

70-A  
reje.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

" CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA "

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A

NORMA LEGORRETA LINARES



CIUDAD UNIVERSITARIA, D. F.

1994

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-109/93

Señorita:  
**NORMA LEGORRETA LINARES**  
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora **ING. ALBA VAZQUEZ GONZALEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

**"CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA"**

- I. INTRODUCCION
- II. FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA
- III. INTRUSION SALINA
- IV. DISPOSICION INADECUADA DE AGUAS RESIDUALES
- V. DISPOSICION INADECUADA DE LODOS Y RESIDUOS SOLIDOS
- VI. METODOS PARA EVITAR O CONTROLAR LA CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA
- VII. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitario, a 7 de marzo de 1994.  
EL DIRECTOR.

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

16. JMCS/RCR\*nll

*Con cariño, gratitud, admiración y respeto a esos seres tan maravillosos que no solamente me dieron el ser, sino que me han alentado durante toda mi vida, brindándome todo su apoyo en mis fracasos y mis triunfos sin esperar recibir nada a cambio*

*Mis padres  
Lucrecia y Ricardo*

*Con cariño a mis hermanos, de quienes he recibido algo  
invaluable su apoyo y amistad*

*Silvia  
Alejandro  
Rocto  
Rosalinda  
Marisol  
Edith*

*Con cariño y respeto a:*

*Dr. Sergio López Melgarejo*

*Con especial agradecimiento a quien por su acertada  
dirección fue posible la culminación de este trabajo*

*Ing. Alba Beatriz Vázquez González*

*Con un cariño muy especial a la persona que me ha  
brindado su apoyo, cariño y comprensión*

*Felipe Martínez Cruz*

*A mis amigos por los gratos momentos*

*Con gran cariño y afecto a aquellos que me brindaron su  
amistad incondicional*

*Amelia Campos*

*Alba Nélida*

*Angelito*

*Carlos Alvarado*

*Carlos Rodríguez*

*Claudia M.*

*David C.*

*Iván Salas*

*Jorge Martínez*

*Mauricio Espinoza*

*Mayanin*

*Patricia Cortés*

*Patricia Morales*

*Rafael Lagarde*



*Con respeto a la Universidad Nacional Autónoma de México porque me dió la oportunidad de forjar uno de mis más grandes anhelos.*

*Con cariño y agradecimiento a*

*Mi abuelita  
Marta*

*Con cariño a mis tíos y primos*

*Con gran cariño y afecto a mis adorables sobrinos  
Carmen y Sergio*

*A cada una de las personas que de alguna manera me alentaron a seguir para llegar a la culminación de este trabajo.*

*Y a todas aquellas personas con quienes tropece dentro de mi carrera, quienes me ayudaron a crecer en muchos aspectos, y a quienes dejaron huella dentro de mi corazón.*

*A todas ellas*

*GRACIAS*

***"LA MEJOR DE TODAS LAS COSAS ES EL AGUA"***

***PINDARO***

**"NO EXISTE OTRO SIGNO MAS REAL DE CULTURA  
Y CIVILIZACION QUE UN BUEN SANEAMIENTO"**

**STOBART**

# INDICE

	PAGINA
<b>CAPITULO 1</b>	
<b>INTRODUCCION</b>	1
<b>CAPITULO 2</b>	
<b>2. FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA</b>	4
2.1 Contaminación del agua	4
2.2 Ciclo hidrológico	4
2.2.1 Balance del agua dentro del ciclo hidrológico	
2.2.2 Ecuación hidrológica general del agua subterránea	
2.3 Agua subterránea	8
2.3.1 Composición del agua subterránea	
2.3.2 Distribución de agua en el subsuelo	
2.3.2.1 Importancia de la zona saturada y no saturada	
2.4 Tipos de acuíferos	14
2.5 Ventajas de las aguas subterráneas sobre las aguas superficiales	16
2.6 Conceptos básicos en Geohidrología	18
2.6.1 Porosidad	
2.6.2 Rendimiento específico ( $S_y$ ) y retención específica ( $r$ )	
2.6.3 Permeabilidad	
2.6.4 Transmisibilidad	
2.7 Calidad del agua	21
2.8 Fundamentos para la evaluación de la contaminación de aguas subterráneas	35
2.8.1 Distribución de aguas subterráneas y transporte de contaminantes	

	<b>PAGINA</b>	
2.8.2	Concepto de riesgo de contaminación de aguas subterráneas	
2.8.3	Clasificación de la vulnerabilidad a contaminación	
2.9	Formas de contaminación del agua subterránea	42
2.9.1	Formas de contaminación del agua subterránea:	
2.9.2	Intrusión Salina	
2.9.3	Aguas residuales	
2.9.4	Lodos y residuos sólidos	
2.9.5	Lluvia ácida	
2.10	Clasificación de las fuentes de contaminación de las aguas subterráneas	47

