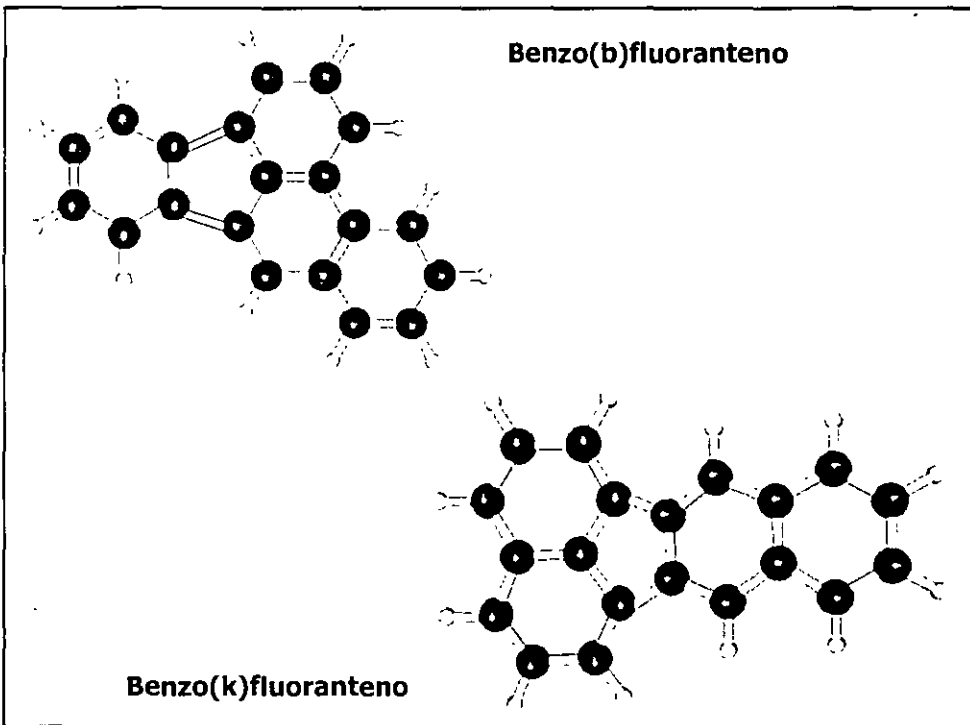
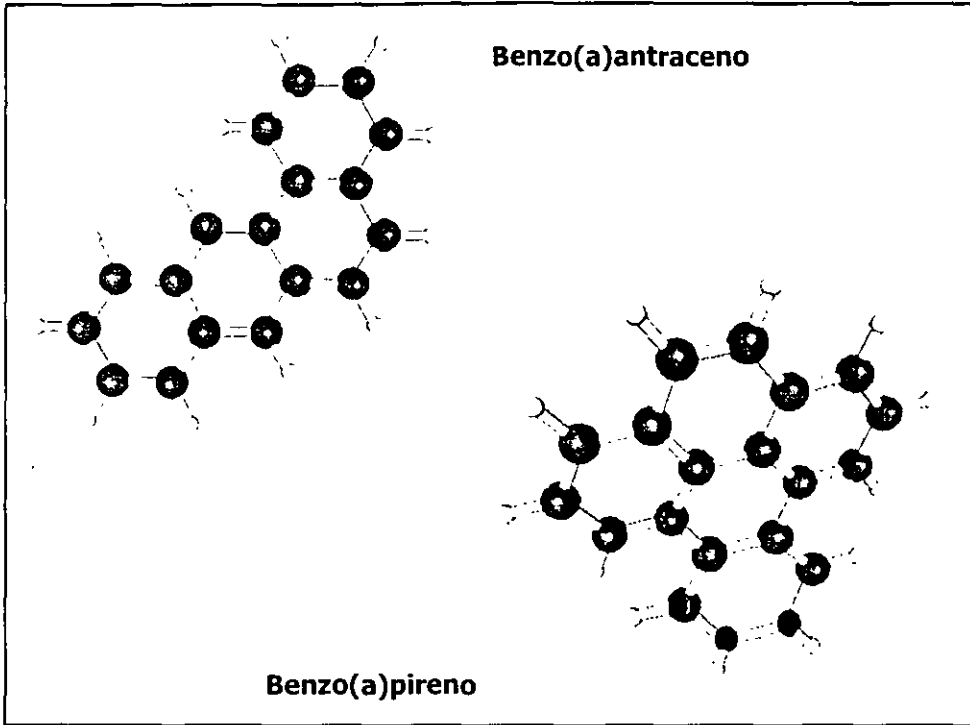


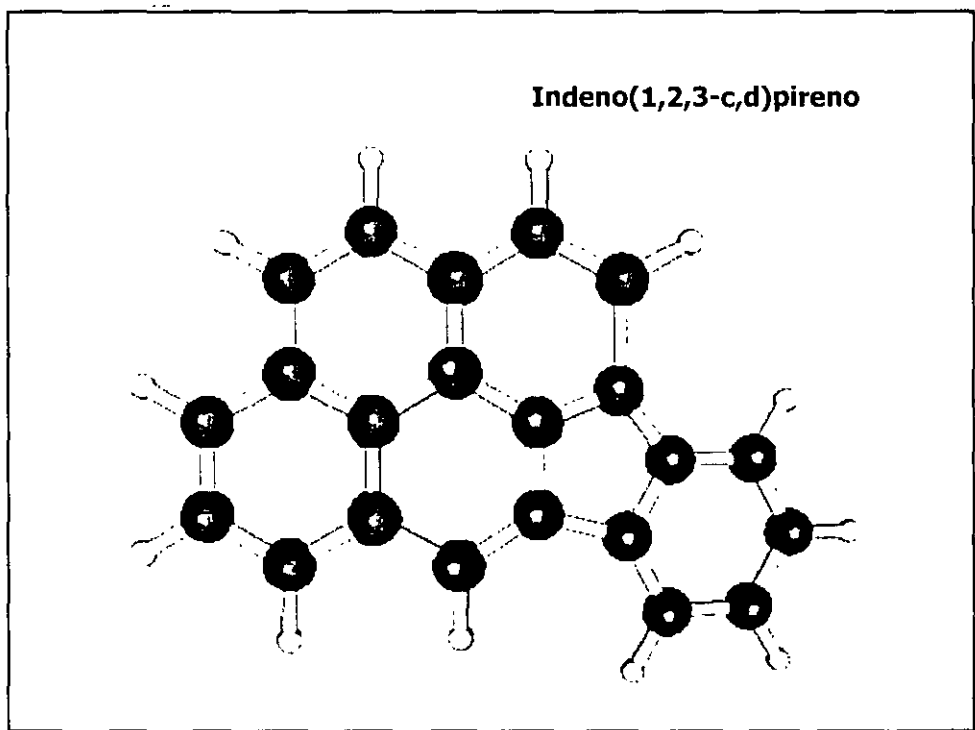
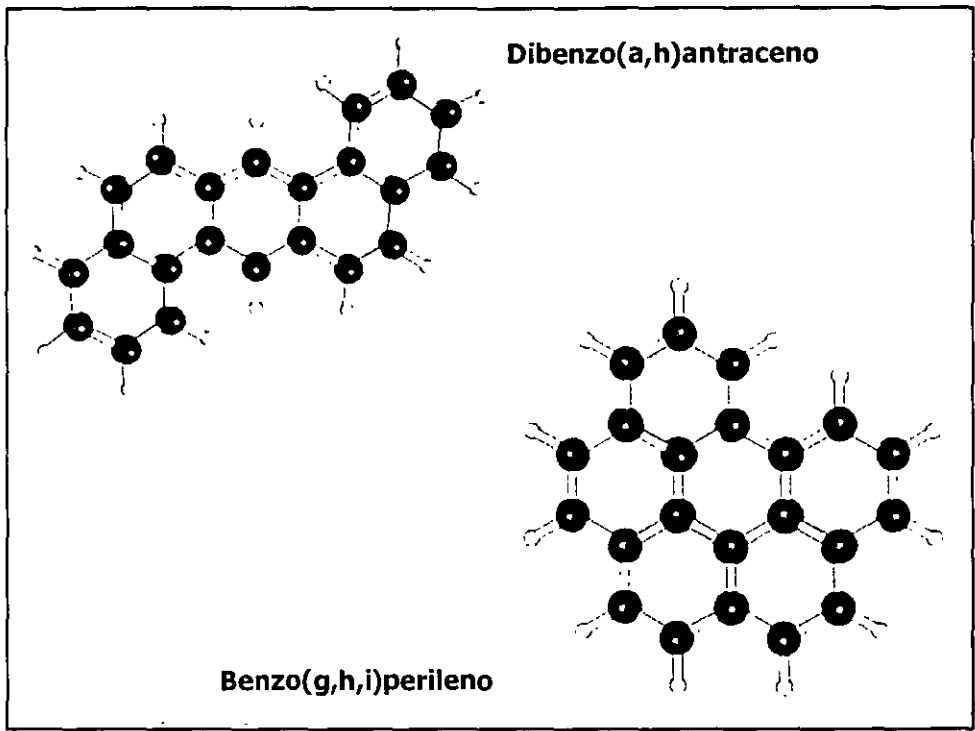












**PESOS MOLECULARES DE LOS HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLINUCLEARES**

COMPUESTO (mg/kg del producto)	FÓRMULA CONDENSADA	PESO MOLECULAR
NAFTALENO	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128.2
2-METILNAFTALENO	C <sub>11</sub> H <sub>10</sub>	142.2
ACENAFTENO	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154.2
ACENAFTILENO	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	152.2
FLUORENO	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	166.2
FENANTRENO	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178.2
ANTRACENO	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178.2
FLUORANTENO	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202.3
PIRENO	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202.3
CRISENO	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.3
BENZO(A)ANTRACENO	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228.3
BENZO(B)FLUORANTENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3
BENZO(K)FLUORANTENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3
BENZO(A)PIRENO	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252.3
DIBENZO(A,H)ANTRACENO	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	278.4
BENZO(G,H,I)PERILENO	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.3
INDENO(1,2,3,CD)PIRENO	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276.3

**COMPOSICIÓN DE LAS GASOLINAS**

TIPO DE HIDROCARBURO	NÚMERO DE ÁTOMOS DE CARBONO	Porcentaje (en peso)
Alcanos de cadena lineal	C <sub>3</sub> - C <sub>12</sub>	10.80 - 24.29
Alcanos ramificados	C <sub>4</sub> - C <sub>10</sub>	17.91 - 54.66
Cicloalcanos	C <sub>5</sub> - C <sub>8</sub>	0.92 - 2.49
Alquenos de cadena lineal	C <sub>4</sub> - C <sub>7</sub>	2.33 - 3.54
Alquenos ramificados	C <sub>5</sub> - C <sub>7</sub>	3.28 - 4.03
Cicloalquenos	C <sub>5</sub> - C <sub>6</sub>	0.18 - 0.26
Aromáticos mononucleares	C <sub>6</sub> - C <sub>10</sub>	10.82 - 55.22
Aromáticos polinucleares	C <sub>10</sub> - C <sub>21</sub>	0.28 - 3.29

### COMPOSICIÓN DEL DIESEL

Átomos de Carbono	Alcanos (% v/v)	Cicloalcanos (% v/v)	Aromáticos (% v/v)
C <sub>10</sub>	0.9	0.6	0.4
C <sub>11</sub>	2.3	1.7	1.0
C <sub>12</sub>	3.8	2.8	1.6
C <sub>13</sub>	6.4	4.8	2.8
C <sub>14</sub>	8.8	6.6	3.8
C <sub>15</sub>	7.4	5.5	3.2
C <sub>16</sub>	5.8	4.4	2.5
C <sub>17</sub>	5.5	4.1	2.4
C <sub>18</sub>	4.3	3.2	1.8
C <sub>19</sub>	0.7	0.6	0.3
<b>Totales</b>	<b>45.9</b>	<b>34.3</b>	<b>19.8</b>

### COMPARACIÓN DEL CONTENIDO DE BTEX EN GASOLINAS

HIDROCARBUROS en %	ESTUDIOS MÉXICO (1)	LITERATURA USA (2)
Benceno	2.96	0.12 – 3.50
Tolueno	8.49	2.73 – 21.80
Etilbenceno	1.56	0.36 – 2.86
o-Xileno	2.06	0.68 – 2.86
m+p-Xileno	5.24	2.54 – 5.45
<b>Xilenos totales</b>	<b>7.30</b>	<b>3.22 – 8.31</b>

- (1) Estudio realizado por S. Saval a partir de combustibles frescos, 2002  
 (2) Reportado por Riser-Roberts, 1993



**CONTENIDO DE ALGUNOS HIDROCARBUROS  
EN GASOLINA Y TURBOSINA**

HIDROCARBURO en %	GASOLINA	TURBOSINA
benceno	0.12 – 3.50	0.3 – 0.5
tolueno	2.73 – 21.80	0.7 – 1.33
etilbenceno	0.36 – 2.86	0.37
o-xileno	0.68 – 2.86	1.01
m-xileno	1.77 – 3.87	0.96
p-xileno	0.77 – 1.58	0.35
naftaleno	0.09 – 0.49	0.2 – 0.5

**CONCENTRACIONES DE BTEX MÁXIMAS  
A ENCONTRAR EN SUELOS CONTAMINADOS CON GASOLINA  
(derrame reciente, gasolina fresca, único combustible presente)**

Concentración de gasolina mg/kg	Concentración máxima de benceno mg/kg	Concentración máxima de tolueno mg/kg	Concentración máxima de etilbenceno mg/kg	Concentración máxima de xilenos (o, m, p) mg/kg
100	3.5	21.8	2.9	8.31
200	7.0	43.6	5.7	16.6
500	17.5	109.0	14.3	41.6
1000	35.0	218.0	28.6	83.1
2000	70.0	436.0	57.2	166.2
5000	175.0	1090.0	143.0	415.5

**CONCENTRACIONES DE BTEX MÁXIMAS  
A ENCONTRAR EN SUELOS CONTAMINADOS CON TURBOSINA**  
(derrame reciente, turbosina fresca, único combustible presente)

Concentración de turbosina mg/kg	Concentración máxima de benceno mg/kg	Concentración máxima de tolueno mg/kg	Concentración máxima de etilbenceno mg/kg	Concentración máxima de xilenos (o, m, p) mg/kg
100	0.5	1.3	0.4	2.3
200	1.0	2.7	0.7	4.6
500	2.5	6.5	2.0	11.5
1000	5.0	13.0	3.7	23.2
2000	10.0	27.0	7.0	46.0
5000	25.0	65.0	20.0	115.0

**ADITIVOS DE LAS GASOLINAS**

Nombre	Formula condensada	Punto de ebullición (°C)	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Tetraetilo de plomo	C <sub>8</sub> H <sub>20</sub> Pb	200	1.659
Metilterbutiléter MTBE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	55.2	0.741
Teramilmetiléter TAME	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	85	0.764

**DNAPLs CONTAMINANTES DE  
SUELOS Y ACUÍFEROS**

---

**hidrocarburos clorados:** percloroetileno,  
tricloroetileno, dicloroetileno, cloruro de vinilo

**disolventes:** cloroformo, tetracloruro de carbono,  
cloruro de metileno, pentaclorofenol

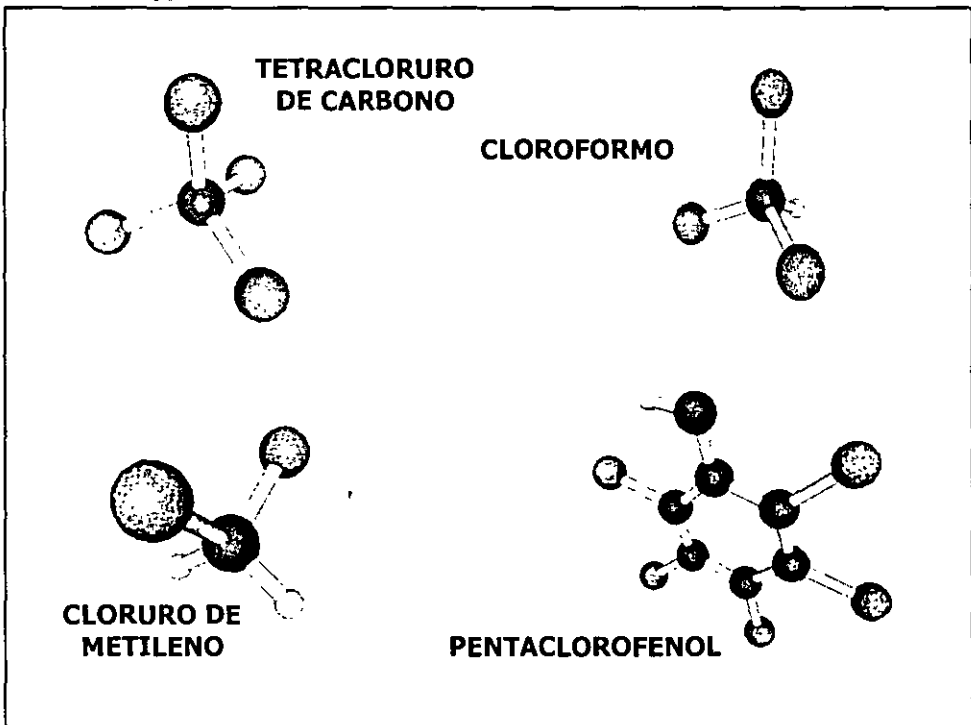
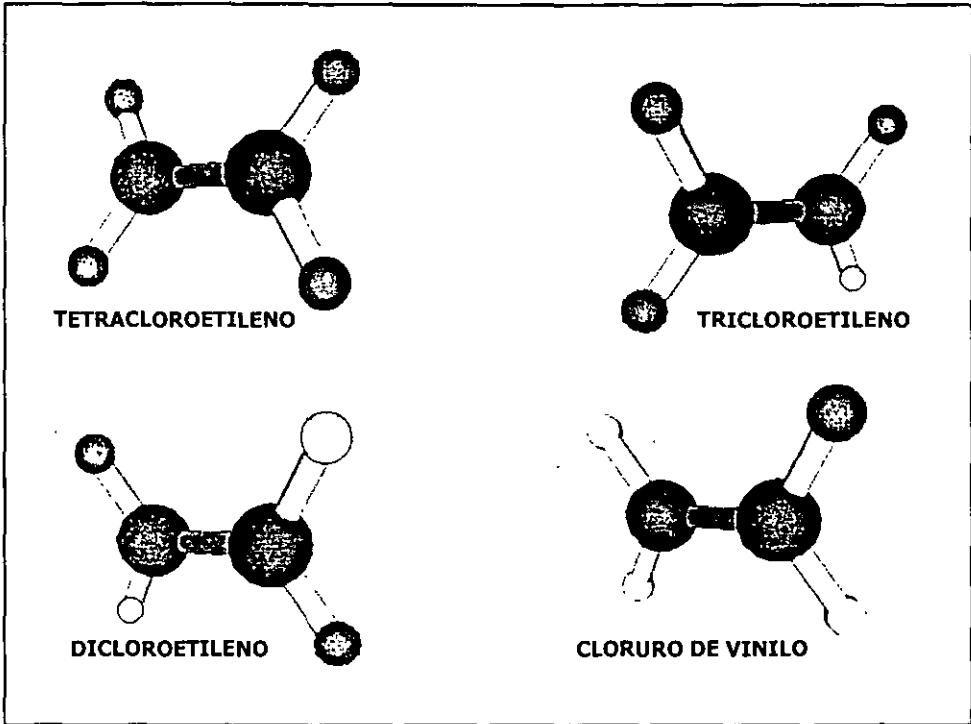
---

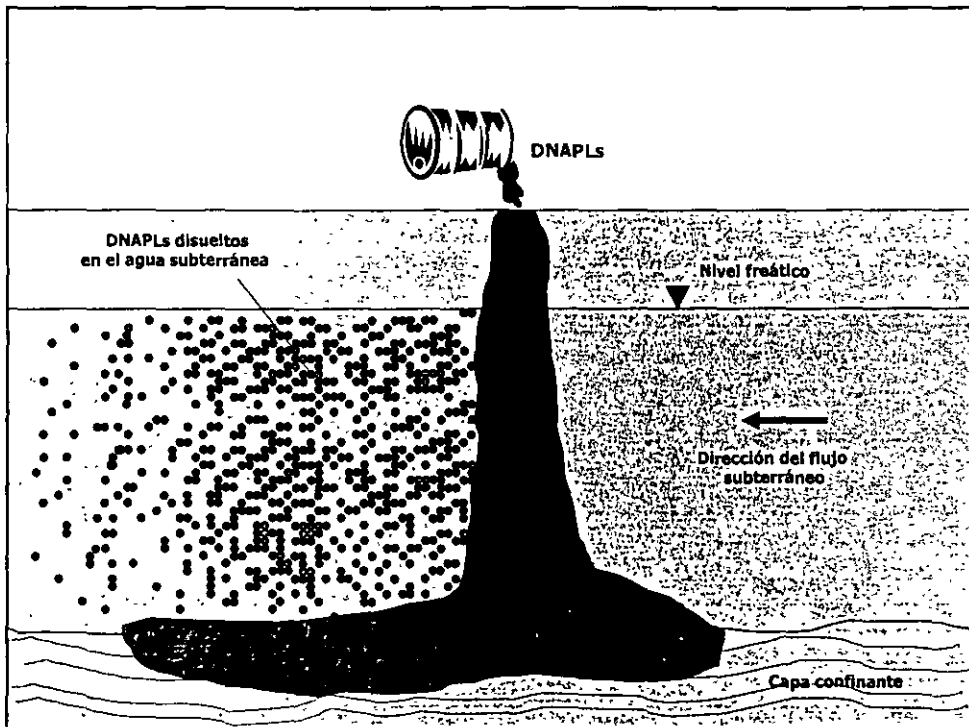
**DISOLVENTES CLORADOS**

**Uso:** desgrasantes en la industria eléctrica,  
electrónica, metalmecánica  
algunos de ellos, disolventes para  
la extracción en análisis de muestras  
en laboratorios de pruebas

**Muy volátiles a temperatura ambiente**

**Métodos analíticos: EPA 8260 y 8270**





### OTROS CONTAMINANTES ORGÁNICOS CLORADOS CONTAMINANTES DE SUELOS

- BIFENILOS POLICLORADOS
  - PLAGUICIDAS
  - CLOROFENOLES

## **BIFENILOS POLICLORADOS**

**Nombres comerciales más comunes:**

<b>Aroclor</b>	<b>Kaneclor</b>	<b>Askarel</b>
<b>Clorinol</b>	<b>Asbestol</b>	<b>Diaclor</b>
<b>Eucarel</b>	<b>Kanechlor</b>	<b>Inclor</b>

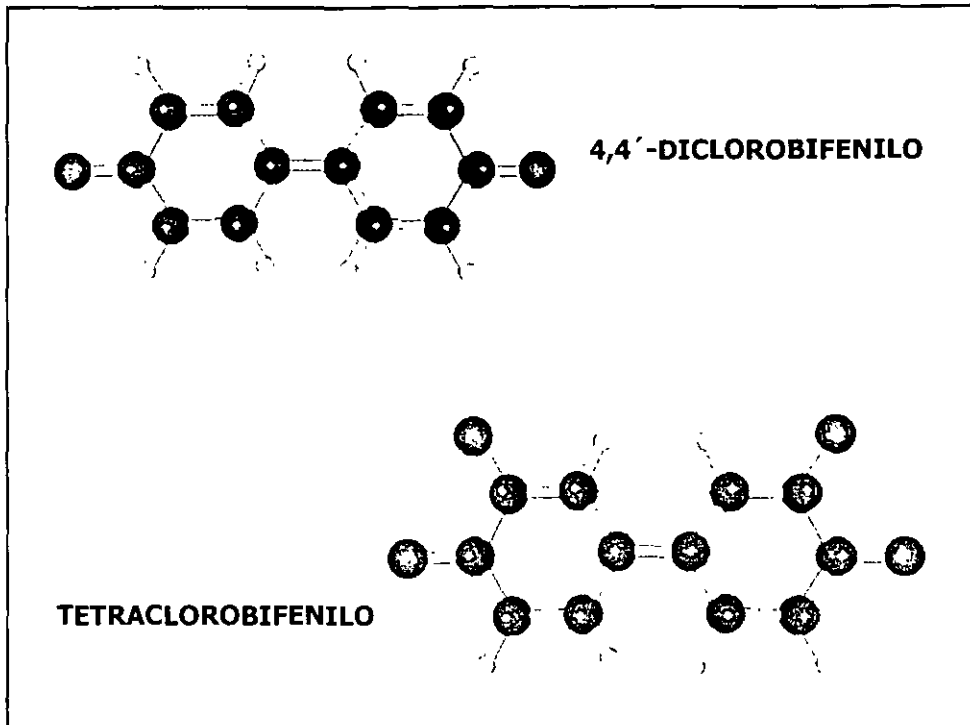
## **BIFENILOS POLICLORADOS**

**Grado de cloración del producto:**

**1242, 1248, 1254, 1260 y 1262**

**porcentaje en peso de átomos  
de cloro en la molécula**

**Aroclor 1242: mezcla de 60 congéneres  
de monoclorobifenilo, diclorobifenilo y  
triclorobifenilo**



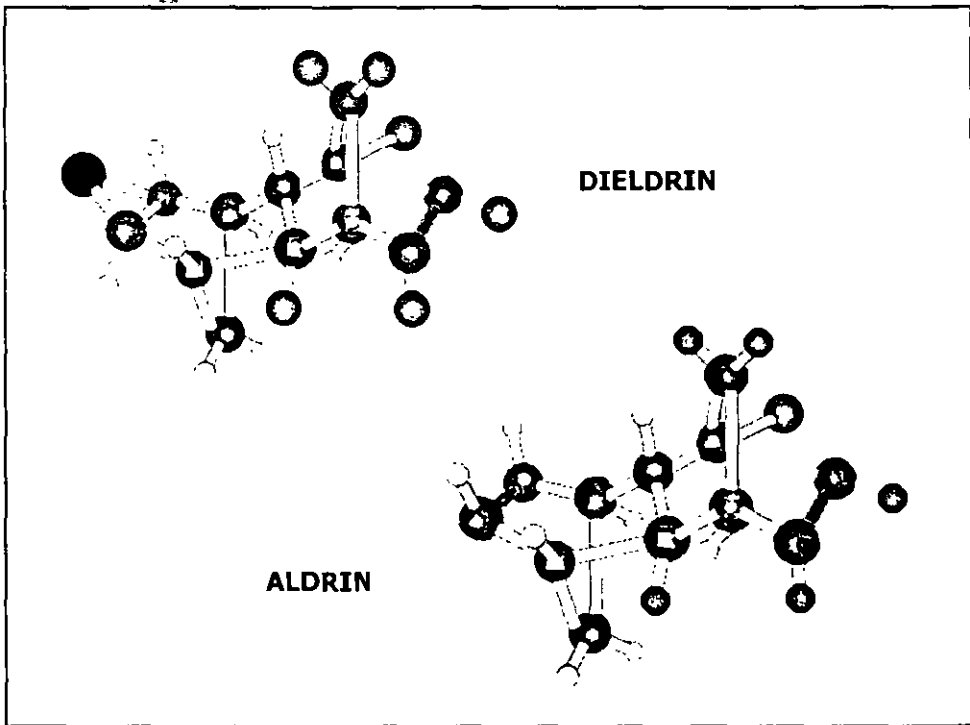
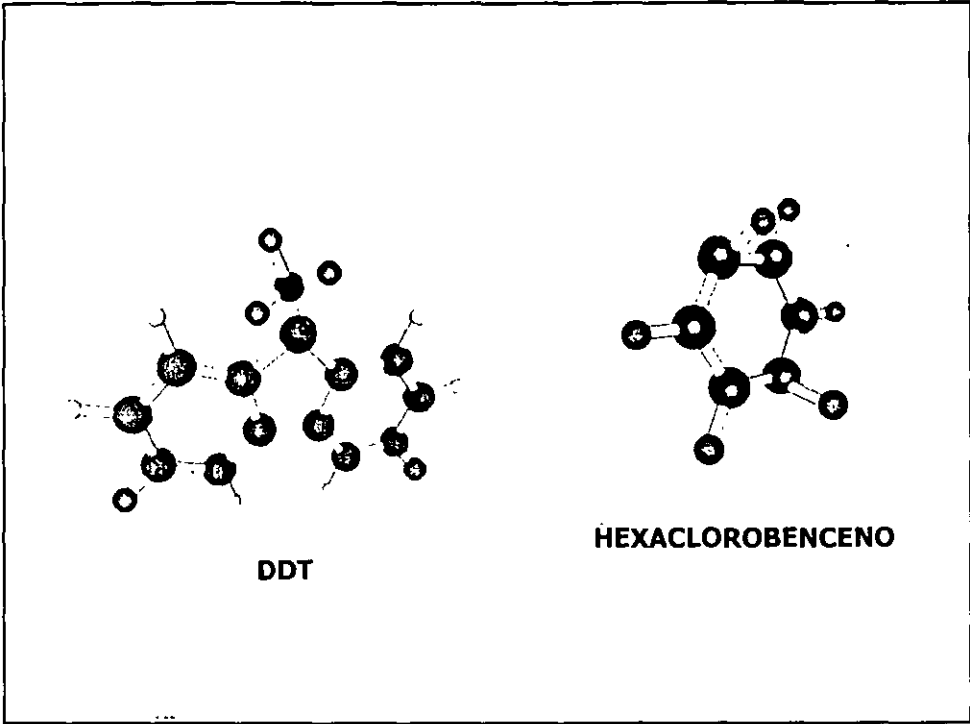
## **PLAGUICIDAS ORGANOCLORADOS**

Origen: agricultura, desechos de fabricación

Polvos insolubles. Se utilizan surfactantes para facilitar su dispersión en la agricultura

Efectos a la salud: la mayoría cancerígenos USEPA A

Método analítico EPA 8081





## **CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE LOS COMPUESTOS ORGÁNICOS**

**SOLUBILIDAD**

**CONSTANTE DE LA  
LEY DE HENRY**

**COEFICIENTE DE  
DISTRIBUCIÓN  
OCTANOL/AGUA**

**PRESIÓN DE VAPOR**

**COEFICIENTE DE  
SORCIÓN**

**COEFICIENTE DE  
DISPERSIÓN**

### **SOLUBILIDAD DE ALGUNOS HIDROCARBUROS LIGEROS PUROS EN AGUA**

<b>Compuesto</b>	<b>Solubilidad (mg/l)</b>
Benceno	1 750
Tolueno	526
o-Xileno	175
Etilbenceno	169
m-Xileno	158
n-hexano	18

HOJA 1 DE 3

**SOLUBILIDAD DE ALGUNOS HIDROCARBUROS PUROS EN AGUA**

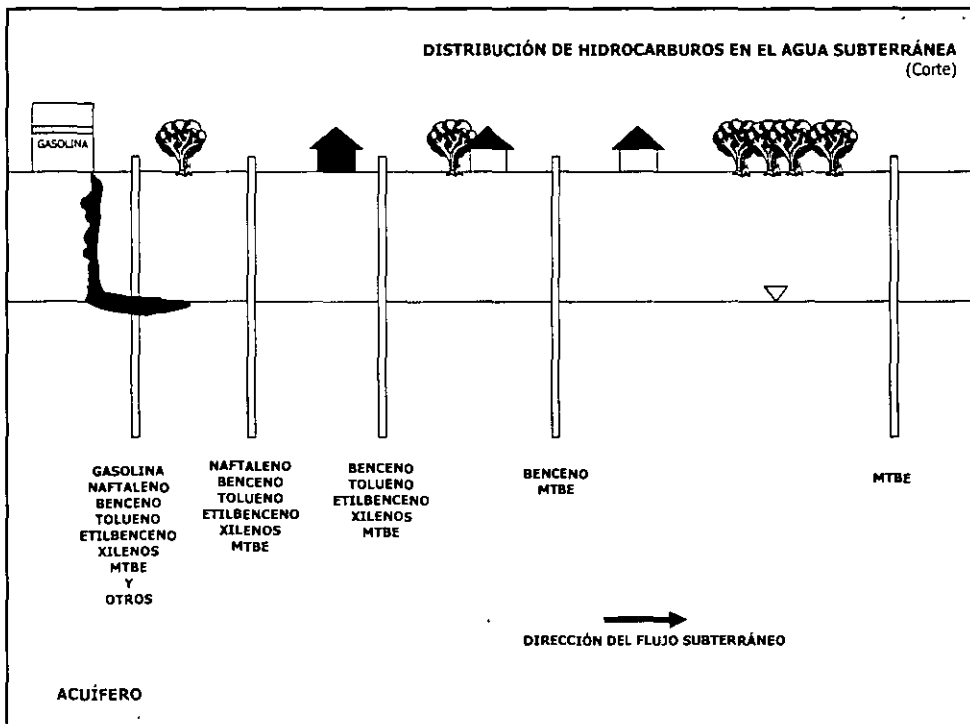
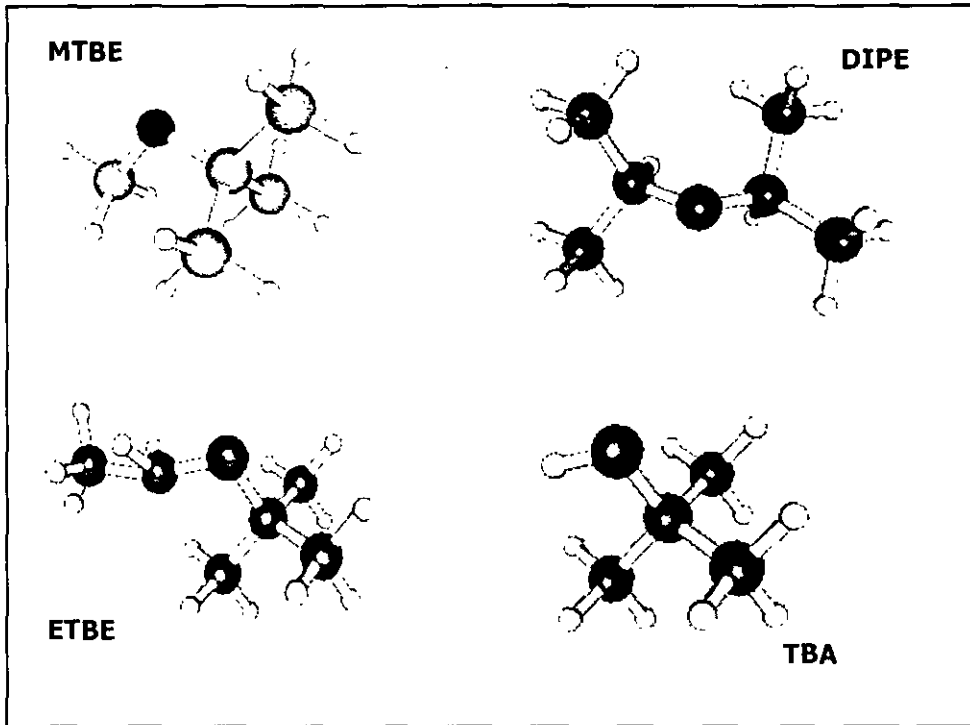
Compuesto Solubilidad (mg/l)

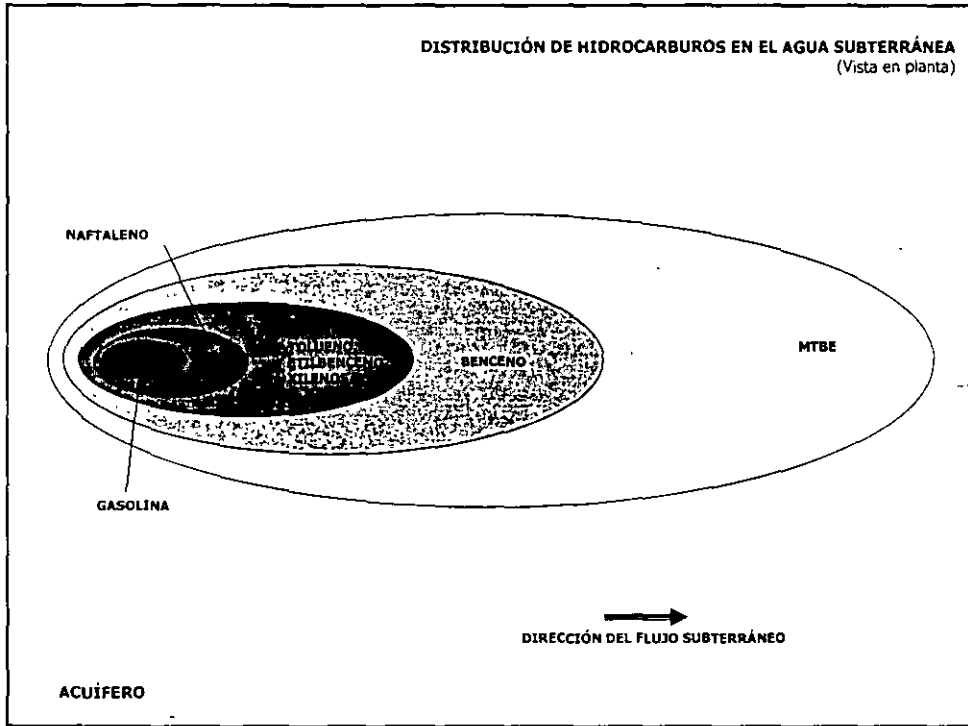
Naftaleno	31.00
Acenafteno	3.93
Acenaftileno	3.93
Indenol (1,2,3,c,d)pireno	2.07
Fluoreno	1.69
Fenantreno	1.00
Benzo(k)fluoranteno	0.430
Fluoranteno	0.206
Pireno	0.135
Antraceno	0.045
Benzo(b)fluoranteno	0.014
Benzo(a)antraceno	0.0067
Criseno	0.0016
Benzo(a)pireno	0.0012
Benzo(g,h,i)perienlo	0.0007
Dibenzo(a,h)antraceno	0.0005

HOJA 2 DE 3

**ADITIVOS DE LAS GASOLINAS**

Nombre	Formula condensada	Solubilidad mg/L	Punto de ebullición (°C)	Densidad g/cm <sup>3</sup>
Tetraetilo de plomo	C <sub>8</sub> H <sub>20</sub> Pb	0.21	200.0	1.659
Metiliterbutiléter MTBE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	50,000	55.2	0.741
Teramilmetiléter TAME	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	2,640	85.0	0.764
Etílerbutiléter ETBE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	1.2	71.0	0.752
Diisopropiléter DIPE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	8,800	68.5	0.724
Alcohol terbutílico TBA	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	-	82.2	0.786





COMPUESTO	SOLUBILIDAD EN AGUA (mg/l)
Aldrin	0.0784
Dieldrin	0.195
1,2-Diclorobenceno	149.55
Hexaclorobenceno	0.006
Fenol	82,800.00
2-Clorofenol	22,000.00
Pentaclorofenol	14.00
Metileticetona	320,000.00
Tetracloroetileno	200.00

## **COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN OCTANOL/AGUA**

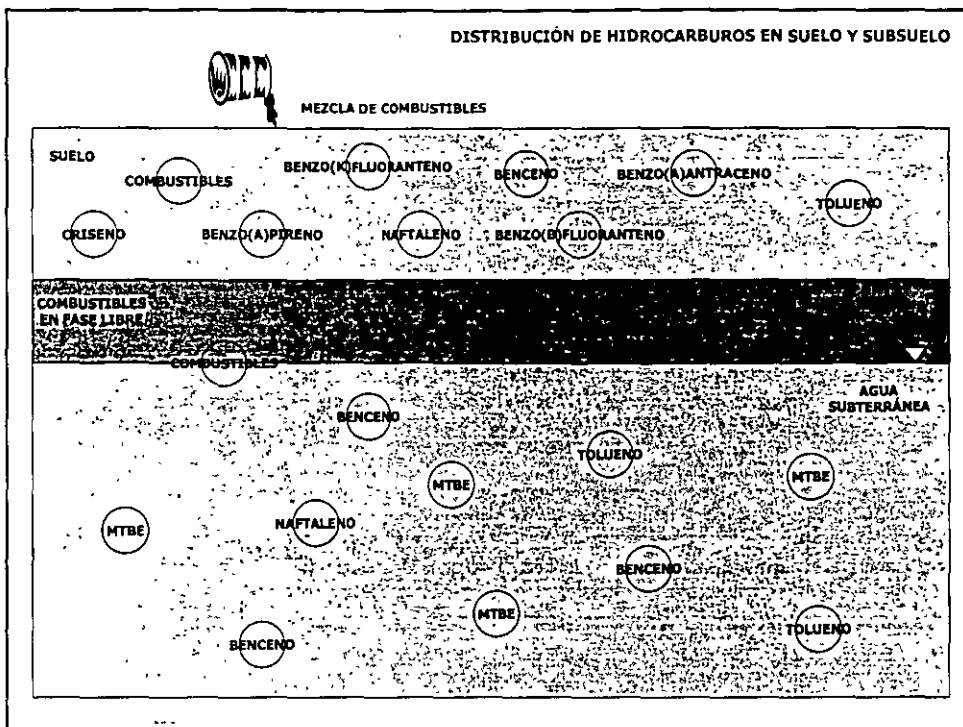
$$K_{O/W}$$

### **AFINIDAD DE UNA SUSTANCIA POR UNA FASE ORGÁNICA**

**cifras altas = preferencia por la fase  
orgánica**

<b>COMPUESTO</b>	<b>COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN OCTANOL/AGUA (log <math>K_{O/W}</math> adim)</b>
benceno	1.77
tolueno	2.13
etilbenceno	2.56
p-xileno	2.38
MTBE	1.08
naftaleno	3.30
fenantreno	4.15
benzo(a)pireno	6.01
benzo(b)fluoranteno	5.74
benzo(g,h,i)perileno	6.20

DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS EN SUELO Y SUBSUELO



COMPUESTO	COEFICIENTE DE DISTRIBUCIÓN OCTANOL/AGUA (log $K_{O/W}$ adim)
Aldrin	8.50
Dieldrin	5.48
1,2-Diclorobenceno	3.38
Hexaclorobenceno	5.50
Fenol	1.45
2-Clorofenol	2.15
Pentaclorofenol	2.96
Diclorometano	1.15
Tetracloroetileno	2.88

**COEFICIENTE DE SORCIÓN  
( $k_{oc}$ )**

**PREFERENCIA DE UNA SUSTANCIA PARA  
ADSORBERSE EN EL SUELO**

**cifras altas = preferencia por el suelo**

<b>COMPUESTO</b>	<b>COEFICIENTE DE SORCIÓN cm<sup>3</sup>/g</b>
<b>benceno</b>	<b>59</b>
<b>tolueno</b>	<b>180</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>360</b>
<b>xilenos</b>	<b>240</b>
<b>MTBE</b>	<b>12</b>
<b>naftaleno</b>	<b>2,000</b>
<b>fenantreno</b>	<b>23,000</b>
<b>benzo(a)pireno</b>	<b>1' 000,000</b>
<b>benzo(b)fluoranteno</b>	<b>1' 200,000</b>
<b>benzo(g,h,i)perileno</b>	<b>7' 800,000</b>

<b>COMPUESTO</b>	<b>COEFICIENTE DE SORCIÓN cm<sup>3</sup>/g</b>
<b>Cloruro de metileno</b>	<b>12</b>
<b>Cloruro de vinilo</b>	<b>19</b>
<b>Clorobenceno</b>	<b>22</b>
<b>Fenol</b>	<b>29</b>
<b>Cloroformo</b>	<b>40</b>
<b>Tetracloroetileno</b>	<b>160</b>
<b>Tricloroetileno</b>	<b>170</b>
<b>Tetracloruro de carbono</b>	<b>170</b>

## **CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY**

**CAPACIDAD DE UNA SUSTANCIA  
PARA VOLATILIZARSE**

**cifras altas = mayor volatilidad**



<b>COMPUESTO</b>	<b>CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY adim</b>
<b>benceno</b>	<b>0.228</b>
<b>tolueno</b>	<b>0.272</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>0.323</b>
<b>p-xileno</b>	<b>0.290</b>
<b>MTBE</b>	<b>0.0204</b>
<b>naftaleno</b>	<b>0.0198</b>
<b>fenantreno</b>	<b>0.0016</b>
<b>benzo(a)pireno</b>	<b>0.0000463</b>
<b>benzo(b)fluoranteno</b>	<b>0.00455</b>
<b>benzo(g,h,i)perileno</b>	<b>0.0000109</b>

<b>COMPUESTO</b>	<b>CONSTANTE DE LA LEY DE HENRY adim</b>
<b>Aldrin</b>	<b>0.0206</b>
<b>Dieldrin</b>	<b>0.0012</b>
<b>1,2-Diclorobenceno</b>	<b>0.080</b>
<b>Hexaclorobenceno</b>	<b>0.0618</b>
<b>Fenol</b>	<b>0.000016</b>
<b>2-Clorofenol</b>	<b>0.016</b>
<b>Pentaclorofenol</b>	<b>0.0000825</b>
<b>Tetracloruro de carbono</b>	<b>1.237</b>
<b>Tetracloroetileno</b>	<b>0.7588</b>

## **PRESIÓN DE VAPOR**

**PRESIÓN QUE EJERCEN LAS MOLÉCULAS  
QUE SE DESPRENDEN EN FORMA DE  
VAPOR CUANDO PRETENDEN  
ABANDONAR EL MEDIO EN QUE SE  
ENCUESTRAN**

<b>COMPUESTO</b>	<b>PRESIÓN DE VAPOR mm Hg</b>
<b>benceno</b>	<b>95.2</b>
<b>tolueno</b>	<b>30.0</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>10.0</b>
<b>m-xileno</b>	<b>7.0</b>
<b>MTBE</b>	<b>249.0</b>
<b>naftaleno</b>	<b>0.23</b>
<b>fenantreno</b>	<b>0.00021</b>
<b>benzo(a)pireno</b>	<b>0.000568</b>
<b>benzo(b)fluoranteno</b>	<b>0.000000667</b>
<b>benzo(g,h,i)perileno</b>	<b>0.000000001</b>

<b>COMPUESTO</b>	<b>PRESIÓN DE VAPOR mm Hg</b>
<b>Aldrin</b>	<b>0.0000167</b>
<b>Dieldrin</b>	<b>0.000000996</b>
<b>1,2-Diclorobenceno</b>	<b>1.50</b>
<b>Hexaclorobenceno</b>	<b>0.0000123</b>
<b>Fenol</b>	<b>0.341</b>
<b>2-Clorofenol</b>	<b>1.40</b>
<b>Pentaclorofenol</b>	<b>0.000017</b>
<b>Tetracloruro de carbono</b>	<b>113.00</b>
<b>Tetracloroetileno</b>	<b>19.00</b>

## **COEFICIENTE DE DISPERSIÓN**

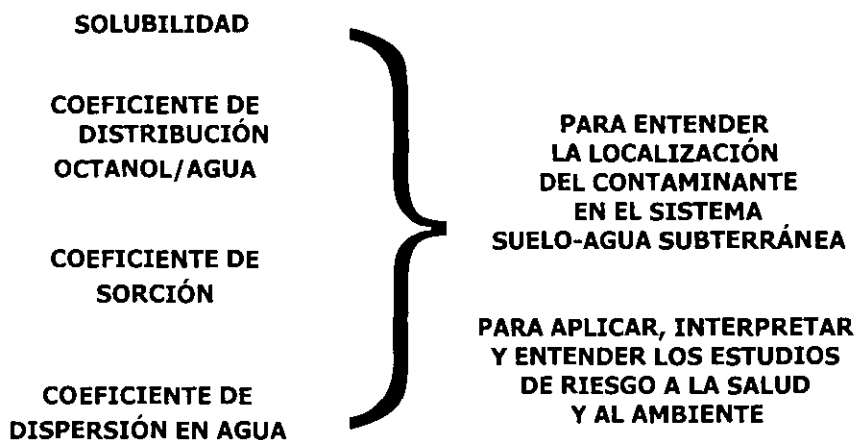
**FACILIDAD CON LA QUE UNA SUSTANCIA  
PUEDE DISTRIBUIRSE EN EL AIRE  
O EN EL AGUA**

**cifras altas corresponden a una  
mayor movilidad**

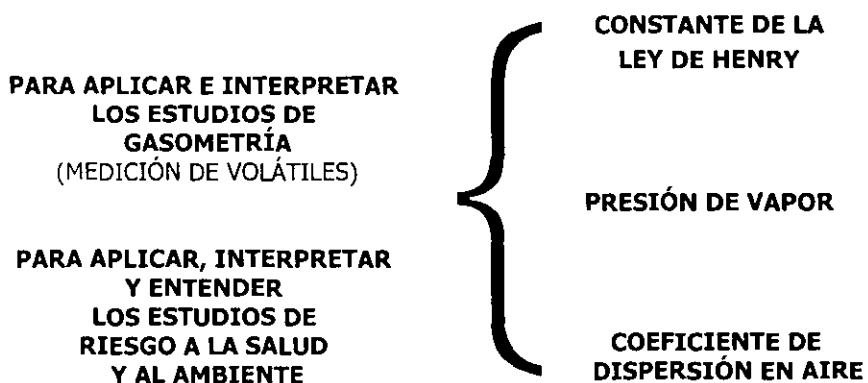
<b>COMPUESTO</b>	<b>COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN AGUA cm<sup>2</sup>/s</b>	<b>COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN AIRE cm<sup>2</sup>/s</b>
benceno	0.0000098	0.088
tolueno	0.0000094	0.085
etilbenceno	0.0000078	0.075
m-xileno	0.0000085	0.072
MTBE	0.0000940	0.079
naftaleno	0.0000075	0.059
fenantreno	0.0000074	0.033
benzo(a)pireno	0.0000090	0.043
benzo(b)fluoranteno	0.0000055	0.023
benzo(g,h,i)perileno	0.0000056	0.049

<b>COMPUESTO</b>	<b>COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN AGUA cm<sup>2</sup>/s</b>	<b>COEFICIENTE DE DISPERSIÓN EN AIRE cm<sup>2</sup>/s</b>
Aldrin	0.0000048	0.013
Dieldrin	0.0000047	0.012
1,2-Diclorobenceno	0.0000079	0.069
Hexaclorobenceno	0.0000059	0.054
Fenol	0.0000091	0.082
2-Clorofenol	0.0000095	0.050
Pentaclorofenol	0.0000061	0.056
Tetracloruro de carbono	0.0000088	0.078
Tetracloroetileno	0.0000082	0.072

**UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LAS  
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE COMPUESTOS  
ORGÁNICOS**



**UTILIDAD Y APLICACIÓN DE LAS  
PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE COMPUESTOS  
ORGÁNICOS**



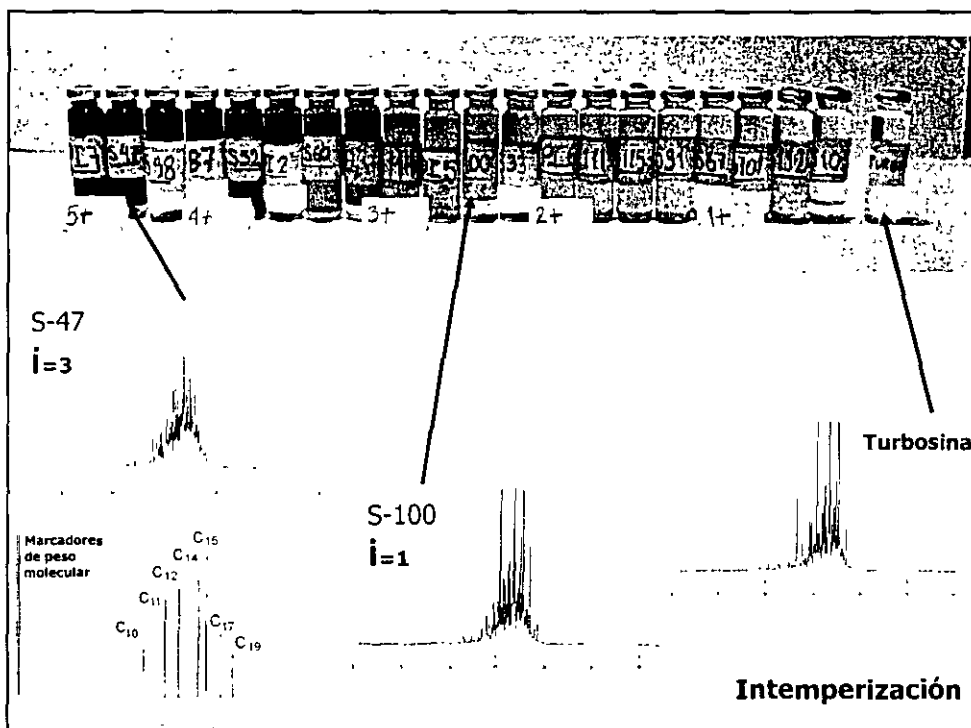
## INTEMPERIZACIÓN

Modificación de las características originales de un contaminante por efecto del tiempo, de las características del suelo y de las condiciones climatológicas del lugar.

- √ pérdida de componentes volátiles (BTEX)
- √ endurecimiento del material en el suelo, en forma de "costras" o "piedras"
- √ cambio de coloración del producto libre
- √ aumento en la viscosidad de producto libre
- √ formación de compuestos complejos por reacciones químicas y fotoquímicas



# Intemperización





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
CARACTERIZACION DE SITIOS CONTAMINADOS.**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**



**DIVISIÓN DE  
EDUCACIÓN  
CONTINUA**

**Programa 2004**



# **CARACTERIZACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS**

Dra. Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM

## **¿ QUE ES UNA CARACTERIZACIÓN ?**

### **DEFINICIÓN**

**Estudio que se realiza para identificar el tipo, grado y comportamiento de la contaminación en un sitio**

### **ALCANCE**

**Definir las acciones correctivas necesarias para reducir el nivel de contaminación y en su caso cumplir con la normatividad aplicable**

## TIPO DE PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN A ESTUDIAR

### √ **Post-emergencia ambiental**

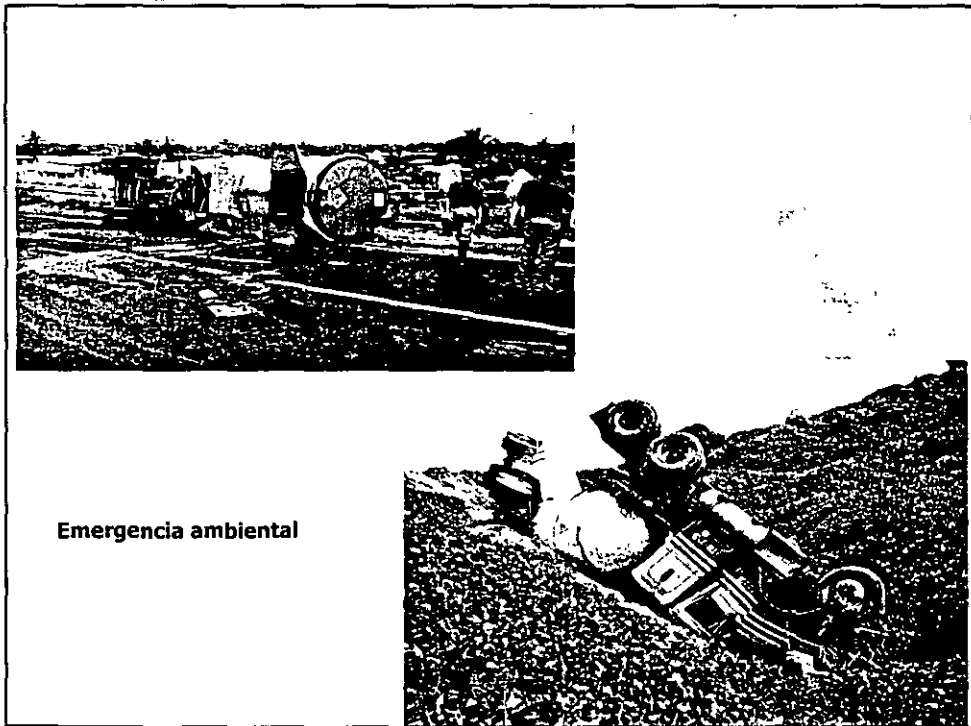
Contaminantes generalmente conocidos que se presentan de manera individual:

- origen inorgánico
- origen orgánicos

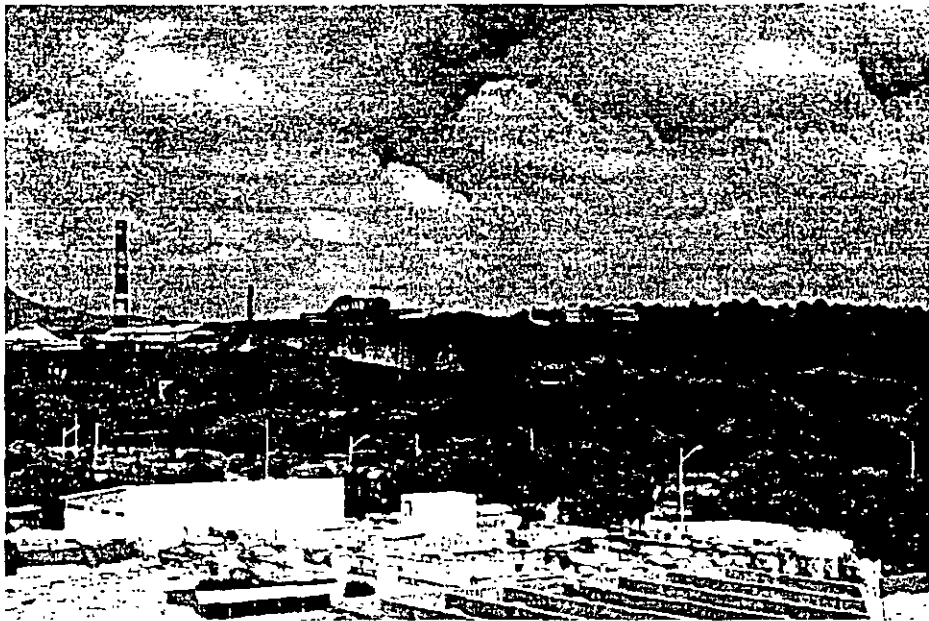
### √ **Pasivo ambiental**

Contaminantes generalmente de origen desconocido que pueden estar presentes como mezclas

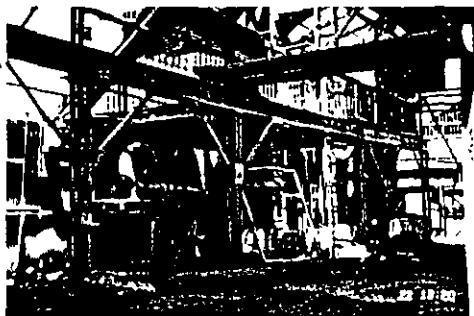


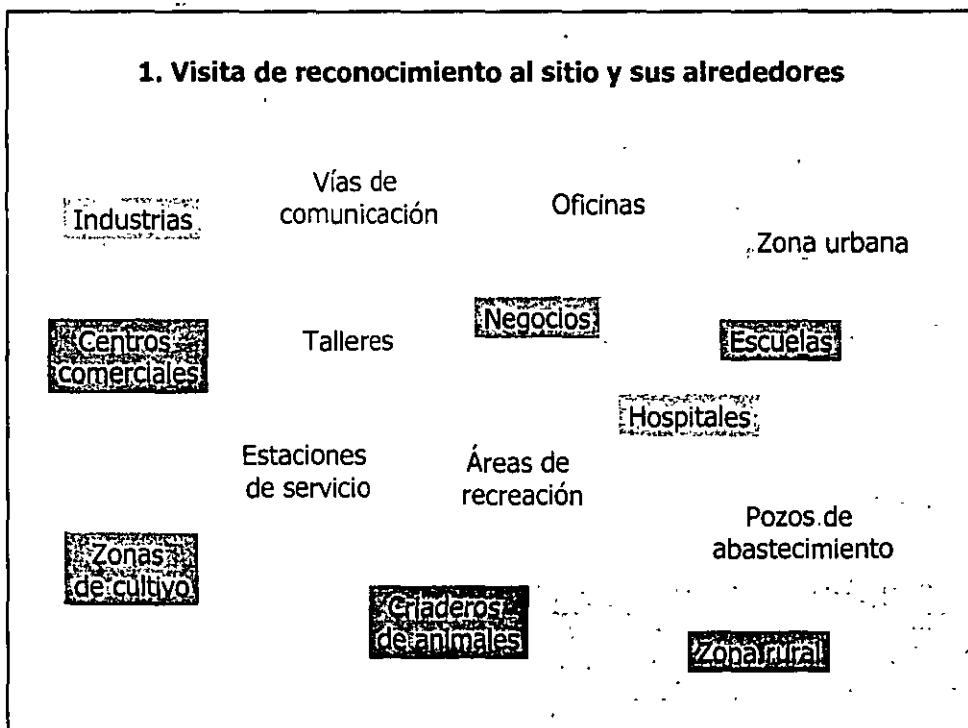
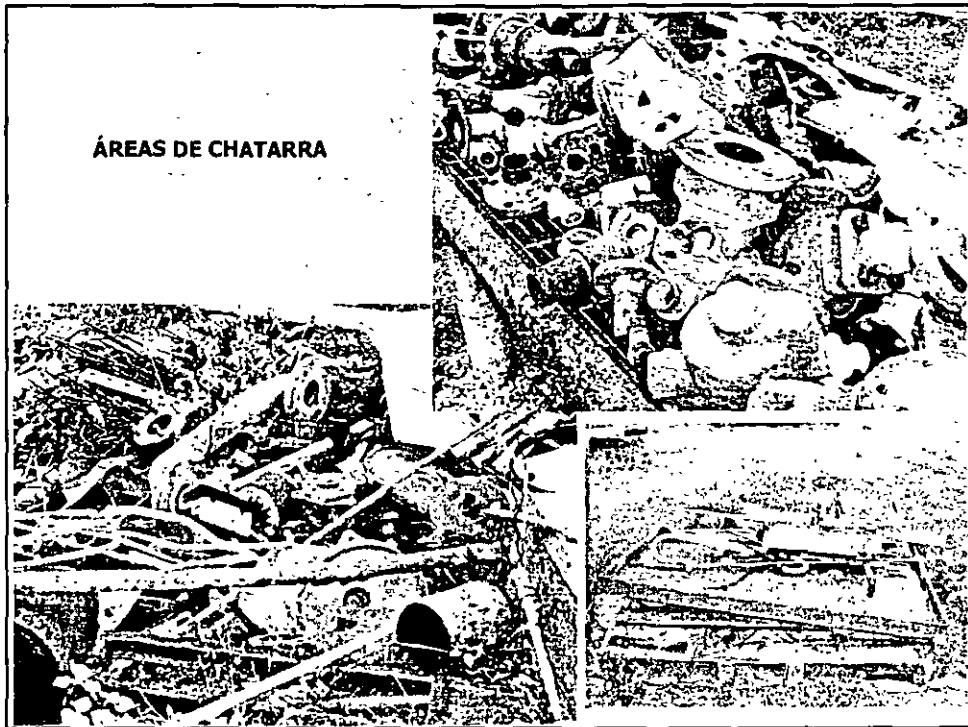


**INDUSTRIA MINERA**  
**Jales**

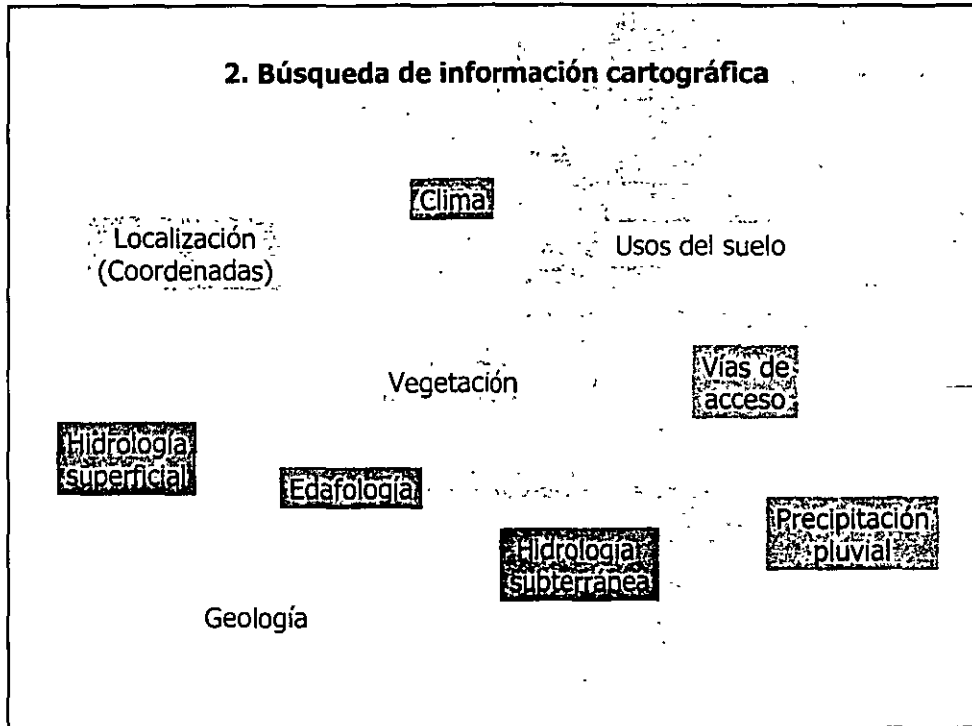


**Plantas fundidoras**  
**Escoria**

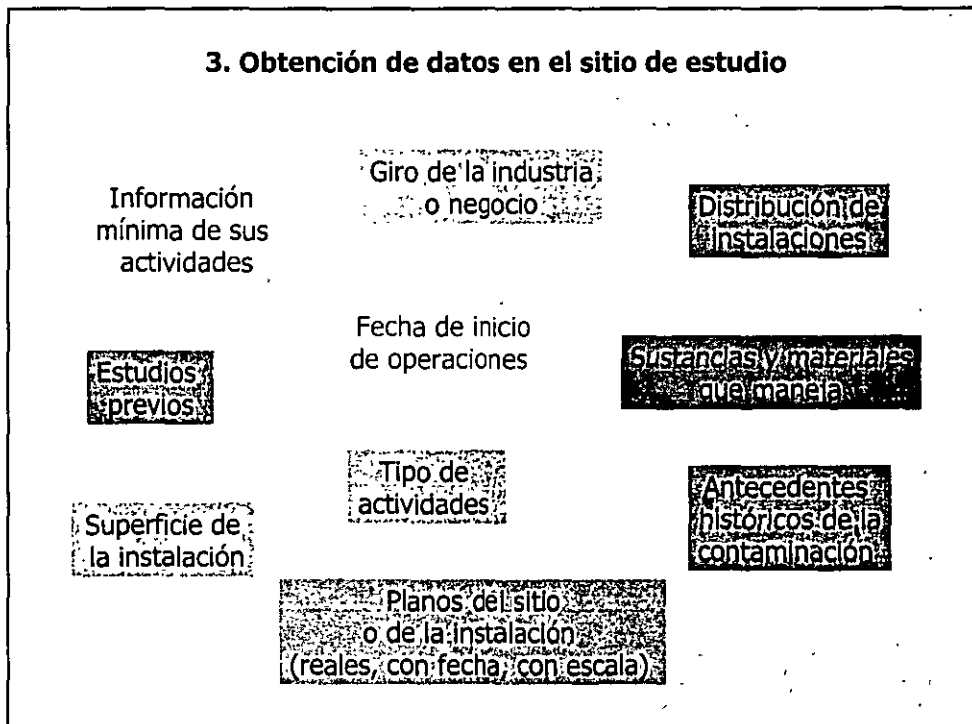


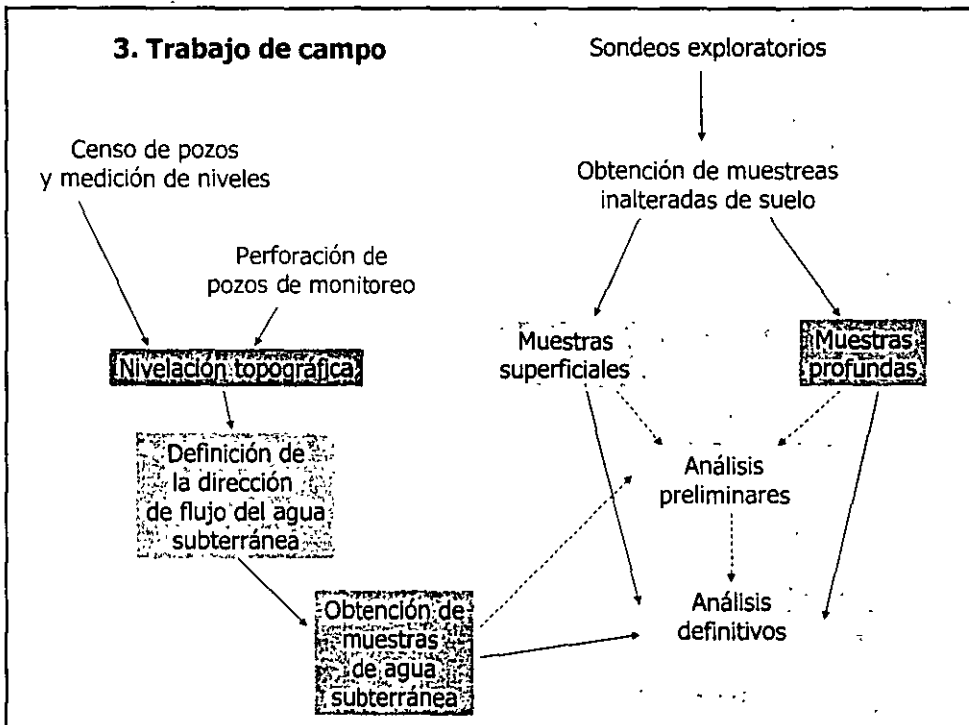
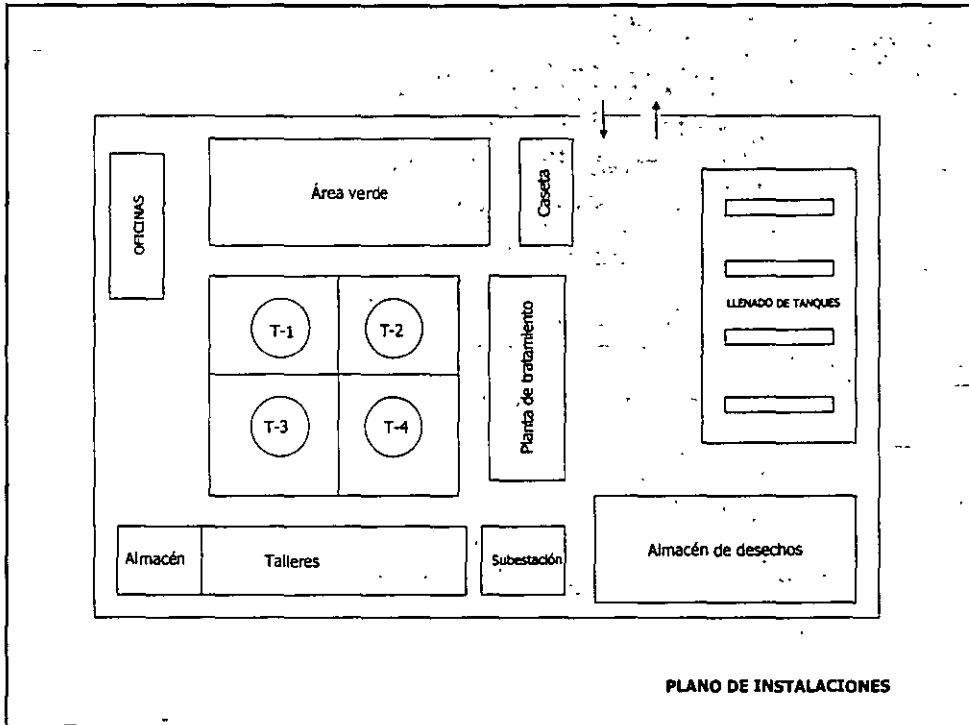


## 2. Búsqueda de información cartográfica



## 3. Obtención de datos en el sitio de estudio





## **SONDEOS EXPLORATORIOS**

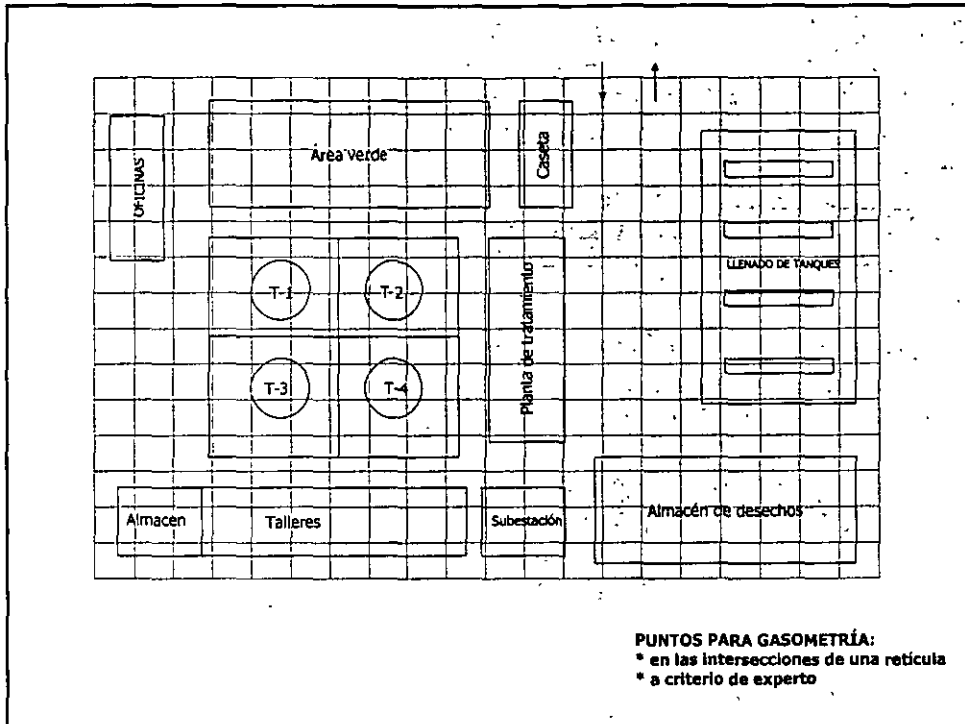
**Perforaciones previas al muestreo para conocer de manera preliminar las características de la contaminación cuando ésta en el subsuelo y definir los análisis a realizar y los puntos a muestrear**

- √ mediciones de hidrocarburos volátiles
- √ mediciones de compuestos orgánicos volátiles
- √ mediciones de pH

## **CARACTERÍSTICAS DE LOS ESTUDIOS DE GASOMETRÍA**

- √ **Muy útiles en casos de contaminación con hidrocarburos y compuestos orgánicos volátiles en general**
- √ **Permite detectar problemas de contaminación en el subsuelo, que no pueden pronosticarse desde la superficie**
- √ **Las lecturas son inmediatas y la interpretación es sencilla**
- √ **Es la mejor herramienta de apoyo para definir la localización de puntos para muestreo profundo y aquellos para instalación de pozos de monitoreo**
- √ **El costo de los equipos de medición es accesible y su aplicación es muy económica**

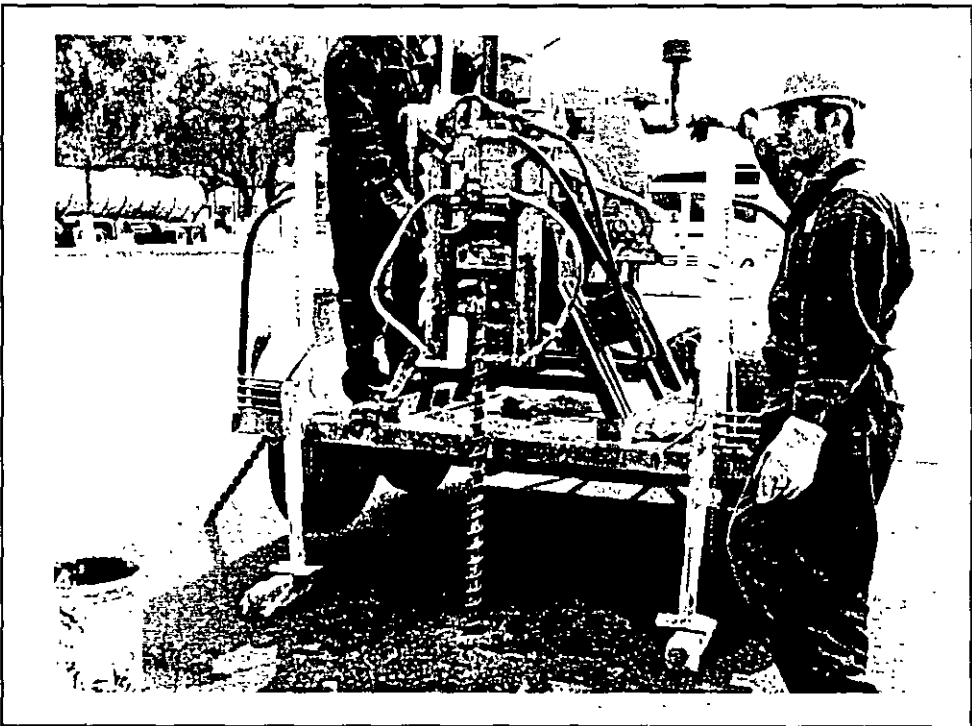




	PRODUCTOS REFINADOS	FRACCIÓN	RESPUESTA A LA GASOMETRÍA
PRODUCTOS FLUIDOS	GASOLINA →	LIGERA	<b>MUY BUENA</b> Estos productos contienen gran cantidad de volátiles, los cuales migran hacia la profundidad
	GASAVIÓN →		
	GASNAFTA →		
	GASOLVENTE →		
	QUEROSINA →	MEDIA	<b>MUY BUENA</b> Estos productos contienen volátiles, los cuales migran hacia la profundidad
	TURBOSINA →		
	DIESEL →		
PRODUCTOS VISCOSOS	GASÓLEO →	PESADA	<b>MALA</b> estos productos no contienen volátiles; además los derrames son superficiales y visibles a simple vista
	ACEITES →		
	COMBUSTÓLEO →		
	PETRÓLEO CRUDO →		

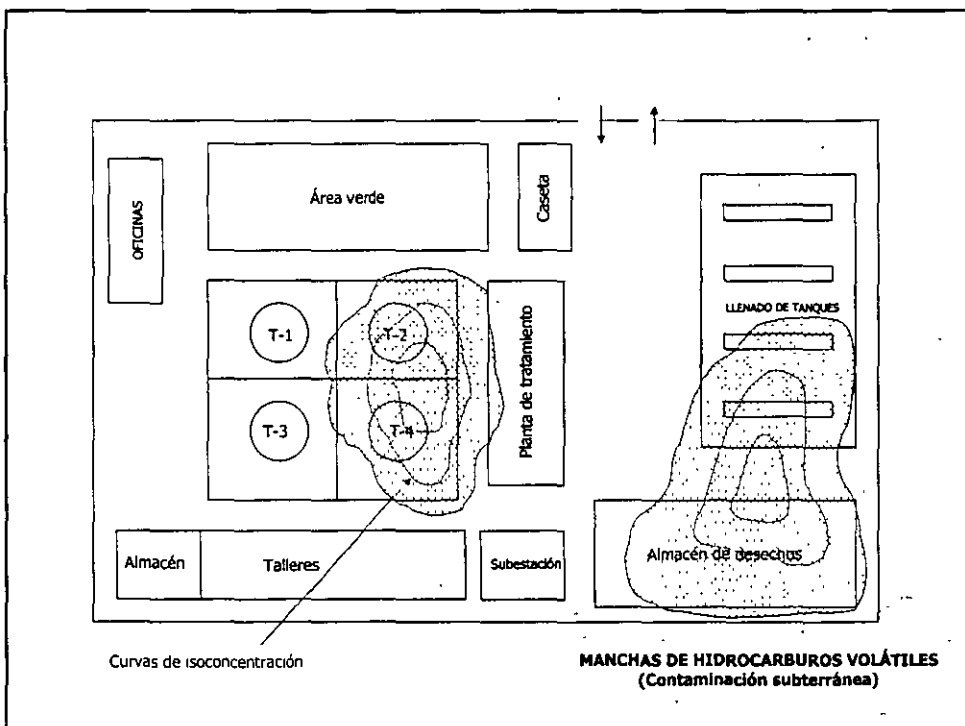
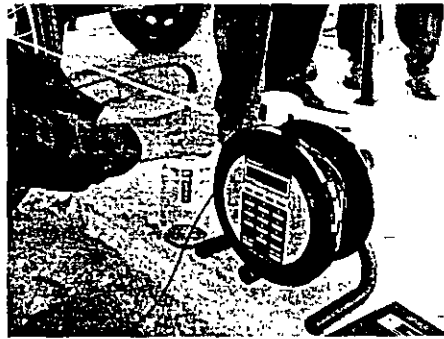
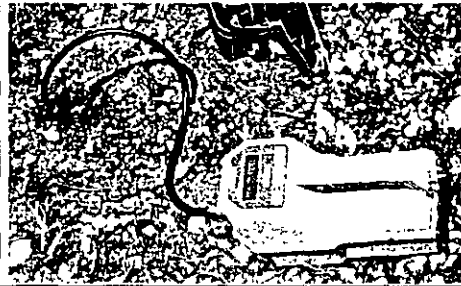
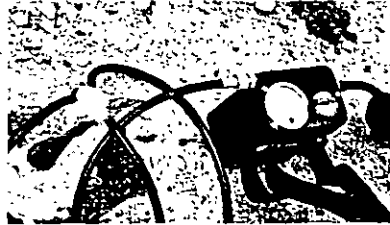


Perforaciones para gasometría ("discretas" por su diámetro pequeño)



### Instrumentos

- ◆ medidores de explosividad
- ◆ medidores de hidrocarburos volátiles (HCVs) o de compuestos orgánicos volátiles (COVs)



## DEFINICIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

### En pasivos ambientales:

- Tomar como referencia los antecedentes de la contaminación
  - Considerar la distribución de instalaciones
  - Considerar las evidencias en suelo superficial

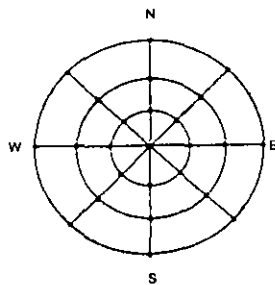
### En estudios de post-emergencia ambiental:

- Considerar las evidencias en suelo superficial  
(en caso de ácidos, sólo alrededor de la mancha principal)

### En ambos casos:

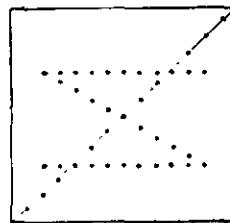
- En los puntos donde las lecturas de hidrocarburos volátiles fueron las más altas
  - La profundidad máxima de muestreo será definida por las observaciones de campo, deseablemente un metro más allá de la última muestra que presentó contaminación
- En el caso de metales se requieren muestras de un sitio control para obtener **valores de fondo** especialmente en el caso de metales

### Ejemplos de patrones de muestreo



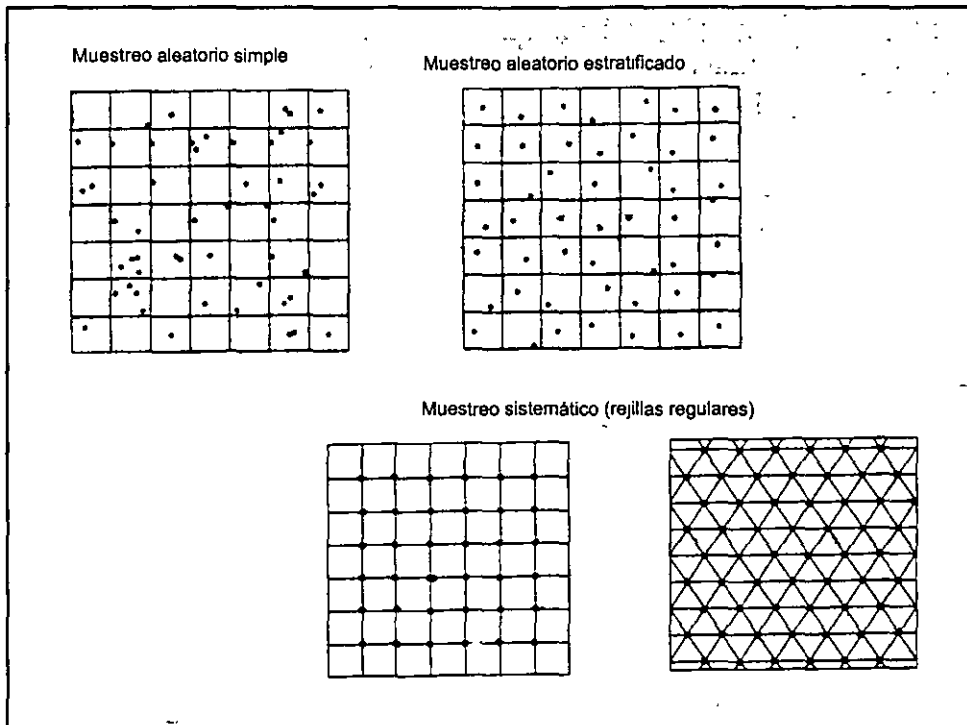
#### Rejillas circulares

- Para delinear una contaminación local
- El radio dependerá del área de influencia



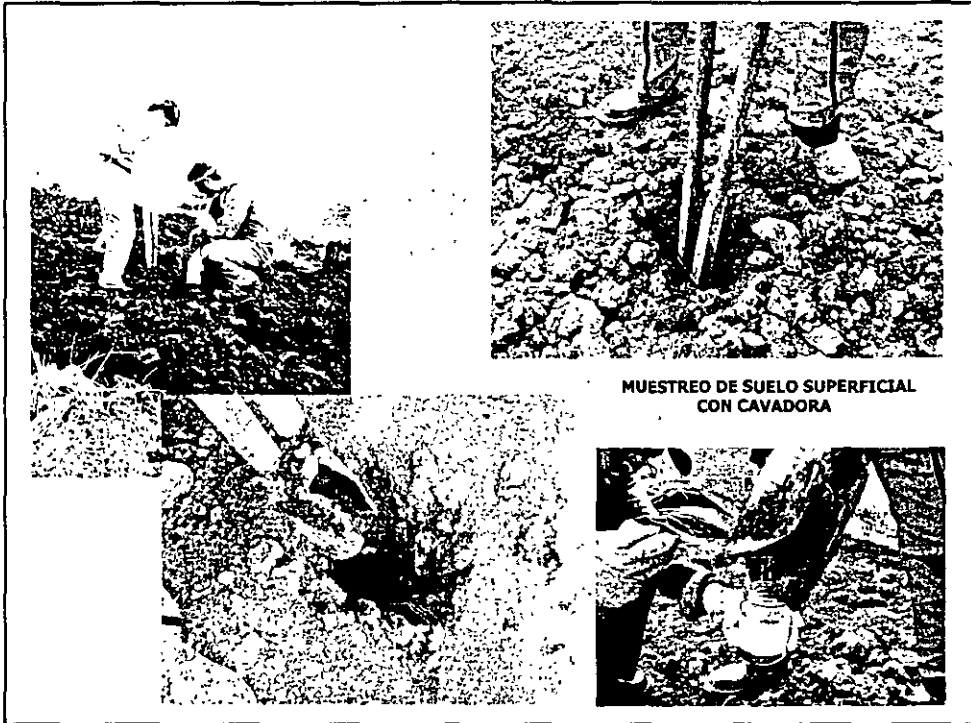
#### No sistemático (muestreo Irregular)

- En zigzag
- Distribución relativamente homogénea
- Diseño para tomar muestras compuestas
- Poco adecuado para definir distribución de un parámetro

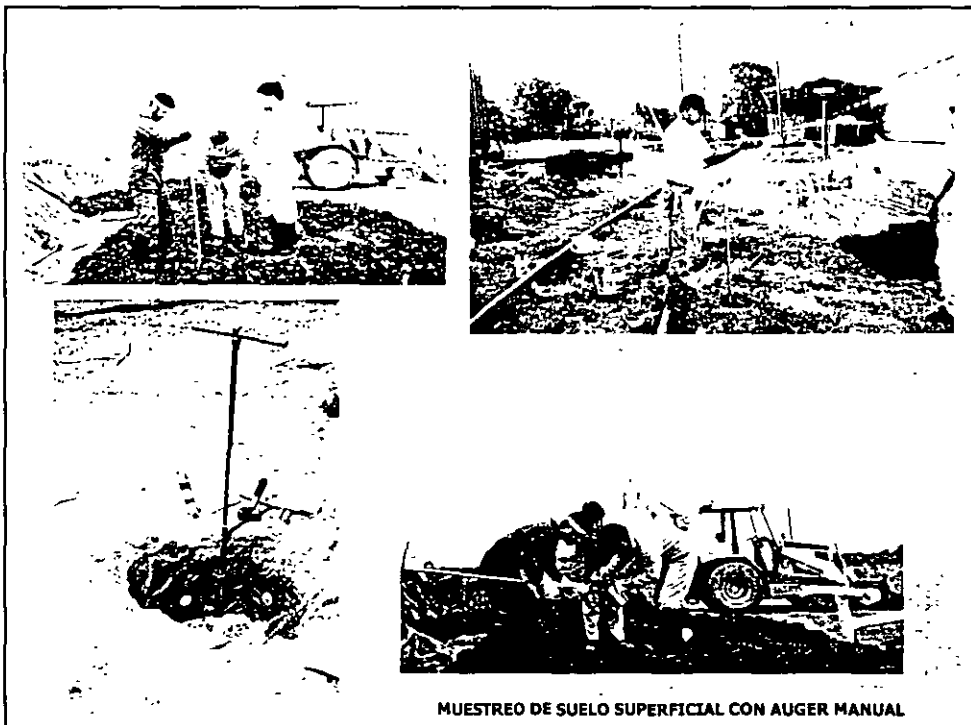


## **OBTENCIÓN DE MUESTRAS INALTERADAS DE SUELO**

- **En frascos de vidrio para análisis de hidrocarburos y compuestos orgánicos en general**
  - **En cartuchos transparentes bien sellados**
- **Para análisis de hidrocarburos volátiles tomar la muestra directamente del suelo en dispositivos especiales para evitar volatilización**



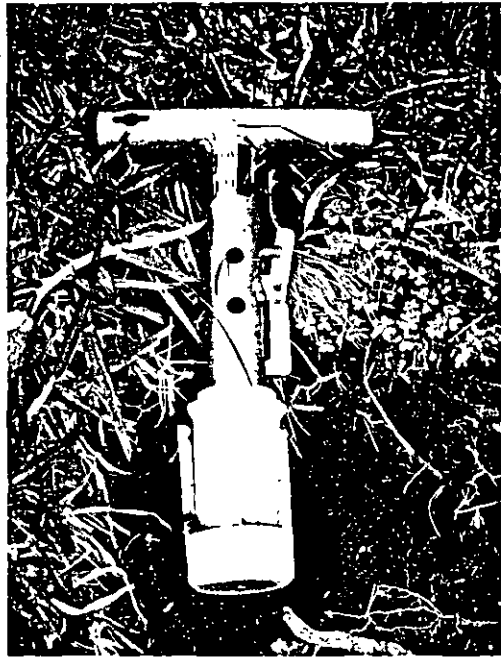
**MUESTRO DE SUELO SUPERFICIAL  
CON CAVADORA**



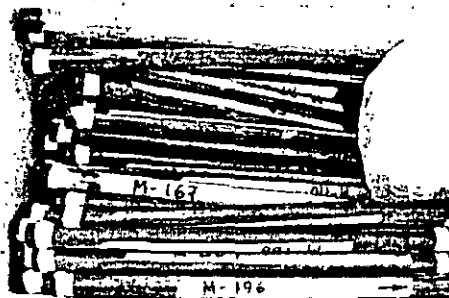
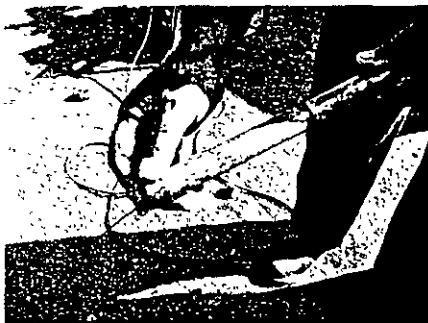
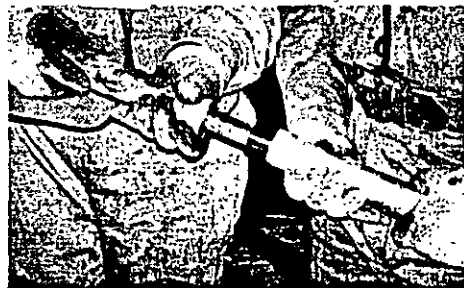
**MUESTRO DE SUELO SUPERFICIAL CON AUGER MANUAL**

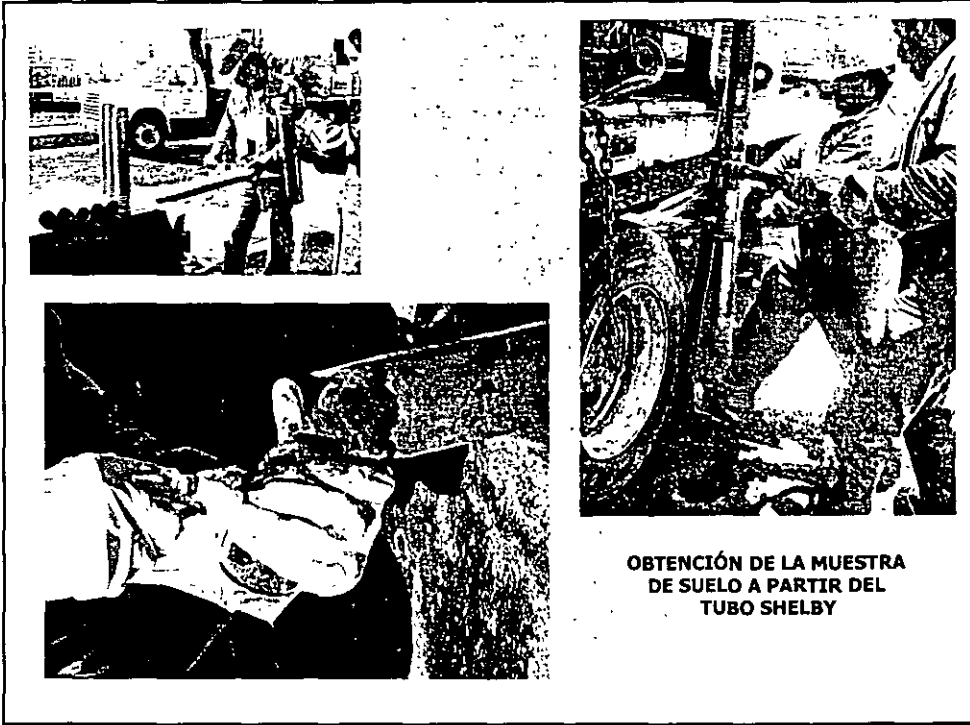


MUESTREO DE SUELO  
PARA ANÁLISIS DE VOLÁTILES

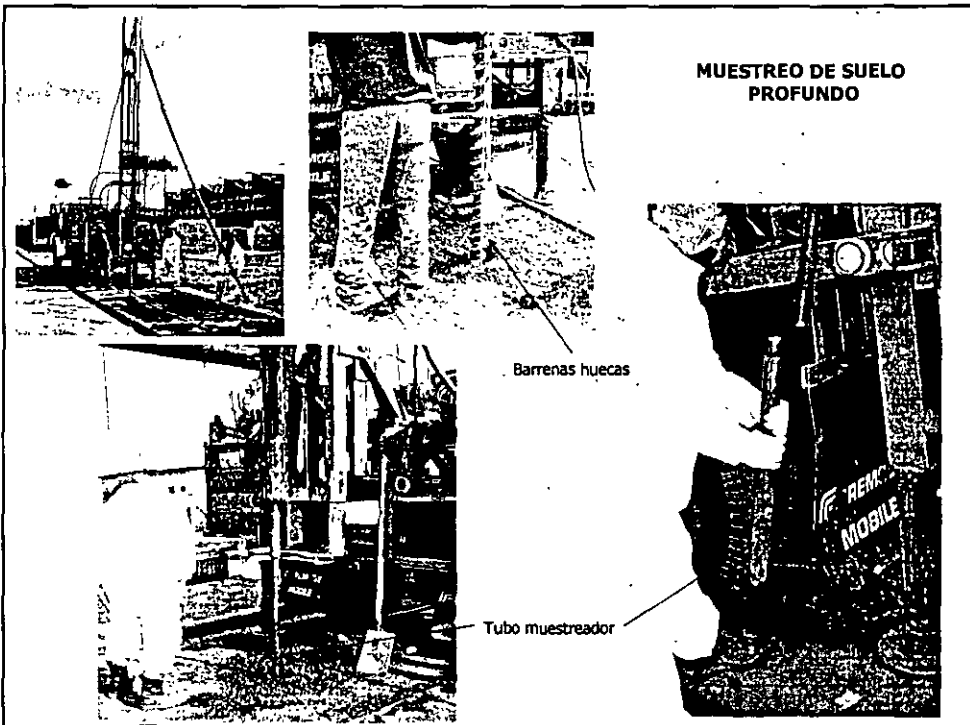


MUESTREO DE SUELO SUBSUPERFICIAL Y PROFUNDO EN CARTUCHOS TRANSPARENTES





**OBTENCIÓN DE LA MUESTRA  
DE SUELO A PARTIR DEL  
TUBO SHELBY**

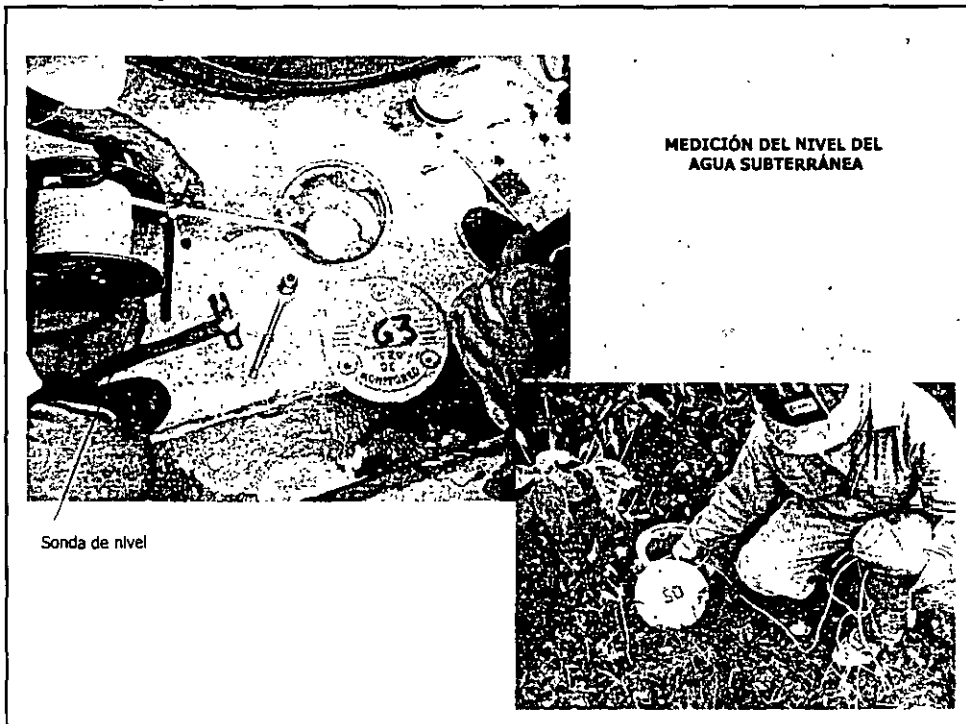


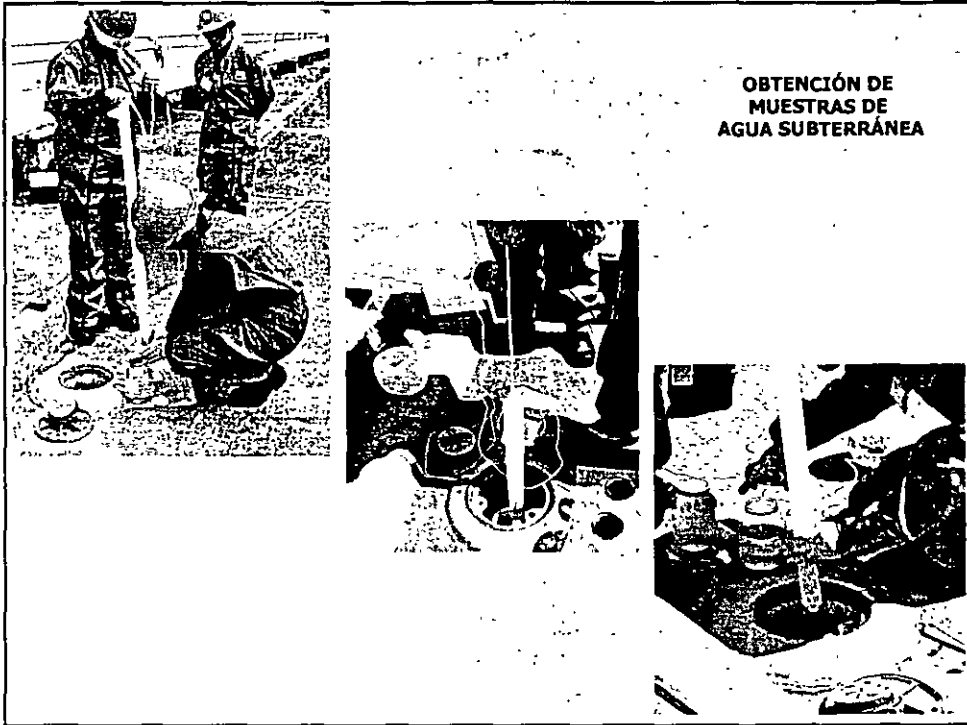
**MUESTREO DE SUELO  
PROFUNDO**

Barrenas huecas

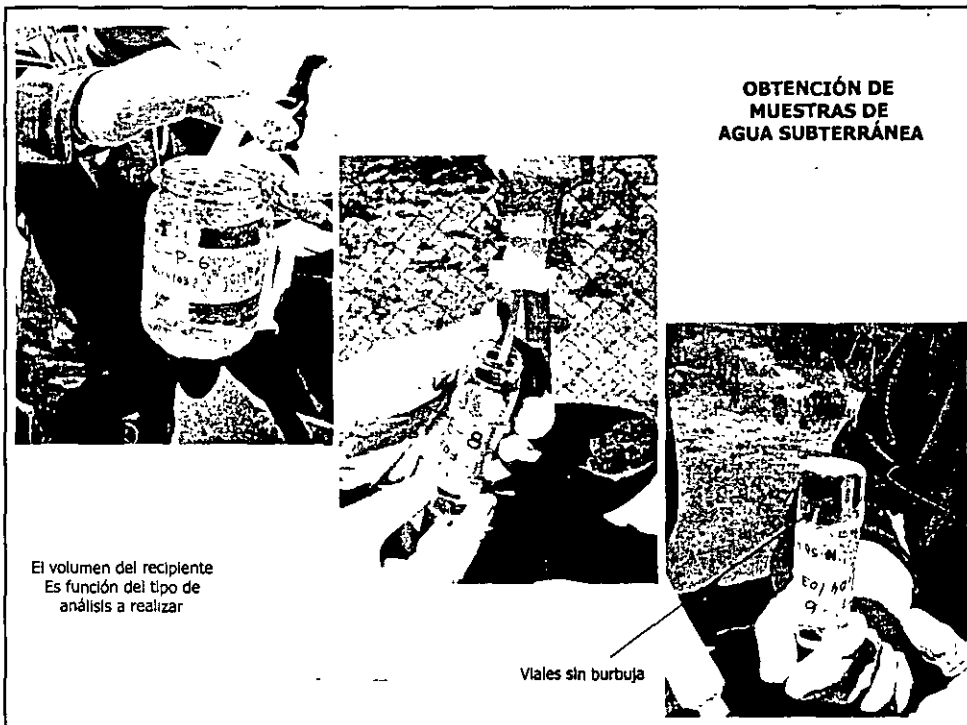
Tubo muestreador







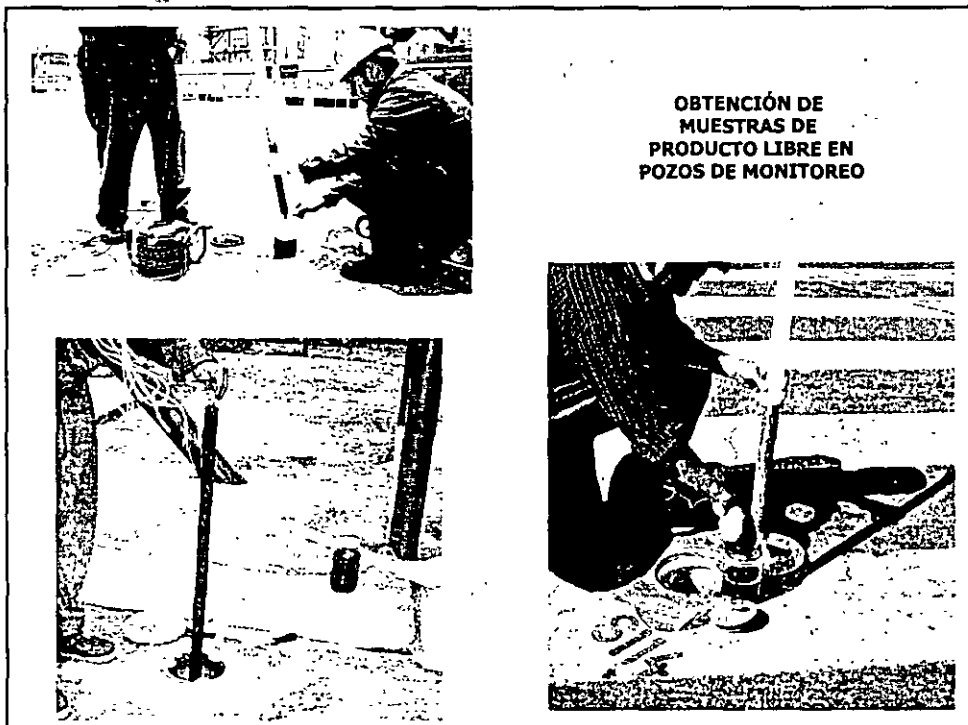
**OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