### **CAPITULO 3**

<b>3.</b>	<b>INTRUSION SALINA</b>	<b>49</b>
3.1	Intrusión salina	49
3.1.1	Mecanismos de avance de la intrusión salina y características físicas de la misma.	
3.2	Principios hidrostáticos	56
3.3	Principio de Ghyben-Herzberg	59
3.4	Alteraciones en las condiciones naturales en los acuíferos cercanos a la costa y contaminación salina	62

### **CAPITULO 4**

<b>4.</b>	<b>DISPOSICION INADECUADA DE AGUAS RESIDUALES</b>	<b>73</b>
4.1	Panorama de la contaminación del agua subterránea	73
4.2	Fuentes de contaminación	74
4.3	Calidad del agua residual municipal, industrial y agrícola	78
4.4	Contaminación industrial	80

4.4.1	Fuentes principales de contaminación industrial	
4.5	Sancamiento sin alcantarillado	88
4.6	Prácticas agrícolas de cultivo	93
4.7	Lagunas artificiales	102

## CAPITULO 5

<b>5.</b>	<b>INADECUADA DISPOSICIÓN DE LODOS Y RESIDUOS SOLIDOS</b>	<b>105</b>
5.1	DISPOSICION INADECUADA DE LODOS	105
5.2	Características de los lodos	108
5.2.1	Características físicas	
5.2.2	Posibles usos de los lodos	
5.3	Estabilidad del lodo de acuerdo al tipo de tratamiento	
5.4	Disposición de lodos	115
5.5	Contribución de los lodos a la contaminación del agua subterránea	118
5.6	DISPOSICION INADECUADA DE RESIDUOS SOLIDOS	118
5.6.1	Codiciones hidrogeológicas de un sitio de disposición de residuos sólidos municipales	
5.6.2	Etapas bioquímicas de la descomposición de los residuos sólidos municipales	
5.6.3	Factores que intervienen en la formación de lixiviados	
5.6.4	Estimación de la generación de lixiviados	
5.6.5	Características de los lixiviados	
5.7	Disposición inadecuada de residuos sólidos industriales	130
5.8	Casos Estudio	134
5.8.1	Zona de Celaya, Guanajuato:	
5.8.2	Zona de Cuautitlán, México	



## CAPITULO 6

<b>6.</b>	<b>METODOS PARA EVITAR O CONTROLAR LA CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA</b>	<b>138</b>
6.1	Control de la calidad del agua	139
6.2	Situación actual de la protección de las aguas subterráneas	139
6.3	Métodos de control de intrusión salina	141
6.4	Métodos de control de aguas residuales	148
6.4.1	Saneamiento de la descarga de aguas residuales	
6.4.2	Control de la calidad de las aguas residuales	
6.4.3	Captación y conducción de aguas residuales	
6.4.4	Métodos de tratamiento para el agua residual	
6.4.4.1	Métodos físicos	
6.4.4.2	Métodos químicos	
6.4.4.3	Métodos biológicos	
6.4.4.4	Métodos para la impermeabilización de lagunas	
6.5	Procesos para la evacuación de lodos	162
6.5.1	Tratamiento por espesamiento	
6.5.2	Digestión con o sin calentamiento	
6.5.3	Secado sobre lechos de arena	
6.5.4	Acondicionamiento químico	
6.5.5	Elutriación	
6.5.6	Filtración al vacío	
6.5.7	Secado por calentamiento	
6.6	Métodos de control de disposición de residuos sólidos	169
6.6.1	El relleno sanitario	
6.6.1.1	Consideraciones generales para el establecimiento de un relleno sanitario	

**CAPITULO 7**

**CONCLUSIONES**

175

**BIBLIOGRAFIA**

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

En gran parte de nuestro territorio, el agua es escasa en relación con su demanda y, como consecuencia, los problemas de sobreexplotación se han multiplicado, ya que el agua disponible se encuentra por debajo de la cota de los 500 m.s.n.m. y en la fajas costeras del Pacífico y Golfo de México, en tanto que las mayores necesidades del recurso se presentan arriba de esta altitud que es donde se encuentra asentada más del 70% de la población y 80% de la planta industrial. En muchas zonas se tiende a reservar el agua dulce para consumo humano ya que el total explotable en la República Mexicana es de 255 km<sup>3</sup>/anuales y aprovechables 28 km<sup>3</sup>/anuales, asimismo se tiende a utilizar las aguas residuales para sustentar la producción agrícola y el uso industrial. Así, se ha incrementado su disponibilidad, pero a costa de un rápido deterioro de su calidad.

No menos grave es el deterioro de la calidad del agua subterránea provocado por elementos químicos de origen natural como flúor, arsénico, nitratos, sulfatos, plomo, fierro y manganeso, entre otros, a veces en concentraciones nocivas para la salud humana, con el agravante de que su distribución en el subsuelo es muy amplia y difícil de conocer en detalle. En algunas zonas se tiene en proceso estudios para determinar su distribución espacial, su

evolución en el tiempo su influencia sobre la salud, aunque éste último aspecto plantea grandes incertidumbres por la falta de estadísticas médicas confiables.