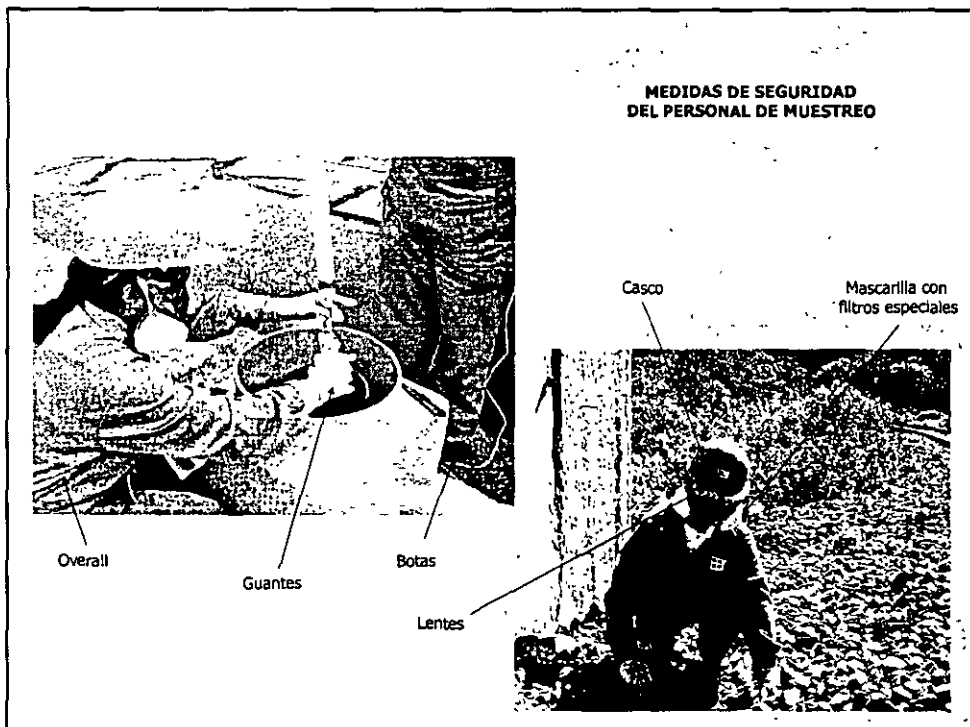
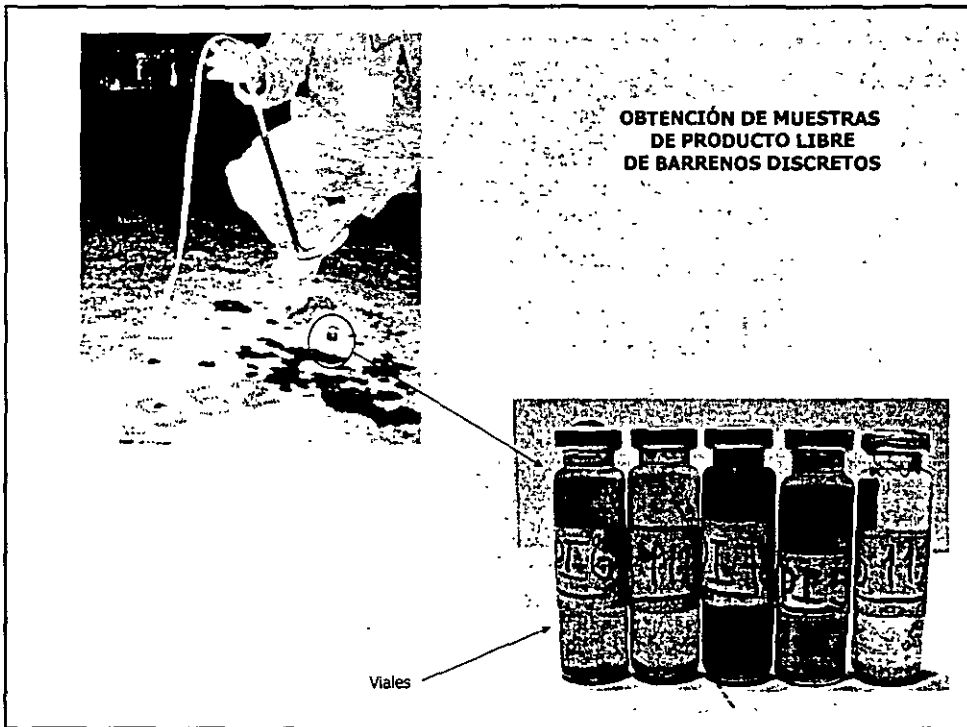


**OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA**

El volumen del recipiente  
Es función del tipo de  
análisis a realizar

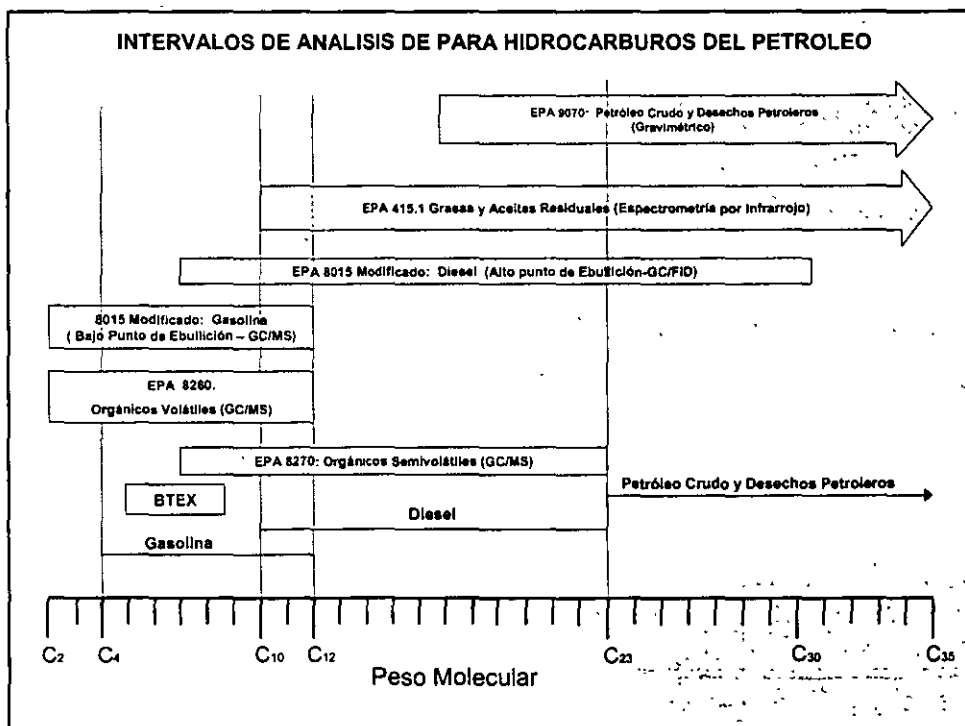
Viales sin burbuja

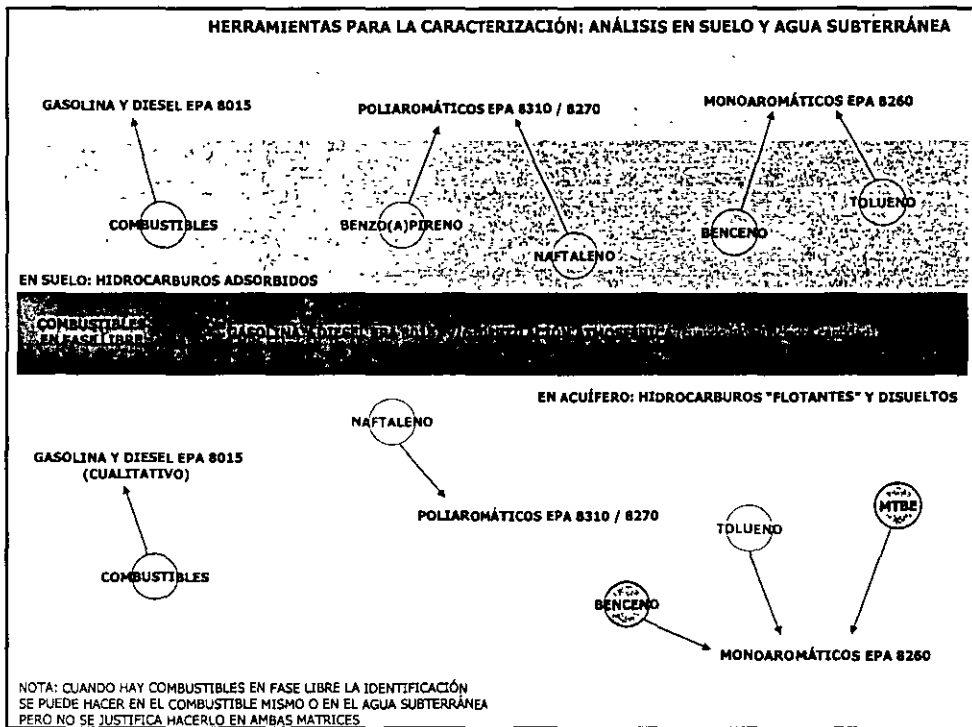
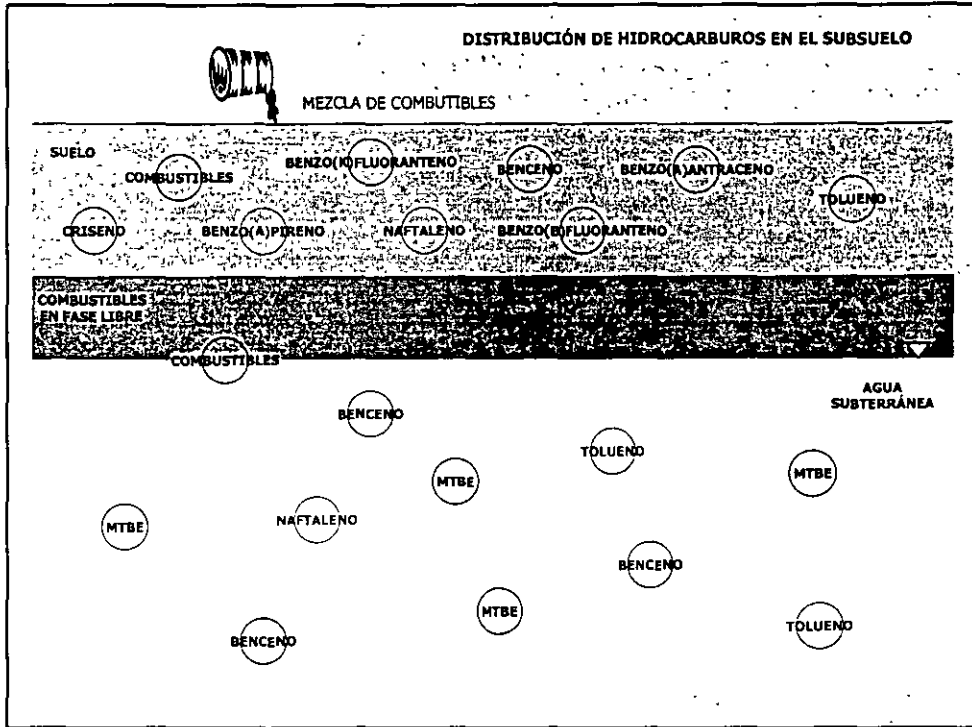




## 4. ANÁLISIS DE CONTAMINANTES

- Adsorbidos en suelo
- Disueltos en agua
- Aquellos combustibles que conforman el producto libre que flota sobre el agua subterránea





## **METALES ASOCIADOS AL PETRÓLEO CRUDO Y COMBUSTIBLES PESADOS**

proporción

mayor



menor

- Vanadio
- Manganeso
- Níquel
- Cadmio

riesgo a la salud

menor



mayor

## **entidad mexicana de acreditación, a.c.**

### **Ramas que acredita:**

- √ Agua
- √ Residuos, fuentes fijas, ambiente laboral (suelos)
- √ Química
- √ Alimentos (agua potable)

**La ema, a.c. entrega al laboratorio un documento con el No. de Acreditación por cada rama indicando la vigencia de la misma, el listado con todas las pruebas acreditadas y de los signatarios autorizados.**

Esta información debe estar disponible para los involucrados.

**organismos encargados de la aprobación de métodos analíticos que la ema, a.c. acredita a los laboratorios de prueba**

√ **CENICA-INE**

**fuentes fijas, residuos y ambiente laboral (suelos)**

**NOM-085-ECOL-1994; PRY-NOM-098-ECOL-2000; NOM-052-ECOL-1993;  
NOM-053-ECOL-1993; NOM-010-STPS-1999; (NOM-EM-138-ECOL-2002)**

√ **SECRETARÍA DE SALUD**

**alimentos (agua potable)**

**NOM-127-SSA1-1994 (2000);**

√ **CNA**

**aguas naturales, subterránea, residual**

**NOM-001-ECOL-1996, Lineamientos de la Ley Federal de Derechos en  
Materia de Agua, Criterios Ecológicos de Calidad del Agua**

**ANÁLISIS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS ADSORBIDOS EN SUELO**

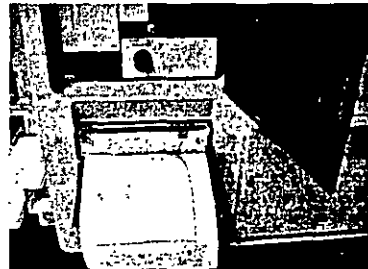
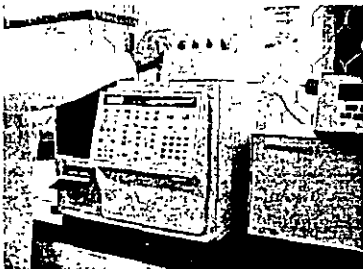
√ **Combustibles** **EPA 8015 C**

√ **Monoaromáticos (BTEX)** **EPA 8260 B**  
(benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos)

√ **Poliaromáticos** **EPA 8310**

√ **Orgánicos volátiles** **EPA 8260 B**

√ **Orgánicos semivolátiles** **EPA 8270 D**





PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003

Tabla 1. HIDROCARBUROS QUE DEBERÁN ANALIZARSE EN FUNCIÓN DEL PRODUCTO CONTAMINANTE

PRODUCTO CONTAMINANTE	H I D R O C A R B U R O S					
	FRACCIÓN PESADA	POLIAROMÁTICOS	FRACCIÓN MEDIA	POLIAROMÁTICOS	FRACCIÓN LIGERA	BTEX
Mezclas desconocidas	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Petróleo crudo	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Combustóleo	XXX	XXX				
Emulsiones asfálticas	XXX	XXX				
Asfalto	XXX	XXX				
Parafinas	XXX	XXX				
Petrolatos	XXX	XXX				
Acetles	XXX	XXX				
Gasóleo			XXX	XXX		
Diesel			XXX	XXX		
Turbosina			XXX	XXX		
Keroseno			XXX	XXX		
Creosota			XXX	XXX		
Gasavión					XXX	XXX
Gasolvente					XXX	XXX
Gasolinas					XXX	XXX
Gasnafta					XXX	XXX

PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003

Tabla 2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS mg/kg base seca

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE AGRÍCOLA (Incluye forestal, recreativo y de conservación)	USO DE SUELO PREDOMINANTE RESIDENCIAL (Incluye comercial)	USO DE SUELO PREDOMINANTE INDUSTRIAL	MÉTODO ANALÍTICO
LIGERA	200	200	500	Anexo A.1
MEDIA	1,000	1,000	3,000 (1,000)	Anexo A.2
PESADA	3,000 (1,000)	3,000 (1,000)	6,000 (2,000)	Anexo A.3

PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003

Tabla 3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS EN SUELOS  
mg/kg base seca

HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS	USO DE SUELO PREDOMINANTE AGRÍCOLA (forestal, recreativo y de conservación)	USO DE SUELO PREDOMINANTE RESIDENCIAL (Incluye comercial)	USO DE SUELO PREDOMINANTE INDUSTRIAL	MÉTODO ANALÍTICO
Benceno	6	6	15	Anexo A.4
Tolueno	40	40	100	
Etibenceno	10	10	25	
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	
Benzopireno	2	2	2	Anexo A.5
Dibenzo(a,h)antraceno	2	2	2	
Benzo(a)antraceno	2	2	2	
Benzo(b)fluoranteno	2	2	2	
Benzo(k)fluoranteno	8	8	8	
Indeno(1,2,3-cd)pireno	2	2	2	

**NOM-133-ECOL-2000**

DOF 10 diciembre 2001

PROTECCIÓN AMBIENTAL

BIFENILOS POLICLORADOS (BPCs) ESPECIFICACIONES DE MANEJO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EMISIONES AL MEDIO AMBIENTE DE BPCs  
EN TRATAMIENTOS TÉRMICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

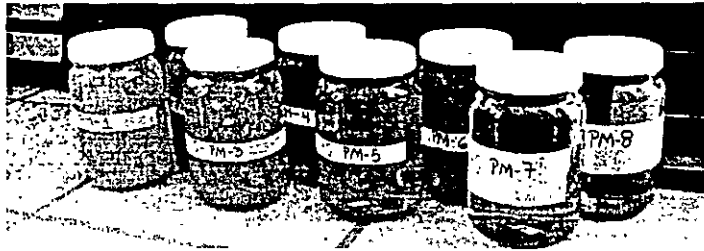
EMISIONES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
a la atmósfera	0.05 microgramos/m <sup>3</sup>
en agua residual	5 microgramos/l
en sólidos residuales	menos de 50 mg/kg BS

LÍMITES MÁXIMOS DE CONTAMINACIÓN EN SUELO

USO DE SUELO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE EN mg/kg BS con la sumatoria de todos los congéneres de BPCs detectados
agrícola	0.5
residencial	5
industrial/comercial	25

### ANÁLISIS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS EN AGUA SUBTERRÁNEA

- ✓ **Combustibles flotantes** EPA 8015 C
- ✓ **Monoaromáticos disueltos (BTEX) y MTBE** EPA 8260 B  
(benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos)
- ✓ **Poliaromáticos disueltos** EPA 8310
- ✓ **Orgánicos volátiles** EPA 8260 B
- ✓ **Orgánicos semivolátiles** EPA 8270 D

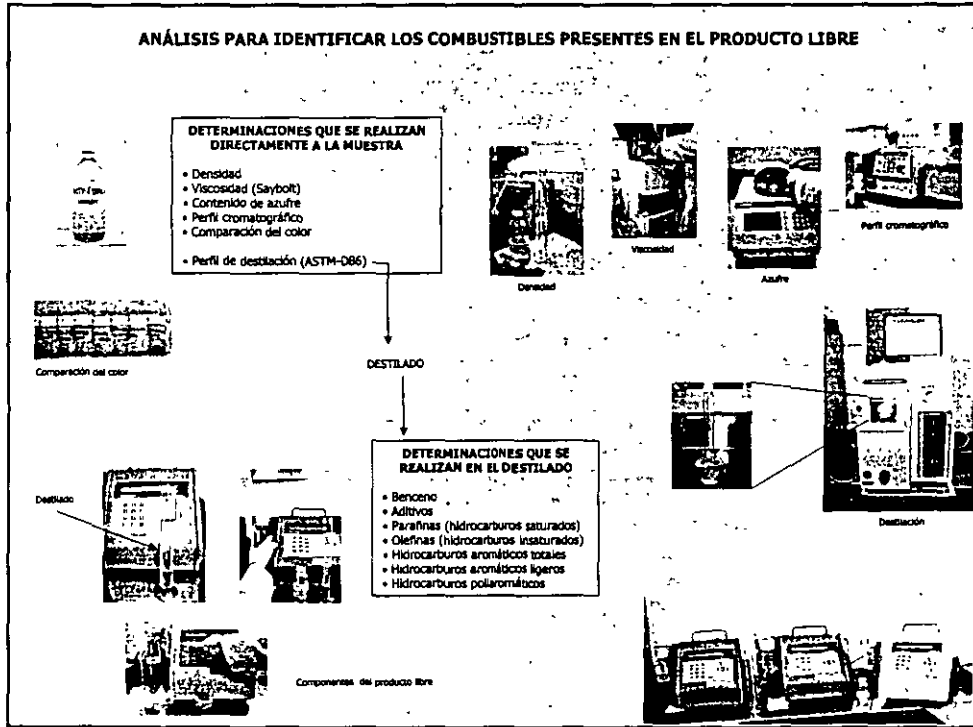


**NOM-127-SSA1-1994 (2000)**  
versión actualizada en el DOF 22 noviembre 2000

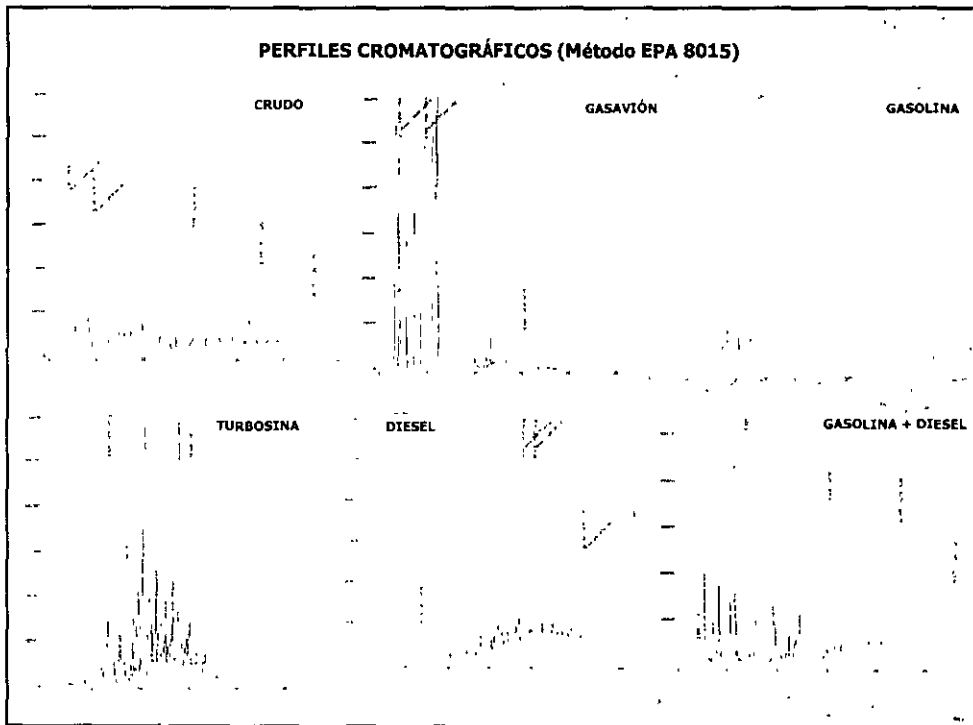
**SALUD AMBIENTAL**  
**AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO**  
**LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A**  
**QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA**  
**PARA SU POTABILIZACIÓN**

HIDROCARBUROS	LÍMITE PERMISIBLE mg/l
benceno	0.010
tolueno	0.700
etilbenceno	0.300
xilenos	0.500

## ANÁLISIS PARA IDENTIFICAR LOS COMBUSTIBLES PRESENTES EN EL PRODUCTO LIBRE



## PERFILES CROMATOGRÁFICOS (Método EPA 8015)



**2do. GRUPO DE CRITERIOS INTERNOS DE RESTAURACIÓN  
DE SUELOS CONTAMINADOS CON INORGÁNICOS TÓXICOS  
(METALES PESADOS) Y OTROS**

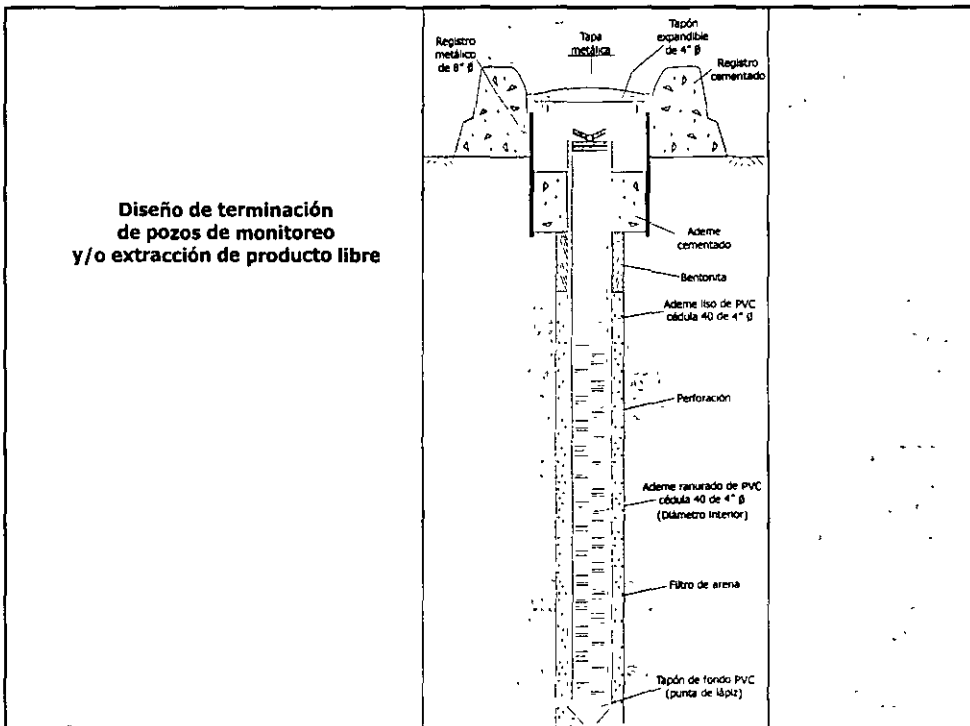
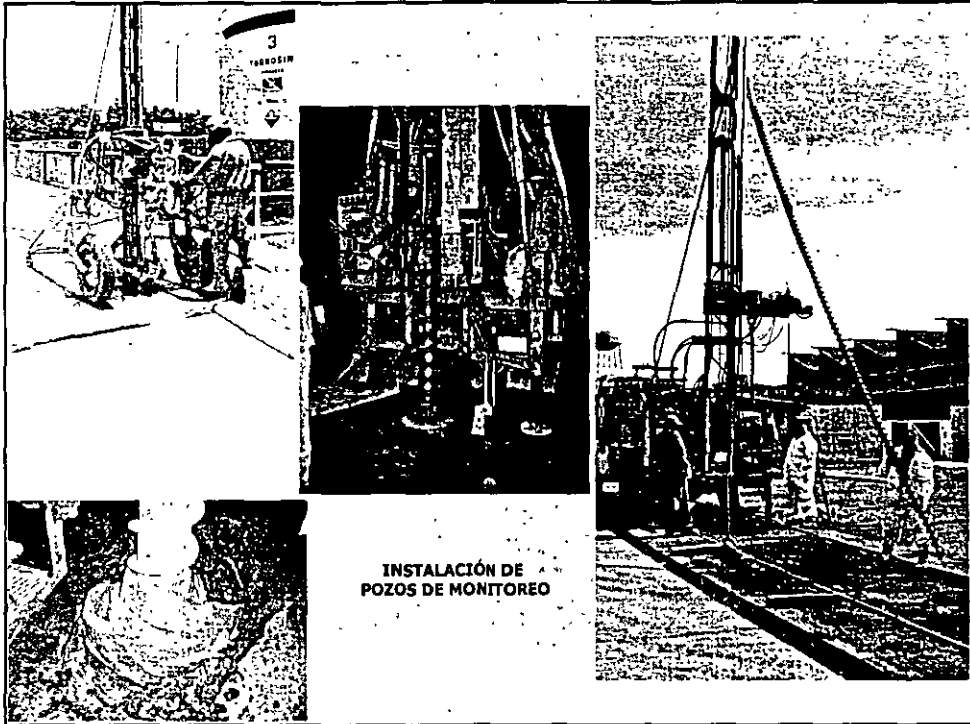
GDT  
Profepa  
1999

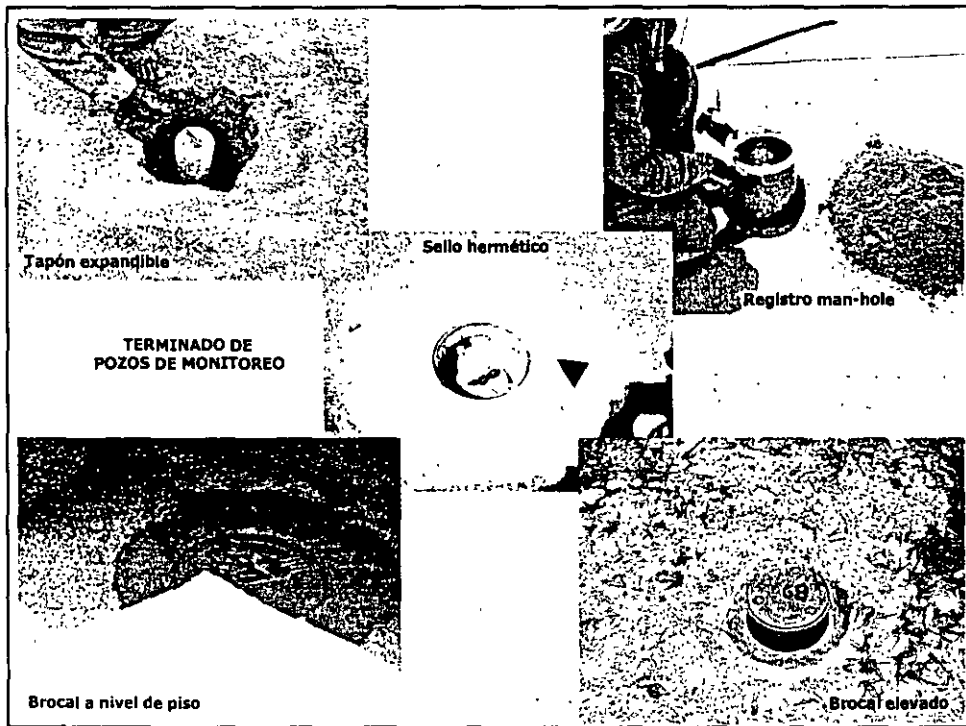
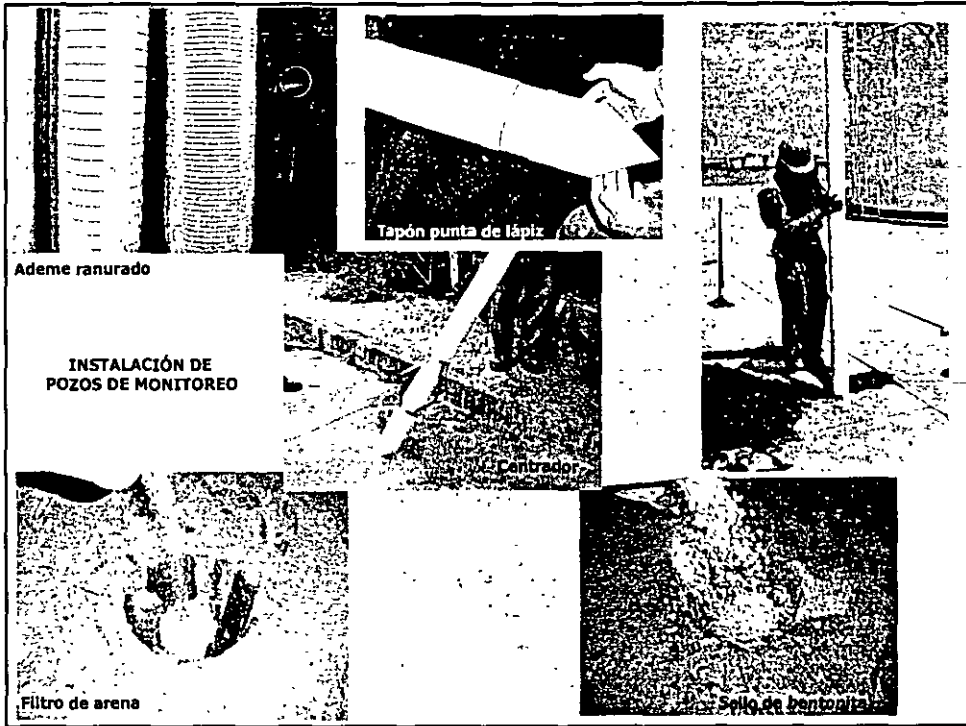
Contaminante	Uso Residencial mg/kg ppm	Agrícola mg/kg ppm	Uso Industrial mg/kg ppm	Método Analítico (EPA)
PLOMO TOTAL	200	100	1,500	7420
ARSENICO TOTAL	20	20	40	7061
BARIO TOTAL	750	150	1,500	7080
CADMIO TOTAL	20	20	100	7130
MERCURIO TOTAL	20	20	100	7471
NIQUEL TOTAL	150	75	700	7520
SELENIO TOTAL	20	20	100	7741
ZINC TOTAL	800	300	1,500	7950
CROMO TOTAL	375	75	750	7190
CIANURO	50	5	500	9010 A
ACRILAMIDA	0.2	0.02	2.4	8260C
ACRILONITRILLO	1.4	0.02	4.8	8260C
PLOMO ORGANICO	0.5	0.1	1	PENDIENTE
HIDROCARBUROS MONOAROMATICOS TOTALES (Arominas + otros disolventes)	40	40	100	8260C

Estos criterios son referencias genericas. Cada propuesta de restauración se resuelve caso por caso

**LÍMITES PERMISIBLES A UTILIZAR EN CASOS DE CONTAMINACIÓN  
DE AGUA CON METALES**

CONTAMINANTE (mg/l)	AGUA POTABLE NOM-127-SSA1-1994 (2000)	FUENTE DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE CECCA-001-1989
Aluminio	0.20	0.02
Arsénico	0.05	0.05
Bario	0.70	1.00
Cadmio	0.005	0.01
Cobre	2.00	1.00
Cromo	Total 0.05	Cromo VI 0.05
Fierro	0.30	0.30
Manganeso	0.15	0.10
Mercurio	0.001	0.001
Níquel	-	0.01
Plata	-	0.05
Plomo	0.01	0.05
Zinc	5.00	5.00





## **ALGO QUE SIEMPRE SE DEBE RECORDAR**

**Todo estudio de caracterización  
debe ser planeado para cubrir las  
necesidades de cada  
sitio en particular**

### **PREGUNTAS QUE DEBE RESPONDER UN ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN**

- **QUÉ TIPO DE CONTAMINANTES EXISTEN?**
- **CUÁL ES O FUE LA FUENTE DE CONTAMINACIÓN?**
- **CUÁL ES LA DISTRIBUCIÓN DE LOS CONTAMINANTES?**
- **CUALES SON LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN EN SUELO Y EN AGUA SUBTERRÁNEA?**
- **LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN REBASAN ALGUNA NORMA OFICIAL O DISPOSICIÓN OFICIAL?**
- **LA CONTAMINACIÓN SE ENCUENTRA DENTRO DEL PREDIO, O REBASA EL LÍMITE PERIMETRAL?**
- **HAY TERCEROS AFECTADOS?**



## **ALGUNOS COSTOS DE LOS CONCEPTOS DE CARACTERIZACIÓN**

**Perforaciones**

**Mediciones de campo**

**Obtención de muestras inalteradas**

**Análisis de contaminantes**

---

<b>Perforación de sondeos exploratorios</b>	<b>\$ 1,500 - \$ 4,000 metro lineal</b>
<b>Perforación e instalación de pozos de monitoreo</b>	<b>\$ 5,000 - \$ 10,000 metro lineal</b>
<b>Análisis de contaminantes</b>	<b>\$ 800 - \$ 2,000 por grupo de compuestos</b>

**[ssb@pumas.iingen.unam.mx](mailto:ssb@pumas.iingen.unam.mx)**



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.

CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.

TEMA:  
BIORREMEDIACIÓN.

COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.

DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA



DIVISIÓN DE  
EDUCACIÓN  
CONTINUA

Programa 2004

# **BIORREMEDIACIÓN**

**Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM**

## **BIORREMEDIACIÓN**

**Técnicas para el saneamiento  
de suelos y cuerpos de agua  
contaminados  
mediante el uso de  
microorganismos vivos o sus enzimas que  
sean capaces de transformar o degradar  
contaminantes a compuestos inocuos**

## **CARACTERÍSTICAS DE LAS TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN**

---

- √ **económicas: más baratas que otras tecnologías**
- √ **efectivas: los contaminantes son realmente transformados y muchos de ellos son mineralizados**
- √ **versátiles: el proceso se adapta a las condiciones del sitio según sus requerimientos**
- √ **seguras: amables con el ambiente**

## **En biorremediación pueden ocurrir reacciones de:**

- √ **Biodegradación**
- √ **Biotransformación**
- √ **Bioacumulación**

## **BIODEGRADACIÓN**

**CONTAMINANTES + MICROORGANISMOS + NUTRIENTES**



condiciones favorables  
(pH, oxígeno, humedad)

**BIÓXIDO DE CARBONO**

**MINERALIZACIÓN**

## **BIOTRANSFORMACIÓN**

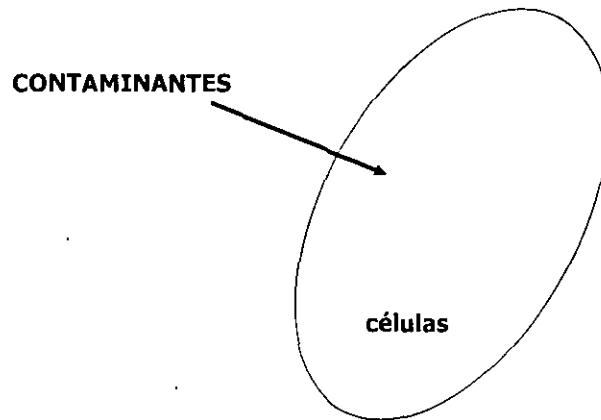
**CONTAMINANTES + MICROORGANISMOS + NUTRIENTES**



condiciones favorables  
(pH, oxígeno, humedad)

**COMPUESTOS QUÍMICAMENTE DIFERENTES**

## **BIOACUMULACIÓN**



**LA BIORREMEDIACIÓN FUNCIONA PARA  
COMPUESTOS ORGÁNICOS  
BIODEGRADABLES O BIOTRANSFORMABLES  
PRESENTES EN SUELOS Y CUERPOS DE AGUA**

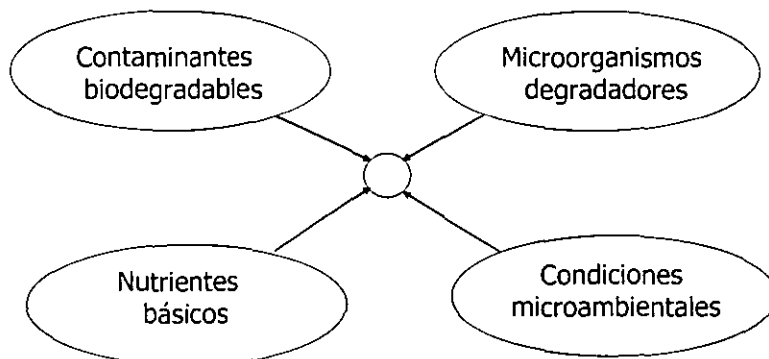
**NO FUNCIONA PARA  
COMPUESTOS RECALCITRANTES  
porque son no-biodegradables**

## CARACTERÍSTICAS MICROBIANAS DEL SUELO

---

- **Baja población microbiana cuantificable en el laboratorio (10<sup>6</sup> a 10<sup>7</sup> bacterias heterótrofas/g de suelo)**
  - **Microorganismos adheridos a la matriz del suelo**
  - **Microorganismos adaptados a una gran variedad de compuestos principalmente de tipo orgánico que satisfacen sus requerimientos nutricionales**
  - **Microorganismos adaptables a condiciones microambientales extremas**
- 

Para que ocurra la biorremediación se requiere ....



**MICROORGANISMOS INVOLUCRADOS  
EN LA BIODEGRADACIÓN O BIOTRANSFORMACIÓN  
DE CONTAMINANTES AMBIENTALES**

- **BACTERIAS**
- HONGOS
- LEVADURAS
- ACTINOMICETOS
- ALGAS

**ATRIBUTOS DE LAS BACTERIAS**

---

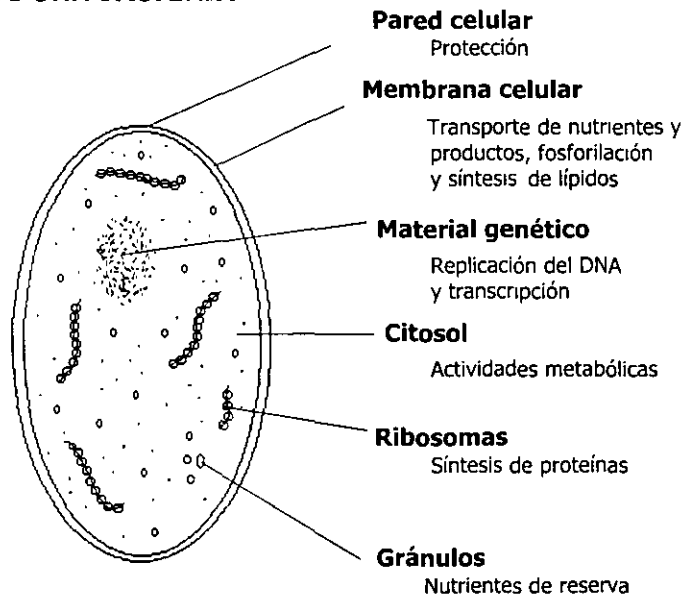
- **fueron los primeros organismos pobladores del planeta**
  - **tienen una velocidad de crecimiento mayor que la de otros microorganismos**
  - **tienen la más amplia versatilidad bioquímica**
    - alta frecuencia de mutación
    - transferencia de material genético (mediante plásmidos, transposones)
-

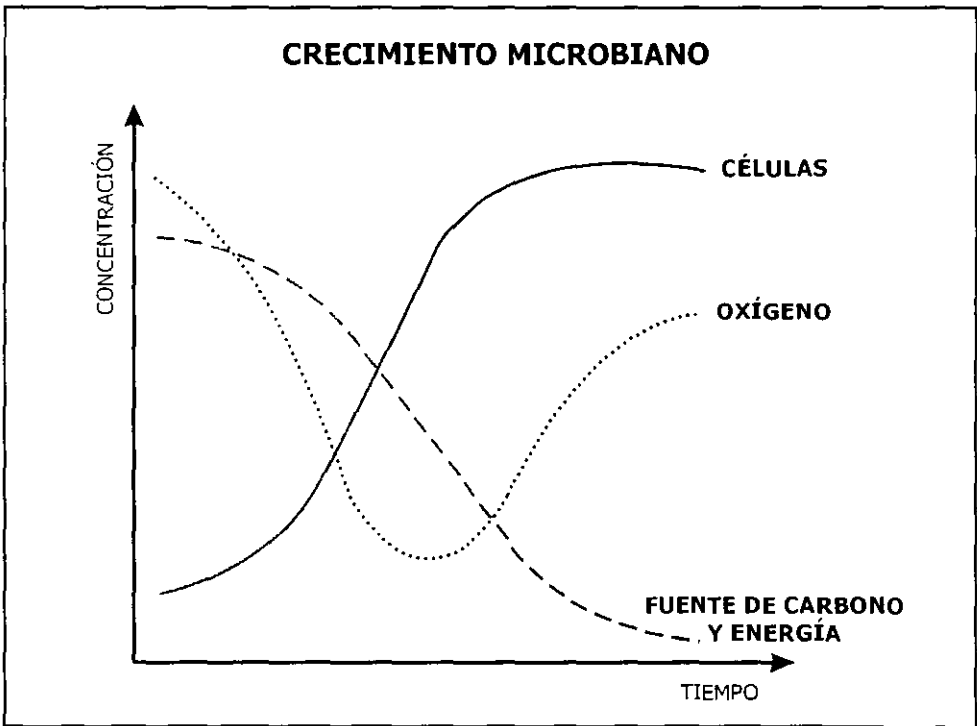
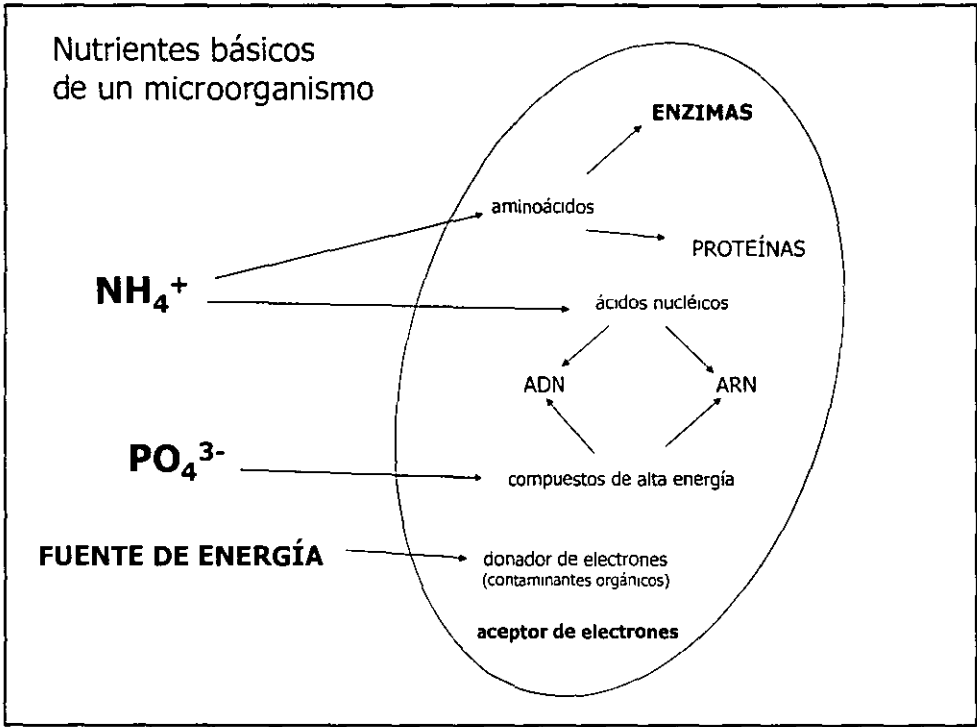


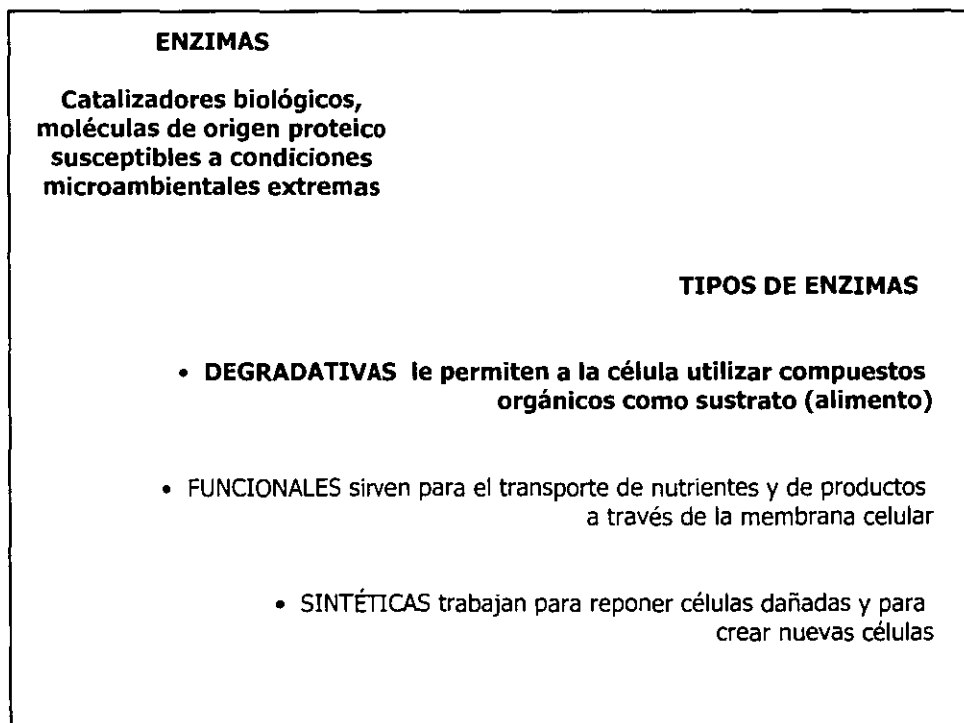
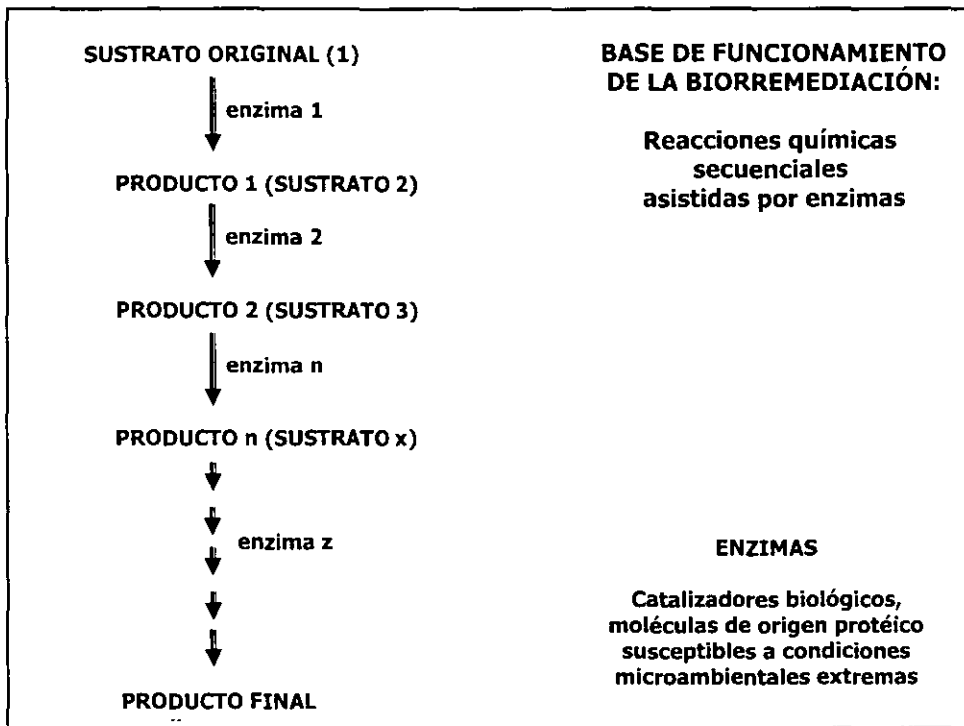
## INTERVALOS DE pH PARA EL CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS

	mínimo	óptimo	máximo
bacterias	3	7	10
levaduras	2	5	8
hongos	1	5	8

### ESTRUCTURA DE UNA BACTERIA







## EFACTORES DE LA ACTIVIDAD MICROBIANA EN EL SUELO

√ pH

√ temperatura

√ presencia de inhibidores

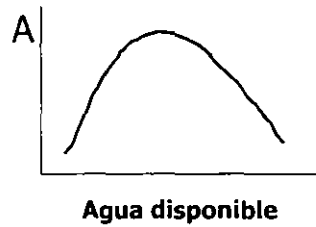
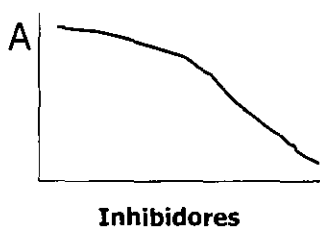
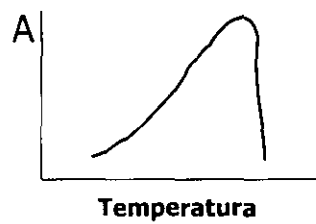
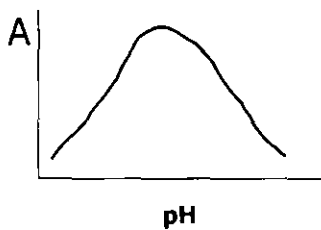
√ contenido de agua disponible

√ disponibilidad de aceptores finales de electrones

√ biodegradabilidad de los contaminantes

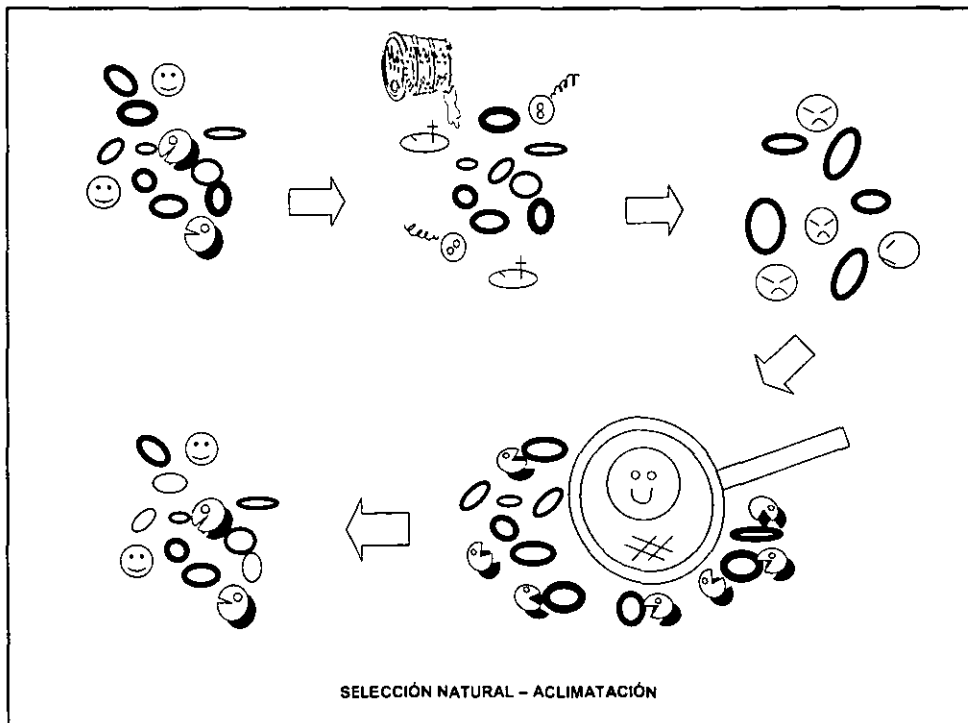
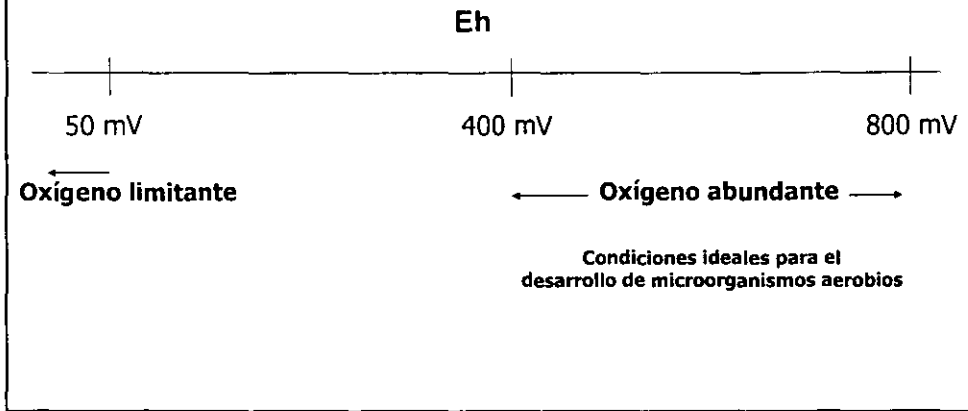
√ biodisponibilidad de los contaminantes