México, es uno de los países latinoamericanos donde los problemas ambientales empezaron a manifestarse a fines de la década de los sesentas, agravándose en los años setenta. Entre las causas más importantes de la creciente contaminación ambiental y degradación de los recursos naturales se encuentra la industrialización, que se ha orientado exclusivamente al crecimiento cuantitativo.

El presente trabajo trata a cerca de la contaminación del agua subterránea (causas, consecuencias y formas de control), ya que en nuestro país es la principal fuente de abastecimiento para agua potable y dadas la circunstancias y características de los acuíferos puede considerarse un RECURSO NATURAL NO RENOVABLE. De aquí la importancia de crear conciencia para cuidar este recurso, ya que sin darnos cuenta a través del tiempo lo hemos ido contaminando paulatinamente sin reparar en el daño que causamos.

En el Capítulo 2 se describen las formas más usuales de contaminación del agua subterránea, así como los conceptos básicos de geohidrología y calidad del agua subterránea necesarios para la comprensión de los siguientes capítulos.

La intrusión salina, una de las principales causas de contaminación del agua subterránea en las zonas costeras se presenta en el Capítulo 3.

En el Capítulo 4 se presentan los efectos adversos sobre la calidad del agua subterránea debido a la disposición inadecuada de las aguas residuales.

El Capítulo 5 presenta los efectos de la inadecuada disposición de lodos y residuos sólidos en la calidad del agua subterránea.

En el Capítulo 6, se mencionan los métodos existentes para evitar o controlar la contaminación del agua subterránea debida al fenómeno de intrusión salina, a la disposición inadecuada de aguas residuales y a la disposición no planeada de lodos o residuos sólidos.

Finalmente las conclusiones del presente trabajo se presentan en el Capítulo 7.

## CAPITULO 2

### 2. FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

En este capítulo se describirán las formas más usuales de contaminación del agua subterránea. Se presentarán primero algunos conceptos básicos, necesarios para la comprensión de los mecanismos de contaminación del agua.

#### 2.1 Contaminación del agua

Por contaminación o polución del agua debe entenderse la alteración o degradación de su estado y composición natural al incorporarse un elemento, material, sustancia o compuesto que en su conjunto se le puede dar el nombre de soluto, así como la energía térmica, radiaciones ionizantes que degradan su calidad natural, perjudicando o alterando con ésto, de alguna manera, toda forma de vida.

#### 2.2 Ciclo hidrológico

Como es sabido, el agua de lluvia que se precipita sobre los continentes tiene tres

caminos por seguir:

- 1) evaporarse para formar nubes;
- 2) escurrir por la superficie del suelo formando arroyos y ríos que finalmente vierten sus aguas al mar, e;
- 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.

### **2.2.1 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, esto se ilustra en la Figura 2.1.

El otro 14% de evaporación se precipita sobre los continentes, haciendo un total de 22% de precipitación sobre éstos. De éste 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 consumo de agua disturba el balance hidrológico e hidráulico natural, los niveles de agua disminuyen, las direcciones del movimiento cambian, puede reducirse el retorno natural de agua a la superficie o a la atmósfera y puede aumentar o reducir la infiltración.

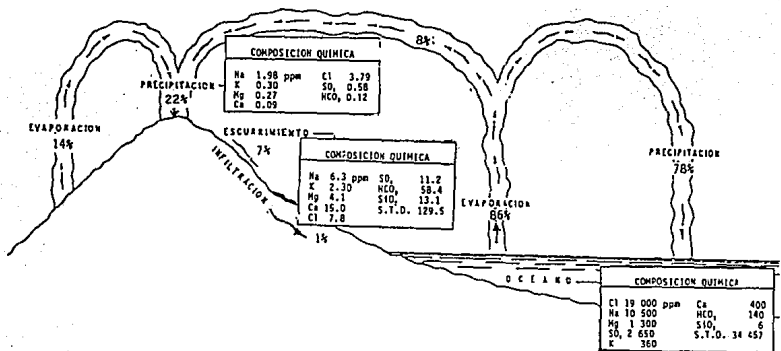


Figura 2.1. Ciclo hidrológico y composición media del agua de lluvia, ríos y océanos



### 2.2.2 Ecuación hidrológica general del agua subterránea

El equilibrio hidrológico se expresa en la ecuación 2.1

$$\Sigma R = \Sigma D + \Delta S \quad (2.1)$$

en donde R denota los varios factores hidrológicos de recarga y D los de descarga,  $\Delta S$  es el cambio asociado en volumen de almacenamiento. Más específicamente la recarga está compuesta de:

1. Infiltración natural derivada de la lluvia y de la fusión de la nieve.
2. Infiltración de masas superficiales de agua.
3. Flujo subterráneo.
4. Fuga a través de las capas confinantes o agua desplazada de ellas por compresión.
5. Agua derivada de las operaciones de difusión, carga y distribución del agua.

Inversamente, la descarga incluye:

1. Evaporación y transpiración.

2. Infiltración a masas de agua.
3. Flujo subterráneo.
4. Fuga a través de capas confinantes o absorbida por ellas mediante la reducción de la compresión.
5. Agua extraída a través de pozos y galerías o depósitos de infiltración.

El inventario hidrológico de un área productora de agua incluye en adición a la evaluación de los tres términos de la ecuación 2.1, una consideración de la precipitación pluvial y del escurrimiento superficial. Cuanto mayor sea el área, mayores son las dificultades para obtener mediciones precisas o estimaciones cercanas a los componentes del inventario.

### 2.3 Agua subterránea

El agua subterránea que forma los acuíferos proviene principalmente de la lluvia, donde parte de ésta al precipitarse sobre las formaciones geológicas, se filtra 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: temperatura del agua y las rocas; el área de contacto del agua con las formaciones, la velocidad de circulación, la longitud del recorrido, la composición química previa del agua y otros factores.

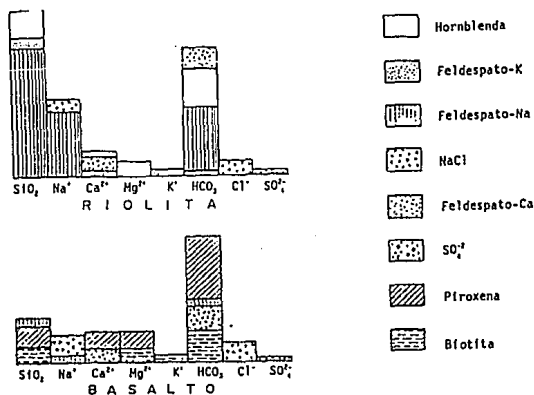
Estimaciones comparativas han revelado que, a nivel mundial, el recurso hidráulico disponible en el subsuelo es mucho mayor que el disponible en la superficie. Según una de dichas estimaciones, más del 90% del agua dulce existente en la Tierra se encuentra bajo la superficie del terreno; otra de ellas indica que el volumen de agua almacenado en el subsuelo de nuestro planeta es unas 20 veces mayor que el de agua dulce superficial.

### **2.3.1 Composición del agua subterránea**

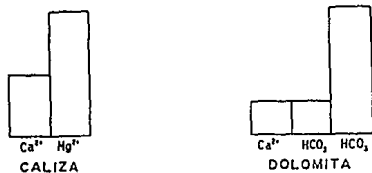
La composición del agua subterránea dependerá del tipo de roca, a través de la cual circula y de otros muchos factores complejos, véase Figura 2.2

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

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA



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



HISTOGRAMAS MOSTRANDO LA COMPOSICION DEL AGUA DE CALIZAS Y DÓLOMITAS

Figura 2.2. Composición química del agua subterránea que circula por diferentes rocas

cantidad de sólidos disueltos, debido a la fácil disolución de estas rocas, predominando la presencia de iones de calcio y sulfatos. El agua que circula a través de basaltos, tendrá pocos sólidos disueltos, debido a que esta roca es de difícil disolución; además tendrá aproximadamente, la misma cantidad de calcio, magnesio y sodio.

### **2.3.2 Distribución de agua en el subsuelo**

Es muy difundida la creencia de que en el subsuelo el agua se encuentra formando enormes lagos subterráneos o corrientes muy localizadas que fluyen a lo largo de conductos de gran tamaño. Sin embargo, aunque así se presenta en algunos acuíferos constituidos por rocas volcánicas o por rocas carbonatadas, en la gran mayoría de los casos el agua circula y se almacena en los poros que dejan entre sí las partículas de materia; es decir, en un medio poroso.

El agua subterránea se encuentra en dos zonas diferentes la de aireación y la de saturación. En la zona de aireación, los poros del suelo están parcialmente llenos de agua. En la zona de saturación el agua llena totalmente los vacíos del suelo. Por lo general la primera zona está situada por arriba de la segunda. El lugar geométrico de los puntos en la zona de saturación en que la presión del agua es igual a la presión atmosférica se le llama **NIVEL DE AGUAS FREÁTICO**.

La zona de saturación está situada sobre un manto impermeable o semi-impermeable y por su parte superior puede estar limitada también por capas impermeables.

### 2.3.2.1 Importancia de la zona saturada y no saturada

La zona no saturada es de especial importancia debido a que representa la primera línea de defensa natural contra la contaminación del agua subterránea. Esto no es sólo debido a su posición estratégica entre la superficie y los acuíferos, sino también a que es un ambiente favorable para atenuar o eliminar contaminantes.

El movimiento de agua en la zona no saturada es generalmente lento y restringido a los poros más pequeños con una superficie específica grande, la condición química es normalmente aerobia y frecuentemente alcalina. Esto resulta en un potencial considerable para:

1. La intercepción, absorción y eliminación de microorganismos patógenos.
2. La atenuación de metales pesados y otras sustancias químicas inorgánicas, mediante precipitación (como carbonatos, sulfuros o hidróxidos), absorción o intercambio de cationes.
3. La absorción y la biodegradación de muchos hidrocarburos y compuestos orgánicos naturales y sintéticos.