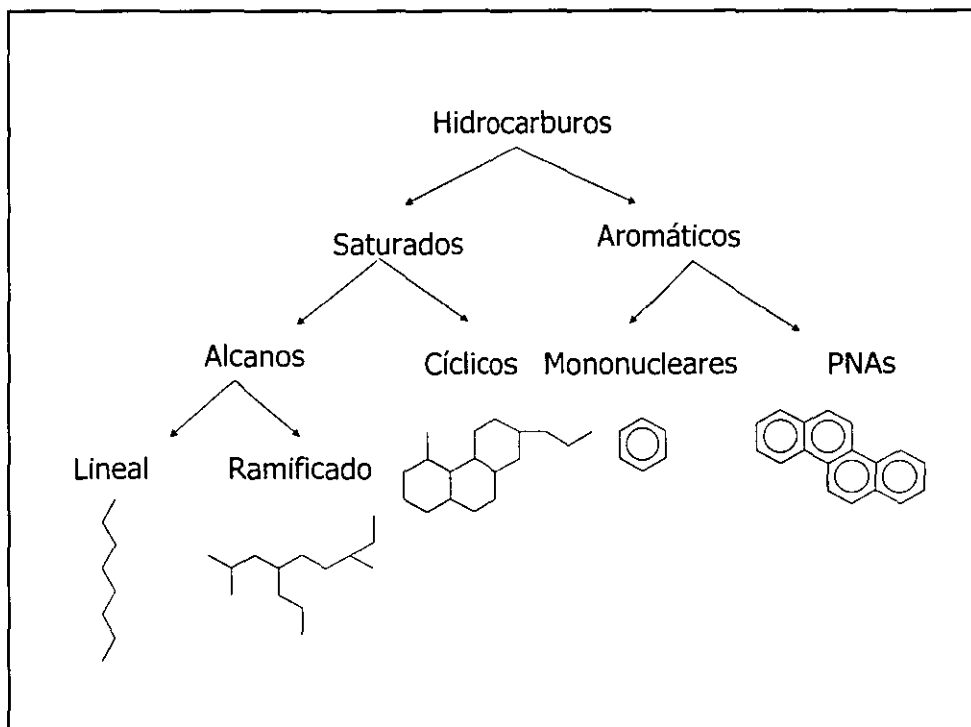
## RESPUESTA SOBRE LA ACTIVIDAD MICROBIANA (microbiana ~ enzimática ~ metabólica)



# DISPONIBILIDAD DE OXÍGENO COMO ACEPTOR FINAL DE ELECTRONES

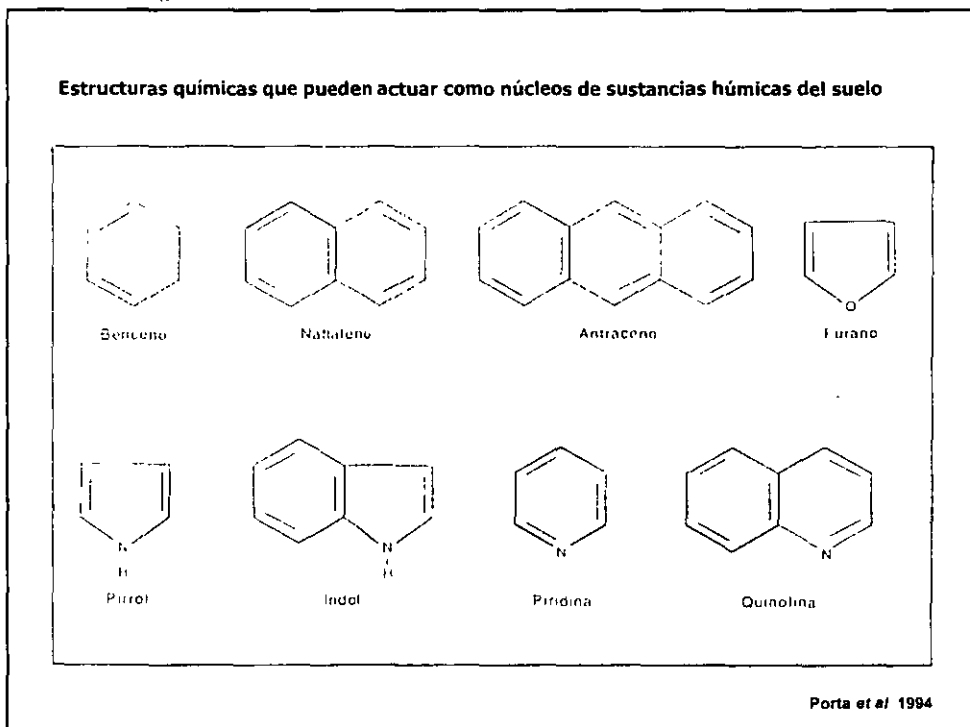
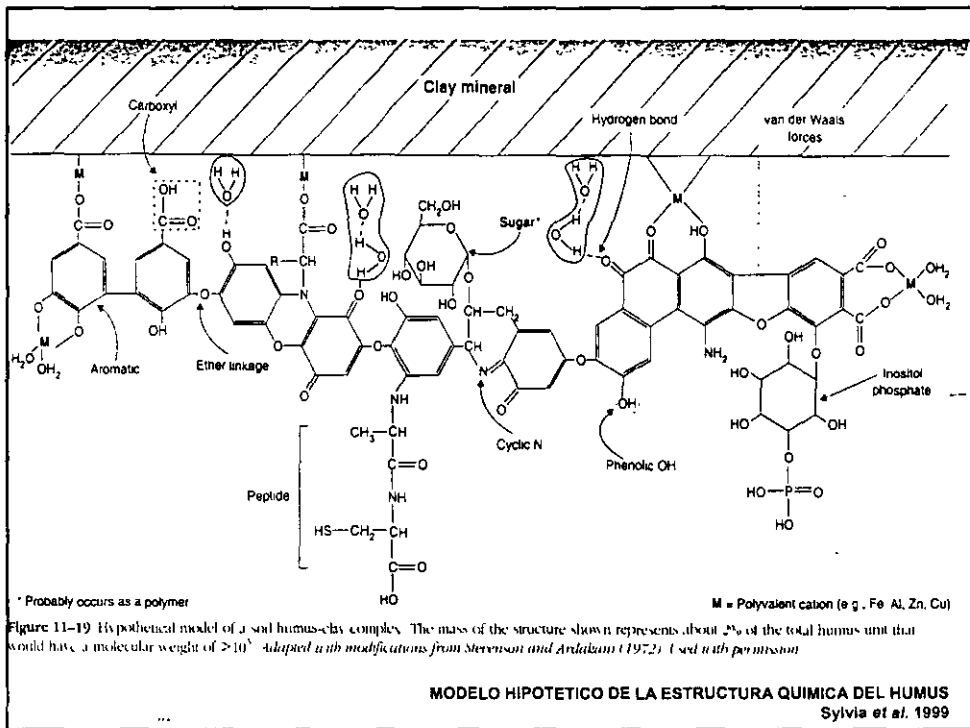
Potencial de oxido-reducción





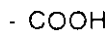
**Estructuras químicas similares a los hidrocarburos existen en la naturaleza, algunos forman parte del propio suelo otros son componentes de especies vegetales.**

**Por ello, muchos se pueden degradar incluso sin la acción del hombre.**

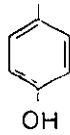


Los principales grupos radicales externos son:

Carboxílico



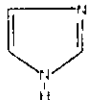
Fenólico



Alcohólico



Imidazol



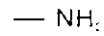
Sulfhídrico



Carbonilo

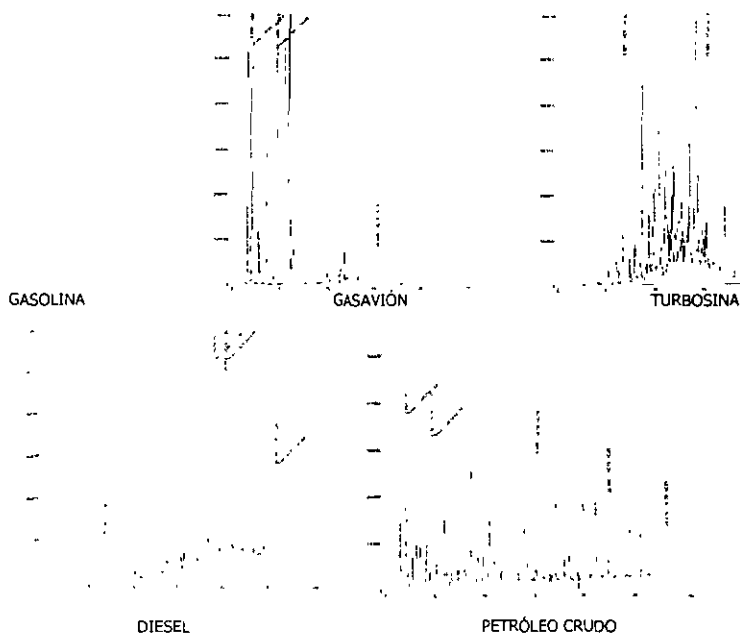


Amino



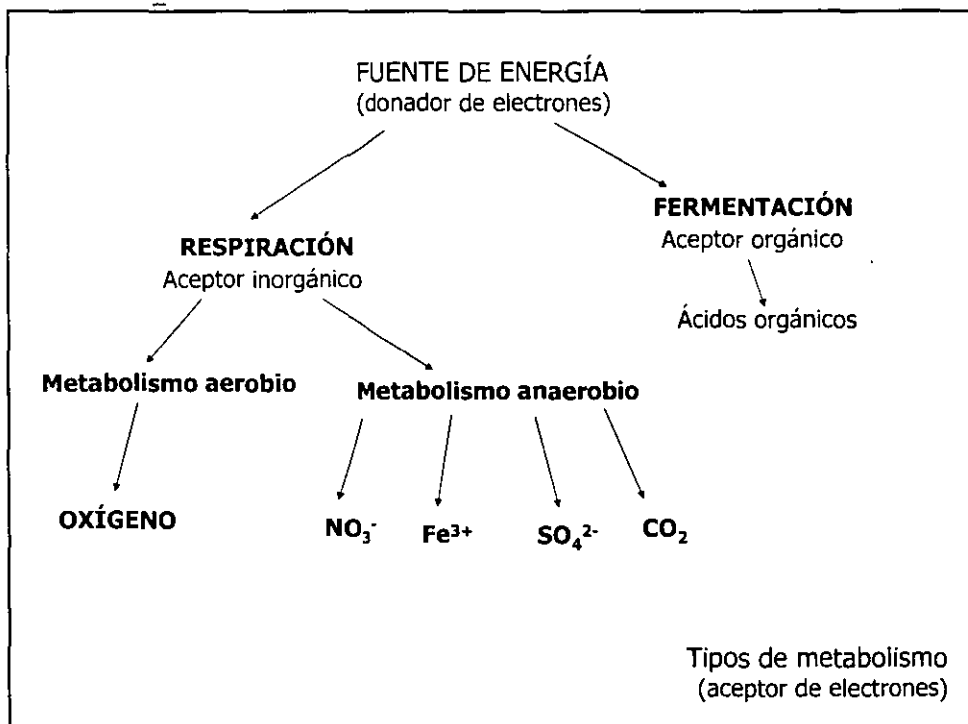
Porta et al. 1994

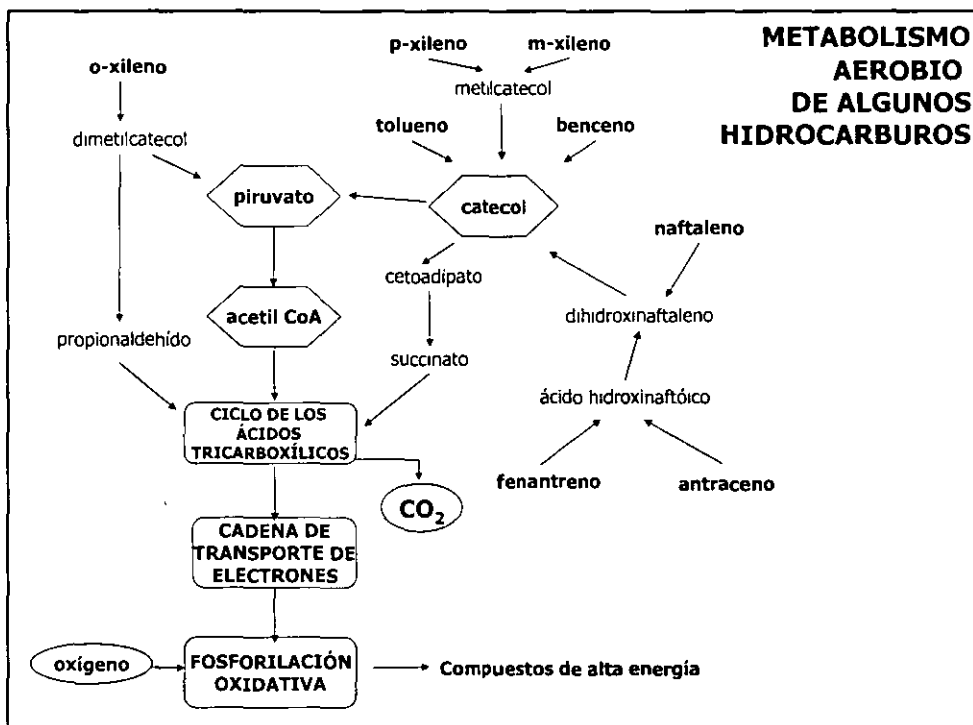
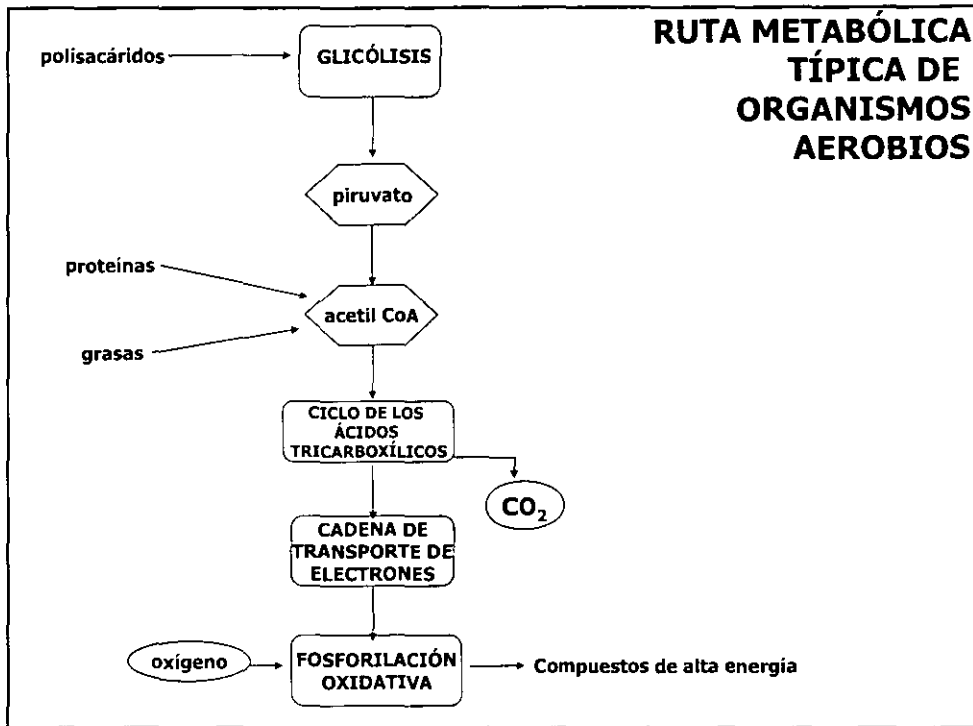
**Perfiles cromatográficos obtenidos por el método EPA 8015 B**





## Rutas de biodegradación de hidrocarburos

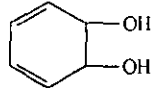




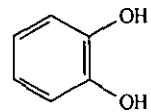
## REACCIONES INICIALES EN LA BIODEGRADACIÓN DE BENCENO



**Benceno**



**cis-bencenohihidrodiol**



**Catecol**

## REACCIONES INICIALES EN LA BIODEGRADACIÓN DE TOLUENO



**Tolueno**



**Alcohol bencílico**



**Benzaldehído**

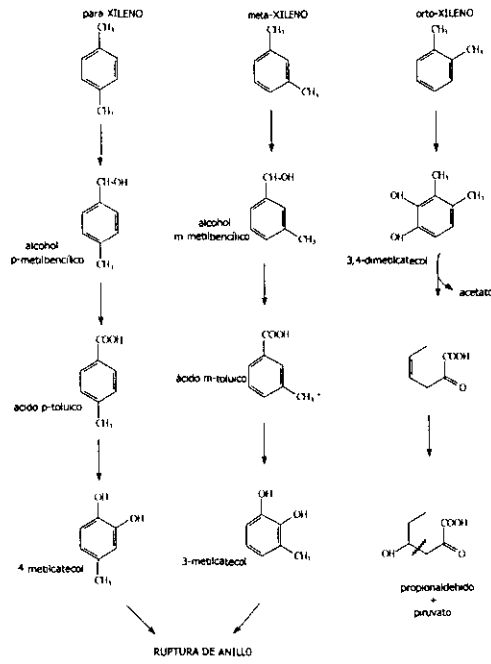


**Benzoato**



**Catecol**

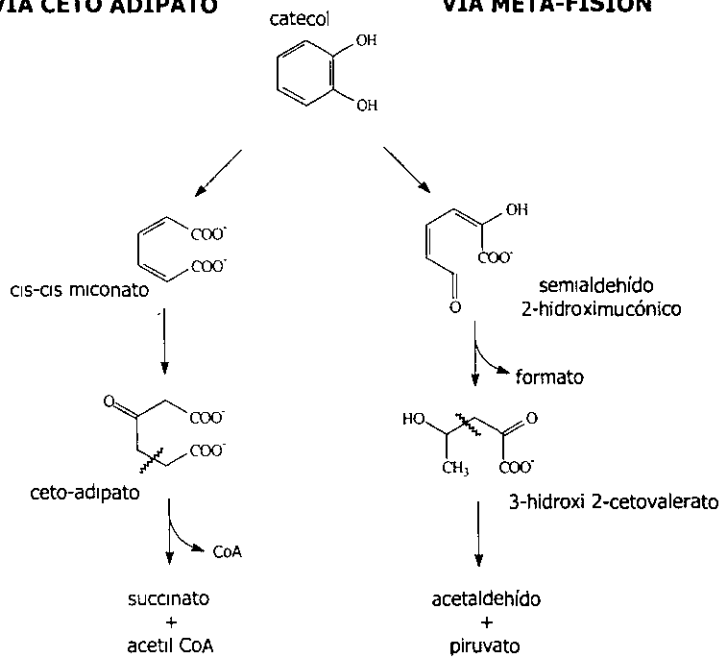
## REACCIONES INICIALES EN LA BIODEGRADACIÓN DE *para*-, *meta*- y *orto*-XILENO



Hoja 1 de 2

### VÍA CETO ADIPATO

### VÍA META-FISIÓN



Hoja 2 de 2



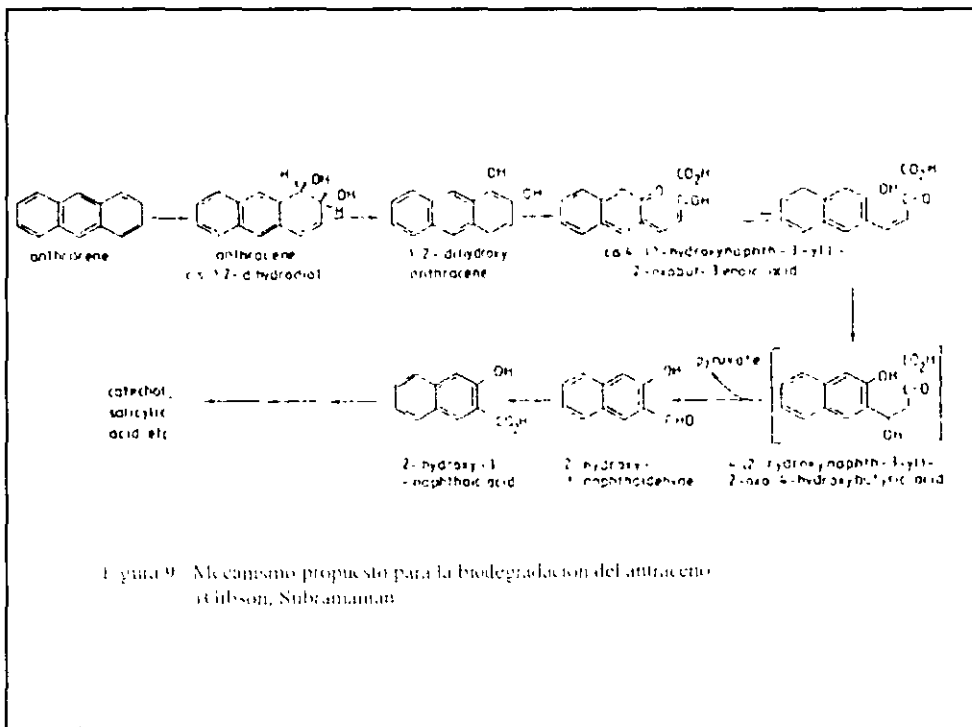


Figura 9. Mecanismo propuesto para la biodegradación del antraceno (Hilborn, Subramanian)

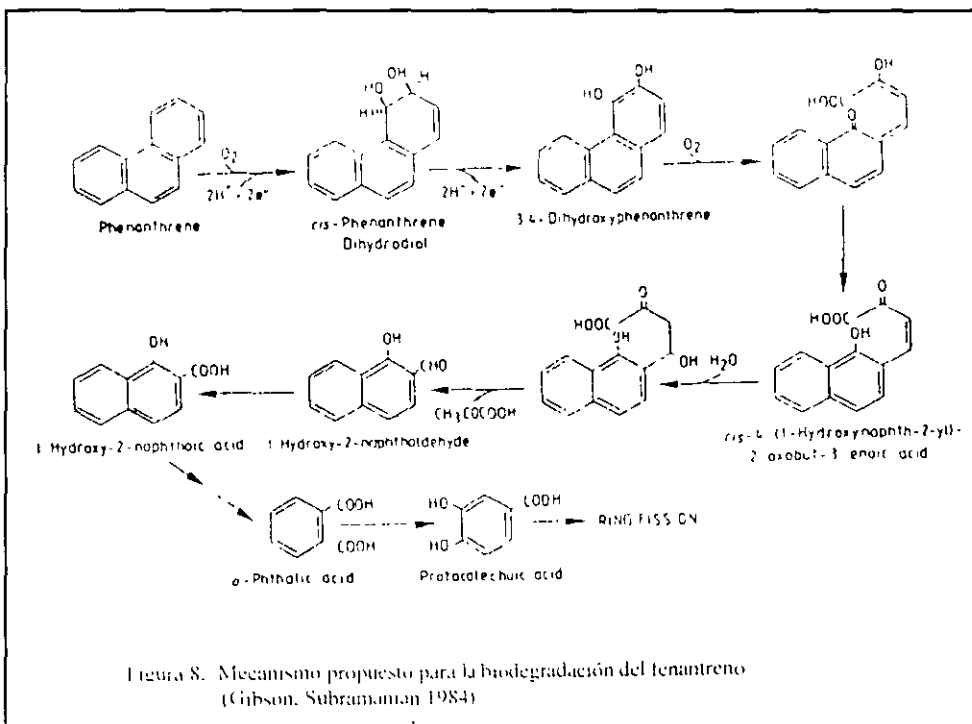
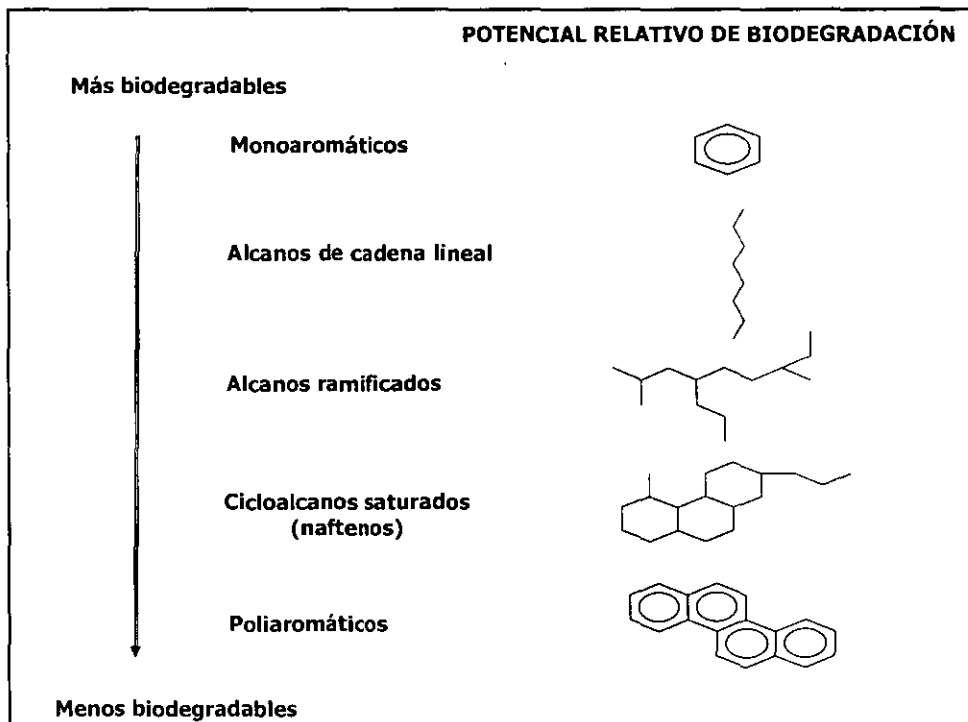
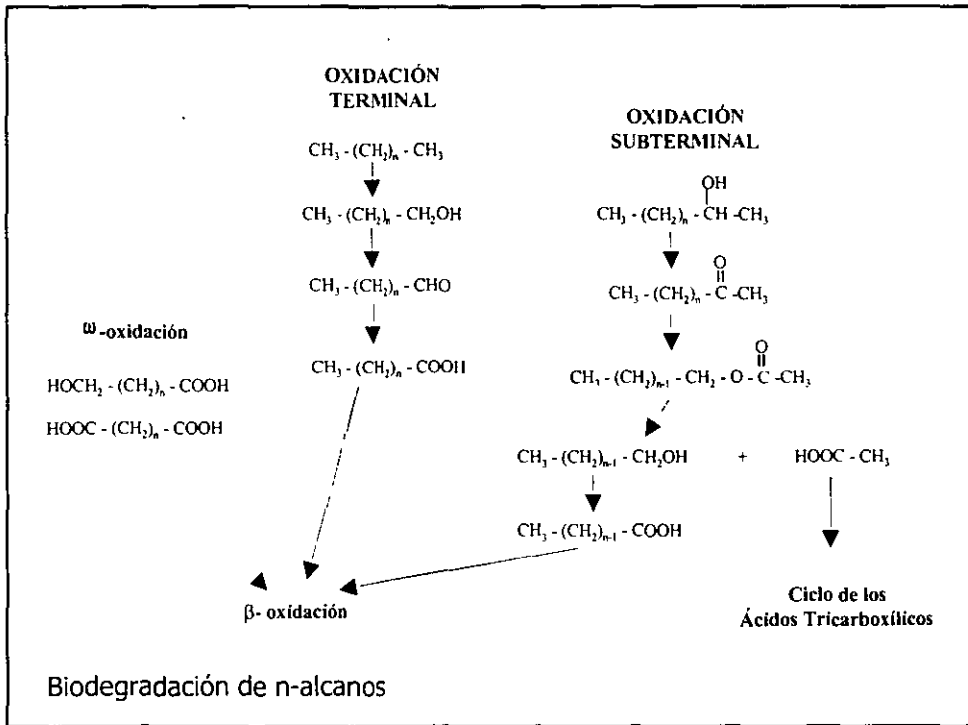


Figura 8. Mecanismo propuesto para la biodegradación del fenantreno (Gibson, Subramanian 1984)



# **Desarrollo de un proyecto de biorremediación**

## **DESARROLLO DE UN PROYECTO DE BIORREMEDIACIÓN**

---

### **CARACTERIZACIÓN DEL SITIO**

- √ entorno
- √ geohidrología
- √ química de contaminantes
- √ fisicoquímica del suelo y subsuelo
- √ microbiología del suelo y subsuelo



### **ESTUDIOS DE BIOTRATABILIDAD EN EL LABORATORIO**



### **ESCALAMIENTO AL CAMPO**

---



## **CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO**

---

**macroambiente que rodea a la zona contaminada:**

- √ temperatura
  - √ forma de acceso
  - √ actividades típicas del lugar
  - √ manejo del proceso a escala real
- 

## **CARACTERIZACIÓN GEOHIDROLÓGICA**

---

**la zona contaminada conforma un biorreactor:**

- √ volumen (superficie y profundidad)
  - √ forma
  - √ heterogeneidad
  - √ dirección preferencial del flujo
-

## **CARACTERIZACIÓN DE CONTAMINANTES**

---

**características del "alimento" para los microorganismos:**

- √ tipo
- √ diversidad
- √ concentración
- √ posibles inhibidores de la actividad microbiana

## **CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA**

---

**características del microambiente del suelo o subsuelo**

- √ pH
- √ nutrientes naturales
- √ interacción con los contaminantes
- √ tipo de matriz

## CARACTERIZACIÓN MICROBIOLÓGICA

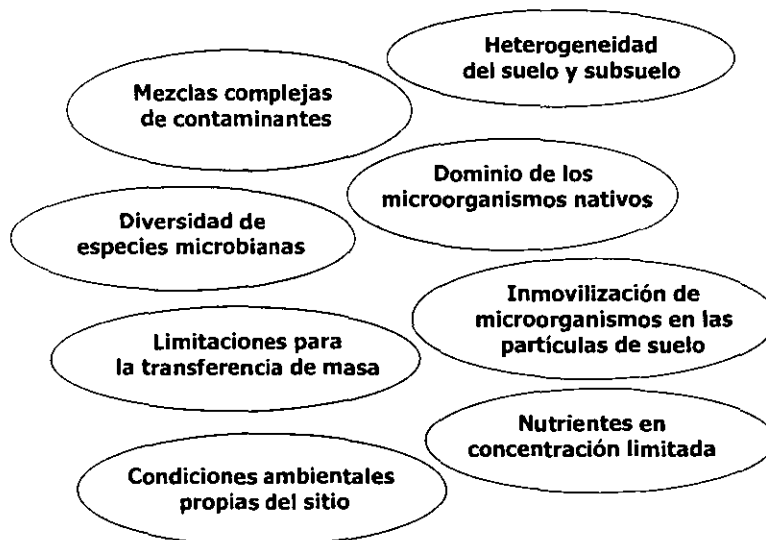
---

presencia y características de los microorganismos vivos nativos del suelo o subsuelo:

- √ heterótrofos (utilizan materia orgánica)
- √ tolerantes (soportan presencia del contaminante)
- √ degradadores (aprovechan el contaminante)
- √ contienen genes catabólicos (*xylE*, *ndoB*, *alkB*)

puede aplicarse también a Inóculos y preparaciones comerciales

En un sitio contaminado se tienen ....



## TÉCNICAS DE BIORREMEDIACIÓN

### BIOESTIMULACIÓN

Fertilización

### BIOAUMENTACIÓN / BIOINCREMENTO

Preparaciones comerciales

Producción de inóculos

### BIOVENTEO

Suministro de oxígeno

### ATENUACIÓN NATURAL

## BIOESTIMULACIÓN

---

- ✓ Adición de fertilizantes ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ )

nitrógeno total: 2000 mg/kg

fosfatos: 12 mg/kg

Suelo rico - muy rico

o relación C : N- $\text{NH}_4^+$  : P-  $\text{PO}_4^{3-}$

100 : 10 : 1

- ✓ Humedad constante: 25 – 50 %  
(en función del tipo de suelo)

### DENOMINACIÓN DE SUELOS SEGÚN SU CONTENIDO DE NUTRIENTES

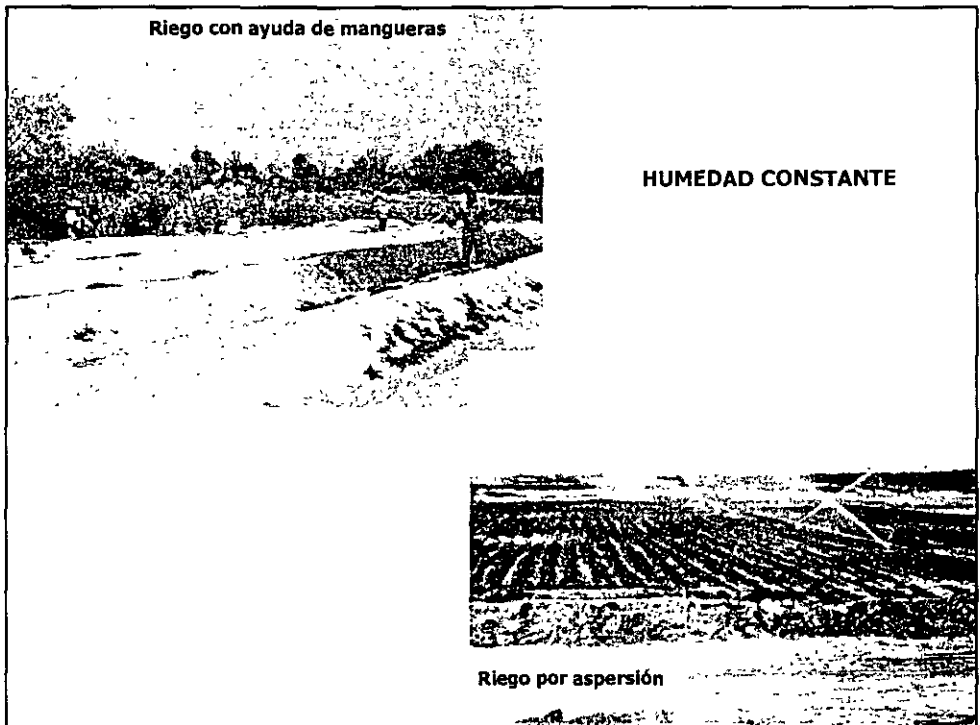
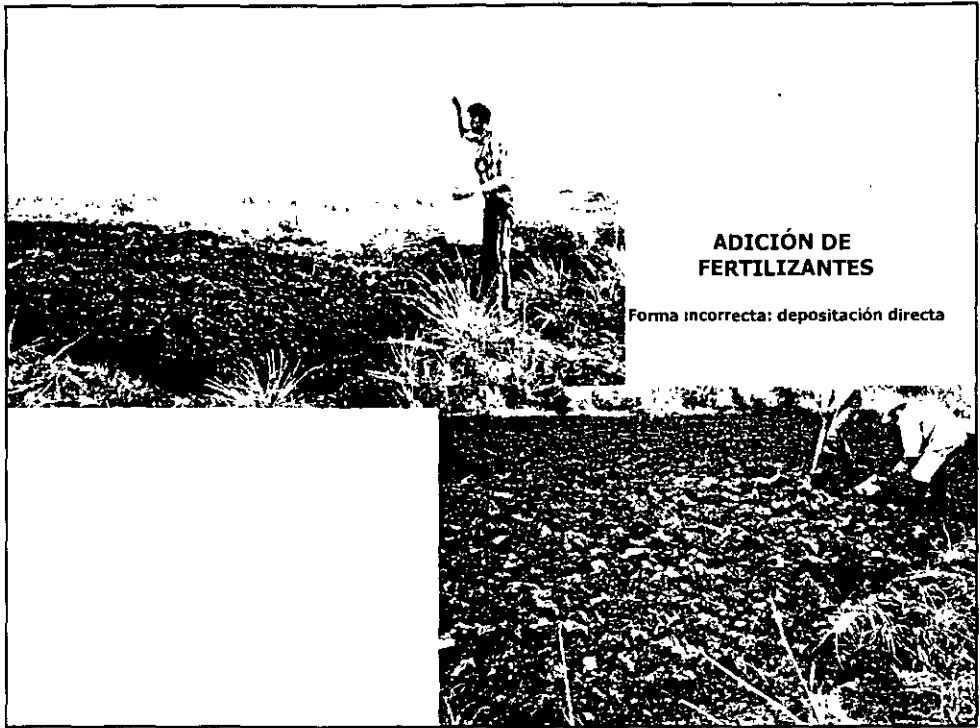
NITRÓGENO %	NITRÓGENO mg/kg	FOSFATOS mg/kg	MATERIA ORGÁNICA %	DENOMINACIÓN DEL SUELO
< 0.032	< 320		0 - 0.2	Extremadamente pobre
0.032 - 0.063	320 - 630	< 4.0	0.8 - 2.0	Pobre
0.064 - 0.095	640 - 950		2.0 - 4.0	Regular
0.096 - 0.126	960 - 1,260	4.0 - 6.9	4.0 - 8.0	Medianamente rico
<b>0.127 - 0.158</b>	<b>1,270 - 1,580</b>	<b>7.0 - 12.5</b>	<b>8.0 - 15.0</b>	<b>Rico</b>
<b>0.159 - 0.221</b>	<b>1,590 - 2,210</b>		<b>15.0 - 30.0</b>	<b>Muy rico</b>
> 0.221	> 2,210	> 12.5	> 30.0	Extremadamente rico

Adaptado de: Tavera, 1985; Aguilera, 1989; Vázquez, 1993.

### ADICIÓN DE FERTILIZANTES

Forma correcta: previa disolución







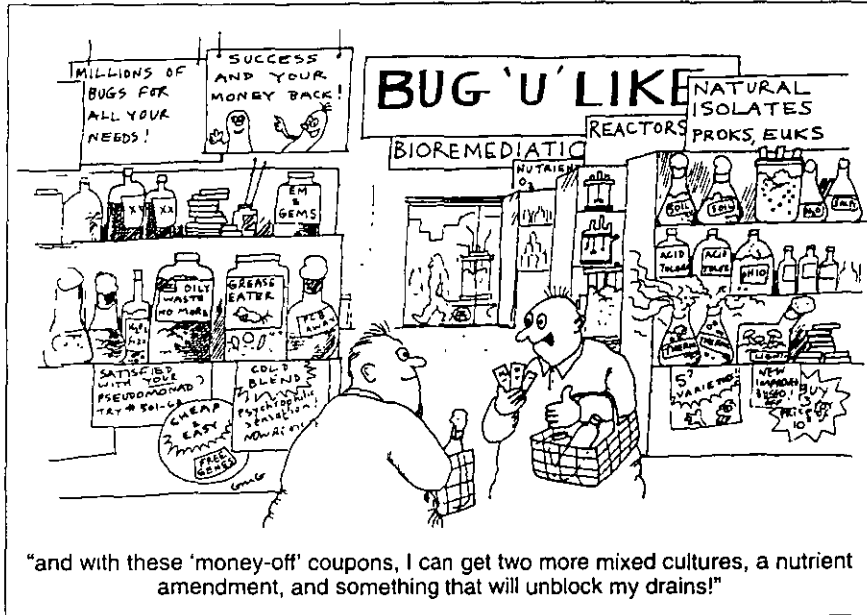
INSTALACIÓN DE TUBERÍA PARA BIOVENTEO

## PRODUCTOS COMERCIALES

---

- **concentrados bacterianos**
  - **musgos impregnados de bacterias**
  - **concentrados enzimáticos**
  - **fertilizantes**
  
  - **agentes tensoactivos (surfactantes)**
  
  - **"oxigenadores"**
-

El mercado de la biorremediación ...

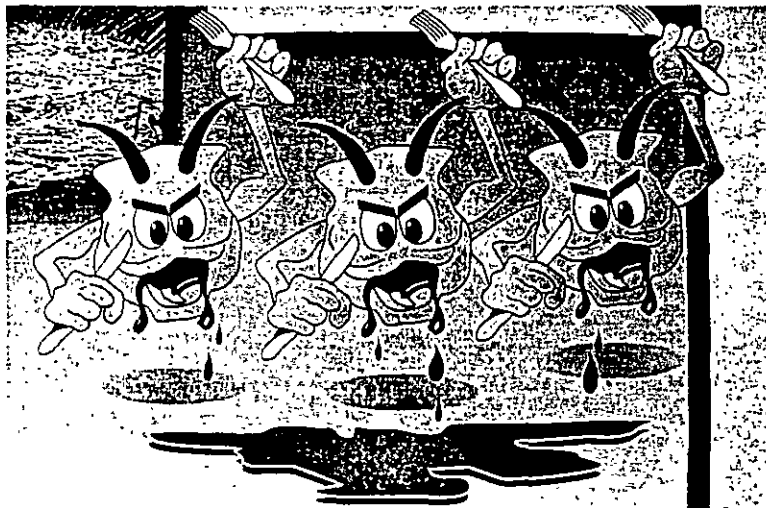


Source: Caplan, 1993, TIBTECH 11, August: 320-323.



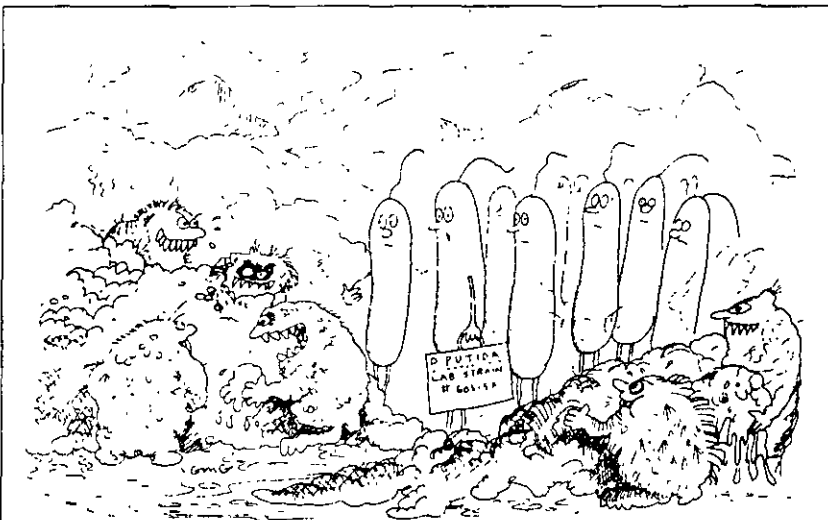
Preparaciones comerciales de bacterias





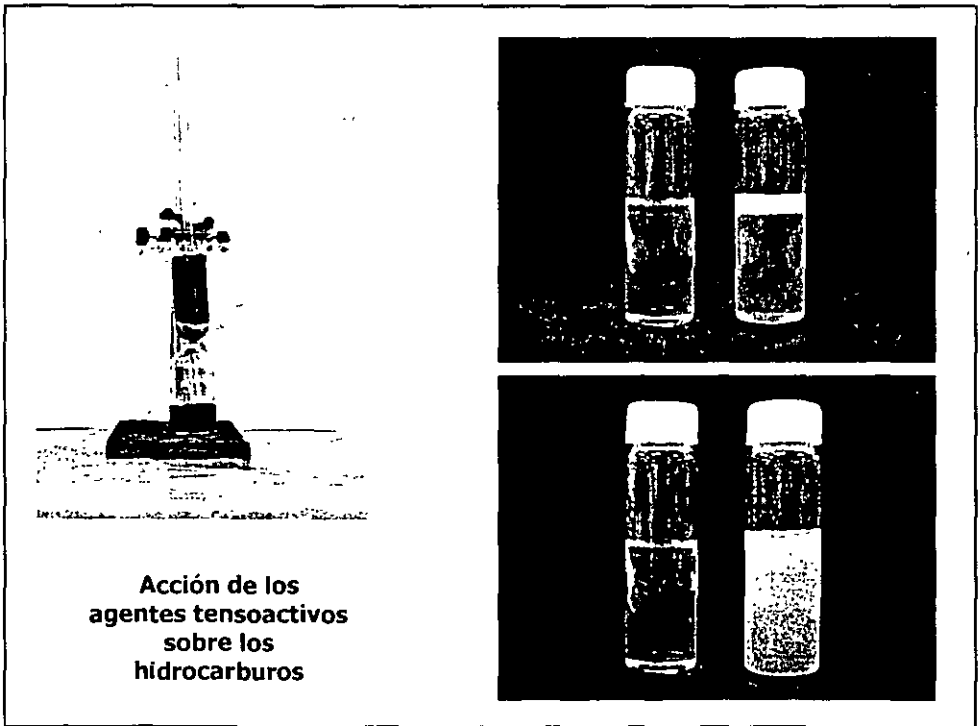
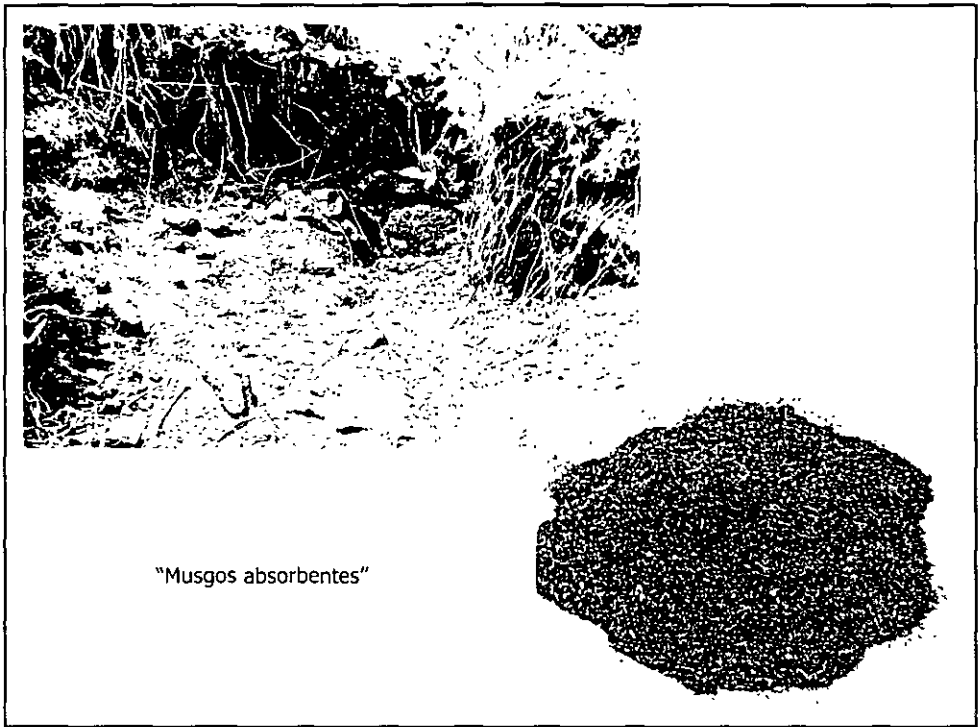
***SUPER BUGS***

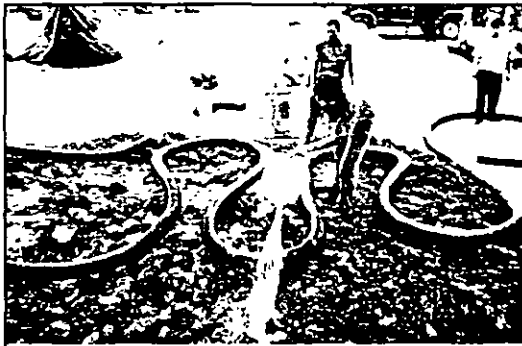
Un extraño no siempre es bienvenido ...



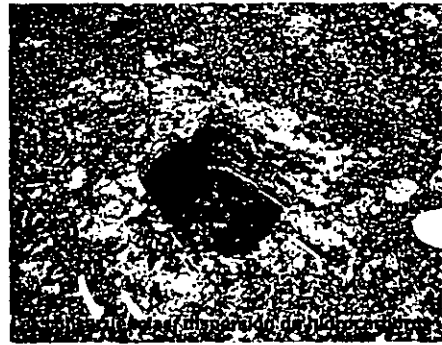
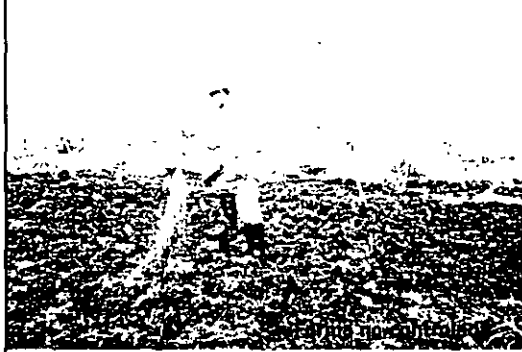
"Oh dear! I didn't realize 'in the field' would be like this!  
We should have stayed in the laboratory."