Por lo general tales procesos continuarán abajo en la zona saturada de los acuíferos pero generalmente a tasas menores. En esta zona la reducción de las concentraciones de los contaminantes dependerá principalmente de la dilución que resulte de la dispersión hidrodinámica, lo que no es un control adecuado para contaminantes altamente tóxicos.

Dado que las velocidades de flujo natural en la zona no saturada de casi todas las formaciones no exceden de 0.2 m/d a corto plazo, y menos cuando se promedian por períodos más extensos, el flujo de agua y las tasas de penetración del contaminante en formaciones fisuradas puede ser de un orden de magnitud mayor, en presencia de una sobrecarga hidráulica artificial, véase Figura 2.3

La zona biológicamente activa del suelo forma, en efecto, la parte más alta de la zona no saturada. Muchos de los procesos que causan la eliminación y atenuación de contaminantes ocurren a tasas más altas en esta zona, como resultado de su contenido mineral orgánico y de arcilla más alto, y una población bacteriana mucho mayor. En muchas fuentes de contaminación puntual, sin embargo, la carga contaminante es aplicada debajo del suelo, en la base de excavaciones tales como fosas, zanjas, lagunas, filtraciones, donde el acuífero es más vulnerable.

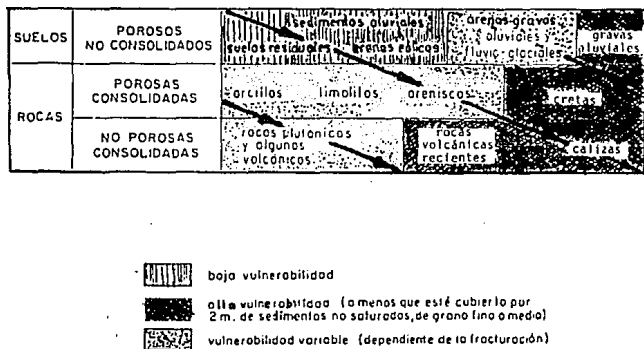


Figura 2.3. Clasificación litológica simplificada de formaciones geológicas en términos de riesgo relativo a la contaminación del agua subterránea. (Esta indica la probabilidad de migración extensiva de contaminantes microbiológicos y biodegradables).

## 2.4 Tipos de acuíferos

Acuíferos: Son aquellos estratos que pueden proporcionar agua en una cantidad aprovechable. Siendo esta definición muy relativa, pues depende de las condiciones



existentes en cada zona.

Desde el punto de vista hidráulico los acuíferos pueden clasificarse en tres tipos principales: confinados, semiconfinados y libres.

#### Acuífero confinado

Es aquel limitado superior e inferiormente por formaciones relativamente impermeables, que contienen agua a mayor presión que la atmosférica.

#### Acuífero semiconfinado

Se le da este nombre ya que esta limitado por formaciones menos permeables que él mismo, pero a través de las cuales puede recibir o ceder volúmenes significativos de agua.

#### Acuífero libre

Se presenta cuando se tiene como límite superior al nivel freático. Las variaciones de este nivel corresponden a variaciones en el espesor saturado del acuífero.

## 2.5 Ventajas de las aguas subterráneas sobre las aguas superficiales

El agua subterránea presenta por naturaleza, varias ventajas con respecto al agua superficial:

- a) **Menores pérdidas por evaporación.** Todos los almacenamientos de agua superficial pierden cantidades significativas de agua por evaporación. En cambio, los recipientes subterráneos sólo pierden cantidades importantes de agua por evapotranspiración cuando los niveles freáticos se encuentran muy someros.
  
- b) **Menor exposición a la contaminación.** Es bien sabido que uno de los grandes problemas de la actualidad es el de la contaminación del agua; la gran mayoría de las corrientes y masas de agua superficial se están contaminando rápidamente en mayor o menor grado. El agua subterránea, en cambio, está relativamente salvaguardada de este perjuicio, gracias a que los materiales granulares funcionan como un filtro que retiene los contaminantes, especialmente los biológicos; y aunque existe la contaminación química provocada por un mal manejo del recurso, la baja velocidad con que el agua circula en el subsuelo no propicia su rápida propagación a grandes áreas de la superficie.

- c) **Disponibilidad menos afectada por las variaciones climatológicas.** Los aprovechamientos subterráneos resultan menos afectados que los superficiales, gracias a que existe una reserva almacenada, acumulada durante siglos, generalmente mucho mayor que la recarga anual, permitiendo una explotación más flexible del recurso.
- d) **Distribución más amplia en el área.** El agua superficial es un recurso transitorio y su presencia es relativamente localizada. Su aprovechamiento requiere en gran escala de obras de almacenamiento y conducción. En cambio, en el subsuelo el agua tiene una distribución muy amplia, lo que permite su captación en el sitio donde va a ser utilizada, o en sus inmediaciones. El vaso de almacenamiento ya existe en el subsuelo, construido por la naturaleza, y funciona al mismo tiempo como un gran conducto.
- e) **No hay pérdida de la capacidad de almacenamiento.** Todo vaso superficial pierde gradualmente su capacidad de almacenamiento al ser azolvado por los sedimentos que transportan las corrientes que lo alimentan, hasta que eventualmente puede quedar inutilizado. La capacidad de almacenamiento de los vasos subterráneos no es afectada significativamente en la gran mayoría de los casos.