Source Liu and Sufita, 1993. TIBTECH 11, August: 344-352





**APLICACIÓN  
DE SURFACTANTES**

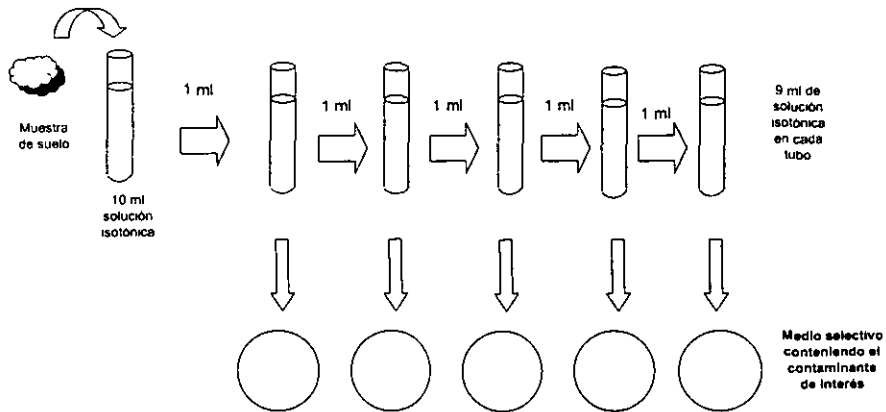


## **PRODUCCIÓN DE INÓCULOS**

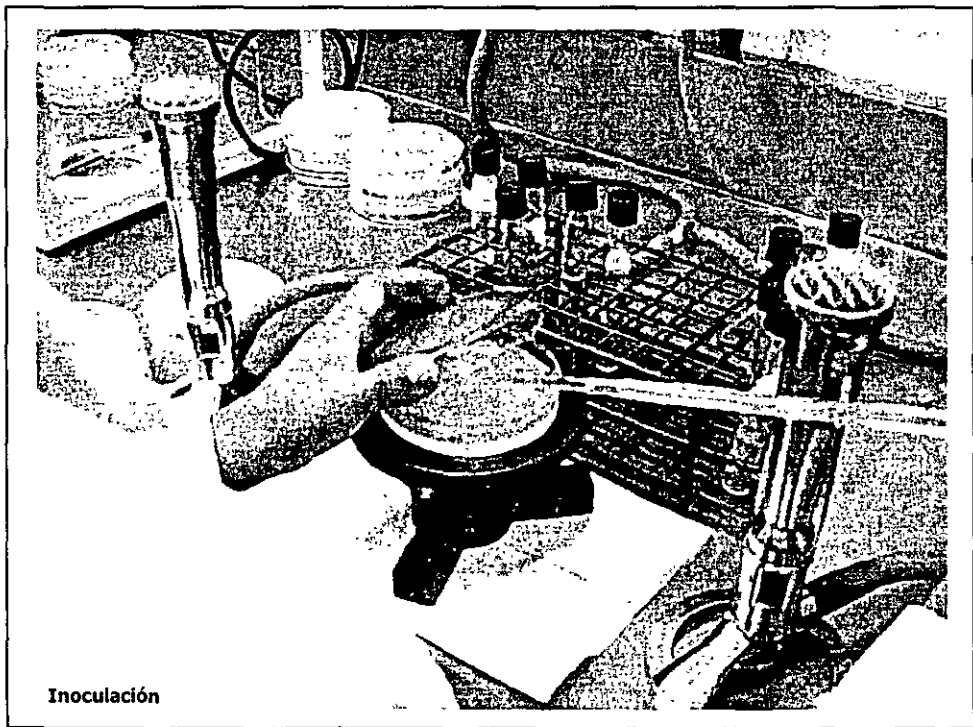
- 1. Aislamiento de bacterias degradadoras**
- 2. Enriquecimiento del cultivo**
- 3. Identificación de cepas (no indispensable)**
- 4. Escalamiento del cultivo**

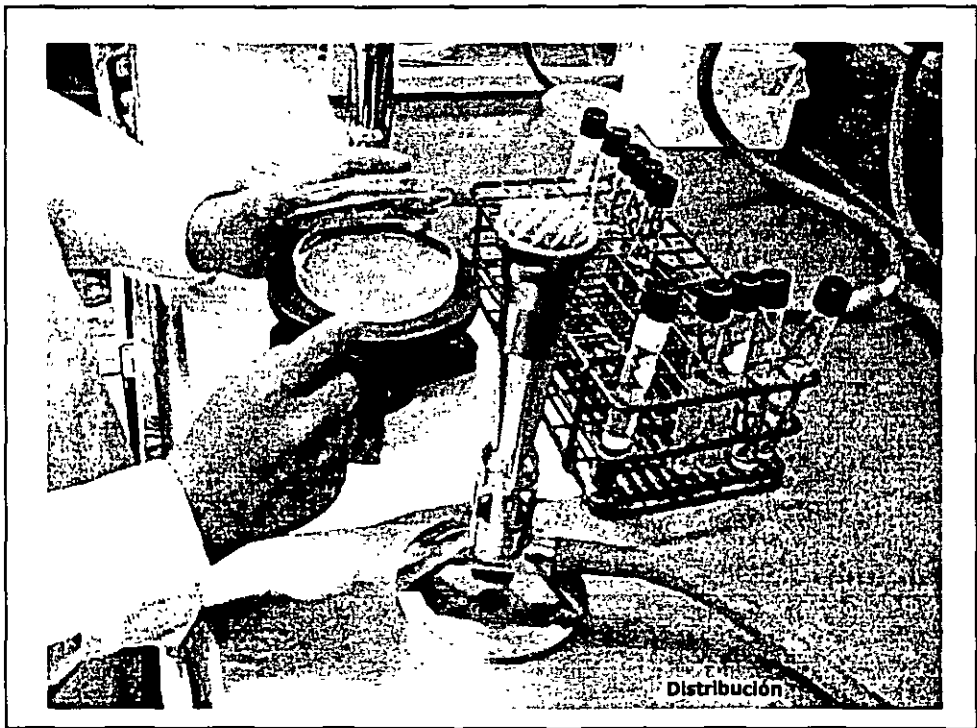
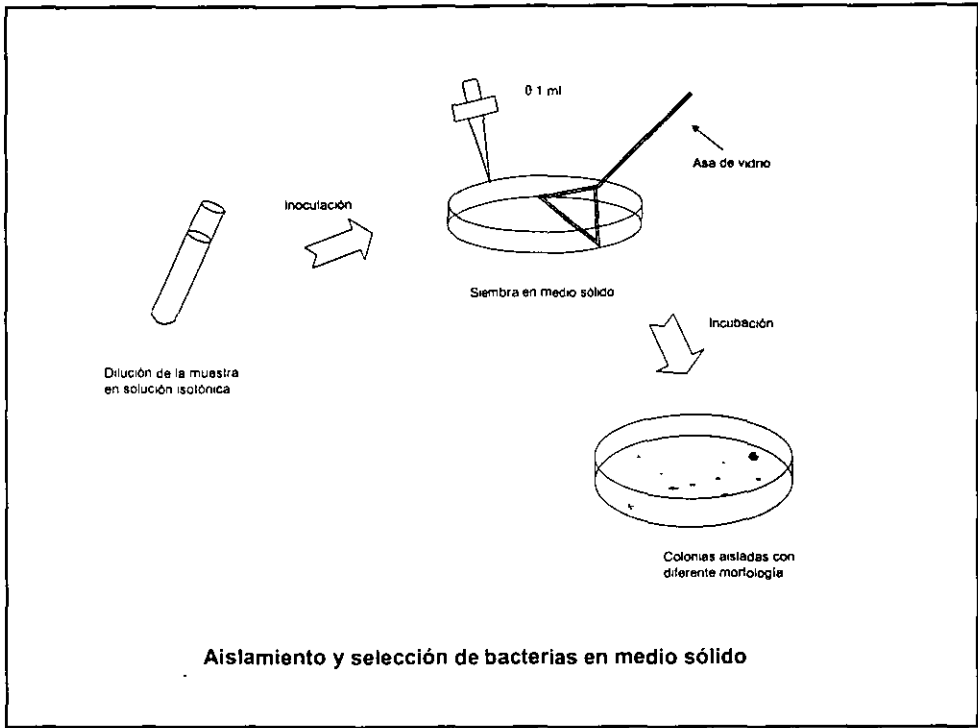
**Fuente inicial de aislamiento de bacterias degradadoras:  
un suelo contaminado de un pasivo ambiental**

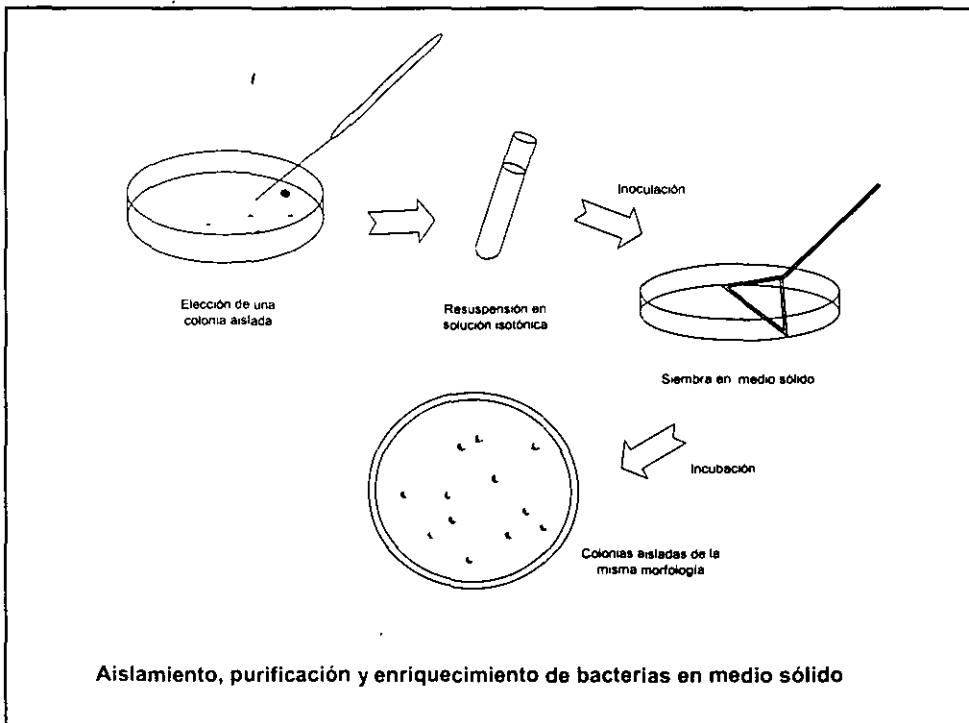
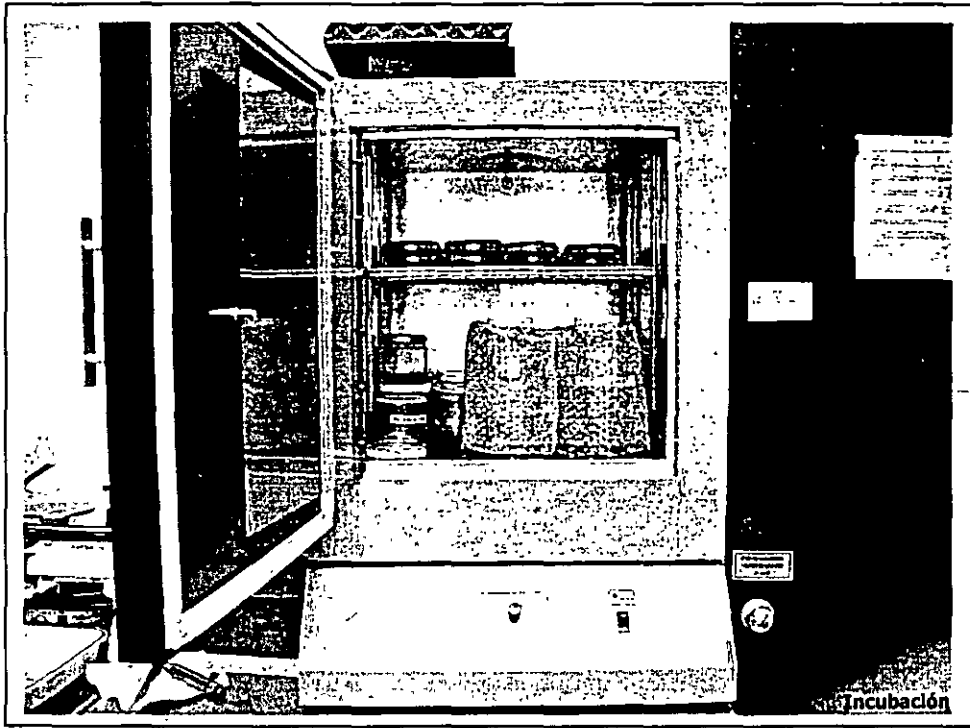
Parámetro	Concentración
pH	8.38
materia orgánica	18.54 (%)
fosfatos	0.33 (mg/kg)
nitrógeno total	457.71 (mg/kg)
nitrógeno amoniacal	372.06 (mg/kg)
bacterias degradadoras de diesel industrial	$3.49 \times 10^5$ (ufc/g de suelo)

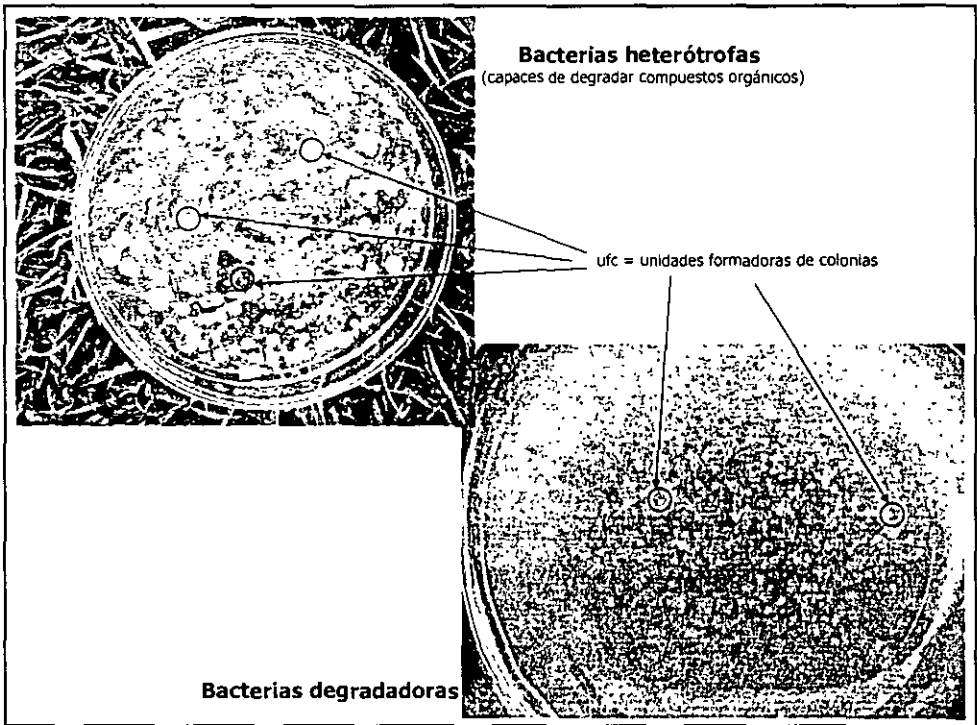
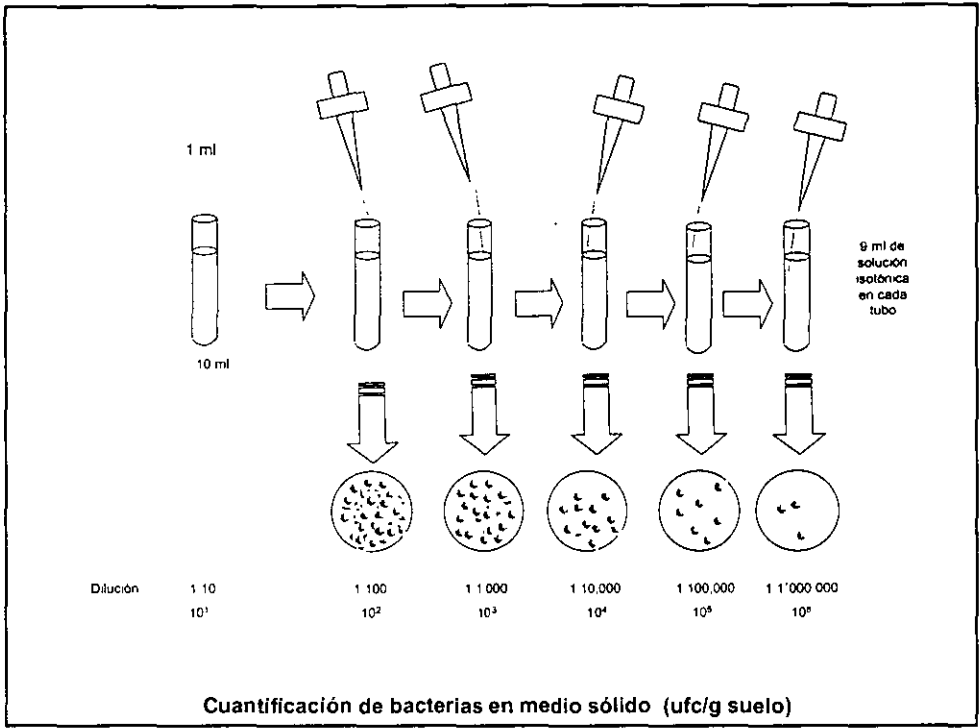


Aislamiento de bacterias en medio sólido







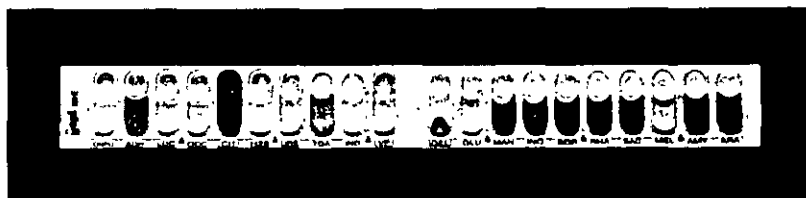




IDENTIFICACIÓN  
DE CEPAS  
MICROBIANAS



*Pseudomonas fluorescens/putida*

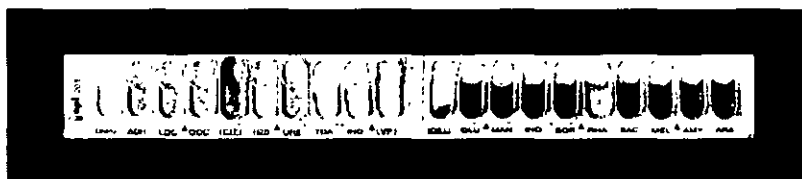


Pruebas bioquímicas API

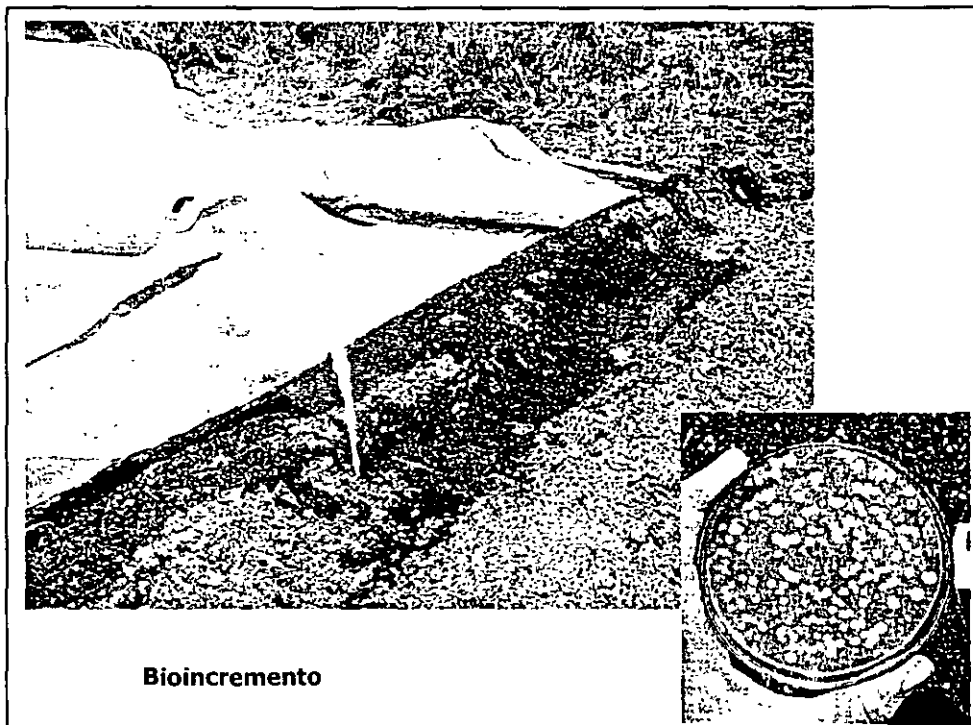
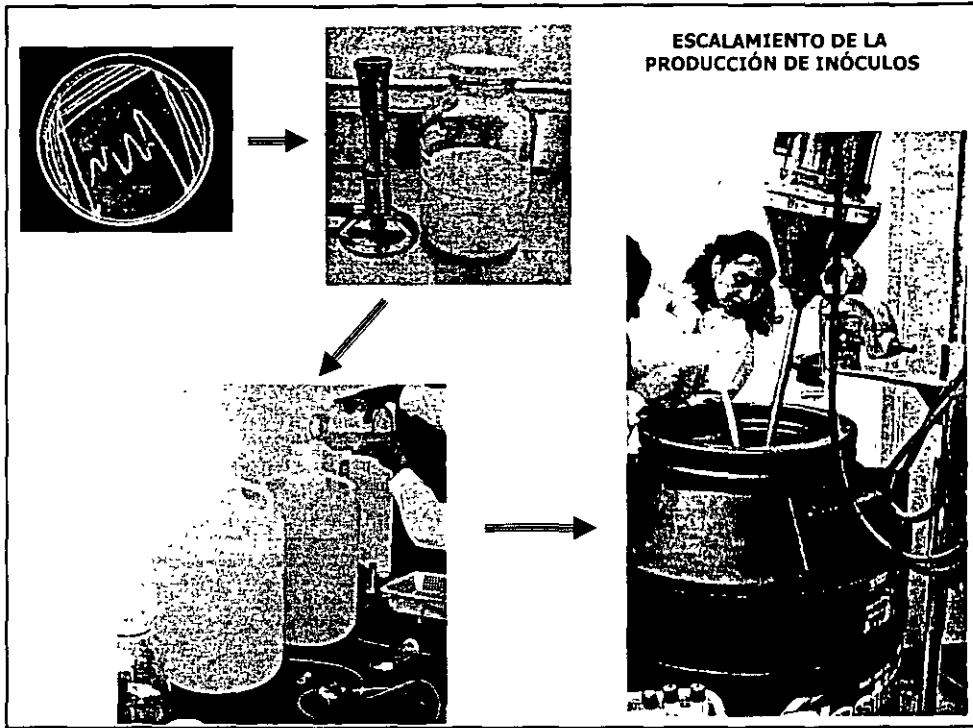
IDENTIFICACIÓN  
DE CEPAS



*Flavimonas oryzihabitans*



Pruebas bioquímicas API



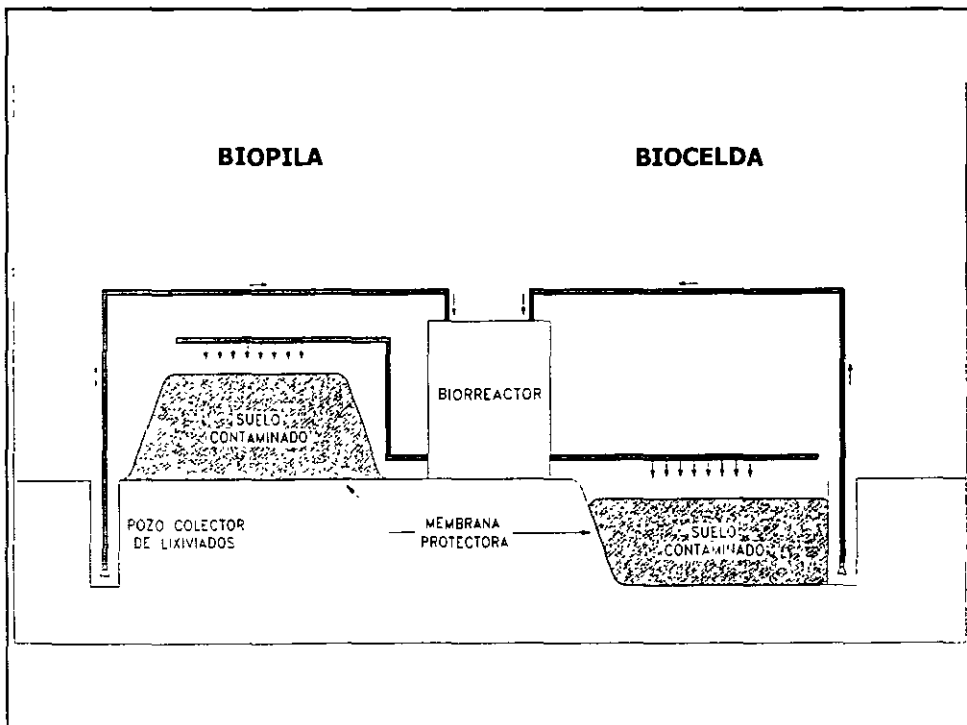
## TIPOS DE BIORREACTORES

**BIOPILAS**

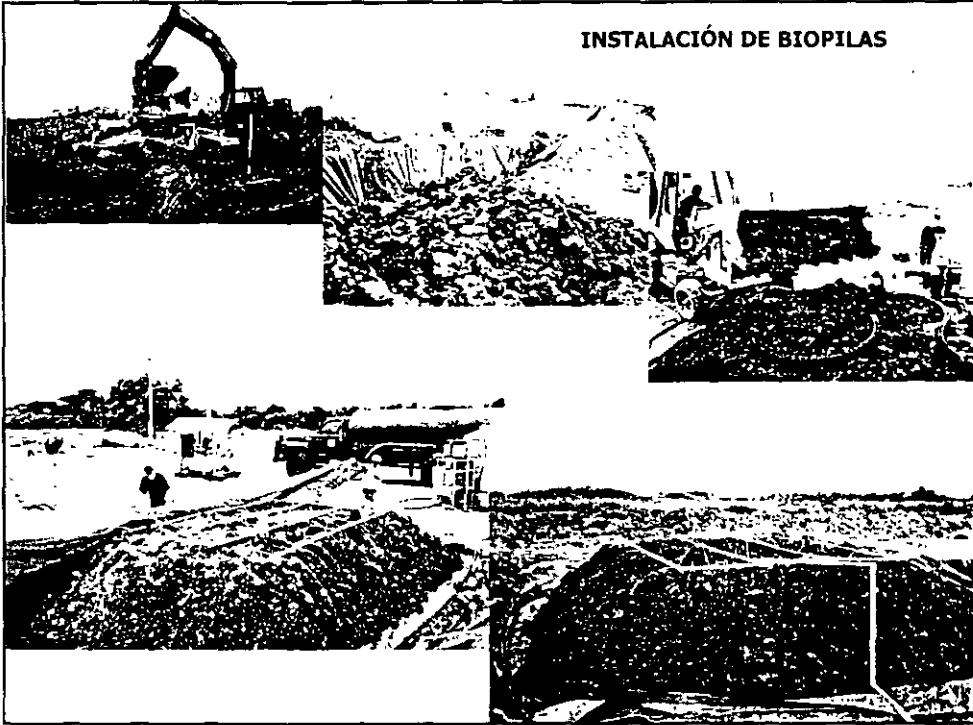
**BIOCELDAS**

**BIOCULTIVO  
(Land-farming)**

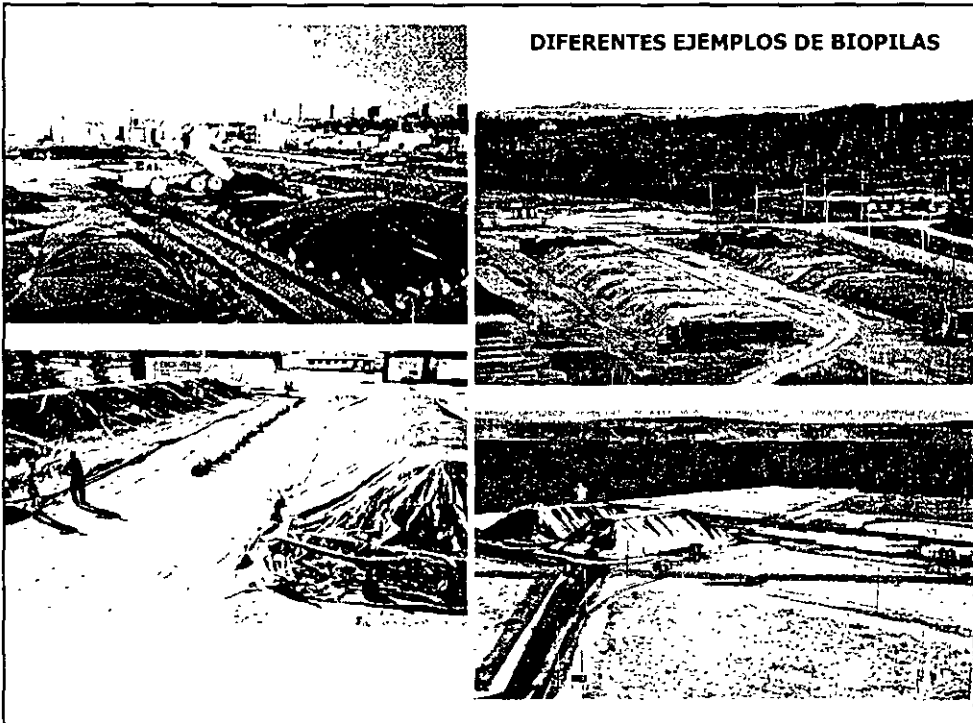
**AGITADOS  
Y  
AEREADOS**

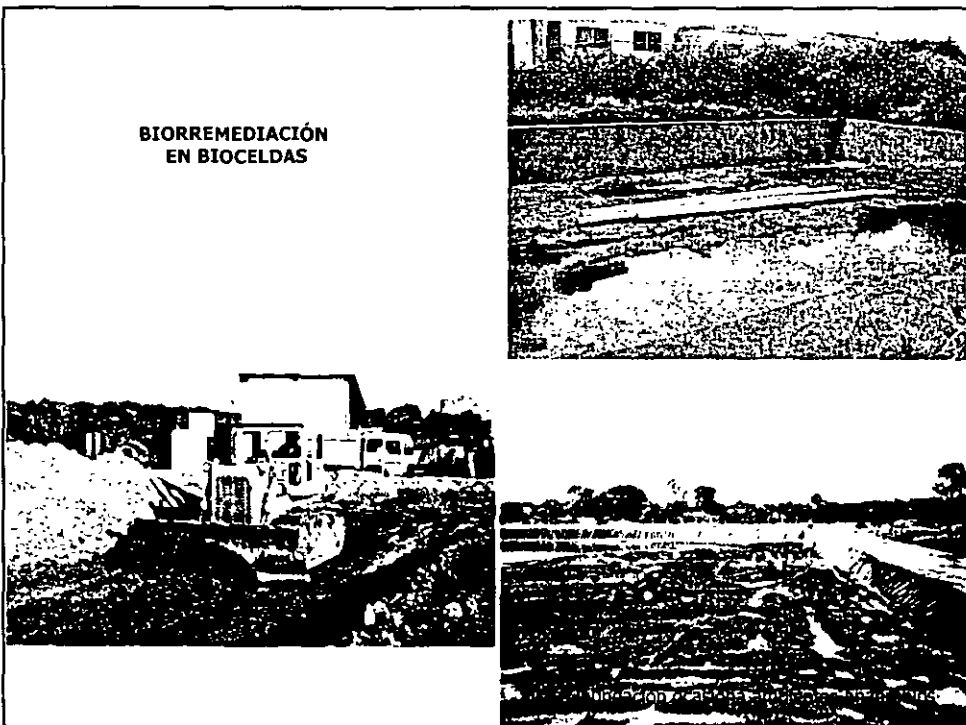
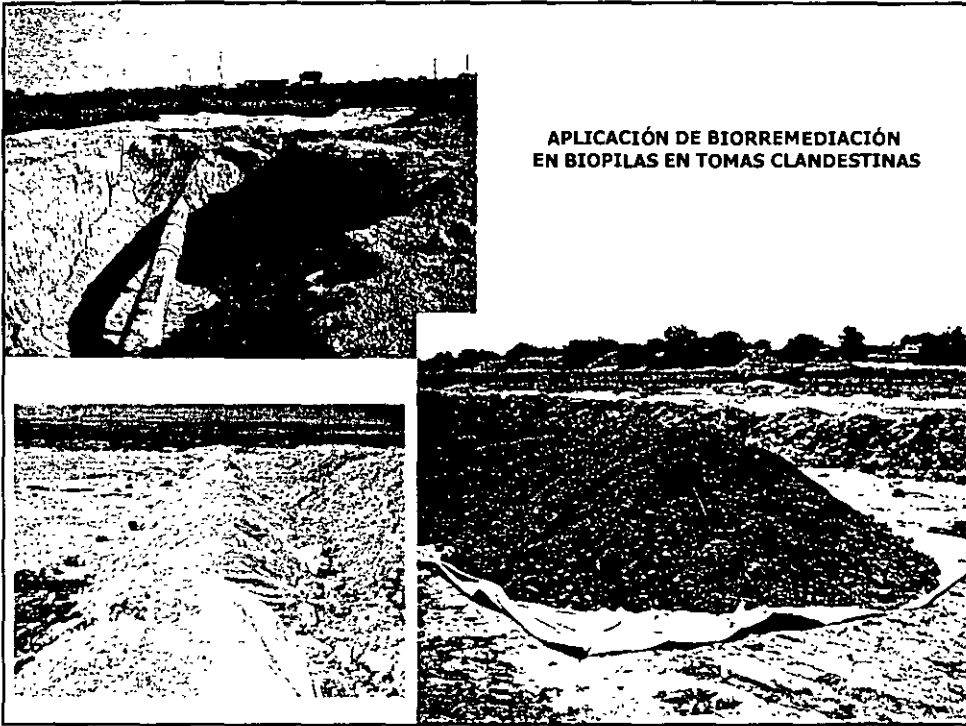


**INSTALACIÓN DE BIOPILAS**



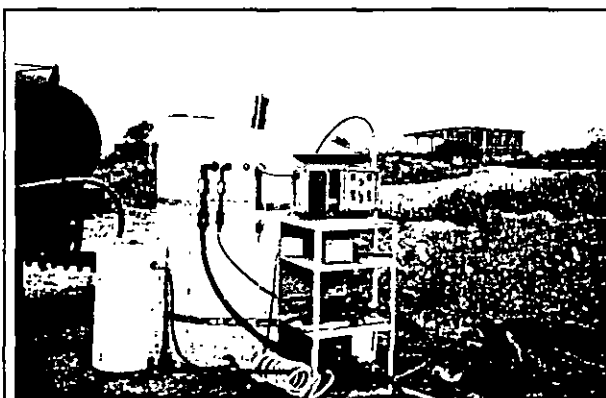
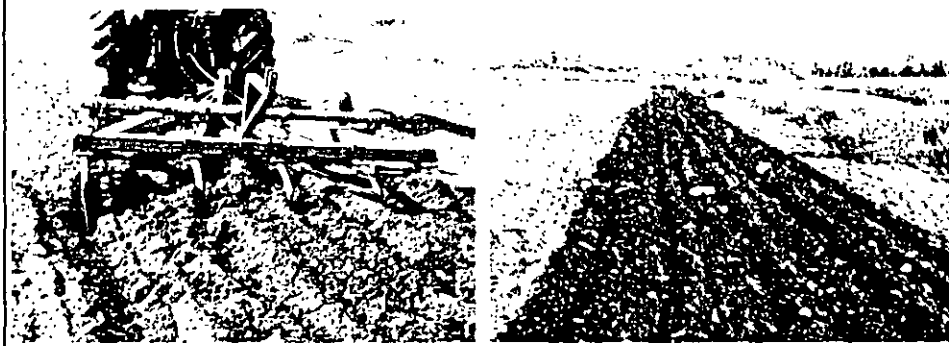
**DIFERENTES EJEMPLOS DE BIOPILAS**







**BIORREMEDIACIÓN  
EN BIOCULTIVO  
(Land-farming)**



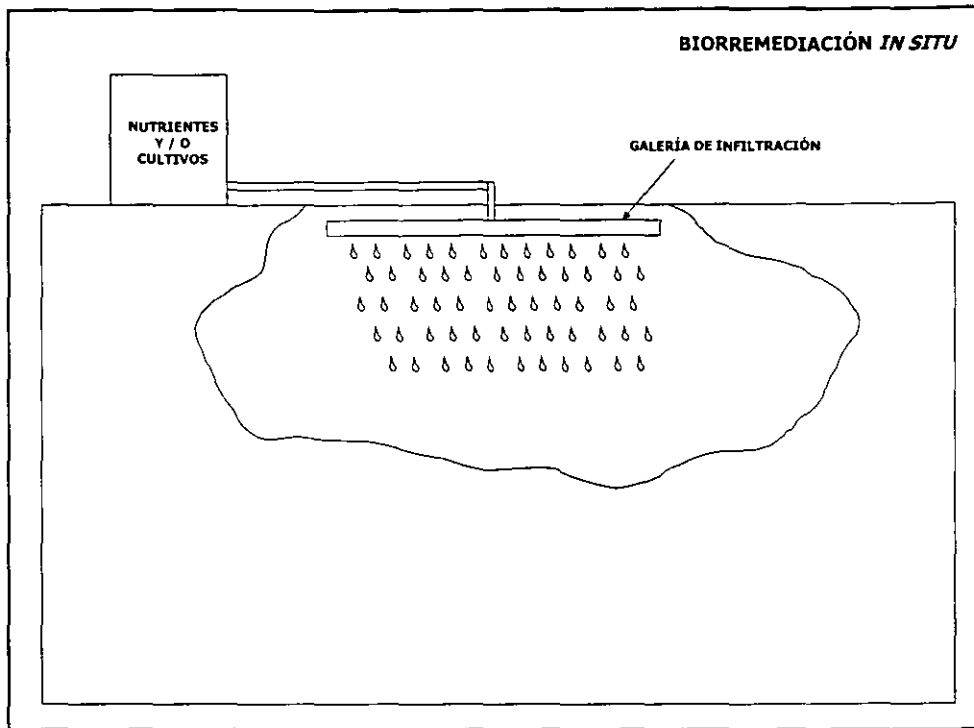
**REACTORES**



**Ventajas de la adición de composta:**

- ✓ **adsorbe los hidrocarburos volátiles presentes**
- ✓ **reduce las emisiones a la atmósfera ocasionadas involuntariamente por el movimiento del material**
- ✓ **limita la generación de lixiviados por su alta capacidad de retención de líquidos**
- ✓ **mejora la textura del material, permitiendo un mejor intercambio de gases**
- ✓ **contiene flora microbiana nativa muy activa y permite la adhesión de bacterias externas**
- ✓ **contiene nutrientes naturales que estimulan la actividad microbiana**





## **APLICACIONES DE LA BIORREMEDIACIÓN**

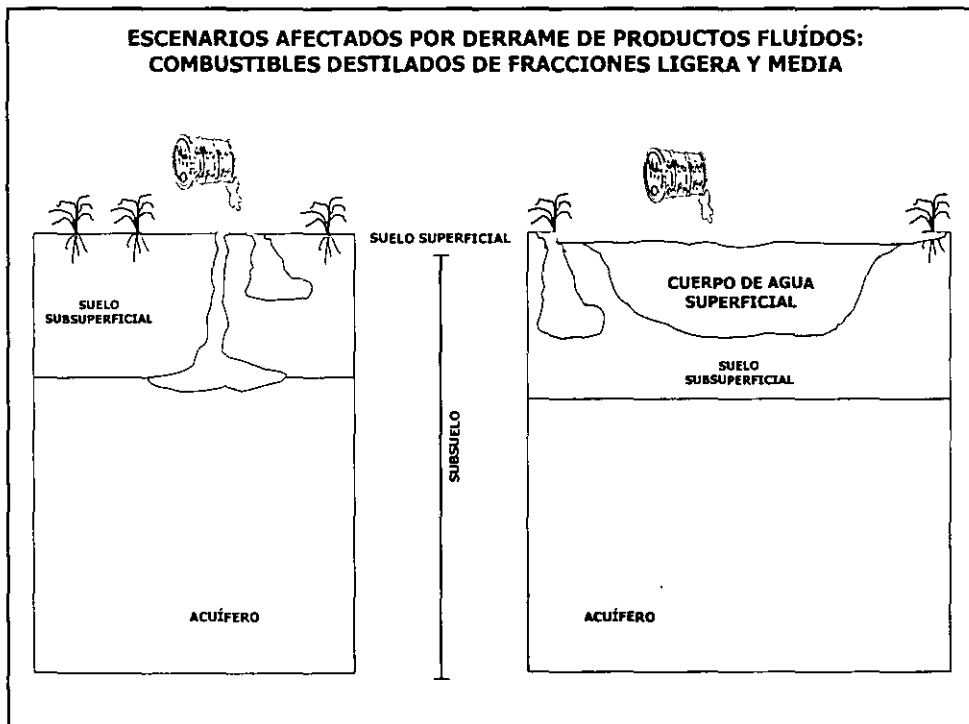
Según el tipo de contaminantes

- ✓ **Hidrocarburos de fracción ligera**
- ✓ **Hidrocarburos de fracción media**
- ✓ **Hidrocarburos de fracción pesada**



PRODUCTOS REFINADOS	FRACCIÓN	POSIBILIDADES DE BIODEGRADACIÓN
GASOLINA	LIGERA	MUY BUENAS (100%), AUNQUE SE DA NATURALMENTE PÉRDIDA POR VOLATILIZACIÓN
GASAVIÓN		
GASNAFTA		
GASOLVENTE		
QUEROSINA	MEDIA	MUY ALTAS (100%)
TURBOSINA		
DIESEL		
GASÓLEO		
ACEITES	PESADA	REGULARES (50%)
COMBUSTÓLEO		MUY BAJAS (<20%)
ASFALTO		NINGUNA
PETRÓLEO CRUDO →		REGULARES (MÁX. 60%)

El sobrecalentamiento genera hidrocarburos muy complejos, por ejemplo los poliaromáticos →



**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PRODUCTOS REFINADOS DE LA FRACCIÓN LIGERA**

**GASOLINA  
GASAVIÓN  
GASNAFTA  
GASOLVENTE**

**BIORREMEDIACIÓN *IN SITU***

- definición de la profundidad de suelo afectado
- descartar presencia de combustibles en fase libre flotando sobre el agua subterránea
- instalación de galerías de infiltración de nutrientes (amonio y fosfatos) y cultivos microbianos
- instalación de pozos de inyección / extracción de gases con sistema de filtración

**CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN SUELO QUE PODRÍA SER BIODEGRADADA  
50,000 mg/kg**

**BIORREMEDIACIÓN FUERA DEL SITIO**

- recomendable la incorporación de composta para evitar volatilización
- construcción de biopilas o bioceldas
- adición de nutrientes (bioestimulación) (amonio y fosfatos)
- adición de cultivos microbianos (bioincremento)

**TIEMPO MÁXIMO QUE PODRÍA TOMAR LA BIORREMEDIACIÓN DE 3 A 6 MESES**

**SEGUIMIENTO ANALÍTICO MENSUAL  
MÉTODO EPA 8015 C PARA LA FRACCIÓN COMPLETA  
MÉTODO EPA 8260 D PARA LOS BTEX**

**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON PRODUCTOS REFINADOS DE LA FRACCIÓN MEDIA**

**QUEROSINA  
TURBOSINA  
DIESEL  
GASÓLEO**

**BIORREMEDIACIÓN *IN SITU***

- definición de la profundidad de suelo afectado
- descartar presencia de combustibles en fase libre flotando sobre el agua subterránea
- instalación de galerías de infiltración de nutrientes (amonio y fosfatos) y cultivos microbianos
- instalación de pozos de inyección / extracción de gases con sistema de filtración

**CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN SUELO QUE PODRÍA SER BIODEGRADADA  
50,000 mg/kg**

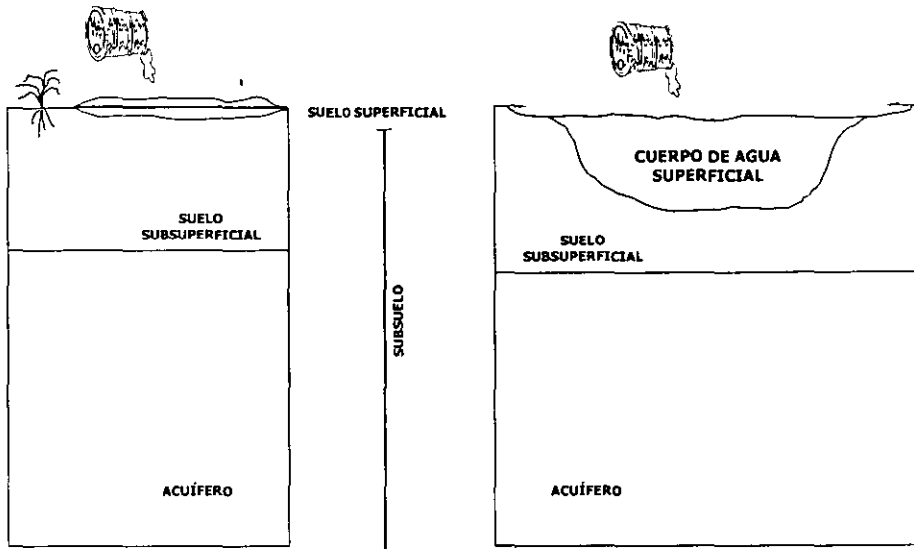
**BIORREMEDIACIÓN FUERA DEL SITIO**

- deseable la incorporación de composta para provocar oxigenación
- construcción de biopilas o bioceldas
- adición de nutrientes (bioestimulación) (amonio y fosfatos)
- adición de cultivos microbianos (bioincremento)

**TIEMPO MÁXIMO QUE PODRÍA TOMAR LA BIORREMEDIACIÓN DE 3 A 6 MESES**

**SEGUIMIENTO ANALÍTICO MENSUAL  
MÉTODO EPA 8015 C PARA LA FRACCIÓN COMPLETA**

**ESCENARIOS AFECTADOS POR DERRAME DE PRODUCTOS VISCOSOS:  
CRUDO, COMBUSTÓLEO, ACEITES, DESECHOS PETROLEROS**



**BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS  
CON PETRÓLEO CRUDO**

**BIORREMEDIACIÓN *IN SITU***

- poco recomendable

CONCENTRACIÓN MÁXIMA EN SUELO  
QUE PODRÍA SER BIODEGRADADA  
HASTA EN UN 60% DE LA  
CONCENTRACIÓN ORIGINAL  
50,000 mg/kg

SEGUIMIENTO ANALÍTICO MENSUAL  
MÉTODO EPA 418.1 Y SI SE DESEA APRECIAR  
CAMBIOS EN LA COMPOSICIÓN EPA 8015 C

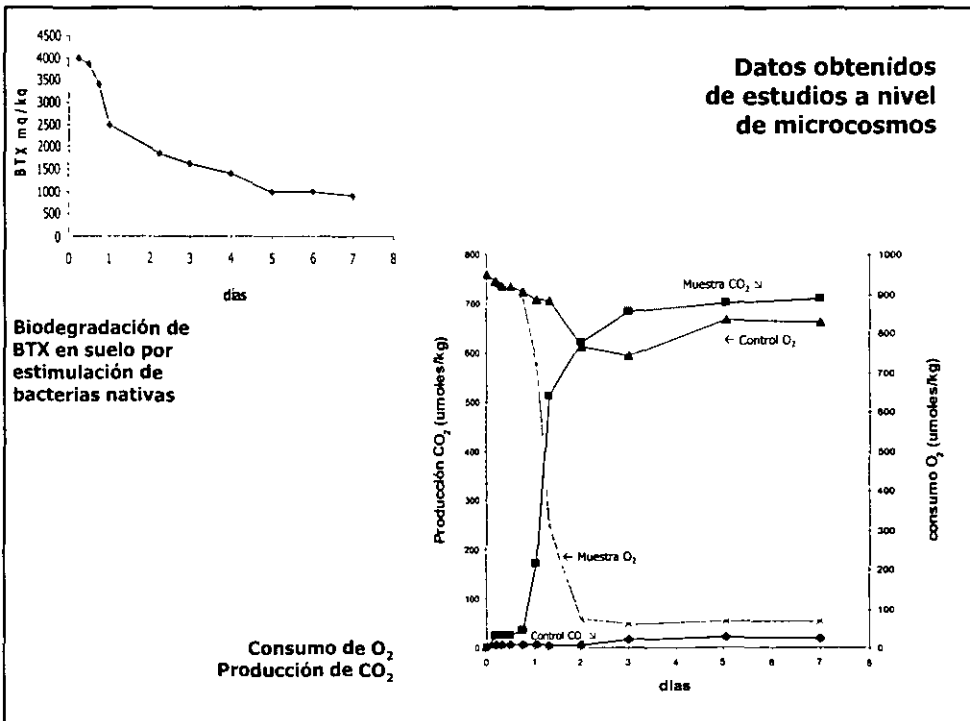
**BIORREMEDIACIÓN FUERA DEL SITIO**

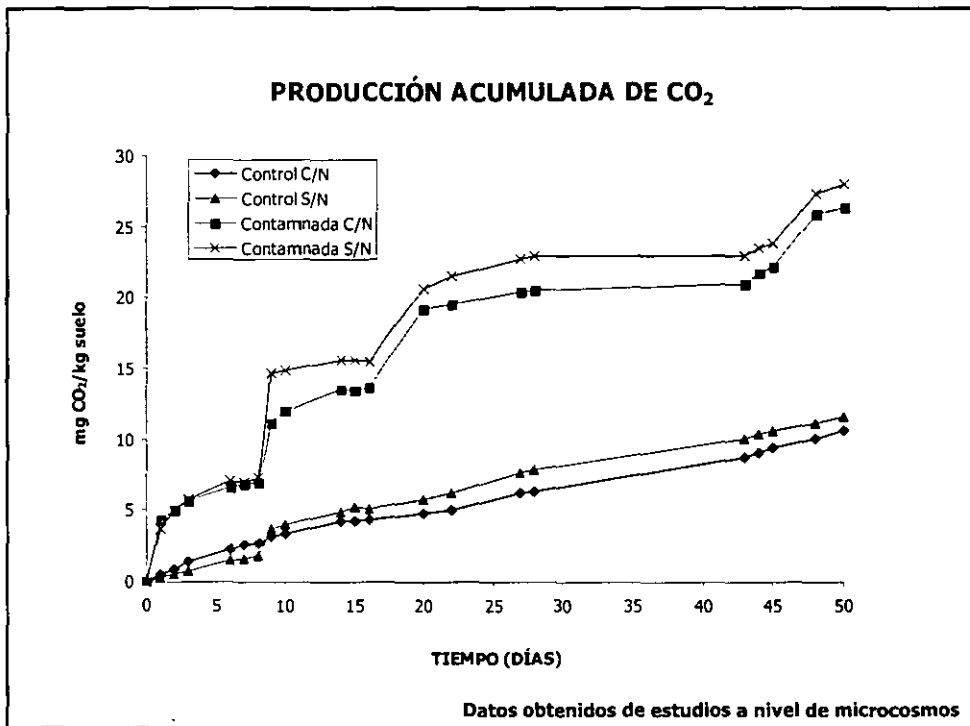
- deseable la incorporación de composta para facilitar el movimiento y provocar oxigenación
- biocultivo (land-farming)
- adición controlada de agentes tensoactivos
- adición de nutrientes (bioestimulación) (amonio y fosfatos)
- adición de cultivos microbianos (bioincremento)

TIEMPO MÁXIMO QUE PODRÍA  
TOMAR LA BIORREMEDIACIÓN  
POR LO MENOS UN AÑO

## PARÁMETROS DE SEGUIMIENTO EN UNA BIORREMEDIACIÓN

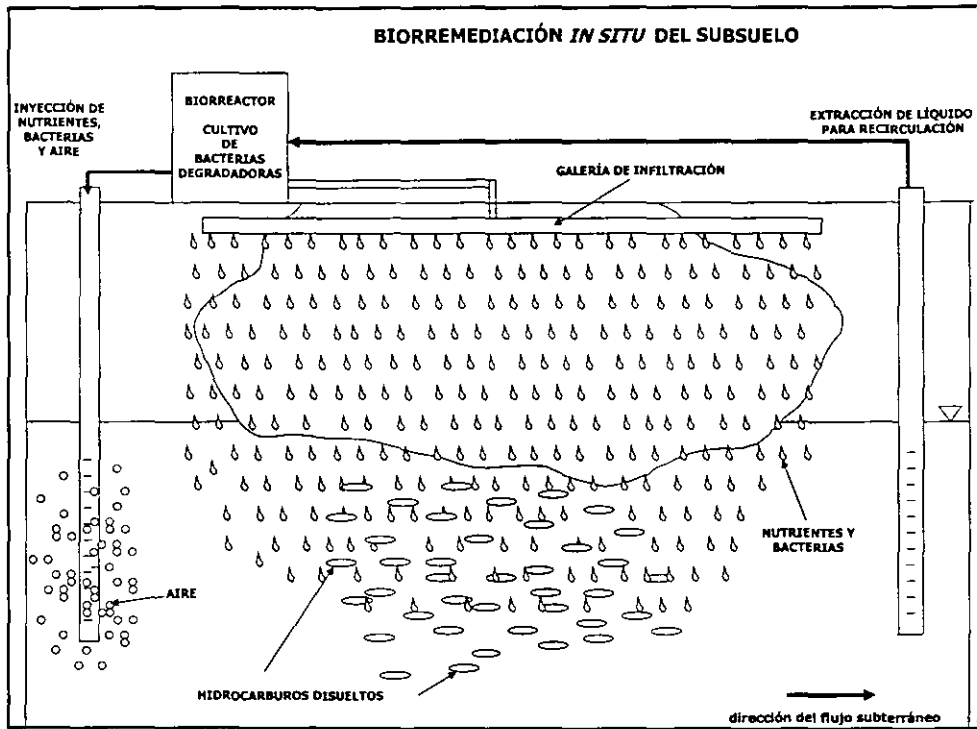
- **contaminantes residuales**
  - consumo de nutrientes
    - variación del pH
  - porcentaje de humedad
  - proporción de bacterias
    - producción de CO<sub>2</sub>
    - consumo de oxígeno





**Cuando la contaminación con productos de fracciones ligera y media, se encuentra en el suelo subsuperficial y algunos hidrocarburos están disueltos en el agua subterránea los principales retos son la disponibilidad de nutrientes y de oxígeno.**

**La descripción de las alternativas teóricas existe, pero en México aún no se han llevado a la práctica debido al riesgo que implica su aplicación.**



## **DESVENTAJAS DE LA BIORREMEDIACIÓN**

---

- **largos tiempos de tratamiento**
  - **difícil en materiales geológicos impermeables**
  - **susceptible a la presencia de inhibidores**
  - **difícil degradación de compuestos altamente clorados**
- 



**Un suelo contaminado adicionado de cal constituye un ambiente poco propicio para el desarrollo microbiano: aumenta el pH y reduce la disponibilidad de agua**

## **ATENUACIÓN NATURAL**

DISMINUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES  
EN SUELO Y SUBSUELO POR EFECTO DE LAS CONDICIONES NATURALES  
DEL SITIO, ESPECIALMENTE DE LA **FLORA NATIVA**

MEDIANTE LA UTILIZACIÓN EN CASCADA  
DE LOS DIFERENTES  
**ACEPTORES DE ELECTRONES** DISPONIBLES:

- ✓ **Oxígeno**
- ✓ **Nitratos**
- ✓ **Ion férrico**
- ✓ **Sulfatos**
- ✓ **Bióxido de carbono**

## **SEGUIMIENTO DE LA ATENUACIÓN NATURAL**

- ✓ **Pérdida documentada de la concentración de contaminantes**
- ✓ **Registros de campo para demostrar que realmente están ocurriendo procesos naturales**
- ✓ **Ensayos en el laboratorio para confirmar la existencia de una actividad biodegradadora**



**Cada monitoreo es una re-caracterización**



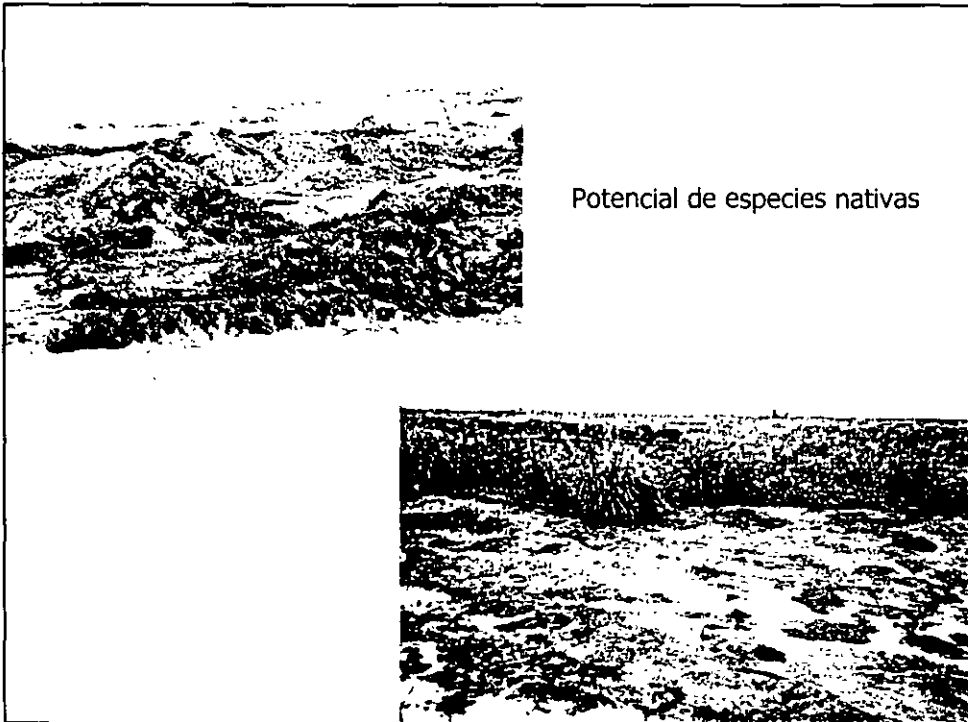
## ATENUACIÓN NATURAL: Monitoreo periódico a largo plazo

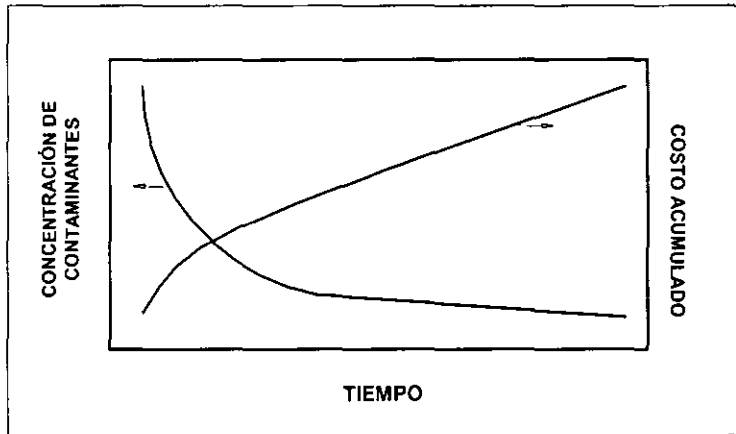
### √ EN CAMPO

- perforaciones discretas a la profundidad de la contaminación
- obtención de muestras inalteradas
- medición *in situ* de gases:  
(oxígeno, bióxido de carbono, nitrógeno, metano)

### √ EN EL LABORATORIO

- cuantificación de los contaminantes "objetivo" para la evaluación del riesgo a la salud
- cuantificación de la masa total de contaminantes
- cuantificación de bacterias degradadoras
- detección de genes catabólicos
- cuantificación de aceptores finales de electrones





COMPORTAMIENTO DE LA REMEDIACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO

**ssb@pumas.iingen.unam.mx**



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
OTRAS TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS  
CONTAMINADOS.**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**

# OTRAS TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM

## TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN MÁS UTILIZADAS EN MÉXICO

Remediación de suelo superficial <i>in situ</i>	Remediación de suelo fuera del sitio	Remediación de suelo profundo y agua subterránea <i>in situ</i>
oxidación química biorremediación encapsulamiento solidificación y estabilización extracción de vapores atenuación natural	confinamiento incineración oxidación química biorremediación lavado (flushing) encapsulamiento estabilización	aislamiento y contención bombeo y tratamiento  tratamiento de aguas subterráneas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• venteo</li> <li>• adsorción en carbón activado</li> </ul>

**OXIDACIÓN QUÍMICA  
CON PERMANGANATO DE POTASIO O SODIO**

**CONTAMINANTES ORGÁNICOS +  $\text{KMnO}_4$**



**$\text{CO}_2 + \text{MnO}_2 + \text{K}^+ + \text{H}_2\text{O} + \dots$**

**Ejemplos de aplicación: hidrocarburos, disolventes clorados**



**Aspecto del permanganato de potasio**

### REQUERIMIENTOS DE OXIDANTE

Sustancia	Formula condensada	g $\text{MnO}_4^-$ / g sustancia	g $\text{MnO}_2$ / g sust. oxidada
Naftaleno	$\text{C}_{10}\text{H}_8$	14.8	10.8
Fenantreno	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	14.7	10.7
Pireno	$\text{C}_{10}\text{H}_{10}$	14.5	10.6
Tricloroetileno	$\text{C}_2\text{Cl}_3\text{H}$	1.81	1.32
Fenol	$\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$	11.8	8.62



Oxidación química a escala real



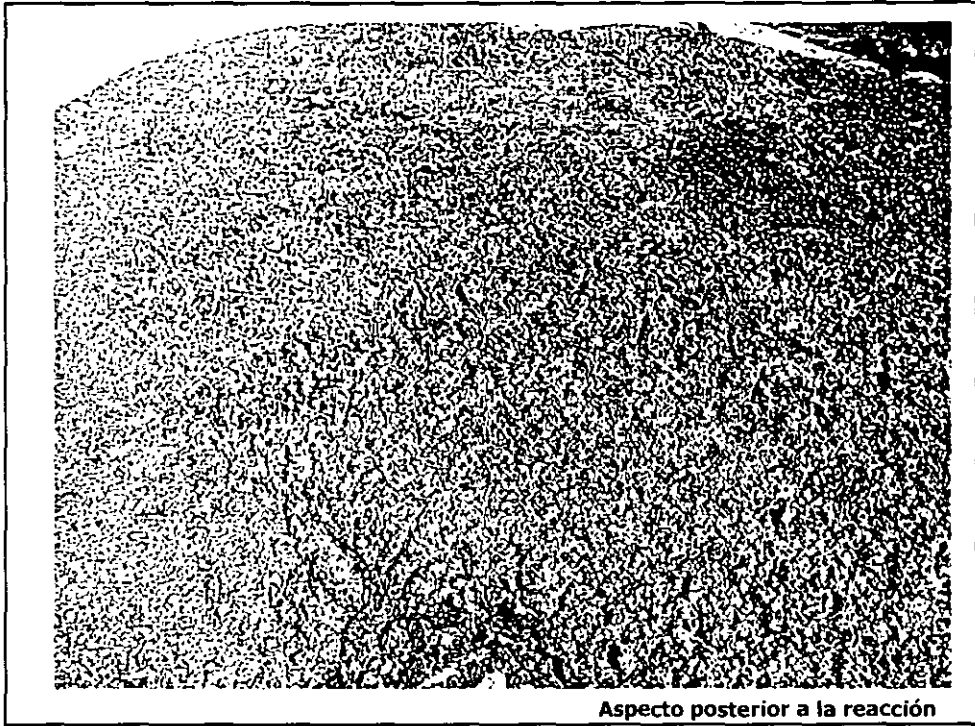
Reacción en proceso (reposo)



Aspecto del suelo al final de la reacción







Aspecto posterior a la reacción



Aspecto del posible lixiviado y el suelo seco

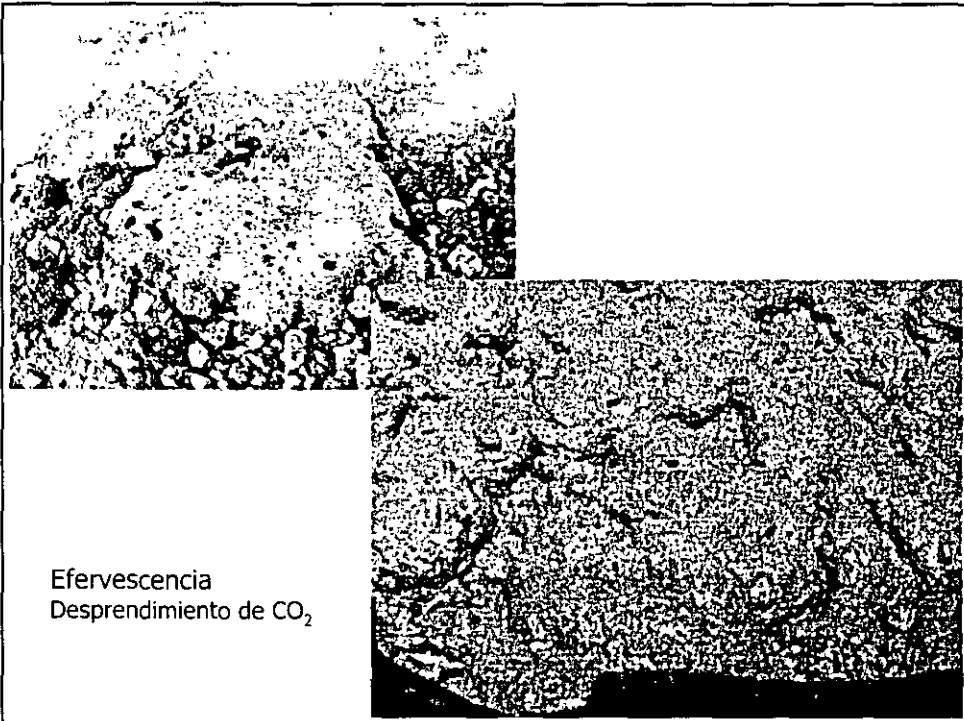
**OXIDACIÓN QUÍMICA CON  
PERÓXIDO DE HIDRÓGENO**  
(30 / 50%)

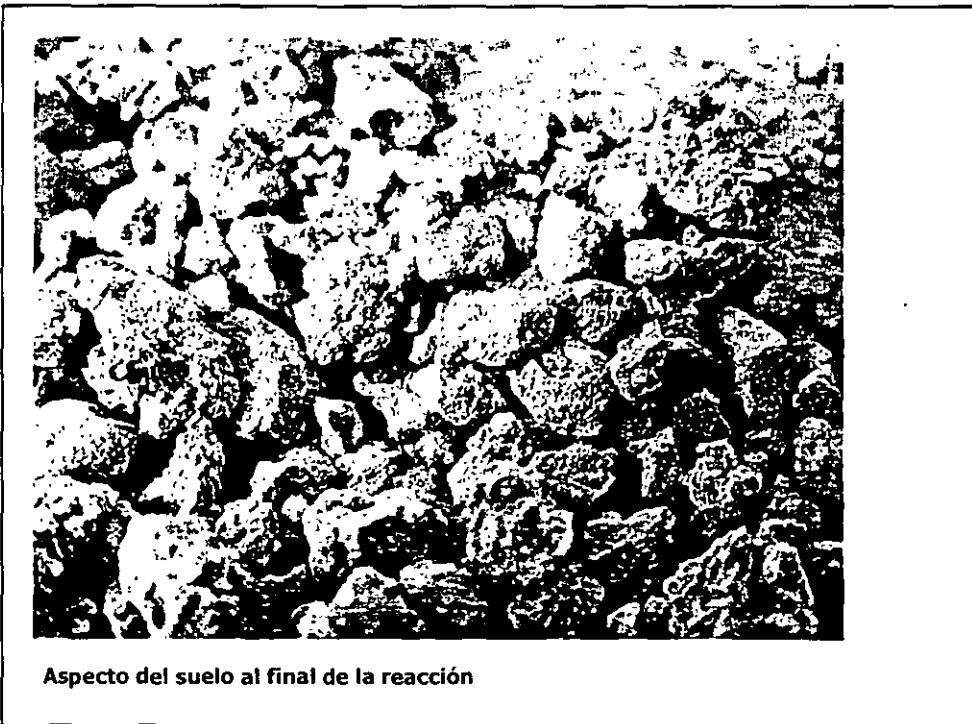
**CONTAMINANTES ORGÁNICOS + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>**

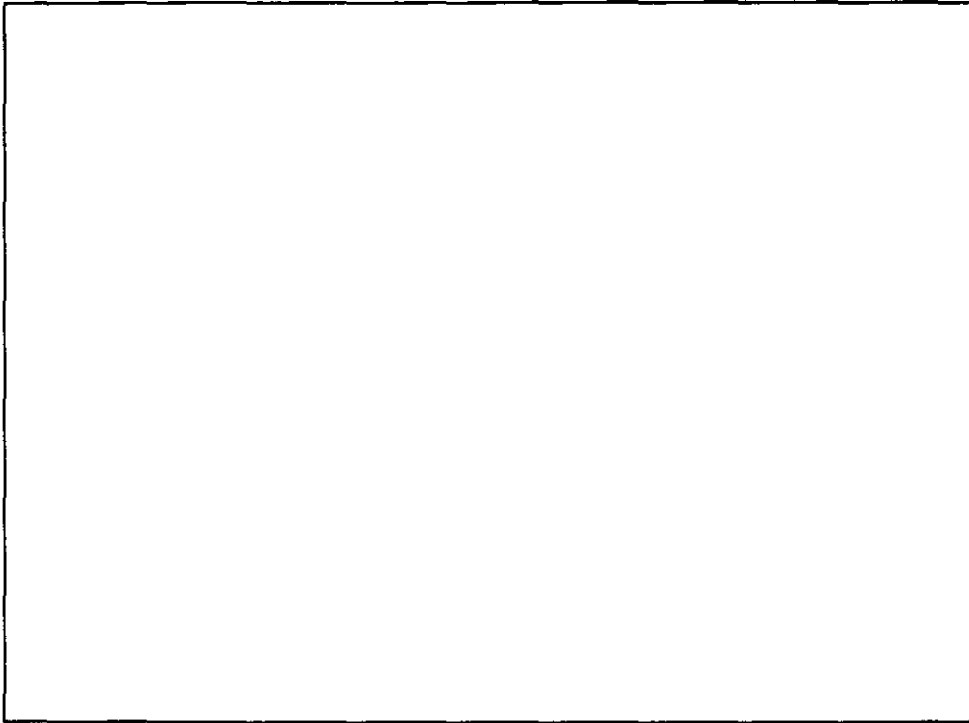
medio ácido, fierro

**CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + ....**

**Ejemplos de aplicación: hidrocarburos, disolventes clorados**

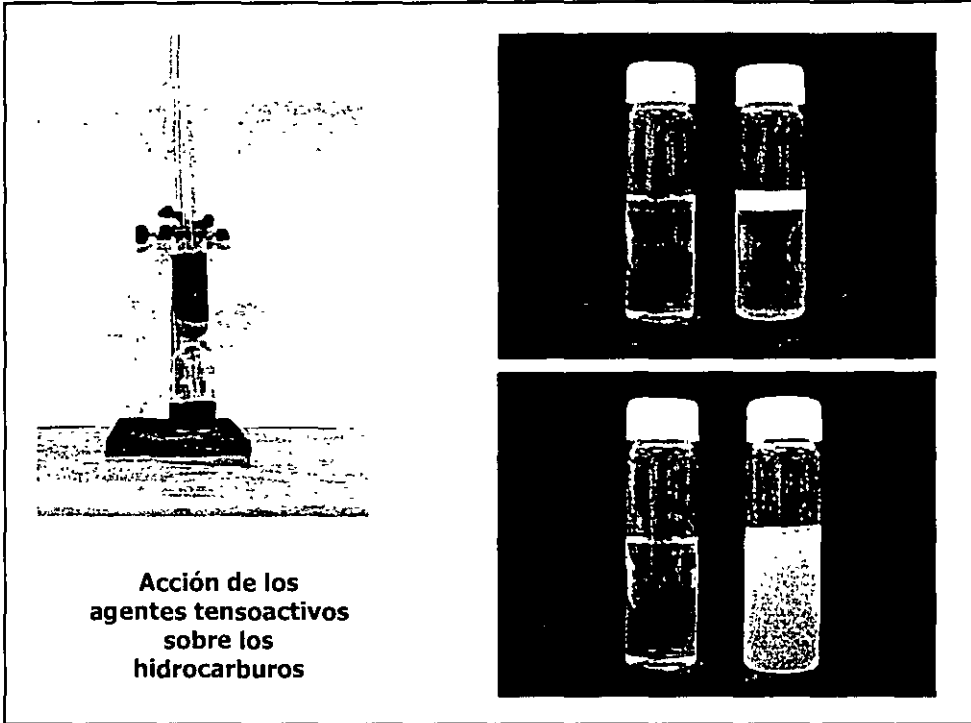


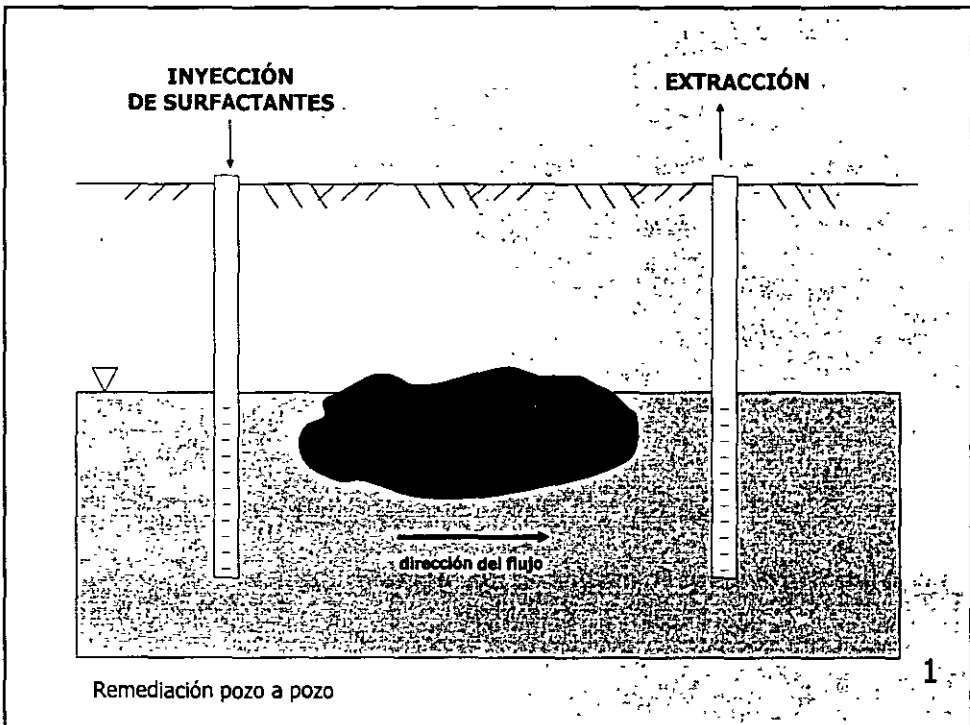


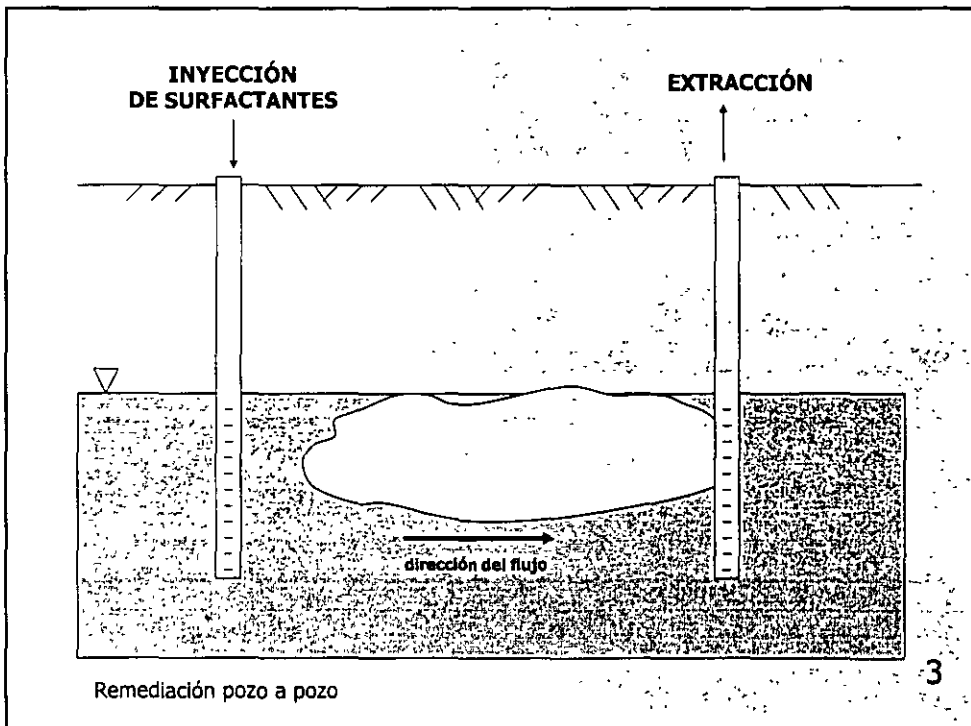
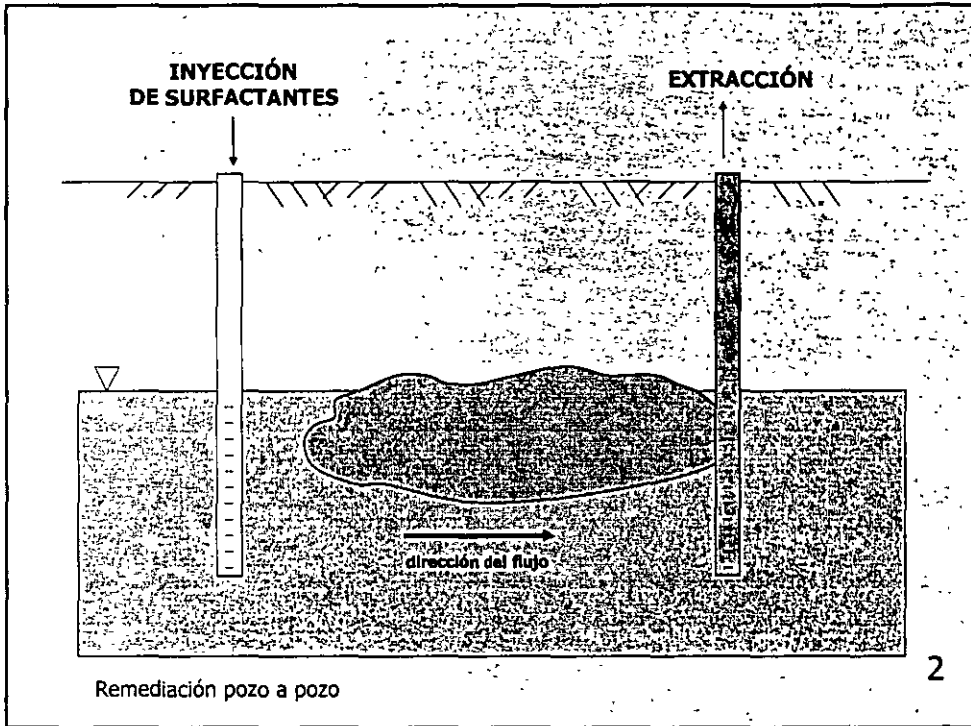


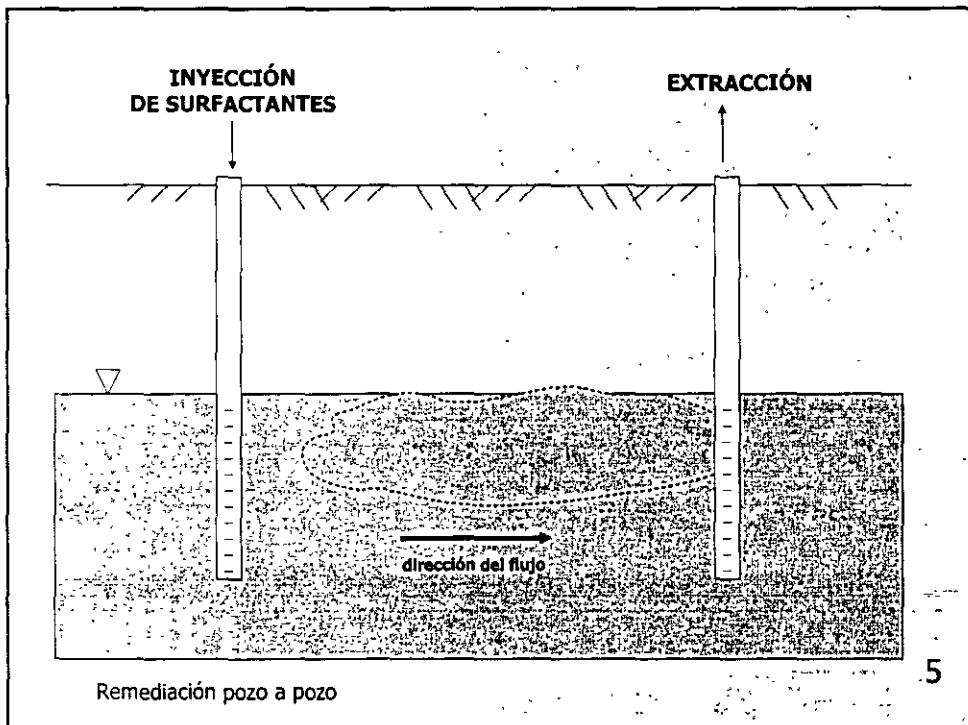
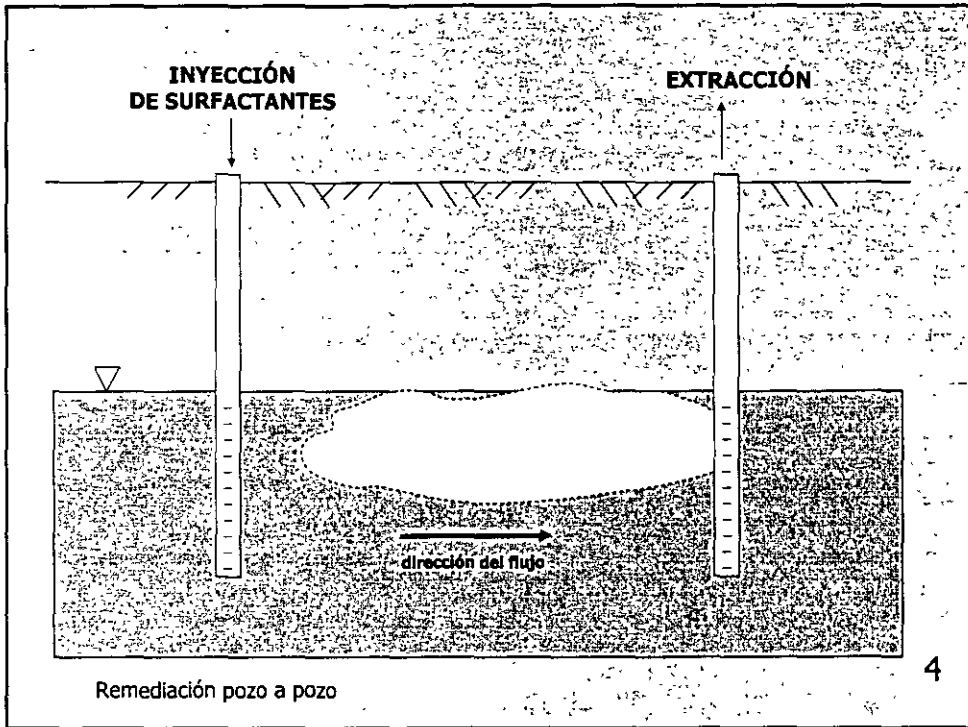
**LAVADO DE SUELOS  
(FLUSHING)**

**Aplicación de agentes tensoactivos  
para modificar la tensión  
superficial y movilizar  
contaminantes**

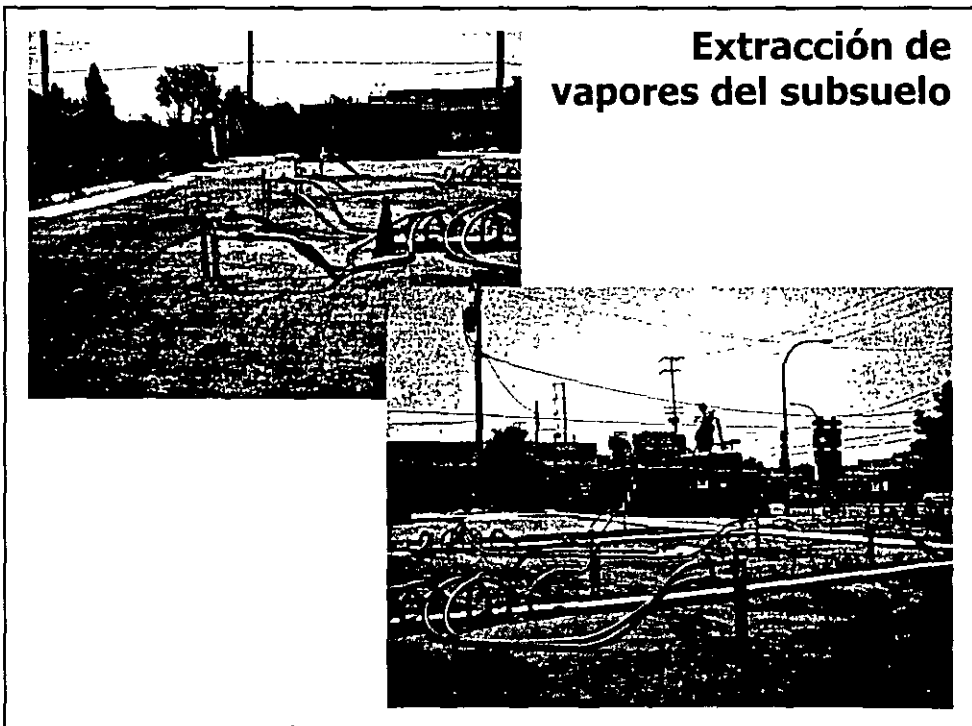
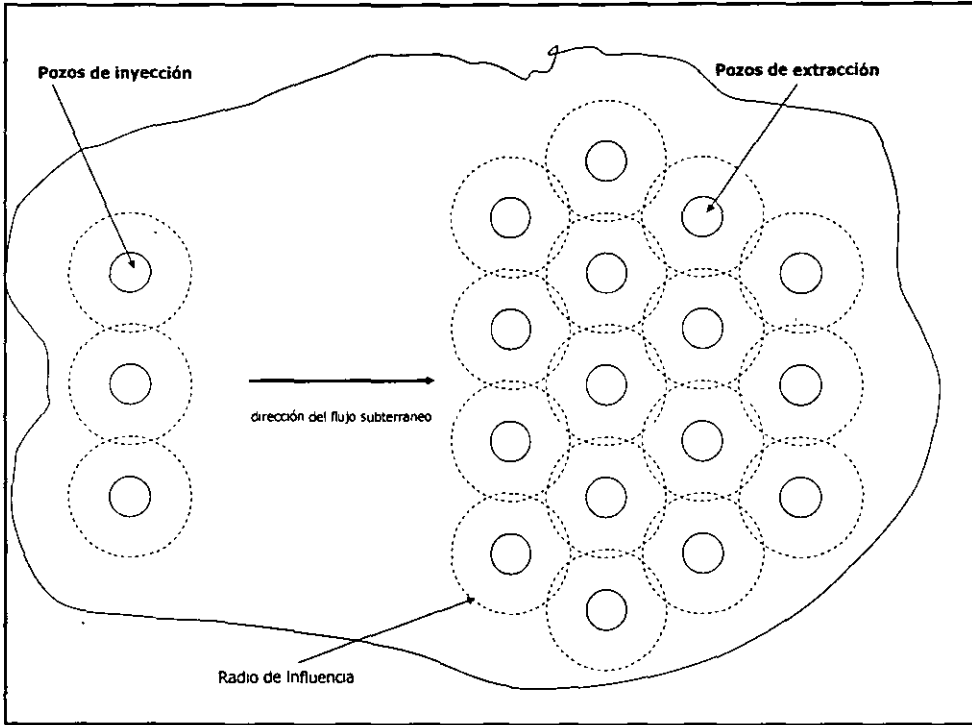


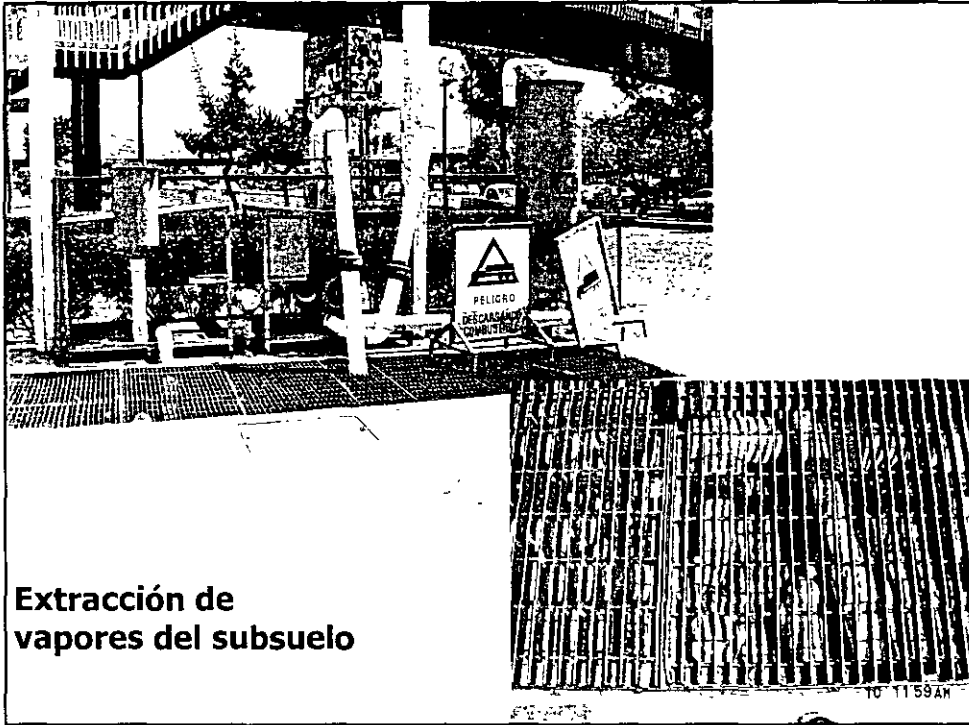


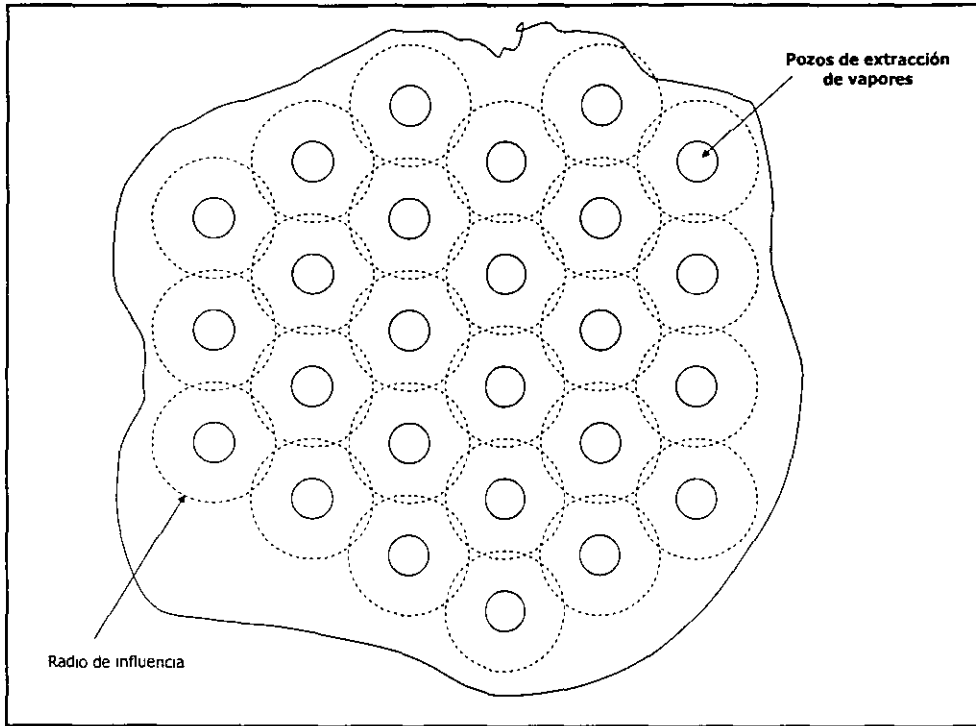








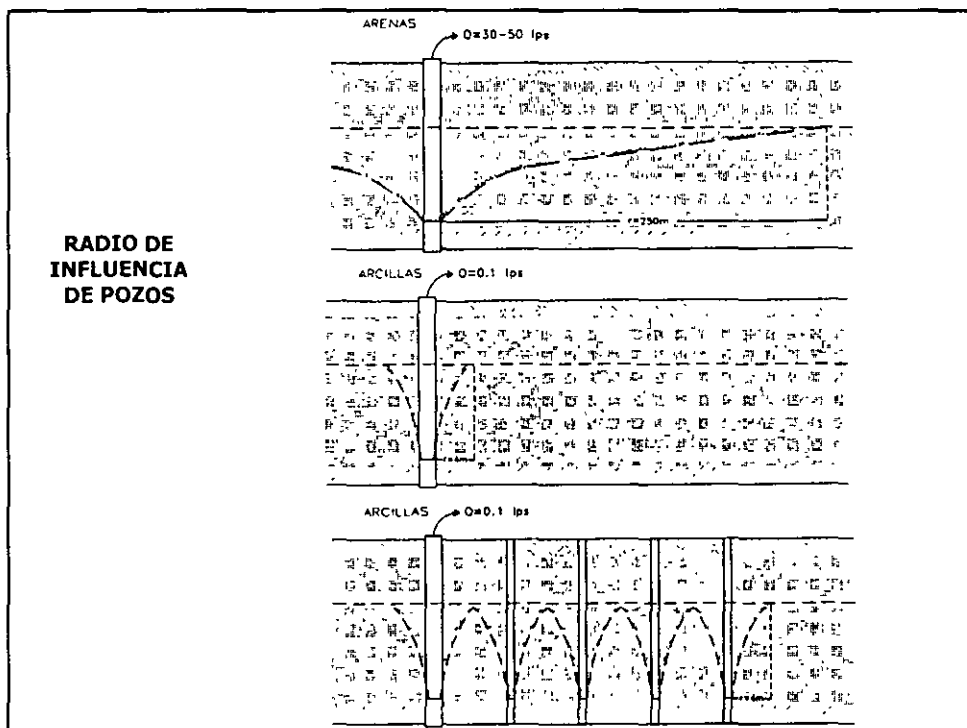




<b>PERMEABILIDAD</b>	
ARCILLA	$10^{-10}$ m/seg
LIMO	$10^{-8}$ m/seg
ARENA FINA	$10^{-6}$ m/seg
ARENA MEDIA	$10^{-4}$ m/seg
ARENA GRUESA	$10^{-2}$ m/seg
	K →

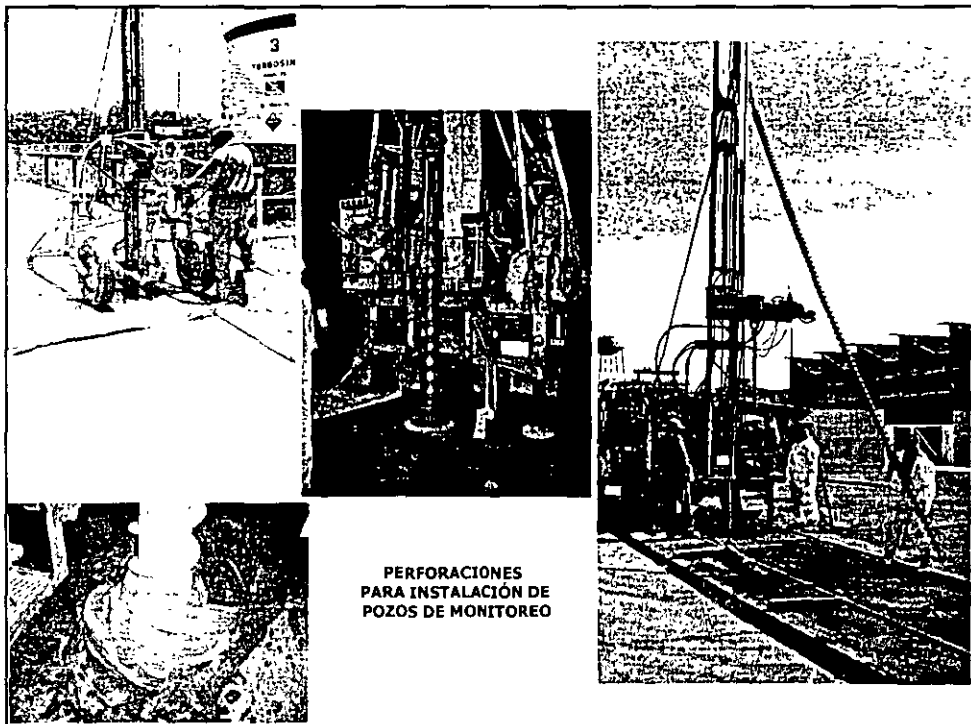
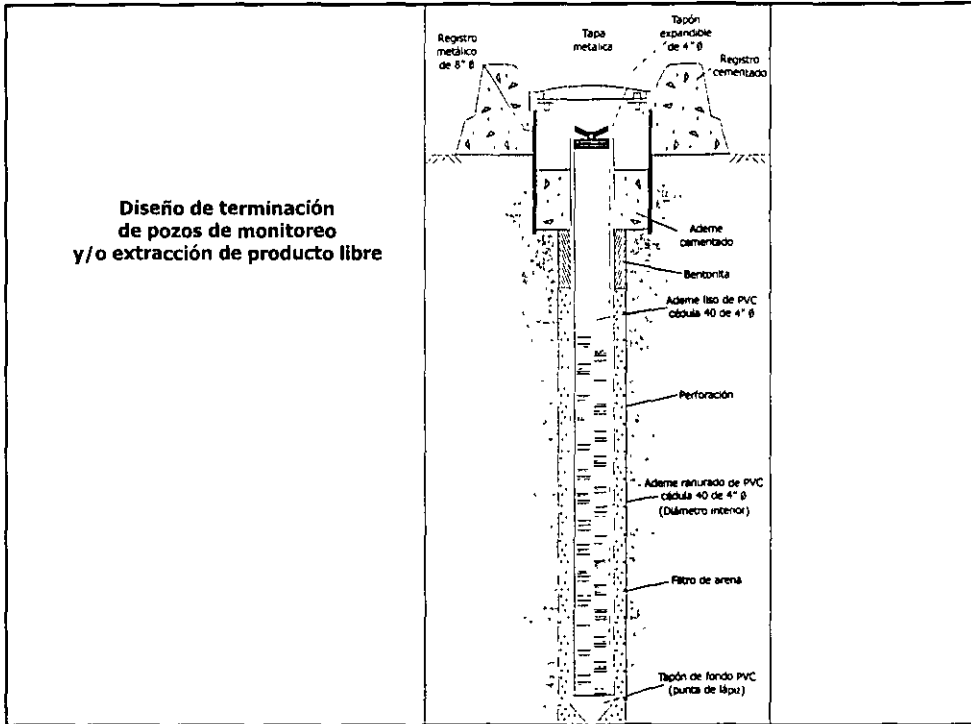
  

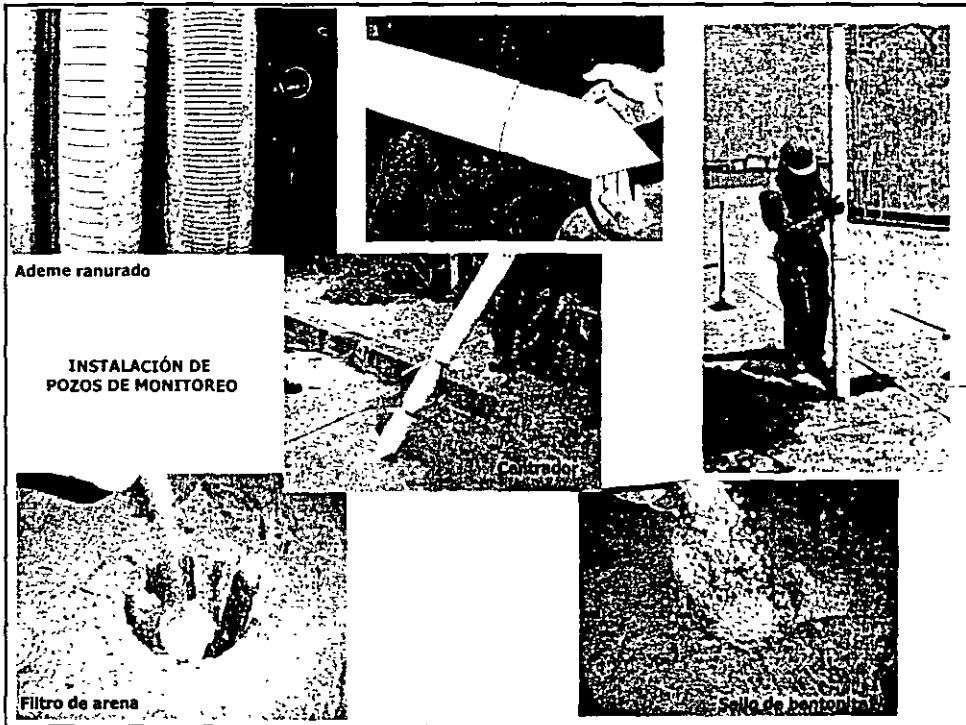
<b>MOVIMIENTO DE FLUIDOS EN EL SUBSUELO</b>	
ARCILLA	LENTO
LIMO	
ARENA FINA	
ARENA MEDIA	
ARENA GRUESA	RAPIDO



### **TÉCNICAS UTILIZADAS (Agua subterránea)**

- **Extracción de producto libre**  
(pozos / galerías)
- **Extracción de agua y tratamiento por venteo**
  - **Filtración**
- **Coagulación / Floculación**
  - **Ozonización**
- **Paredes permeables**





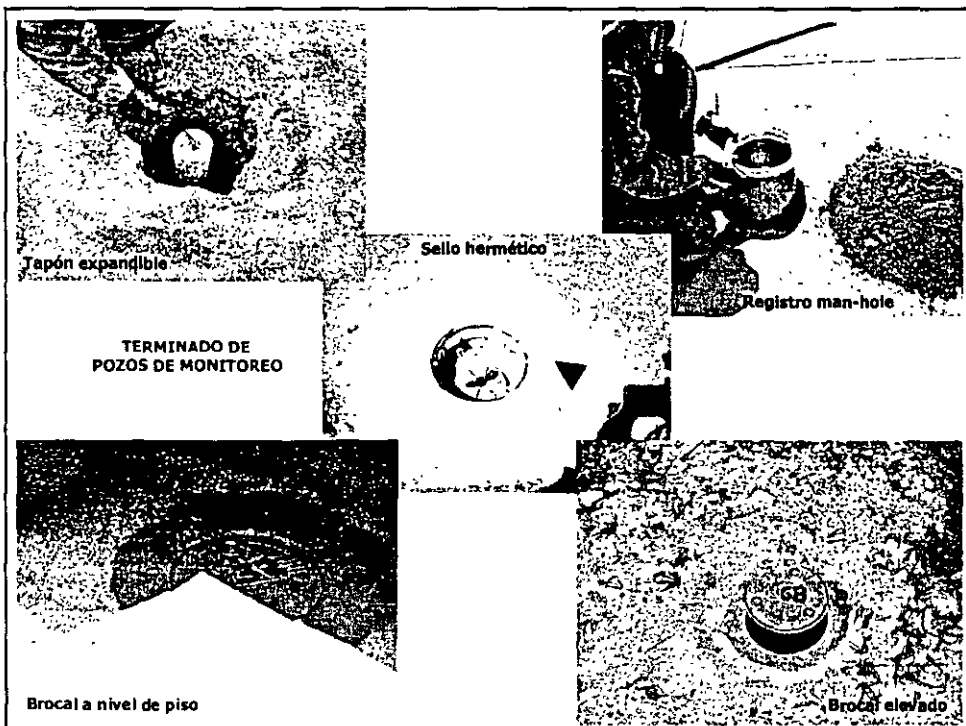
Ademe ranurado

**INSTALACIÓN DE POZOS DE MONITOREO**

Colador

Filtro de arena

Sello de bentonita



Tapón expandible

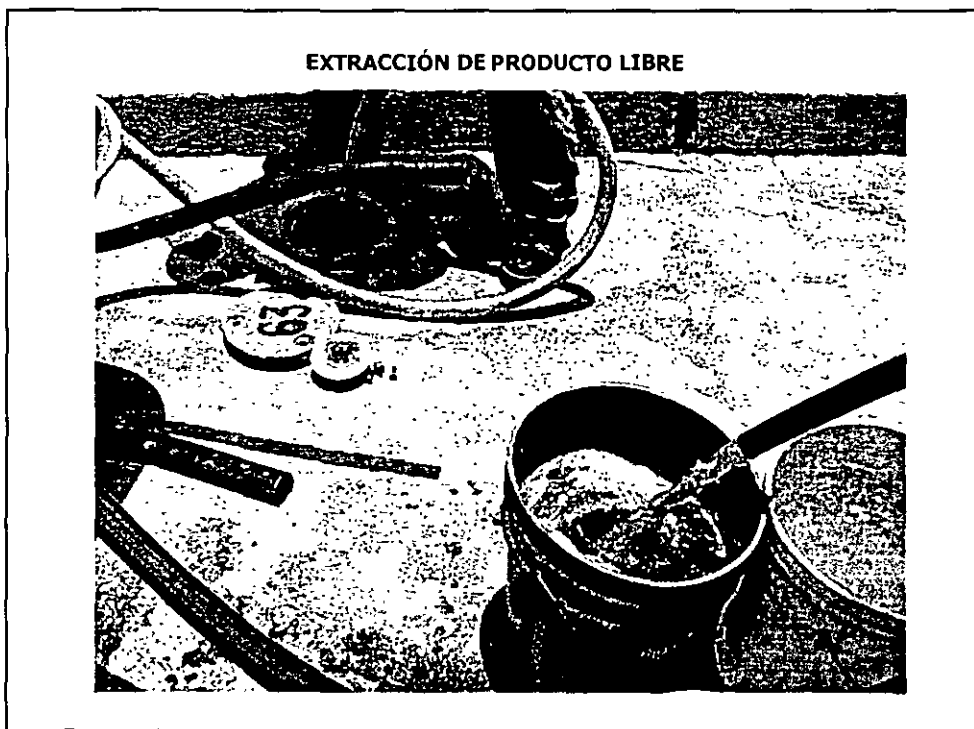
Sello hermético

Registro man-hole

**TERMINADO DE POZOS DE MONITOREO**

Brocal a nivel de piso

Brocal elevado





## REMEDIACIÓN ACTIVA

### VENTAJAS

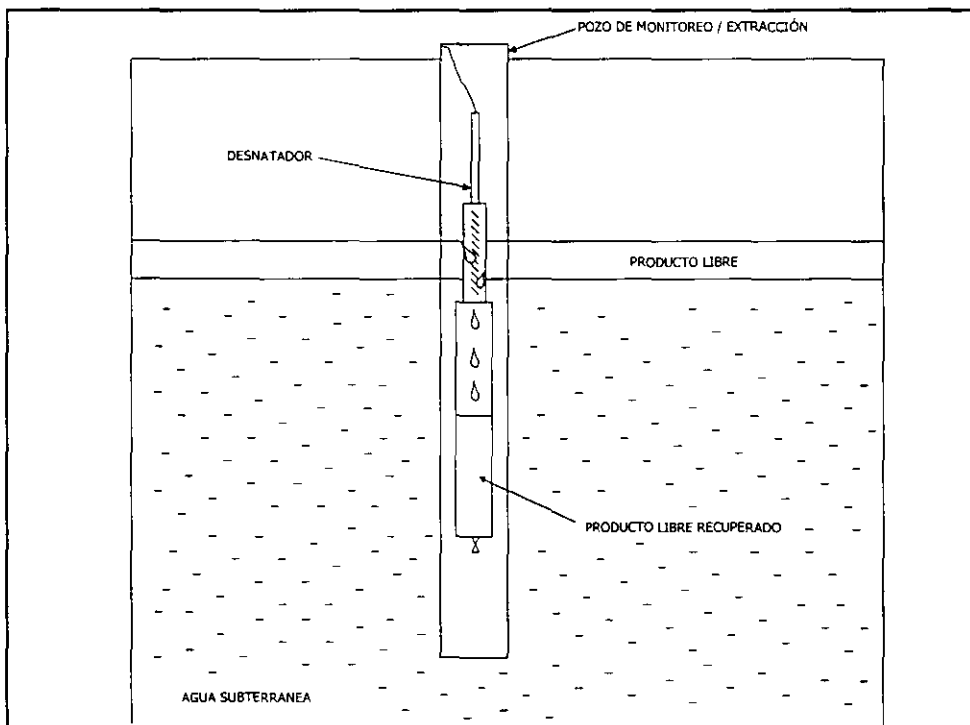
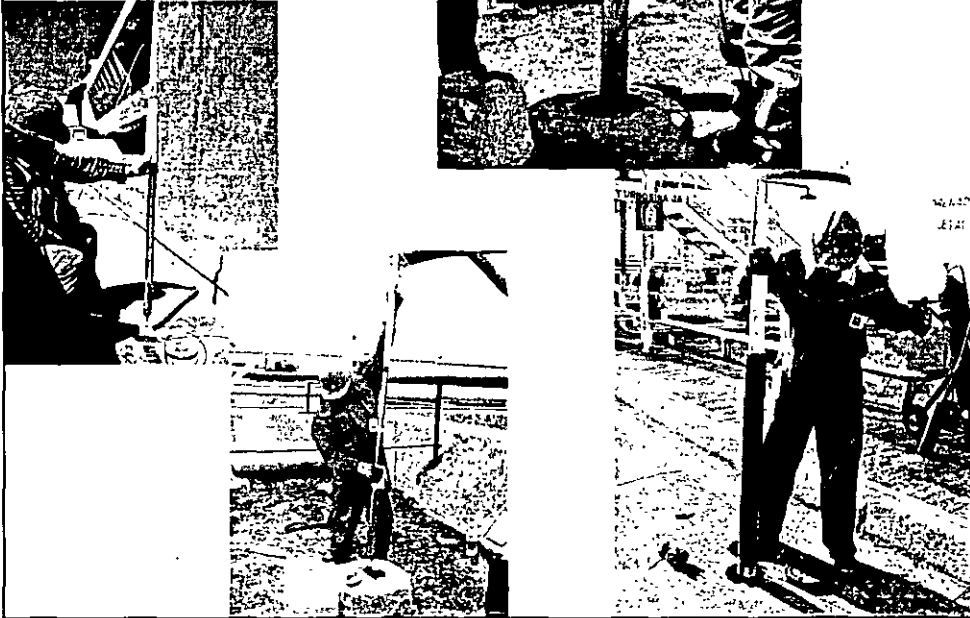
- ✓ Rápida extracción (tiempos cortos)
- ✓ Muy útil cuando existen espesores importantes

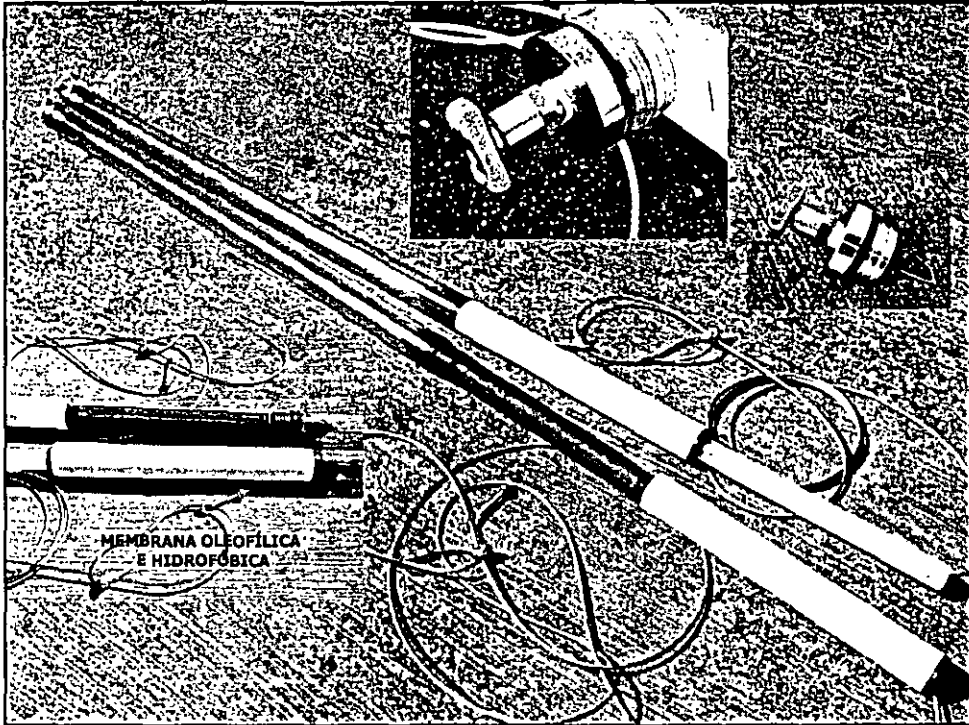
### DESVENTAJAS

- ✓ Alto costo, mucha labor
- ✓ Dificultades administrativas para el seguimiento
  - ✓ Rápido agotamiento de los pozos
- ✓ Extracción inminente de grandes volúmenes de agua
- ✓ Reinyección del agua al subsuelo previo tratamiento
- ✓ Lento goteo del combustible adsorbido en el suelo, hacia el acuífero