- f) **Temperatura del agua constante.** La temperatura del agua superficial varía continuamente al estar expuesta a los cambios atmosféricos. La temperatura del agua subterránea es casi constante debido a que el subsuelo funciona como un regulador térmico.

## 2.6 Conceptos básicos en Geohidrología

### 2.6.1 Porosidad

La porosidad de una roca es una medida del volumen de vacíos ( $V_v$ ) que contiene, y se expresa como porcentaje del volumen total ( $V_t$ ):

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (2.2)$$

Puesto que en la zona de saturación los vacíos están totalmente saturados, la porosidad es una medida de la cantidad de agua que la roca contiene por unidad de volumen.

## 2.6.2 Rendimiento específico ( $S_y$ ) y retención específica ( $r$ )

Cuando un cierto volumen de roca totalmente saturada, se deja drenar bajo la acción de la gravedad, no toda el agua que contiene es liberada; una parte del agua es retenida en los poros por fuerzas de atracción molecular, adhesión y cohesión. La cantidad de agua retenida es directamente proporcional a la superficie de las partículas e inversamente proporcional al tamaño de los poros; así por ejemplo las arcillas retienen mayor cantidad de agua que las arenas.

Se define como rendimiento específico de una roca a la cantidad de agua que libera por unidad de volumen, cuando el nivel freático experimenta un abatimiento unitario. La retención específica mide la capacidad de la roca para retener el agua, y se define como el volumen de agua retenido en contra de la gravedad, por unidad de volumen de roca.

De acuerdo con las definiciones anteriores, se tiene la siguiente definición:

$$n = (S_y) + r \quad (2.3)$$

En la mayoría de las rocas el agua no es liberada en forma instantánea, sino que existe un cierto retraso entre el descenso del nivel freático y el drenado total de los poros. En las formaciones granulares tal retraso es tanto mayor cuanto menor es el tamaño de los poros.

### 2.6.3 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de una roca para permitir la circulación del agua a través de ella. Cuantitativamente su valor está dado por el Coeficiente de permeabilidad, el cual se define como el caudal que circula a través de un área unitaria, transversal al flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario. Esta propiedad depende de la forma, acomodo y distribución granulométrica de las partículas constituyentes, y del grado de compactación o cementación de las mismas, factores que controlan, a su vez, el tamaño e interconexión de los intersticios. El coeficiente de permeabilidad se expresa en unidades de velocidad; generalmente en el sistema métrico, en m/seg o cm/seg.

### 2.6.4 Transmisibilidad

Es la capacidad de un acuífero para transmitir el agua a través de todo su espesor y es igual al producto del coeficiente de permeabilidad  $K$ , por el espesor saturado del acuífero  $b$ . Se expresa en  $m^2/seg$  o  $m^2/día$ .

$$T = Kb \quad (2.4)$$

## 2.7 Calidad del agua

La calidad es la propiedad del agua que le permite seguir siendo útil, dar de beber al hombre y a especies animales, sustenta toda la vida marina, sirve para irrigar la tierra, y sirve como medio de recreación.

Esta calidad se puede conocer a través del contenido de elementos y sustancias en el agua, haciendo un examen minucioso en el cual se obtengan resultados cualitativos y cuantitativos de cada uno de ellos.

Para definir el grado de contaminación del agua se determinan los parámetros por medio de análisis físicos, químicos orgánicos e inorgánicos y bacteriológicos, incluyendo los virales.

Dependiendo de las características del agua, cada muestreo es diferente, o sea, su forma de recolección, cantidades de muestras, tipos de envases, limpieza de los mismo, etc., esto es con base en el grado de contaminación del agua a tratar.

Los resultados de los análisis se comparan con las Normas Oficiales Mexicanas y Criterios de Calidad del Agua para diferentes usos, que establecen los límites máximos permisibles por parámetros. Las pruebas de laboratorio son de gran importancia, ya que

## FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

---

ayudan a formar una opinión de que tan adecuada resulta el agua de una fuente de abastecimiento para un uso determinado. Los principales criterios para evaluar el grado de contaminación del agua se basan en los siguientes factores:

- a) Concentración de microorganismos coliformes
- b) Déficit de saturación de oxígeno
- c) Demanda bioquímica de oxígeno
- d) Concentración de sólidos en suspensión
- e) Concentración de petróleo, fenoles, agentes tóxicos
- f) Radiactividad

Los análisis que se hacen al agua se dividen en:

- a) Físicos

**Temperatura:** La variación de la temperatura puede indicar principio de



contaminación. La temperatura del agua contaminada tiende a ser mayor que la natural en el mismo medio.

**Color:** La variedad en el color da indicios de contaminación, sobre todo cuando es diferente al color natural del agua.

**Olor:** En general el olor se debe a la presencia de materia orgánica en descomposición o a compuestos químicos como fenoles.