**REMEDIACIÓN PASIVA:  
CON AYUDA DE DESNATADORES  
(SKIMMERS)**





## REMEDIACIÓN PASIVA

---

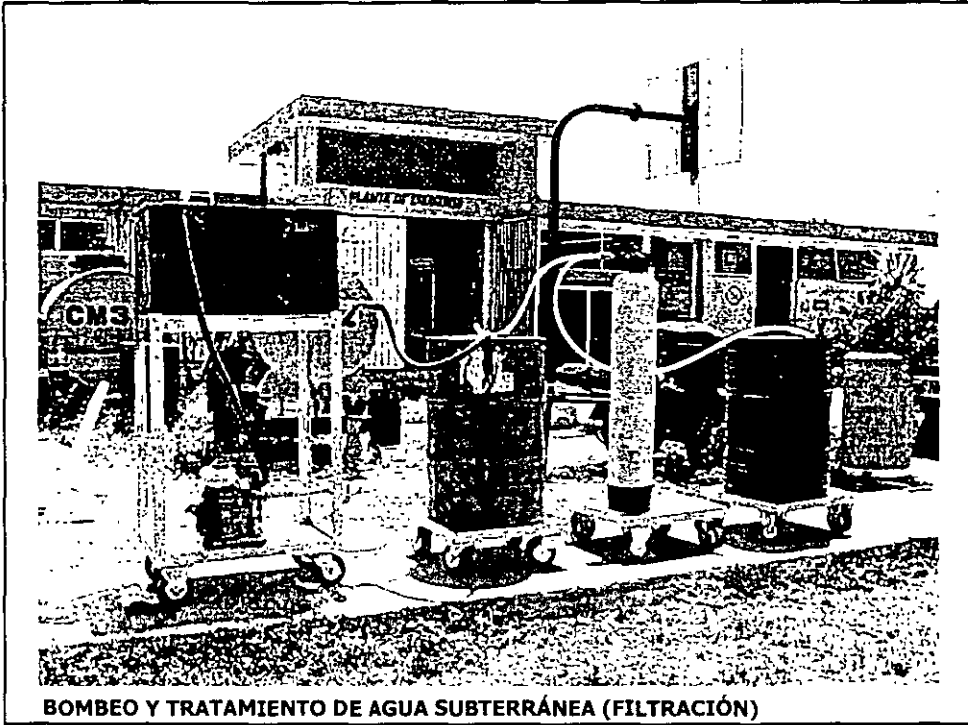
### VENTAJAS

- ✓ Bajo costo
- ✓ Mínimo espacio requerido para la labor
- ✓ Lo puede realizar personal de la propia institución
- ✓ Recuperación únicamente de producto libre, no de agua subterránea
- ✓ Acumulación del producto libre en función de las condiciones naturales
- ✓ Solución segura

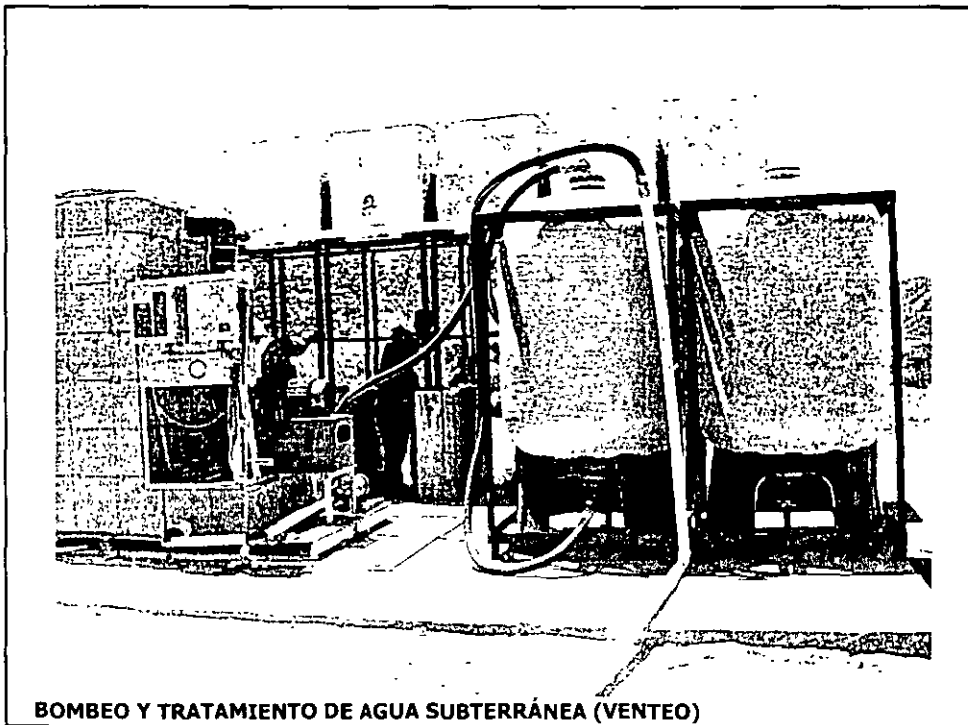
### DESVENTAJAS

- ✓ Largos tiempos

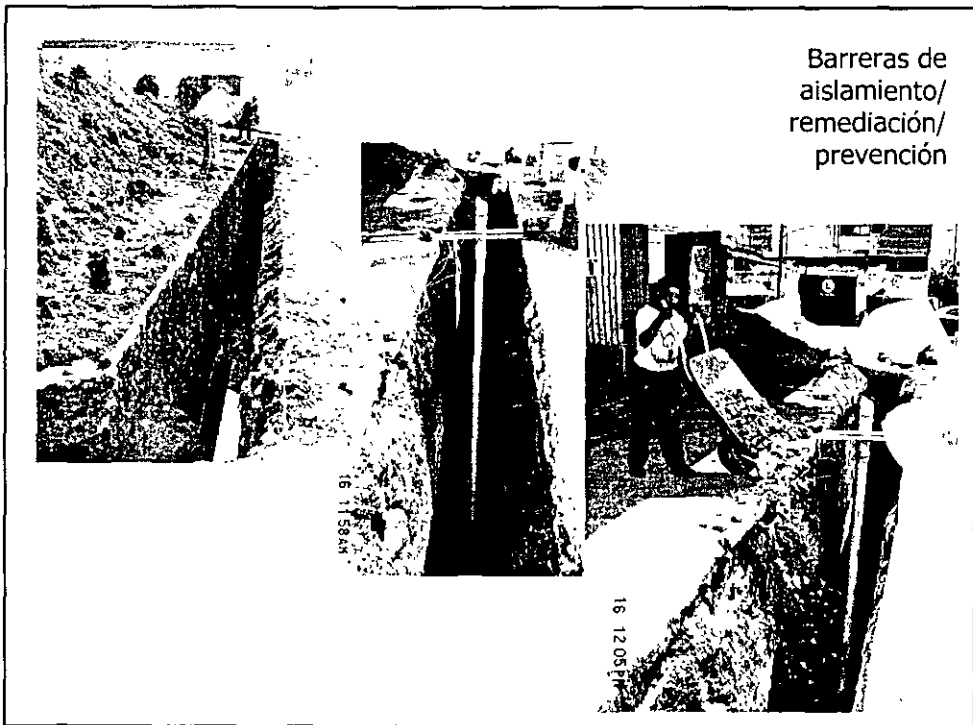
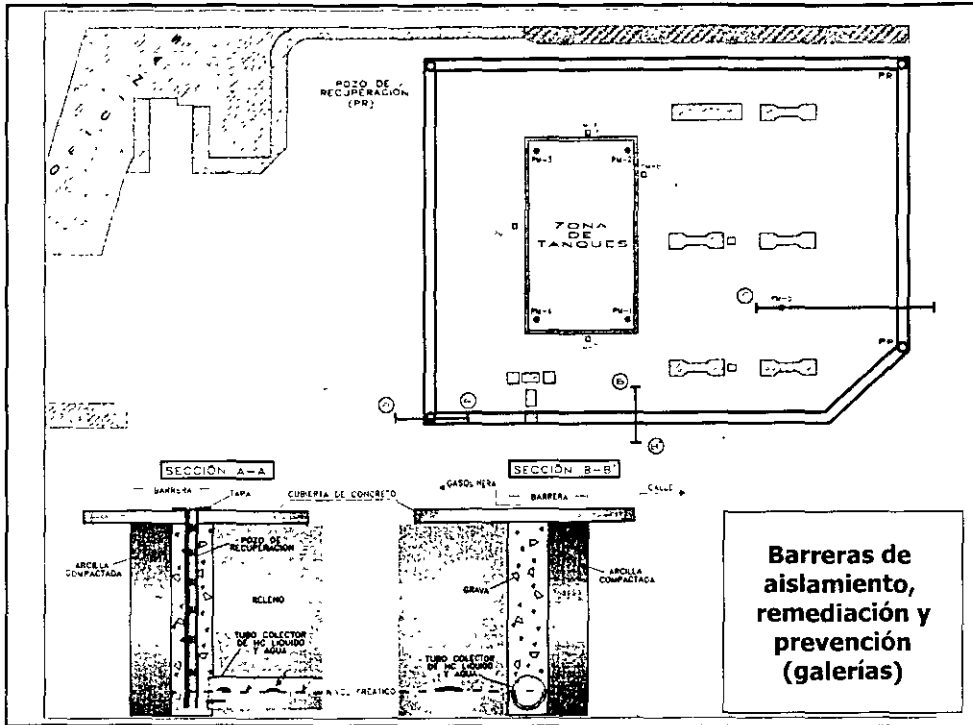




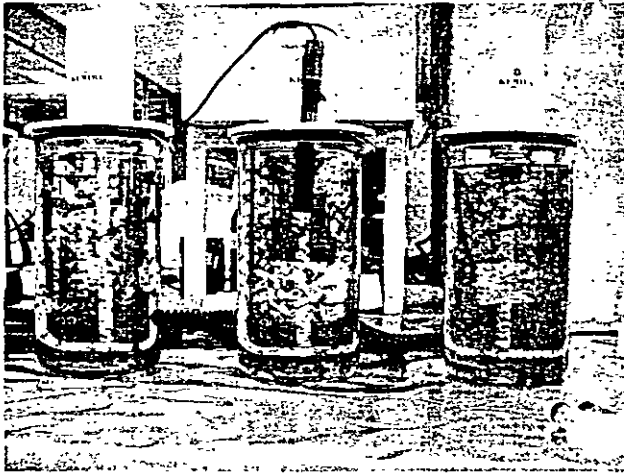
BOMBEO Y TRATAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA (FILTRACIÓN)



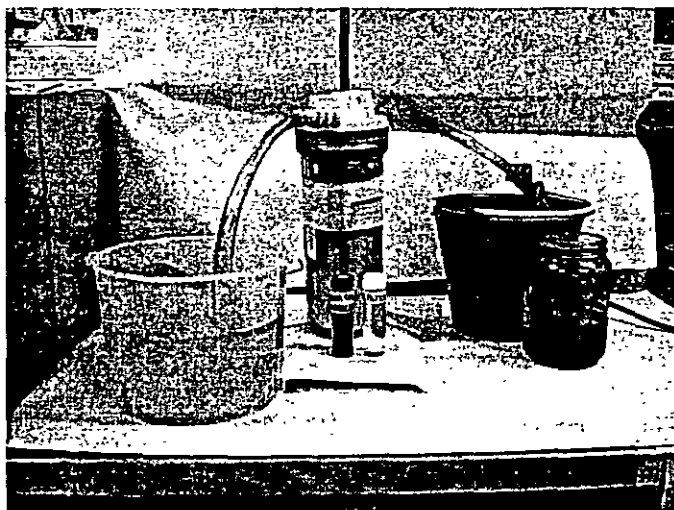
BOMBEO Y TRATAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA (VENTEO)

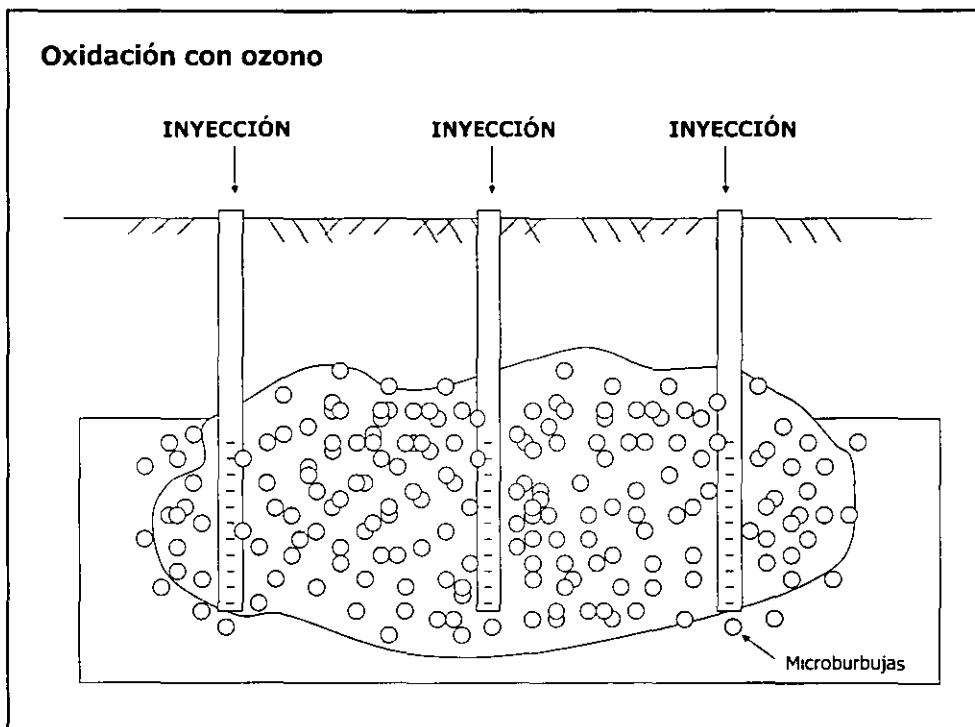
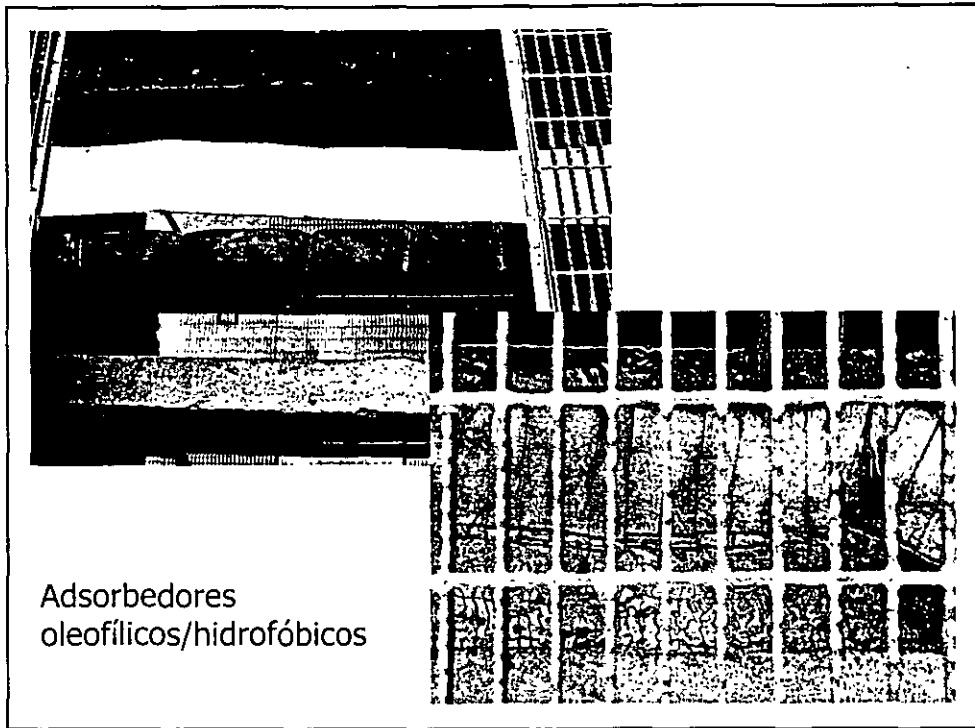


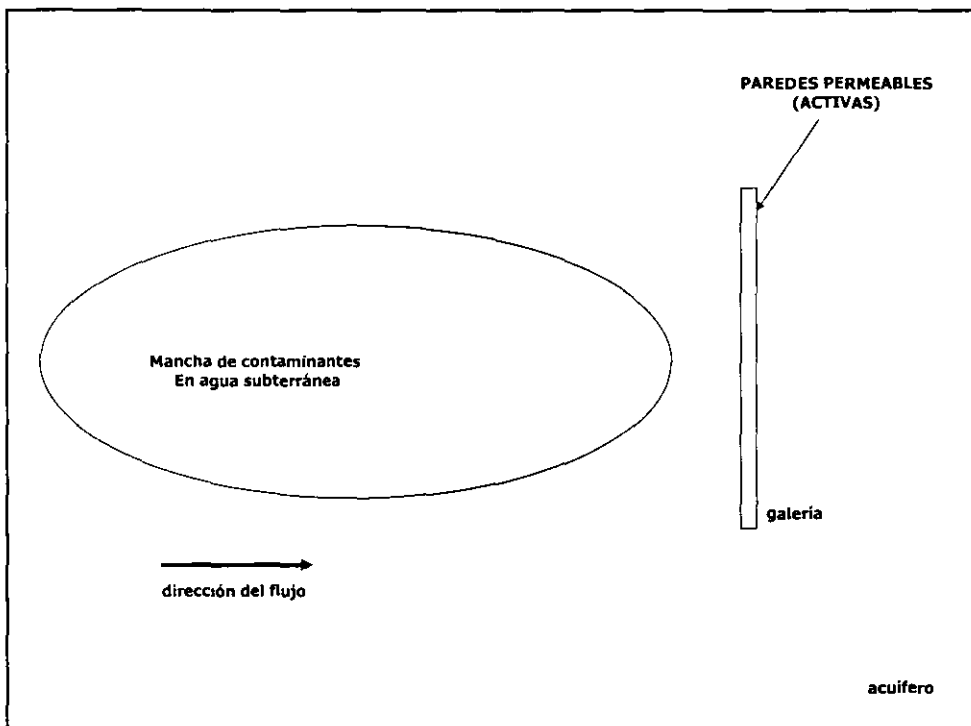
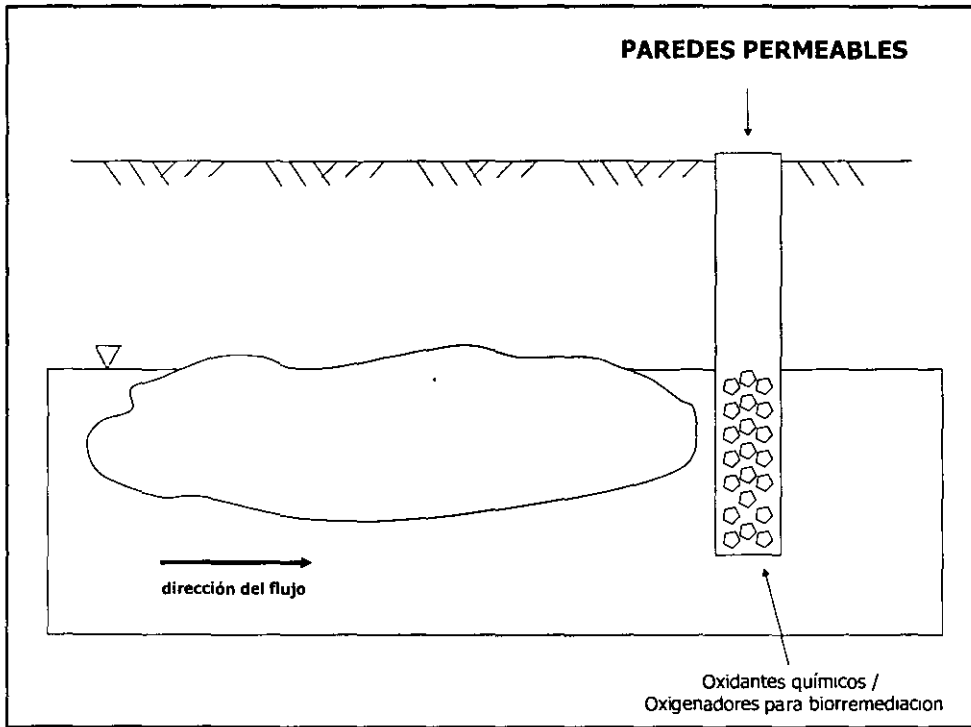
## Coagulación - floculación



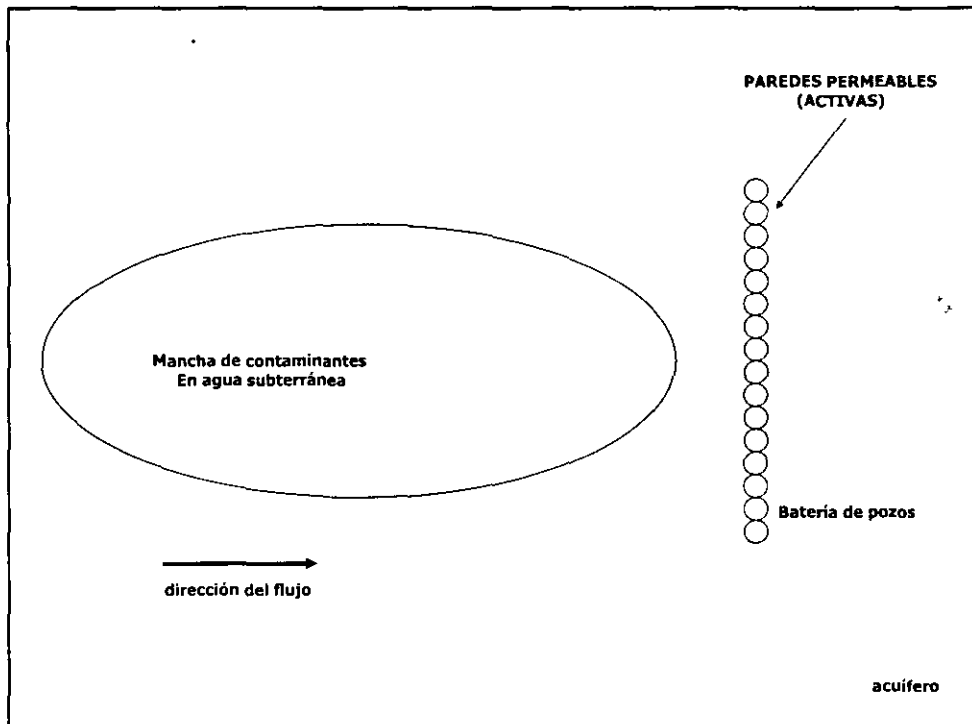
## Filtros oleofílicos/hidrofóbicos











### POSIBLES USOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA SANEADA

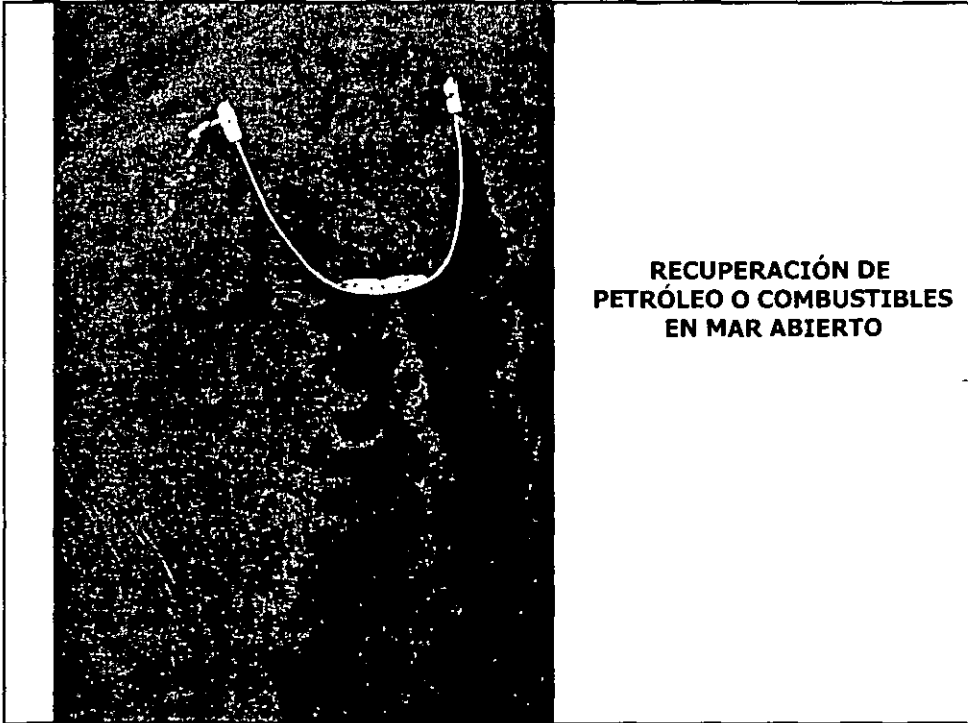
Reinyección al acuífero para mantener la estabilidad del terreno

Riego ornamental

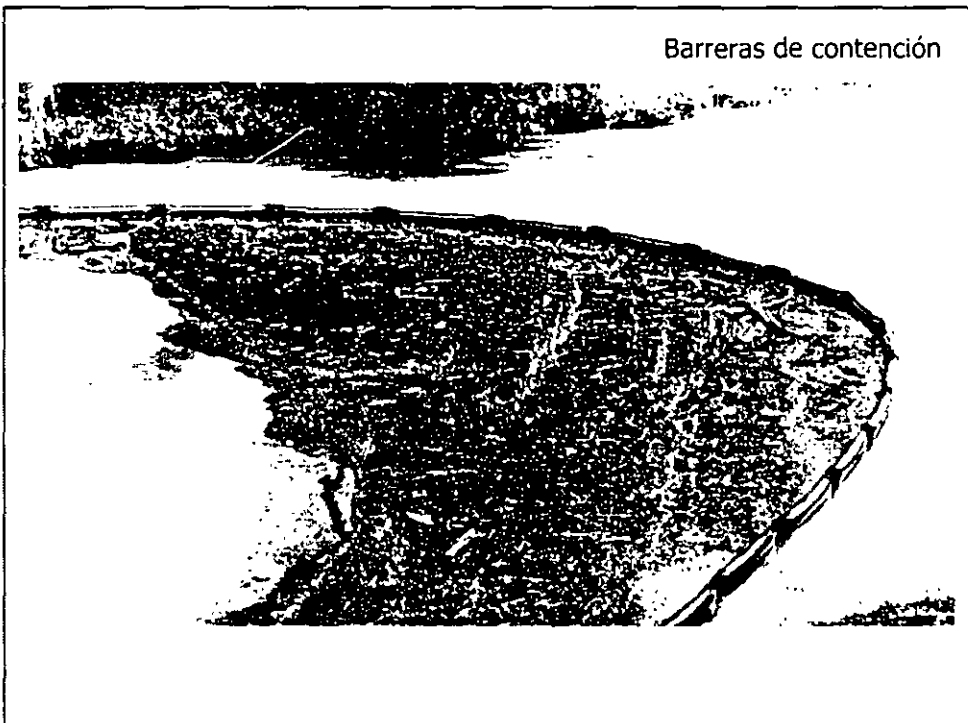
Uso urbano no-potable

Uso industrial o comercial

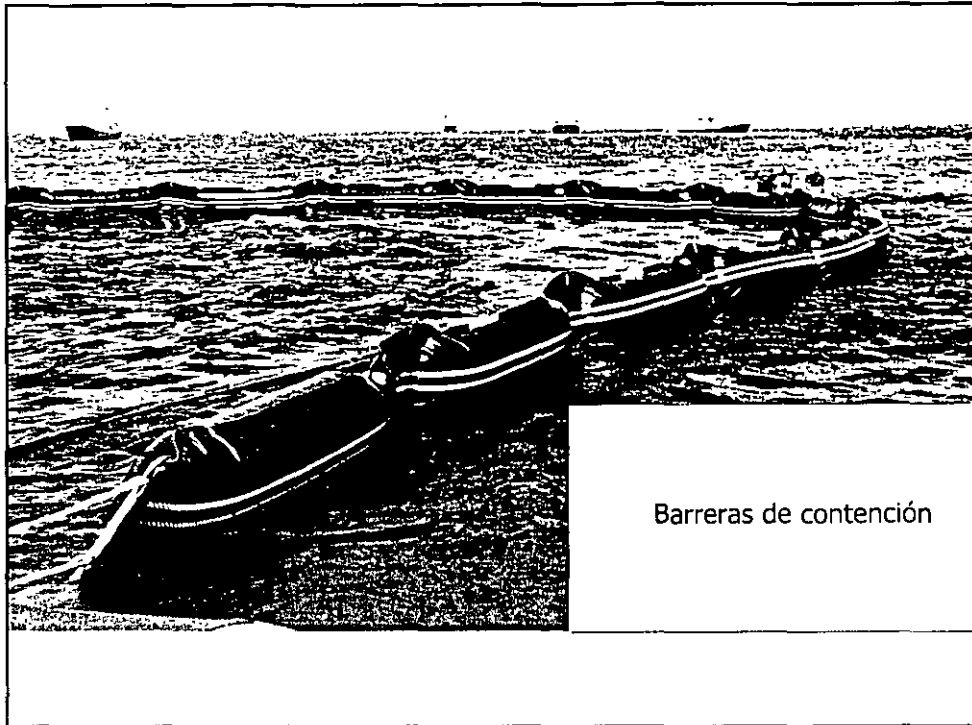
Nota importante: verificar ausencia de trihalometanos después de la cloración



**RECUPERACIÓN DE  
PETRÓLEO O COMBUSTIBLES  
EN MAR ABIERTO**

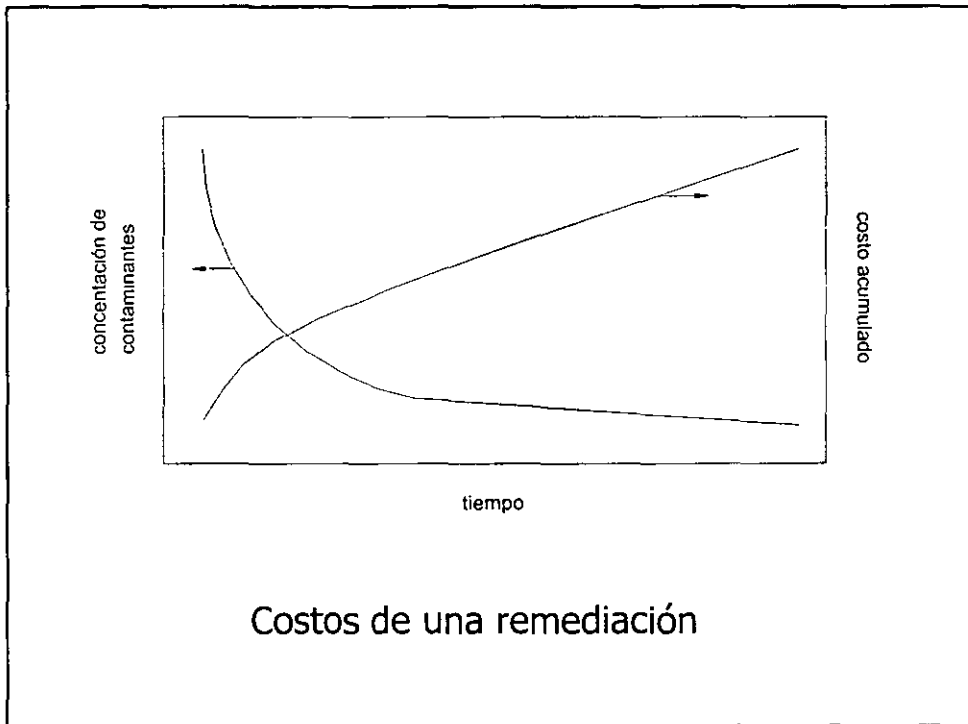


**Barreras de contención**



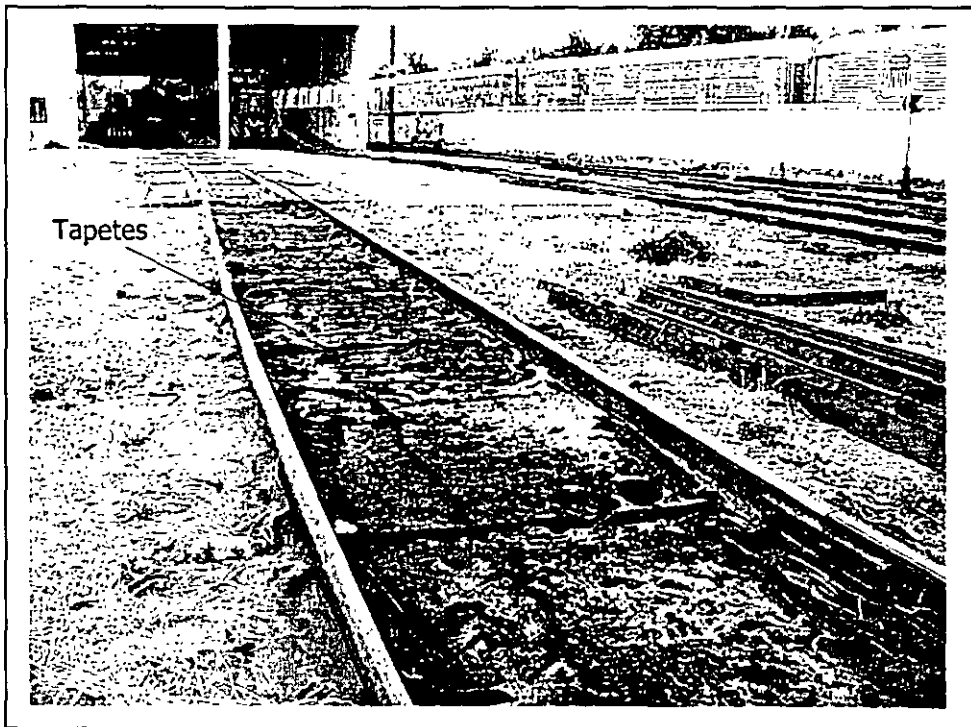
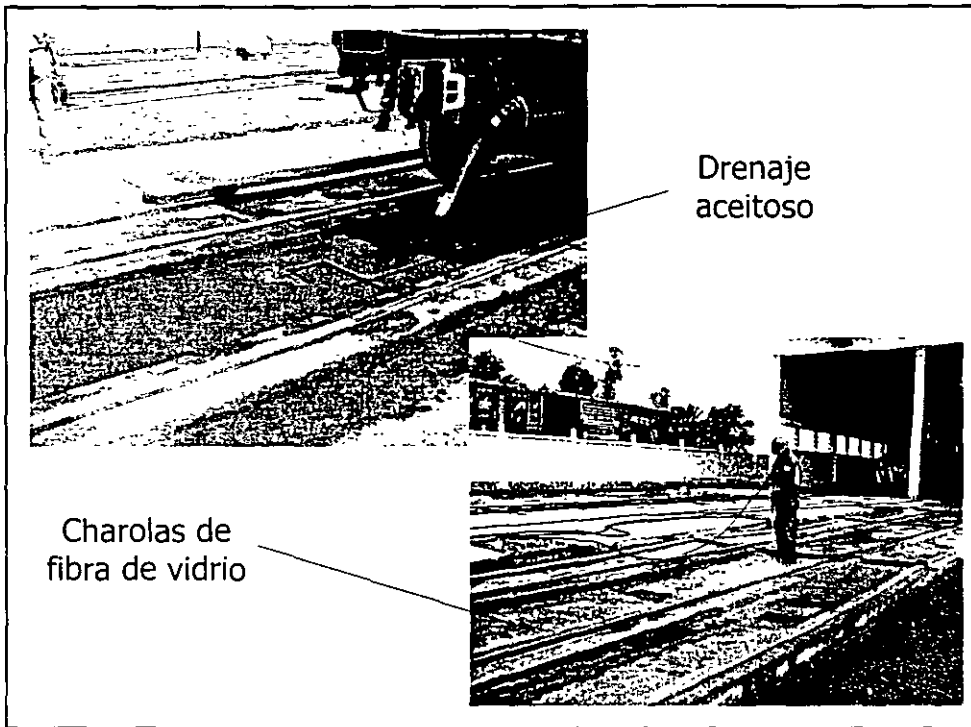
### COSTOS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS

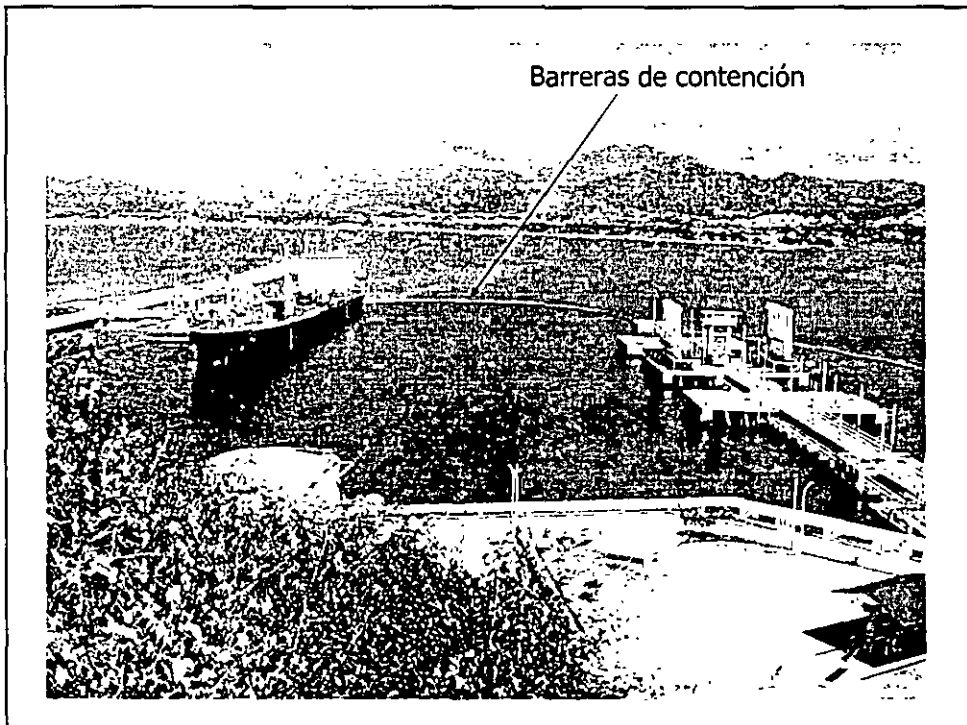
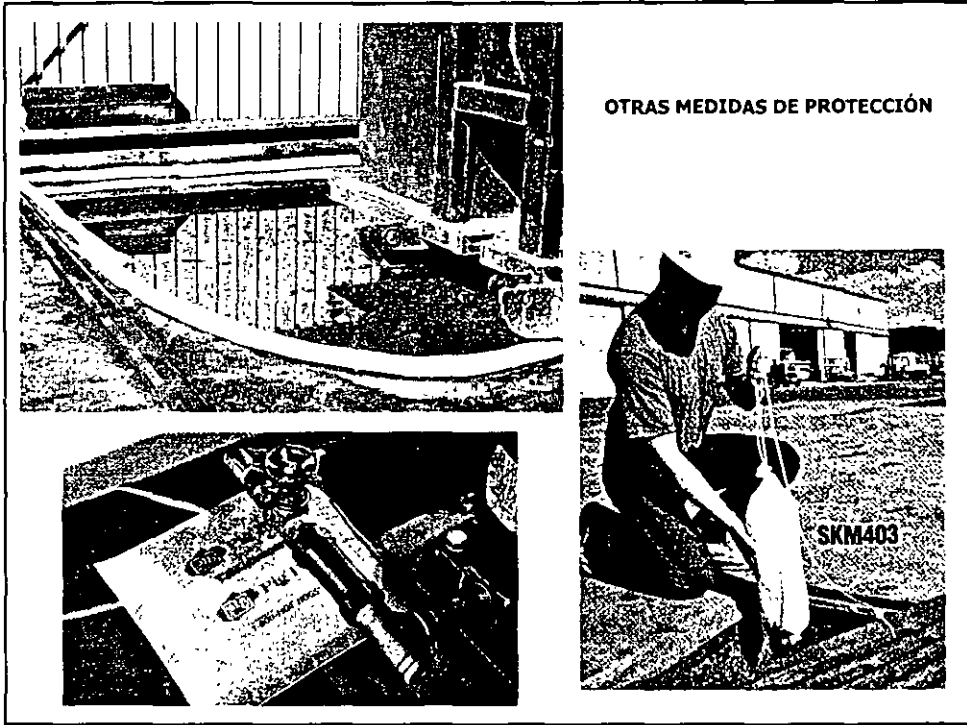
Técnica de remediación	\$ M.N. / m <sup>3</sup> suelo
Oxidación química	200 - 700
Biorremediación	50 - 600
Confinamiento	500 - 800
Lavado	600 - 900
Incineración	1 000 - 1 200
Estabilización	400 - 700



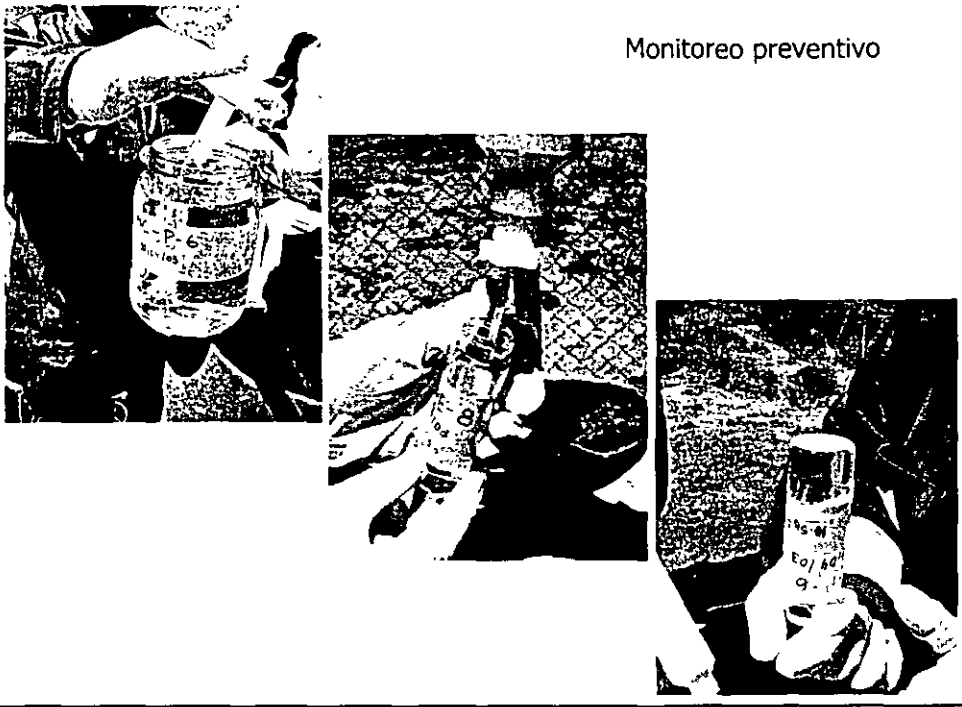
## **PREVENCIÓN**

**Medidas para reducir  
situaciones peligrosas  
y por ende,  
daños a la salud  
y al ambiente en general**





Monitoreo preventivo



[ssb@pumas.iingen.unam.mx](mailto:ssb@pumas.iingen.unam.mx)



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS.**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**



**DIVISIÓN DE  
EDUCACIÓN  
CONTINUA**

**Programa 2004**



**CONTAMINACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS:**

**ESTADO ACTUAL DEL MARCO LEGAL Y NORMATIVO**

Dra. Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM  
Mayo del 2004

ssb@pumas.iingen.unam.mx

**MARCO GENERAL EN ASUNTOS DE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS**

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos
  - Ley de Aguas Nacionales
  - Ley Federal de Metrología y Normalización
  - Código Penal Federal
  - Código Federal de Procedimientos Penales
  - Ley Orgánica de la Administración Pública
  - Ley de Procedimientos Administrativos
  - Ley General de Población

## **MARCO LEGAL Y REGLAMENTOS**

### **LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE**

**versión original: 1988**

**versión 1996: incluyó las figuras de los DELITOS AMBIENTALES  
y de la REPARACIÓN DEL DAÑO (multas, indemnización, restauración)**

#### **Título IV. Protección al Ambiente**

##### **Capítulo III. Prevención y Control de la Contaminación del Suelo**

Artículos 134 a 144

##### **Capítulo VI. Materiales y Residuos Peligrosos**

Artículos 150 a 153

#### **Modificaciones:**

10 Dic 1999: Decreto de modificación

31 Dic 2001: Decreto de modificación

25 Feb 2003: Reformas

Sus reglamentos .....

**REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA  
PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE RESIDUOS PELIGROSOS**

**versión original: 1988**

- ✓ Al igual que la LGEEPA considera exclusivamente a los **RESIDUOS PELIGROSOS**, siendo que la gran mayoría de hidrocarburos son no-peligrosos
- ✓ Documento obsoleto que no responde ni a la LGEEPA actual, ni a las necesidades actuales
- ✓ En el 2000, el entonces INE de la SEMARNAT generó una propuesta de actualización considerando residuos no-peligrosos, pero nunca se hizo oficial
- ✓ A la fecha no se vislumbran iniciativas formales encaminadas a generar una actualización

**REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA  
PROTECCIÓN AL AMBIENTE EN MATERIA DE AUDITORÍA AMBIENTAL**

**versión original: DOF 29 Noviembre 2000**

**Propuesta de modificaciones**

**16 Julio 2003**

**LEY GENERAL DE PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS  
DOF, 8 de octubre del 2003**

- Apareció de manera sorpresiva como iniciativa del gobierno
- En su creación no se involucraron las actuales entidades ambientales
- Aunque se asume que es la SEMARNAT, nunca refiere a la Secretaría encargada de aplicarla
- Carece de un fundamento técnico preciso y exagera en aspectos administrativos
  - En su redacción, inicialmente considera residuos sin calificarlos, al final se refiere únicamente a los residuos peligrosos
  - Incluye aspectos de riesgo a la salud y deja de lado el riesgo al ambiente
    - Considera el concepto de remediación de sitios contaminados
- Su aplicación creará conflictos con la actual LGEEPA en lo que se refiere a la restauración de suelos contaminados
- Respecto a su reglamento, recientemente se publicó el proyecto y terminó el período de consulta pública

**LEY DE AGUAS NACIONALES**

Versión original: 1992

Título séptimo

Prevención y Control de la Contaminación de las Aguas

Capítulo Único: Artículos 85 a 96

Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales

Versión original: 1994

- El 29 de abril del 2004 se publicó la versión actualizada de la Ley que ahora considera la contaminación de aguas como **DELITOS AMBIENTALES** y obliga a la **REPARACIÓN DEL DAÑO**
  - Será necesario actualizar su reglamento de manera inmediata

**10 Agosto 1998**  
**Creación de la FISCALÍA CONTRA DELITOS AMBIENTALES**

**6 Febrero 2002**  
**CÓDIGO PENAL FEDERAL**  
**Título Vigésimo Quinto**  
**Delitos contra el Ambiente y la Gestión Ambiental**

- Capítulo I. De las actividades tecnológicas y peligrosas**  
**artículos 414 a 416**
- Capítulo II. De la biodiversidad**  
**artículos 417 a 420 bis**
- Capítulo III. De la bioseguridad**  
**artículo 420 ter**
- Capítulo IV. Delitos contra la gestión ambiental**  
**artículo 420 quarter**
- Capítulo V. Disposiciones comunes a los delitos contra el ambiente**  
**artículos 421 a 423**

**LEY FEDERAL DE METROLOGÍA Y NORMALIZACIÓN**  
**(1 de julio de 1992, última reforma aplicada 19 mayo 1999)**

**Título tercero**

**Capítulo II**

**Sección I. De las Normas Oficiales Mexicanas (NOM): Artículos 40 a 51**

**Sección II. De las Normas Mexicanas (NMX): Artículos 51A a 51B**

## **MARCO NORMATIVO**

### **APLICABLE A SUELOS CONTAMINADOS**

#### **SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS**

##### **CRITERIOS INTERINOS DE LIMPIEZA PARA SUELOS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS**

Disposición vigente de 1998 al 2000 que se aplicó por instrucciones de la Profepa y el entonces INE de la SEMARNAT (Grupo de Trabajo conformado por autoridades ambientales y académicos convocado por la Profepa, Emergencias Ambientales)



##### **NORMA OFICIAL MEXICANA DE EMERGENCIA NOM-EM-138-ECOL-2002 QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINACIÓN EN SUELOS AFECTADOS POR HIDROCARBUROS, LA CARACTERIZACIÓN DEL SITIO Y PROCEDIMIENTO PARA LA RESTAURACIÓN**

Vigencia del 20 de agosto del 2002 al 19 de agosto del 2003  
(Grupo de Trabajo conformado exclusivamente por autoridades ambientales)



##### **PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA PROY-NOM-138-SEMARNAT-2003 QUE ESTABLECE LOS LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS Y LAS ESPECIFICACIONES PARA SU CARACTERIZACIÓN Y RESTAURACIÓN**

Solicitud de dictamen final a COFEMER MIR 18 diciembre del 2003  
Publicado en el DOF el 19 de marzo del 2004  
Concluyó el período de consulta pública; revisión de comentarios  
(Grupo de Trabajo conformado por representantes de diversas instituciones convocadas por la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental - SEMARNAT)

Tabla 1. HIDROCARBUROS QUE DEBERÁN ANALIZARSE EN FUNCIÓN DEL PRODUCTO CONTAMINANTE

PRODUCTO CONTAMINANTE	H I D R O C A R B U R O S					
	FRACCIÓN PESADA	POLIAROMÁTICOS	FRACCIÓN MEDIA	POLIAROMÁTICOS	FRACCIÓN LIGERA	BTEX
Mezclas desconocidas	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Petróleo crudo	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Combustóleo	XXX	XXX				
Emulsiones asfálticas	XXX	XXX				
Asfalto	XXX	XXX				
Parafinas	XXX	XXX				
Petrolatos	XXX	XXX				
Aceltes	XXX	XXX				
Gasóleo			XXX	XXX		
Diesel			XXX	XXX		
Turbosina			XXX	XXX		
Keroseno			XXX	XXX		
Creosota			XXX	XXX		
Gasavión					XXX	XXX
Gasolvente					XXX	XXX
Gasolinas					XXX	XXX
Gasnafta					XXX	XXX

Tabla 2. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE HIDROCARBUROS EN SUELOS  
mg/kg base seca

FRACCIÓN DE HIDROCARBUROS	USO DE SUELO PREDOMINANTE AGRÍCOLA (incluye forestal, recreativo y de conservación)	USO DE SUELO PREDOMINANTE RESIDENCIAL (incluye comercial)	USO DE SUELO PREDOMINANTE INDUSTRIAL	MÉTODO ANALÍTICO
LIGERA	200	200	500	Anexo A.1
MEDIA	1,000	1,000	3,000 (2,000)	Anexo A.2
PESADA	3,000 (1,000)	3,000 (1,000)	6,000 (2,000)	Anexo A.3

Tabla 3. LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS EN SUELOS  
mg/kg base seca

HIDROCARBUROS ESPECÍFICOS	USO DE SUELO PREDOMINANTE AGRÍCOLA (forestal, recreativo y de conservación)	USO DE SUELO PREDOMINANTE RESIDENCIAL (Incluye comercial)	USO DE SUELO PREDOMINANTE INDUSTRIAL	MÉTODO ANALÍTICO
Benceno	6 (20)	6 (20)	15 (50)	Anexo A.4
Tolueno	40	40	100	
Etilbenceno	10	10	25	
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100	
Benzopireno	2 (0.08)	2 (0.08)	2 (0.08)	Anexo A.5
Dibenzo(a,h)antraceno	2	2	2	
Benzo(a)antraceno	2 (0.80)	2 (0.80)	2 (0.80)	
Benzo(b)fluoranteno	2 (0.80)	2 (0.80)	2 (0.80)	
Benzo(k)fluoranteno	8 (8.00)	8 (8.00)	8 (8.00)	
Indeno(1,2,3-cd)pireno	2	2	2	

NOM-133-ECOL-2000      DOF 10 diciembre 2001  
PROTECCIÓN AMBIENTAL  
BIFENILOS POLICLORADOS (BPCs)      ESPECIFICACIONES DE MANEJO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA EMISIONES AL MEDIO AMBIENTE DE BPCs EN  
TRATAMIENTOS TÉRMICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

EMISIONES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
a la atmósfera	0.05 microgramos/m <sup>3</sup>
en agua residual	5 microgramos/l
en sólidos residuales	menos de 50 mg/kg BS

LÍMITES MÁXIMOS DE CONTAMINACIÓN EN SUELO

USO DE SUELO	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE EN mg/kg BS con la sumatoria de todos los congéneres de BPCs detectados
agrícola	0.5
residencial	5
Industrial/comercial	25

Modificación DOF 5 marzo 2003:  
Amplía el plazo para la disposición de equipos o residuos conteniendo BPCs



**NOM-115-ECOL-1998**

**QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE PROTECCIÓN AMBIENTAL QUE DEBEN OBSERVARSE EN LAS ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN DE POZOS PETROLEROS TERRESTRES PARA LA EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN EN ZONAS AGRÍCOLAS, GANADERAS Y ERIALES**

publicada en el DOF 25 noviembre 1998

Propuesta de actualización en el 2003  
**NOM-115-ECOL-2003**

**QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE PROTECCIÓN AMBIENTAL QUE DEBEN OBSERVARSE EN LAS ACTIVIDADES DE PERFORACIÓN Y MANTENIMIENTO DE POZOS PETROLEROS TERRESTRES PARA EXPLORACIÓN Y PRODUCCIÓN EN ZONAS AGRÍCOLAS, GANADERAS Y ERIALES, FUERA DE ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS O TERRENOS FORESTALES**

Publicada en el DOF el 31 diciembre del 2003  
Concluyó el período de consulta pública en marzo del 2004

**NORMA OFICIAL MEXICANA  
NOM-021-RECNAT-2000**

publicado en el DOF 31 diciembre 2002

**QUE ESTABLECE LAS ESPECIFICACIONES DE FERTILIDAD, SALINIDAD Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS. ESTUDIOS, MUESTREO Y ANÁLISIS**

**métodos detallados para el muestreo  
y análisis de los parámetros  
físicoquímicos de suelos agrícolas**

**NORMA OFICIAL MEXICANA  
NOM-052-ECOL-1993**

**QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS,  
EL LISTADO DE LOS MISMOS Y LOS LÍMITES QUE HACEN A UN RESIDUO  
PELIGROSO POR SU TOXICIDAD AL AMBIENTE**

Publicada en el DOF 22 octubre 1993  
Actualización de nomenclatura publicada en el  
DOF 29 noviembre 1994

Propuesta de actualización  
**PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA  
PROY-NOM-052-ECOL-2001**

**QUE ESTABLECE LAS CARACTERÍSTICAS, EL PROCEDIMIENTO DE  
IDENTIFICACIÓN, CLASIFICACIÓN Y EL LISTADO DE LOS  
RESIDUOS PELIGROSOS**

publicado en el DOF 26 julio 2002

En espera ....

**NOM-053-ECOL-1993**

**Que establece el procedimiento para llevar  
a cabo la prueba de extracción para determinar los  
constituyentes que hacen a un residuo peligroso por  
su toxicidad al ambiente**

Publicada en el DOF 22 octubre 1993  
Actualización de nomenclatura publicada en el  
DOF 29 noviembre 1994

**NOM-054-ECOL-1993**

**QUE ESTABLECE EL PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR  
LA INCOMPATIBILIDAD ENTRE DOS O MÁS RESIDUOS  
CONSIDERADOS COMO PELIGROSOS POR LA NOM-052-  
ECOL-1993**

Publicada en el DOF 22 octubre 1993  
Actualización de nomenclatura publicada en el  
DOF 29 noviembre 1994

**ELABORACIÓN DE LA PROPUESTA DE  
NORMA OFICIAL MEXICANA**

**QUE ESTABLECE LOS CRITERIOS  
Y BASES METODOLÓGICAS PARA  
DETERMINAR LAS ACCIONES DE REMEDIACIÓN  
EN UN SUELO CONTAMINADO POR METALES  
(ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS)**

(Reinstalación del Grupo de Trabajo: 6 Abril 2002)  
SEMARNAT Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental

**2do. GRUPO DE CRITERIOS INTERNOS DE RESTAURACIÓN  
DE SUELOS CONTAMINADOS CON INORGÁNICOS TÓXICOS  
(METALES PESADOS) Y OTROS**

GDT  
Profepa  
1999

Contaminante	Uso Residencial mg/kg ppm	Agrícola mg/kg ppm	Uso Industrial mg/kg ppm	Método Analítico (EPA)
PLOMO TOTAL	200	100	1,500	7420
ARSENICO TOTAL	20	20	40	7061
BARIO TOTAL	750	150	1,500	7080
CADMIO TOTAL	20	20	100	7130
MERCURIO TOTAL	20	20	100	7471
NIQUEL TOTAL	150	75	700	7520
SELENIO TOTAL	20	20	100	7741
ZINC TOTAL	800	300	1,500	7950
CROMO TOTAL	375	75	750	7190
CIANURO	50	5	500	9010 A
ACRILAMIDA	0.2	0.02	2.4	8260C
ACRILONITRILO	1.4	0.02	4.8	8260C
PLOMO ORGANICO	0.5	0.1	1	PENDIENTE
HIDROCARBUROS MONOAROMATICOS TOTALES (Arominas + otros disolventes)	40	40	100	8260C

Estos criterios son referencias genéricas. Cada propuesta de restauración se resuelve caso por caso.

**PROYECTO DE NORMA OFICIAL MEXICANA  
NOM-141-SEMARNAT-2003**

**QUE ESTABLECE LOS REQUISITOS PARA LA  
CARACTERIZACIÓN DEL SITIO, PROYECTO,  
CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y POST-OPERACIÓN  
DE PRESAS DE JALES**

Publicada en el DOF 17 septiembre del 2003

**MARCO NORMATIVO**  
**APLICABLE A AGUAS SUBTERRÁNEAS**

**NOM-127-SSA1-1994 (2000)**  
versión actualizada en el DOF 22 noviembre 2000

**SALUD AMBIENTAL**  
**AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO**  
**LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE**  
**SOMETERSE EL AGUA**  
**PARA SU POTABILIZACIÓN**

<b>HIDROCARBUROS</b>	<b>LÍMITE PERMISIBLE</b> <b>mg/l</b>
<b>benceno</b>	<b>0.010</b>
<b>tolueno</b>	<b>0.700</b>
<b>etilbenceno</b>	<b>0.300</b>
<b>xilenos</b>	<b>0.500</b>

**CRITERIOS ECOLÓGICOS DE CALIDAD DEL AGUA  
CECCA-001/89**

**Niveles máximos en agua (mg/l)**

Compuesto	Fuente de abastecimiento de agua potable	Protección de la vida acuática	
		Agua dulce	Agua marina
Benceno	0.010	0.050	0.005
Tolueno	14.300	0.200	0.060
Etilbenceno	1.400	-	0.500
Acenafteno	0.020	0.020	0.010
Fluoranteno	0.040	0.040	0.0004
Bifenilos policlorados	0.0000008	0.00001	0.00003

**NOM-003-CNA-1996  
DOF 6 enero 1997**

**REQUISITOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN  
DE POZOS DE AGUA PARA PREVENIR LA  
CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS**

**NOM-004-CNA-1996**  
**DOF 24 julio 1997**

**QUE ESTABLECE LOS REQUISITOS PARA LA  
PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS DURANTE EL  
MANTENIMIENTO Y REHABILITACIÓN DE POZOS DE  
EXTRACCIÓN DE AGUA Y PARA EL CIERRE DE POZOS EN  
GENERAL**

Propuesta de modificación ingresada a  
COFEMER – MIR junio 27 del 2003

**NOM-014-SSA1-1993**  
**DOF 3 junio 1994**

**PROCEDIMIENTOS SANITARIOS PARA EL  
MUESTREO DE AGUA PARA USO Y CONSUMO  
HUMANO EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE  
AGUA PÚBLICOS Y PRIVADOS**

**muestreo, manejo, preservación y transporte de  
muestras de agua para la determinación de  
parámetros incluidos en la  
NOM-127-SSA1-1994**  
(requiere actualización, ya que no contempla BTEX)

**MARCO NORMATIVO**  
**APLICABLE A AMBIENTE LABORAL**

**NOM-010-STPS-1999**  
publicado en el DOF 14 marzo 2002

**CONDICIONES DE SEGURIDAD E HIGIENE  
EN LOS CENTROS DE TRABAJO  
DONDE SE MANEJEN, TRANSPORTEN, PROCESEN  
O ALMACENEN SUSTANCIAS QUÍMICAS  
CAPACES DE GENERAR CONTAMINACIÓN  
EN EL MEDIO AMBIENTE LABORAL**

**límites máximos permisibles de exposición,  
clasificación de sustancias con base en sus  
características carcinógenas y listado de procedimientos  
para la determinación de sustancias químicas en el  
medio ambiente laboral**



### LÍMITE DE EXPOSICIÓN A SUSTANCIAS ORGÁNICAS

SUSTANCIA	CLASIFICACIÓN COMO CARCINÓGENO	LMPE <sup>1</sup> EN JORNADA NORMAL mg/m <sup>3</sup>	LMPE QUE NO DEBE SER EXCEDIDO <sup>2</sup> mg/m <sup>3</sup>
Benceno	A2 sospechoso	3.2	16.0
Tolueno	A4 no clasificable	188	-
Etilbenceno	-	435	545
Xilenos	A4 no clasificable	435	655
Naftaleno	A4 no clasificable	50	75

<sup>1</sup> LMPE: Límite Máximo Permissible de Exposición

<sup>2</sup> LMPE que no debe ser excedido por más de 15 min, una vez durante la jornada normal

### LEY FEDERAL DE METROLOGÍA Y NORMALIZACIÓN (1 de julio de 1992, última reforma aplicada 19 mayo 1999)

#### Título cuarto

Capítulo I. De la acreditación y la aprobación: Artículos 68 a 72

Capítulo II. De los procedimientos para la evaluación de la conformidad  
Artículos 51A a 51B

Capítulo V. De los laboratorios de pruebas: Artículos 81 a 83

Capítulo VI. De las unidades de verificación: Artículos 84 a 87

Su reglamento ... .. DOF 14 enero 1999

**entidad mexicana de acreditación, a.c.**

**organismo encargado de la  
acreditación de métodos analíticos en los  
laboratorios de prueba  
bajo la NMX-EC-17025-IMNC-2000  
a partir del 1 de enero del 2002**

**entidad mexicana de acreditación, a.c.**

**Ramas que acredita:**

- √ Agua
- √ Residuos, fuentes fijas, ambiente laboral (suelos).
- √ Química
- √ Alimentos (agua potable)

**La ema, a.c. entrega al laboratorio un documento con el No. de Acreditación por cada rama indicando la vigencia de la misma, el listado con todas las pruebas acreditadas y de los signatarios autorizados**

organismos encargados de la aprobación de métodos analíticos que la ema, a.c. acredita a los laboratorios de prueba

√ CENICA-INE

fuentes fijas, residuos y ambiente laboral (suelos)

NOM-085-ECOL-1994; PRY-NOM-098-ECOL-2000; NOM-052-ECOL-1993;  
 NOM-053-ECOL-1993; NOM-010-STPS-1999; (NOM-EM-138-ECOL-2002)

√ SECRETARÍA DE SALUD

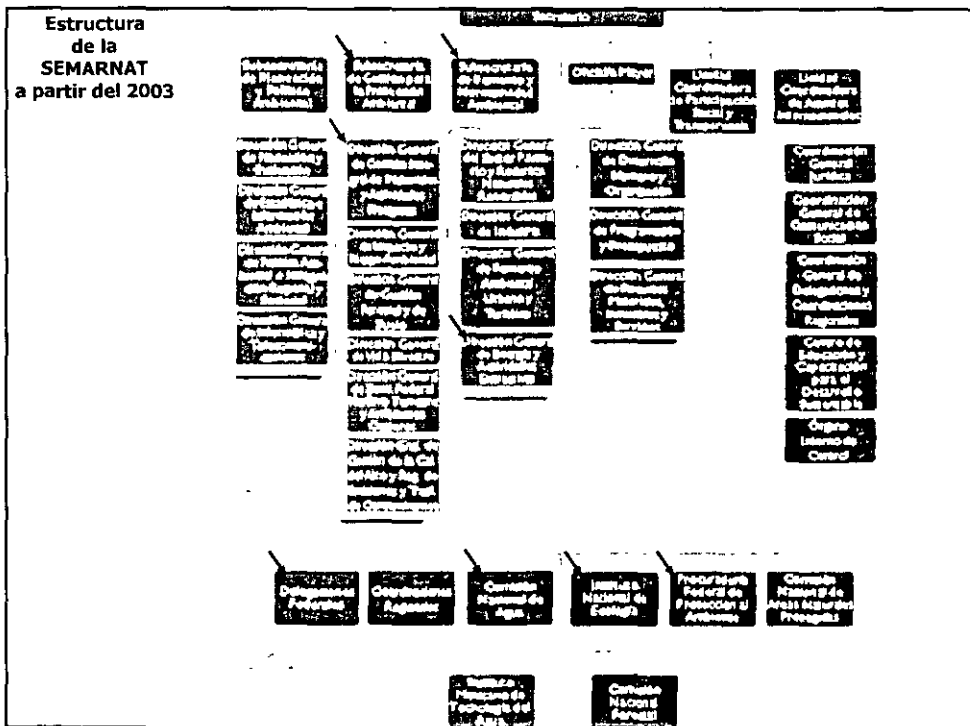
alimentos (agua potable)

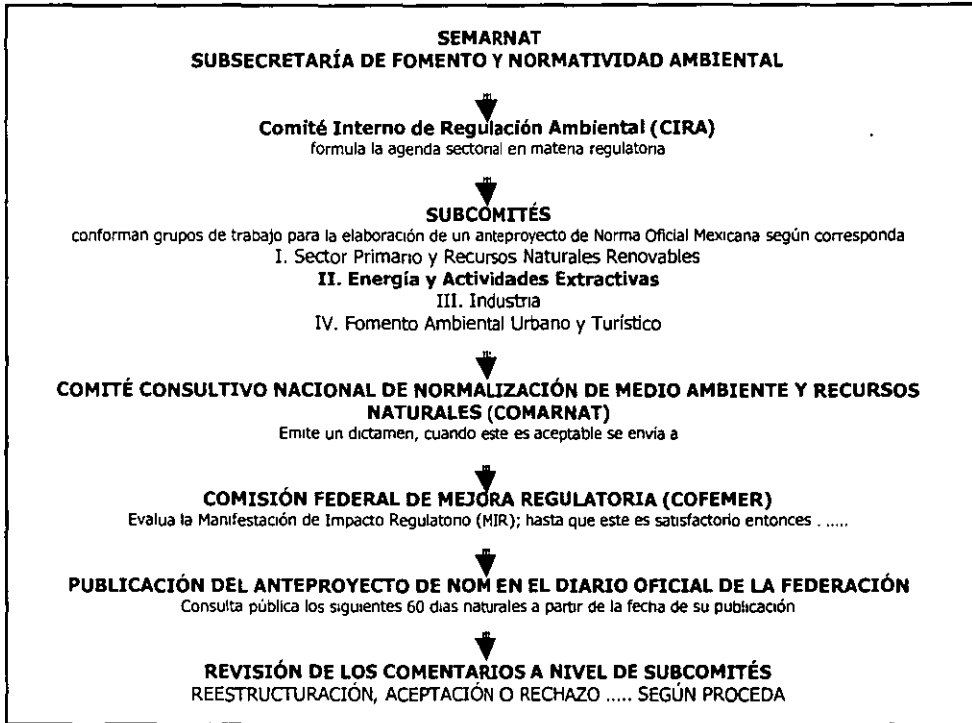
NOM-127-SSA1-1994 (2000);

√ CNA

aguas naturales, subterránea, residual

NOM-001-ECOL-1996, Lineamientos de la Ley Federal de Derechos en  
 Materia de Agua, Criterios Ecológicos de Calidad del Agua





**ssb@pumas.iingen.unam.mx**



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIPLOMADO INTERNACIONAL SOBRE  
CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE  
SUELOS ACUÍFEROS.  
MÓDULO II.**

**CA165 RESTAURACION DE SUELOS  
ACUÍFEROS CON CONTAMINANTES DE  
HIDROCARBUROS.**

**TEMA:  
EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD EN SITIOS  
CONTAMINADOS**

**COORDINADOR: ING. JUAN MANUEL LESSER ILLADES.**

**DEL 30 DE AGOSTO AL 03 DE SEPTIEMBRE 2004  
PALACIO DE MINERÍA**

## **EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD EN SITIOS CONTAMINADOS**

**Dra. Susana Saval  
Instituto de Ingeniería, UNAM**

### **RIESGOS ASOCIADOS A LA CONTAMINACIÓN**

- √ **riesgo geohidrológico: afectación de la calidad del agua subterránea que es fuente de abastecimiento para uso y consumo humano y/o de animales, o para riego agrícola**
- √ **riesgo a la salud humana por las diferentes vías de exposición: ingestión, inhalación y/o contacto dérmico**
- √ **riesgo ecológico con afectación a especies de flora y fauna que son fuente de alimentación, tienen interés comercial o están en peligro de extinción; incluye cuerpos de agua superficiales**

## **RIESGO GEOHIDROLÓGICO**

**Afectación a fuentes de abastecimiento  
de agua potable**



**Aspectos a considerar:**

- √ **Características de los contaminantes  
que determinan su dispersión**
- √ **Características del sitio que determinan la dispersión de  
los contaminantes**

## **CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTAMINANTES QUE DETERMINAN SU DISPERSIÓN EN EL AMBIENTE**

- √ **estado fisico**
  - √ **solubilidad**
    - √ **volatilidad**
      - √ **densidad**
        - √ **viscosidad**

## **CARACTERÍSTICAS DEL SITIO QUE DETERMINAN EL DESTINO DE LOS CONTAMINANTES**

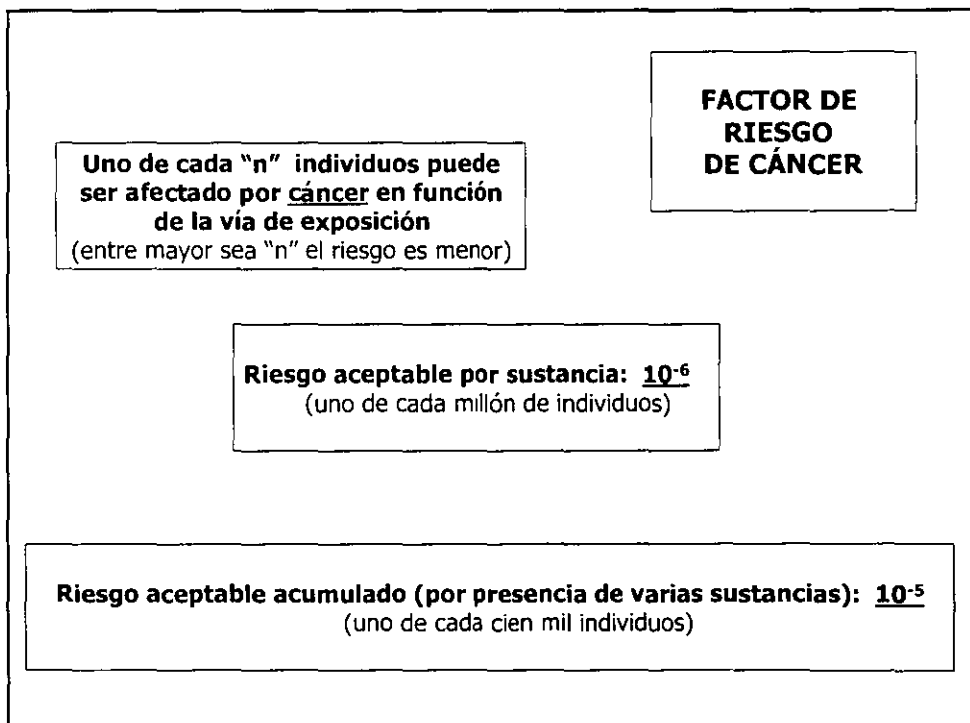
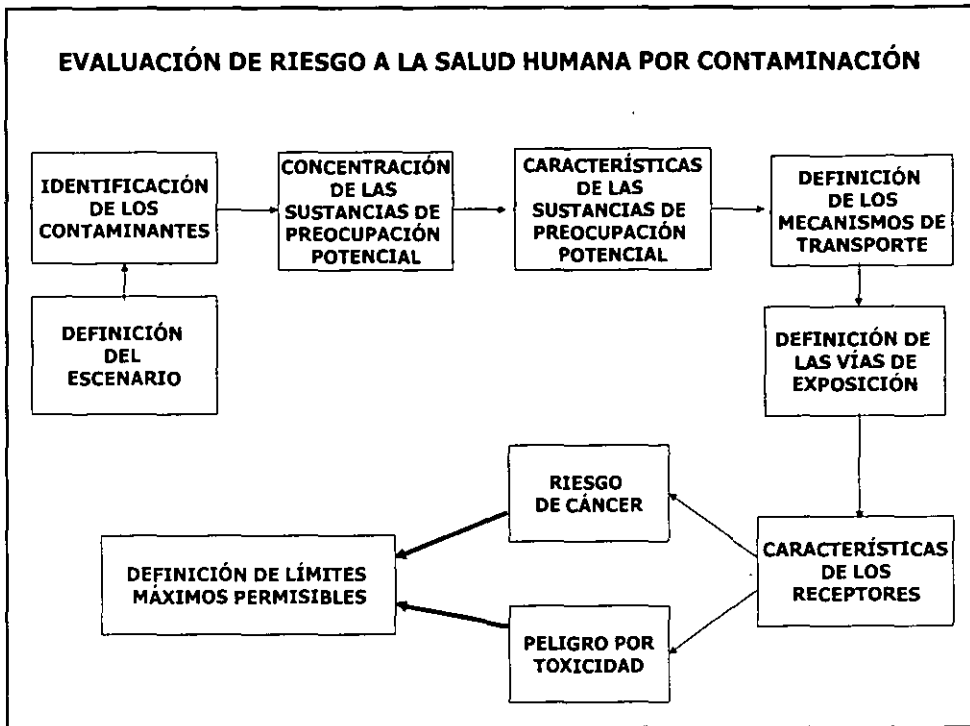
- √ **profundidad del nivel estático**
- √ **dirección y velocidad de flujo subterráneo**
- √ **material de la zona vadosa**
  - √ **permeabilidad**
  - √ **tipo de suelo**
  - √ **tipo de roca**
- √ **pendiente del terreno**
- √ **recarga neta**

## **EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA**

**Daños a la salud humana por la presencia de contaminantes**







**PELIGROSIDAD  
POR TOXICIDAD**

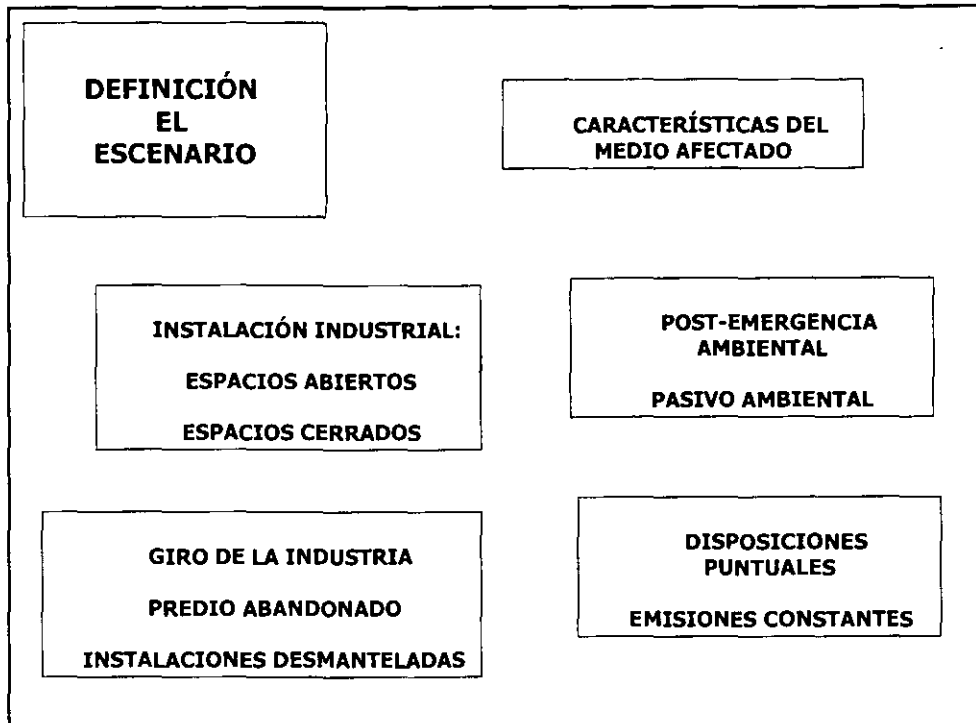
número de veces que la dosis de  
exposición está por encima de la  
concentración que no causa daño

índice aceptable : 1

(entre más cercano sea el valor a 1 y más aún cuando es mayor a 1,  
mayor es el peligro por toxicidad)

**EJEMPLO DE RESULTADOS ESPERADOS DE UN ESTUDIO DE EVALUACIÓN DE RIESGO A LA SALUD HUMANA**

Vía de exposición / Receptor / Escenario	Riesgo por Carcinogenicidad		Peligro por Toxicidad	
	Probabilidad	Riesgo	Índice	Peligro
Valor aceptable	1 de 100,000	-	1	-
<b>Inhalación de polvos o partículas</b>				
<b>Trabajadores permanentes</b>				
espacio abierto	1 de 5,263	sí	1.1	si
espacio cerrado	1 de 67	sí	69	si
<b>Trabajadores ocasionales</b>				
espacio abierto	1 de 5,000,000	no	0.042	no
<b>Ingestión accidental de agua</b>				
en la zona	1 de 6	sí	34	si
alrededor de la zona	1 de 1,449	sí	0.15	no



- CARACTERÍSTICAS DEL MEDIO AFECTADO**
- ✓ **Vientos dominantes**
  - ✓ **Precipitación pluvial**
  - ✓ **Distancia a las zonas pobladas en los alrededores**
  - ✓ **Profundidad al nivel del agua subterránea**
  - ✓ **Uso del agua subterránea**
  - ✓ **Distancia a los pozos de abastecimiento**

**IDENTIFICACIÓN  
DE LOS  
CONTAMINANTES**

**CONCENTRACIÓN  
DE LAS SUSTANCIAS  
DE PREOCUPACIÓN  
POTENCIAL**

**•Método de muestreo**

**•Métodos de análisis confiables** (laboratorios con métodos de prueba acreditados por la ema y aprobados por el organismo correspondiente)

**•Límites de detección de los métodos**  
(para comparar con los valores de fondo en el caso de metales)

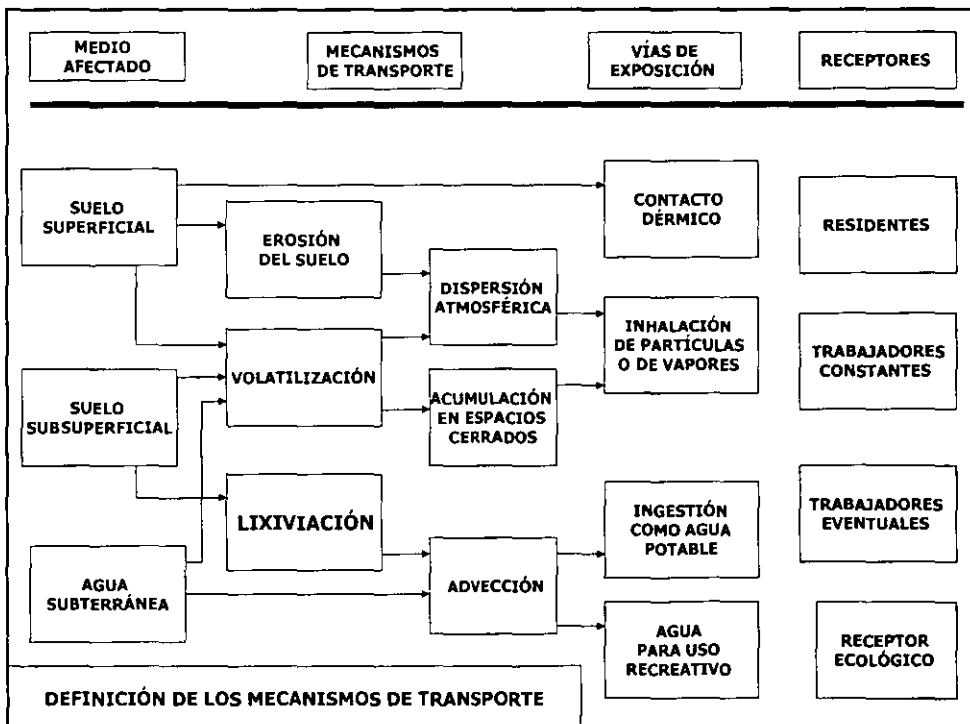
**•Formas químicas biodisponibles del contaminantes para el receptor**

**SUSTANCIAS INDICADORAS DE RIESGO EN CASOS DE  
CONTAMINACIÓN CON HIDROCARBUROS**

GRUPO DE COMPUESTOS	COMBUSTIBLES DESTILADOS	PETRÓLEO CRUDO Y SUS RESIDUOS	ACEITES Y RESIDUOS ACEITOSOS
HIDROCARBUROS MONOAROMÁTICOS	X	X	
HIDROCARBUROS POLIAROMÁTICOS	X	X	X
METALES		Cadmio Níquel Vanadio	

**CARACTERÍSTICAS DE LAS SUSTANCIAS DE PREOCUPACIÓN POTENCIAL**

- Constante de la Ley de Henry
- Solubilidad
- Coeficiente de sorción (factor de retardo)
- Presión de vapor
- Coeficiente de dispersión
- Coeficiente de distribución octanol/agua



**DEFINICIÓN DE LAS  
VÍAS DE EXPOSICIÓN  
DE LOS RECEPTORES**

**inhala  
ción  
de vapores y/o  
partículas de suelo**

**ingestión  
de agua o suelo**

**contacto dérmico  
con agua o suelo  
contaminados**

**CARACTERÍSTICAS  
DE LOS  
RECEPTORES**

- √ **edad, sexo** (especialmente en el caso de plomo)
- √ **calidad de vida** (nutrición, adicciones, higiene)
- √ **tiempo de exposición** (residente, trabajador constante u ocasional)
- √ **tipo de actividad en el sitio** (operación en planta, oficina, taller, limpieza)

**CLASIFICACIÓN DE LAS  
SUSTANCIAS EN FUNCIÓN  
DE SU EFECTO A LA  
SALUD HUMANA**

**TOXICIDAD CRÓNICA**

**DOSIS FRECUENTES DE COMPUESTOS BIOACUMULABLES,  
QUE AUNQUE SEAN MÍNIMAS PUEDEN CAUSAR  
CARCINOGENICIDAD, TERATOGENICIDAD O MUTAGENICIDAD  
(principalmente en humanos)**

**CRITERIOS USEPA PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUSTANCIAS  
QUÍMICAS CON BASE EN EL RIESGO DE CÁNCER  
PARA CUALQUIER VÍA DE EXPOSICIÓN**

<b>A</b>	Carcinógeno a humanos con suficiente evidencia de estudios epidemiológicos
<b>B1</b>	Probable carcinógeno a humanos, con evidencia limitada de estudios epidemiológicos
<b>B2</b>	Probable carcinógeno a humanos, con suficiente evidencia de estudios con animales, pero inadecuada evidencia de estudios epidemiológicos
<b>C</b>	Posible carcinógeno a humanos con limitada evidencia de estudios con animales
<b>D</b>	No clasificable como carcinógeno a humanos por inadecuada evidencia en estudios con animales
<b>E</b>	Evidencia de no-carcinogenicidad en humanos y ninguna evidencia en animales de diferentes especies

**NÚMERO DE COMPUESTOS CLASIFICADOS POR LA USEPA (2002)**

CLASIFICACIÓN USEPA	CATEGORÍA DE RIESGO A LA SALUD	NÚMERO DE COMPUESTOS CLASIFICADOS
A	CARCINÓGENO A HUMANOS	11
B1	PROBABLE CARCINÓGENO, EVIDENCIA LIMITADA EN HUMANOS	5
B2	PROBABLE CARCINÓGENO, EVIDENCIA SUFICIENTE EN ANIMALES	69
C	POSIBLE CARCINÓGENO, EVIDENCIA LIMITADA EN ANIMALES	41
D	NO CLASIFICABLE COMO CARCINÓGENO A HUMANOS	113
E	EVIDENCIA DE NO-CARCINOGENICIDAD EN HUMANOS	3

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A HIDROCARBUROS**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

COMPUESTO	CLASIFICACIÓN USEPA (años de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Benceno	A 86/00	Inhalación (exposición ocupacional) Ingestión (de agua)	Leucemia en humanos Estudios epidemiológicos en humanos 1974, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1985, 1986, 1987, 1992, 1993, 1994, 1996, 1997, 1998, 1999
Tolueno*	D 86/92/94	Ingestión / Inhalación	Efectos neurológicos, degeneración del epitelio nasal en animales de laboratorio 1956, 1978, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1987, 1988, 1989, 1990
Etilbenceno	D 86/87/90/91	Ingestión / Inhalación	Toxicidad al hígado y riñón en animales de laboratorio 1956, 1980, 1981, 1983, 1985, 1988, 1989, 1990, 1991
Xilenos*	D 86/87/91	Ingestión / Inhalación	Hiperactividad y reducción del peso corporal en animales de laboratorio 1984, 1985, 1986

\* En proceso de revisión (2002)



**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A HIDROCARBUROS**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

COMPUESTO	CLASIFICACIÓN USEPA (años de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Benzo(a)pireno	B2 86/92/94	Implantación en pulmones / Inyección intraperitoneal y subcutánea	Desarrollo de tumores y genotoxicidad en animales de laboratorio 1967, 1973, 1981, 1991, 1992
Benzo(a)antraceno	B2 86/90/94	Inyección intraperitoneal / subcutánea / intramuscular	Desarrollo de tumores en animales de laboratorio. Mutagenicidad en bacterias 1951, 1952, 1959, 1963, 1969, 1971, 1972, 1974, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979, 1981, 1984, 1986, 1987, 1988, 1990
Benzo(b)fluoranteno	B2 86/90/93/94	Implantación en pulmones / Inyección intraperitoneal y subcutánea	Desarrollo de carcinomas en aparato digestivo y pulmones en animales de laboratorio. Mutagenicidad en bacterias 1959, 1963, 1982, 1983, 1985, 1986, 1987,
Benzo(k)fluoranteno	B2 86/90/94	Implantación en pulmones / Inyección subcutánea	Desarrollo de tumores en animales de laboratorio. Mutagenicidad en bacterias 1966, 1980, 1982, 1983, 1985, 1987,
Criseno	B2 86/90/94	Inyección intraperitoneal / Contacto dérmico	Desarrollo de carcinomas y linfomas en piel, anomalías cromosómicas en animales de laboratorio 1959, 1966, 1972, 1973, 1974, 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1983, 1985, 1986
Dibenzo(a,h)antraceno	B2 86/90/94	Inyección intramuscular y subcutánea	Desarrollo de carcinomas en animales de laboratorio. Mutagenicidad en bacterias 1943, 1955, 1959, 1962, 1963, 1967, 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A HIDROCARBUROS**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

COMPUESTO	CLASIFICACIÓN USEPA (años de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Naftaleno	C 86/90/98	Ingestión / Inhalación	Hiperplasia y metaplasia en epitelio respiratorio y nasal en animales de laboratorio 1964, 1980, 1981, 1982, 1984, 1985, 1986, 1989, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1997, 1998
Acenafteno	- 89/90/93/94	Inyección intraperitoneal	Hepatotoxicidad en animales de laboratorio 1969, 1970, 1975, 1989
Acenaftileno	D 86/90/91	Aplicación dérmica	Estudios en animales de laboratorio 1932
Antraceno	D 86/90/91/93/94	Inyección intraperitoneal	Ninguno observado en animales de laboratorio 1955, 1972, 1973, 1975, 1977, 1978, 1979, 1980, 1981, 1983, 1984, 1985, 1988, 1989,
Fenantreno	D 86/90/94	Inyección intraperitoneal y subcutánea	Estudios en animales de laboratorio 1962, 1963, 1964, 1973, 1976, 1977, 1979, 1981, 1982, 1985
Fluoranteno	D 86/90/93/94	Inyección intraperitoneal	Nefropatía, alteraciones hematológicas en animales de laboratorio 1957, 1959, 1972, 1974, 1976, 1979, 1983, 1987, 1988
Fluoreno	D 86/90	Inyección intraperitoneal	Estudios en animales de laboratorio 1960, 1981, 1984, 1988, 1989
Benzo(g,h,i)perileno	D 86/90	Implantación en pulmones/ Inyección subcutánea	Estudios en animales de laboratorio 1959, 1966, 1968, 1973, 1976, 1983
Pireno	D 86/90/91/93/94	Inyección intraperitoneal	Estudios en animales de laboratorio 1940, 1973, 1974, 1976, 1981, 1986, 1989

**Nota importante:**

**La probable carcinogenicidad hacia los humanos (B2) de los hidrocarburos poliaromáticos se ha relacionado con su presencia en el humo del cigarro, así como en emisiones a la atmósfera de los hornos de carbón de hulla (mineral), durante el proceso de obtención de coque, así como en la destilación de la hulla y de la madera de coníferas para obtener alquitrán y creosota. En su caso, la vía de exposición sería la de inhalación de partículas.**

**Sin embargo, no ha sido posible concluir que los hidrocarburos poliaromáticos sean los agentes directamente responsables**

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A METALES**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

INORGANICO	CLASIFICACIÓN USEPA (Año de clasificación y de revisiones)	VIA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Arsénico	A 86/88/93/95/98	Inhalación (exposición ocupacional), Ingestión (de agua)	Cáncer pulmonar en humanos por inhalación. Cáncer en diferentes órganos y en piel en humanos por ingestión de agua 1968, 1977, 1988
Bario	D 86/87/98/99	Ingestión (de agua en animales)	Incrementa el peso del hígado en animales de laboratorio 1984, 1990, 1996
Berilio	B1 86/97/98	Inhalación (en animales)	Cáncer pulmonar, de tráquea y bronquios en animales de laboratorio 1976, 1980, 1996
Cadmio	B1 86/87/91/92/94	Inhalación (exposición ocupacional)  Inhalación, inyección intramuscular y subcutánea (en animales)	Limitada evidencia de cáncer pulmonar, de tráquea y bronquios en humanos.  Suficiente evidencia de carcinogenicidad en animales de laboratorio 1985
Cromo VI	A 86/87/98	Inhalación (exposición ocupacional)	Cáncer pulmonar en humanos 1975, 1983, 1990, 1994
	D 86/87/98	Ingestión (de agua en animales)	Estudios en animales de laboratorio 1958
Cobre	D 86/88/91		Estudios en animales de laboratorio
Manganeso	D 86/88/93/95/96	Inhalación (exposición ocupacional a dióxido de manganeso) Ingestión crónica en humanos	Estudios en humanos 1992, 1973, 1987, 1989, 1992

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A METALES**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

INORGÁNICO	CLASIFICACIÓN USEPA (Año de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Mercurio	D 86/88/95	Inhalación (exposición ocupacional)	Inadecuada evidencia de estudios epidemiológicos y en animales de laboratorio 1983, 1989, 1992, 1993
Cloruro mercúrico	C 86/94/95	Ingestión e inyección subcutánea (en animales)	Limitada evidencia en estudios con animales de laboratorio 1987
Cloruro metilmercúrico	C 86/87/95/01	Ingestión	Inadecuados datos en humanos y limitada evidencia en animales de laboratorio 1997, 1999
Níquel (en sales)	- 87/91/94/96	Ingestión (en animales)	Disminuye peso de órganos en animales de laboratorio 1976
Carbonil níquel	B2 86/87/91	Inhalación Inyección intravenosa	Formación de tumores en animales de laboratorio
Polvos de níquel	A 86/91	Inhalación (exposición ocupacional)	Cáncer pulmonar y nasal en humanos expuestos a los polvos de refineries 1981, 1982, 1984
Bisulfuro de níquel	A 86/91	Inhalación (exposición ocupacional)	Cáncer pulmonar y nasal en humanos expuestos a polvos de refineries 1981, 1982, 1984
Piomo	B2 86/81/91/93	Ingestión / Inyección subcutánea	Formación de tumores en animales de laboratorio
Tetraetilo de plomo	B2 87/88	Ingestión	Histopatología del riñón y timo en animales de laboratorio 1964

**CLASIFICACIÓN USEPA Y EFECTOS A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A METALES**  
IRIS: Integrated Risk Information System 2002

INORGÁNICO	CLASIFICACIÓN USEPA (Año de clasificación y de revisiones)	VÍA DE EXPOSICIÓN CORRESPONDIENTE A LA CLASIFICACIÓN	EFFECTOS A LA SALUD (Años de publicación de estudios empleados como base para la clasificación)
Plata	D 86/87/89/91/96	Implantación en órganos	Estudios con animales de laboratorio 1935
Selenio	D 86/91/93	Ingestión	Seleniosis clínica. Estudio epidemiológico en humanos 1989
Ácido selenioso	D 86/	-	Estudios con animales de laboratorio
Sulfuro de selenio	B2 86/91/93	Ingestión	Carcinomas hepáticos en animales de laboratorio
Pentóxido de vanadio	87/88/96	Ingestión	Alteraciones en el peso de animales de laboratorio 1953
Zinc	D 86/91/92	Ingestión	Estudios en animales de laboratorio

**CONSIDERACIONES IMPORTANTES**

**LAS ÚNICAS SUSTANCIAS QUE PODRÍAN DAR UN FRANCO RESULTADO DE RIESGO DE CÁNCER EN HUMANOS SON AQUELLAS PARA LAS CUALES SE HA DETERMINADO UNA CLASIFICACIÓN USEPA "A"**

- . **BENCENO** (POR INHALACIÓN E INGESTIÓN)
- . **ARSÉNICO** (POR INHALACIÓN E INGESTIÓN)
- . **CROMO VI** (POR INHALACIÓN)
- . **NÍQUEL** (POR INHALACIÓN DE POLVOS, Y EN FORMA DE COMPUESTOS AZUFRADOS)

**PARA LAS SUSTANCIAS CON UNA CLASIFICACIÓN USEPA B1 O B2, AÚN NO SE HAN DEMOSTRADO DE MANERA DETERMINANTE LOS EFECTOS A HUMANOS, A MENOS QUE SU MALA CALIDAD DE VIDA LOS HAGA VULNERABLES**

**SI NO EXISTEN LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN,  
NO HAY RIESGO DE CÁNCER, NI PELIGRO POR INTOXICACIÓN**

**CLASIFICACIÓN DE  
LAS SUSTANCIAS  
EN FUNCIÓN  
DE SU EFECTO A LA  
SALUD HUMANA**

**TOXICIDAD AGUDA  
UNA SOLA DOSIS CAUSA  
"ENVENENAMIENTO" INMEDIATO**

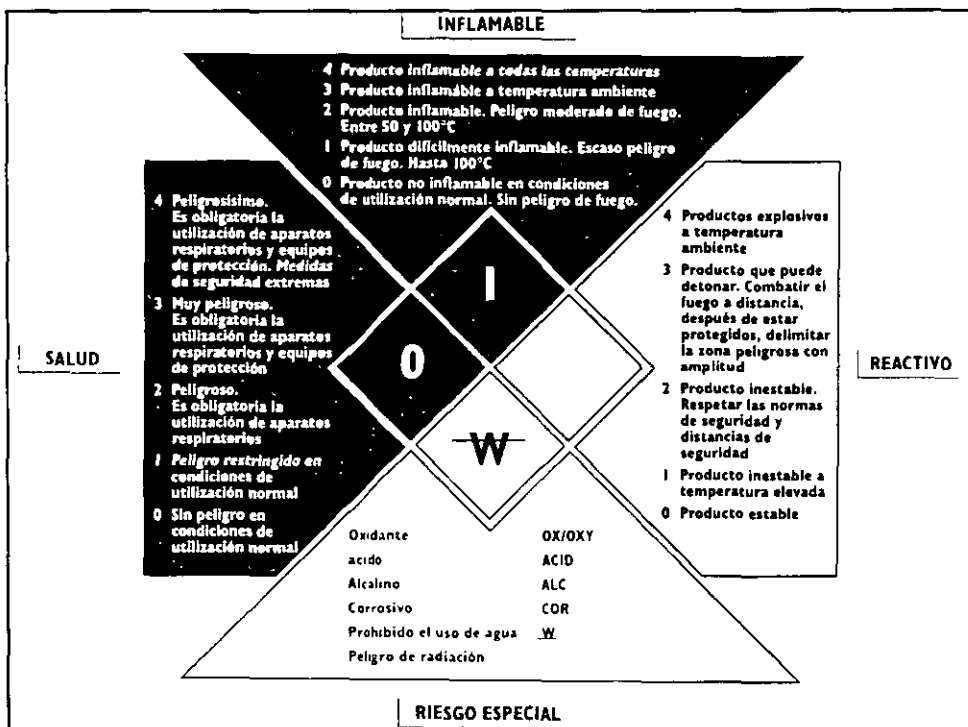
**EFFECTOS ADVERSOS DERIVADOS DE UNA CONTAMINACIÓN CON:**

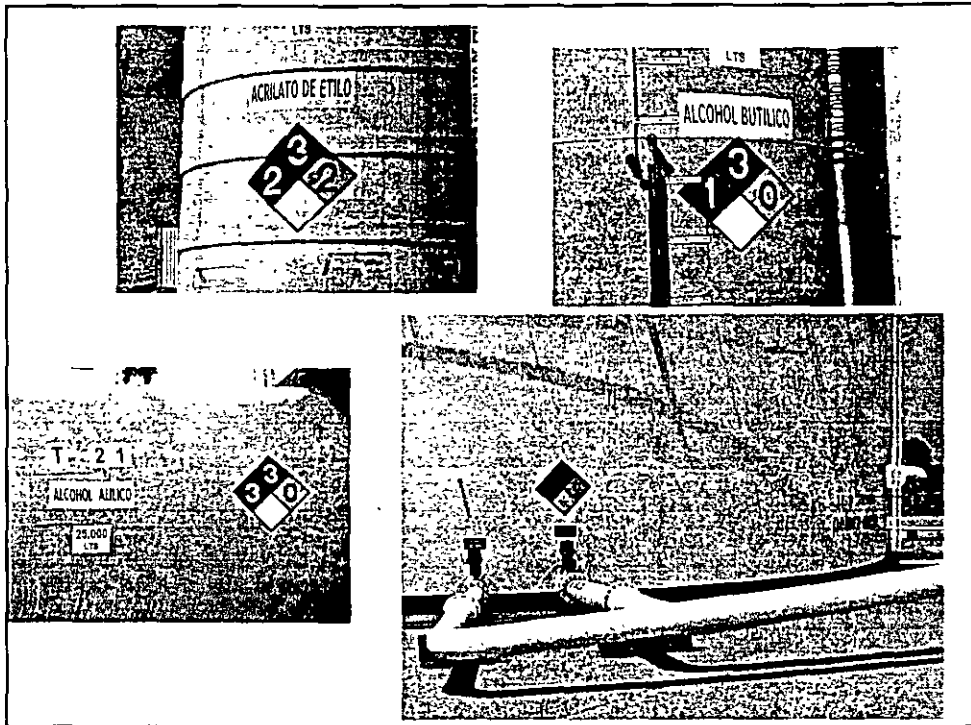
CONTAMINANTE	EFFECTO ADVERSO
ÁCIDOS	Irritación a los ojos y a vías respiratorias Intoxicación por inhalación Quemaduras de los ojos y de la piel
AMONÍACO	Irritación a los ojos, a vías respiratorias, a la piel Intoxicación por inhalación Quemaduras de la piel
HIDRÓXIDO DE SODIO	Quemaduras de la piel
HIPOCLORITO DE SODIO	Irritación de vías respiratorias y de la piel Intoxicación por inhalación Desordenes gástricos (náuseas) Quemaduras de la piel

**EFFECTOS ADVERSOS POR LA PRESENCIA DE ANIONES EN AGUA DERIVADOS DE UNA CONTAMINACIÓN CON ÁCIDOS**

ANIÓN	EFFECTO ADVERSO
Sulfatos	No hay reportes de efectos adversos a concentraciones menores a 500 mg/l. Entre 300 y 400 mg/l se detecta sabor desagradable
Cloruros	Se detecta su sabor desagradable a partir de 250 mg/l
Nitratos	Más de 10 mg/l ocasiona <u>metahemoglobinemia</u> . Oxidante de la hemoglobina de la sangre (USEPA "D")
Fosfatos	No hay reportes de daños a la salud humana. Se limita su concentración en cuerpos de agua porque su presencia es una amenaza de eutrofización

## COMUNICACIÓN DE RIESGO A LA SALUD





### NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGO DE COMBUSTIBLES

COMBUSTIBLE	RIESGO A LA SALUD	RIESGO DE INFLAMABILIDAD	RIESGO POR REACTIVIDAD
Gasnafta	1	3	0
Gasolina	1	3	0
Gasavión	1	3	0
Gasolvente	1	3	0
Turbosina	1	3	0
Diesel	0	2	0
Gasóleo	0	2	0
Combustóleo	0	2	0
Asfalto	0	1	0
Crudo	2	3	0

**NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGO DE HIDROCARBUROS**

HIDROCARBURO	RIESGO A LA SALUD	RIESGO DE INFLAMABILIDAD	RIESGO POR REACTIVIDAD
Benceno	2	3	0
Tolueno	2	3	0
Etilbenceno	2	3	0
Xilenos	2	3	0
Hexano	1	3	0
n-Heptano	1	3	0
Ciclohexano	1	3	0

**NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGO DE OTROS PRODUCTOS**

COMPUESTO	RIESGO A LA SALUD	RIESGO DE INFLAMABILIDAD	RIESGO POR REACTIVIDAD
Tetraetilo de plomo	3	2	3
MTBE	1	3	0
Azufre	2	1	0
Cloruro de vinilo	2	4	1



### NÚMERO DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGO DE COMPUESTOS INORGÁNICOS

COMPUESTO	RIESGO A LA SALUD	RIESGO DE INFLAMABILIDAD	RIESGO POR REACTIVIDAD	ESPECIAL
ácido clorhídrico	3	0	0	
ácido nítrico				
ácido sulfúrico	3	0	2	<del>W</del>
ácido fosfórico				
ácido sulfhídrico	3	4	0	
ácido fluorhídrico	4	0	0	
cloro	3	0	0	
amoníaco	3	1	0	
hidróxido de sodio	3	0	1	ALC
hidróxido de potasio	3	0	1	ALC

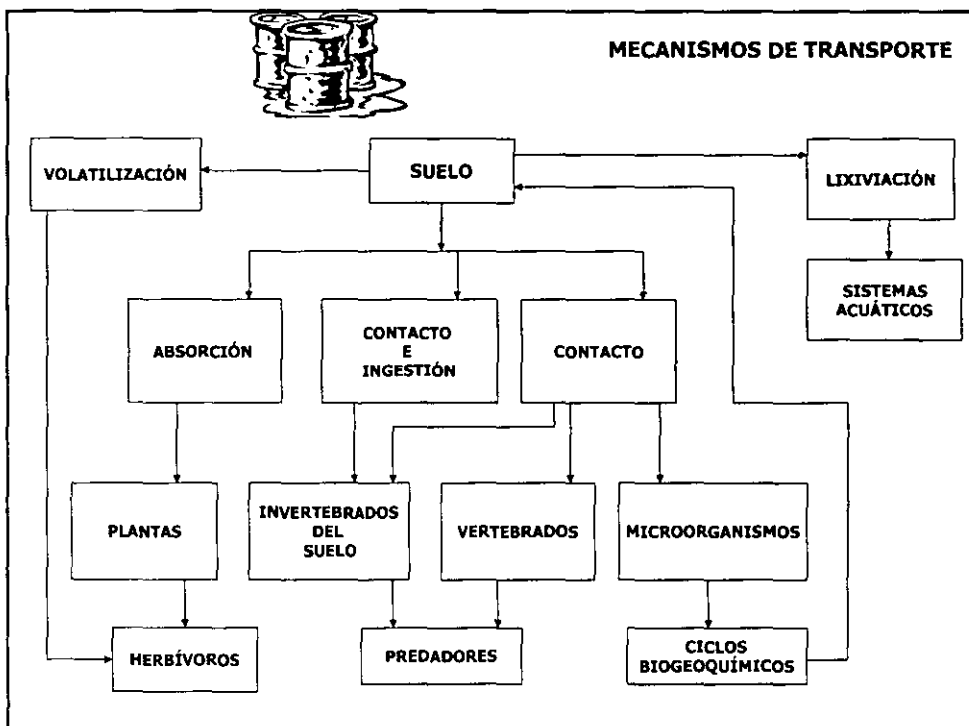
### RIESGO ECOLÓGICO

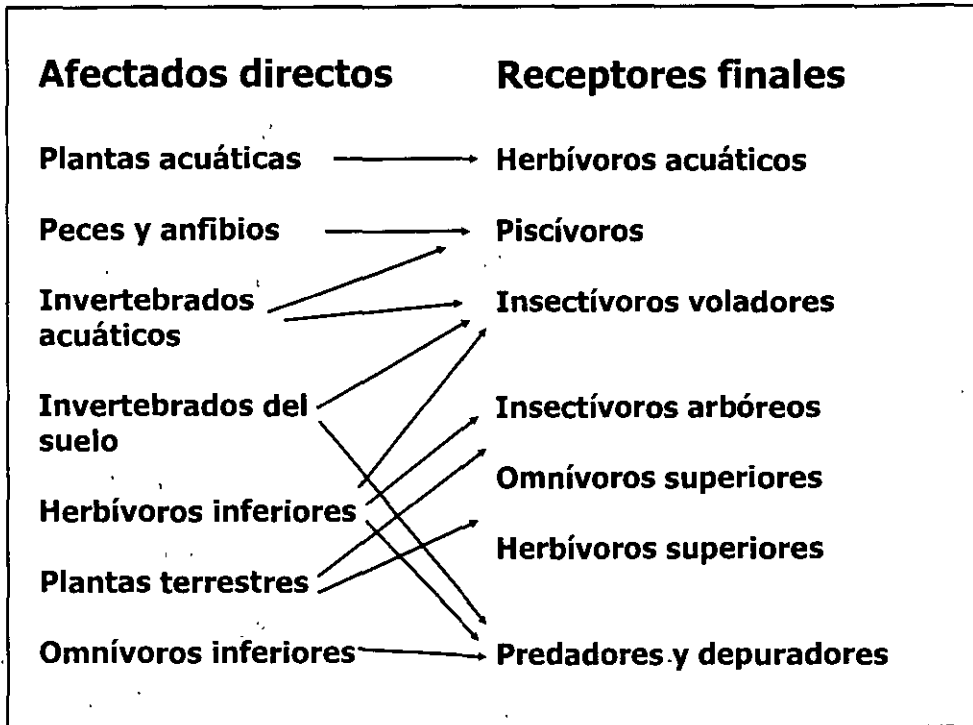
Destrucción de especies nativas vegetales y/o animales presentes en suelo o cuerpos de agua superficiales



## INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGO ECOLÓGICO

- Características de los receptores
- Identificación de las formas de exposición de los receptores
- Identificación de los receptores finales de las cadenas alimenticias involucradas
- Concentración de los contaminantes en el medio afectado





**ssb@pumas.iingen.unam.mx**