**Turbiedad:** Las aguas contaminadas normalmente son turbias porque contienen materia sólida en suspensión volátil.

**Residuos sólidos:** Se llama residuo a aquel que queda en un recipiente después de la evaporación de una muestra de agua y de su secado subsecuente a una temperatura definida.

b) Químicos

Los elementos que pueden encontrarse en solución en el agua pueden ser muy variados. De los más comunes, se mencionan su fuente o causa de origen, así como algunas de sus principales características, se presentan en el Cuadro 2.1

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

CUADRO 2.1. Elementos que pueden encontrarse en solución en el agua.  
Significado de algunas propiedades físicas y químicas del agua

COMPUESTO	FUENTE O CAUSA DE ORIGEN	SIGNIFICADO
Bicarbonato Carbonato	Proviene de la incorporación del bióxido de carbono en el agua y de la disolución de rocas carbonatadas como la caliza y la dolomita	Los carbonatos y bicarbonatos producen alcalinidad. Los carbonatos de calcio y magnesio se descomponen en calderas y aguas calientes, facilitando la incrustación y liberando bióxido de carbono corrosivo a la atmósfera. En combinación con calcio y magnesio es causa de la dureza.
Boro	Proviene de la disolución de suelos y rocas, en especial las de origen ígneo. El agua de zonas térmicas y especialmente aquellas que se encuentran en áreas de actividad volcánica reciente, pueden contener altas concentraciones de boro. Puede deberse en ocasiones, a contaminación por desperdicios, especialmente donde se usan detergentes que contienen boratos.	Cantidades pequeñas de este elemento, es esencialmente 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	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.	El calcio y el magnesio son los principales responsables de la dureza en el agua, la cual origina un gran consumo de jabón. Puede incrustarse en tuberías y ademes, reduciendo su eficiencia.

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

COMPUESTO	FUENTE O CAUSA DE ORIGEN	SIGNIFICADO
Color	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.	Indica la presencia de iones inorgánicos o materia orgánica en el agua subterránea. Es un factor importante en la evaluación de agua potable o para otros usos.
Cloruro	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.	Grandes concentraciones de este elemento, aumenta el poder corrosivo del agua y, en combinación con sodio, da un sabor muy salado.
Concentración de Hidrógeno	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.	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.

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

COMPUESTO	FUENTE O CAUSA DE ORIGEN	SIGNIFICADO
Conductividad eléctrica	Depende de la cantidad de sales disueltas en el agua.	Es una medida de la capacidad del agua de conducir corriente eléctrica. Varía con la concentración y grado de ionización de los constituyentes, así como con la temperatura. Se usa para estimar la cantidad de sales disueltas en el agua.
Dureza como $\text{CaCO}_3$	En la mayoría de los casos, la dureza es debida al calcio y magnesio	Consumo jabón y no produce espuma. Forma depósitos de jabón en baños. El agua dura incrusta calderas y tuberías
Estroncio	Proviene de la disolución de rocas y suelos, en especial de rocas carbonatadas y rocas de origen ígneo.	Las concentraciones son en general muy bajas.
Hierro	Proviene de la disolución de suelo, rocas y de tuberías, bombas y equipos similares. Concentraciones mayores a 1 ó 2 ppm, generalmente indican drenaje de zonas mineras u otra fuente.	Expuesto a la superficie, el hierro 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 favorecen el crecimiento de bacterias.

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

COMPUESTO	FUENTE O CAUSA DE ORIGEN	SIGNIFICADO
Fluoruro	Se encuentra diseminado en cantidades muy pequeñas, en casi todo tipo de rocas y suelos.	Reduce la picadura de dientes (caries) en los niños durante la época de calcificación. En exceso 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	Proviene del intemperismo de rocas ígneas y de la lixiviación de suelos que contienen desperdicios orgánicos, fertilizantes, detergentes y drenajes domésticos e industriales.	Concentraciones mayores a las normales, indican contaminación por desechos.
Litio	Proviene de la disolución de rocas durante el intemperismo. La escasez del litio en la naturaleza es probablemente el responsable de las relativas bajas concentraciones en el agua.	Las concentraciones de este elemento en el agua son en general muy bajas, y no afectan la calidad para los diferentes usos.
Magnesio	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.	Es el causante de la coloración café oscura o negra.

**FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA**

COMPUESTO	FUENTE O CAUSA DE ORIGEN	SIGNIFICADO
Nitrógeno Amonio Nitrito Nitrito	Se encuentra en el agua como $\text{NH}_4$ , $\text{NH}_2$ y $\text{NO}_2$ , dependiendo del grado de oxidación. Proviene de la disolución de rocas ígneas suelos enriquecidos por legumbres y fertilizantes, establos y aguas de drenaje.	Concentraciones altas de nitrógeno, indican contaminación. Los nitratos aumentan el crecimiento de algas y otros organismos que producen olor y sabor desagradable. Concentraciones mayores a 45 ppm de nitratos, causan metahemoglobinemia en lo niños.
Potasio	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.	Grandes concentraciones, en combinación con cloro, producen un sabor salado. Esencial en la nutrición de las plantas.
Relación de adsorción de sodio	Se calcula usando las concentraciones de los iones que se indican en miliequivalentes por litro.	El RAS es usado junto con la conductividad eléctrica, para determinar la calidad del agua por riego.
Selenio	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 derivado de ellas.	Es tóxico en cantidades pequeñas. Constituye un problema cuando se encuentra en plantas o agua para el ganado.

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

COMPUESTO	FUENTE O CAUSA DE ORIGEN	SIGNIFICADO
Silice	Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Generalmente se presenta en concentraciones bajas de 1 a 30 ppm. Concentraciones hasta de 100 ppm suelen encontrarse en aguas altamente alcalinas.	Produce incrustación en tuberías y calderas
Sodio	Proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. Se encuentra también en salmueras, agua de mar, desperdicios industriales y drenajes.	Grandes concentraciones en combinación con el cloro, producen un sabor salado. Concentraciones grandes comúnmente limitan el uso del agua para la agricultura.
Sólidos totales disueltos	Proviene de la disolución de minerales que forman los suelos y las rocas. Puede incluir constituyentes orgánicos y agua de cristalización.	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	Proviene de la disolución de rocas y suelos que contienen yesos, fierro y compuestos sulfurados. Comúnmente se presenta en aguas de drenaje de minas y en algunos desechos industriales.	Concentraciones altas, actúan como laxante y en combinación con otros iones da al agua un sabor desagradable. En aguas que contienen calcio, producen incrustaciones.

c) Bacteriológicos

Las corrientes contaminadas (aguas negras o industriales) contienen microorganismos que pueden clasificarse en: algas, hongos, bacterias, protozoos y formas superiores de vida. Las bacterias tiene la particularidad de reproducirse rápidamente, algunas pueden crecer y subdividirse en sólo 15 minutos. De acuerdo a las temperaturas óptimas para el desarrollo de las bacterias, éstas se dividen en sicrofilicas cuando viven entre los 15 y los 20° C; mesofilicas entre 25 y 45°C y termofilicas entre 45 y 55°C.

Las bacterias que producen enfermedades en el hombre se denominan patógenas y en general son parásitos que viven a la temperatura del cuerpo humano. Las principales enfermedades causadas por bacterias y transmitidas por el agua son la fiebre tifoidea, la disentería, el cólera y ciertos tipos de trastornos gastrointestinales.

De acuerdo al medio de desarrollo las bacterias se dividen en:

1. Naturales del agua

En general no son patógenas; son típicas las *Pseudomonas sp*, la *Serratía sp*, *Flavobacterium sp* y *Chromobacterium sp*.



2. Provenientes del suelo.

No son patógenas y son frecuentes los bacilos y los bacilos aerobios.

3. De origen intestinal

Pueden ser o no patógenas; entre las no patógenas se hallan la *Escherichia coli* (típica del hombre), bacilos aerobios y *Proteus sp.* Entre las patógenas la *Salmonella sp* y la *Shigella sp*; el bacilo *Clostridium sp* que es altamente peligroso.

**2.7.1 Guías para la calidad del agua potable en relación con las aguas subterráneas**

En muchos casos una política de protección de las aguas subterráneas no estará orientada a prevenir todo tipo de contaminación. Entonces surge la interrogante de saber qué cantidad de contaminación se puede tolerar. Por tal razón, las diferentes normas o guías para la potabilidad del agua se tornan, en efecto, en los criterios de diseño para el control de la contaminación de las aguas subterráneas. Por lo tanto, es relevante discutir de qué manera las actuales Guías de la OMS sobre Calidad del Agua Potable se refieren directamente a las aguas subterráneas. Al hacerlo es importante apreciar que estas guías se basan en dos criterios separados: su importancia para la salud (efecto tóxico, carcinogénico, mutagénico) que es de prioridad, y los aspectos organolépticos o estéticos (sabor, olor,

color) que son de importancia secundaria, siempre que se garantice que el consumidor aceptará el agua y no acudirá a una fuente aparentemente mejor, pero de mayor riesgo para la salud pública.

### 2.7.2 Resumen de las guías de la OMS para la calidad del agua potable

El cuadro 2.2 muestra un resumen de las guías de la OMS para la calidad del agua potable.

Con respecto a la calidad microbiológica, las guías actuales de la OMS recomiendan que debe considerarse que un suministro no es satisfactorio si se detectan bacterias indicadoras, coliformes fecales, en cualquier muestra de 100 ml. Para algunos tipos de suministro de agua se puede tolerar la presencia de las bacterias coliformes totales en niveles de hasta 10/100 ml en muestra esporádicas. Algunos especialistas en salud pública consideran que estas guías son innecesariamente severas como para ser adoptadas en países en desarrollo, sobre todo para pequeños suministros de agua subterránea no tratados ni entubados, debido al costo desproporcionado para alcanzar tales estándares en relación con otros riesgos para la salud pública. También se cuestiona la relevancia del recuento de coliformes totales debido a las existencia relativamente difundida de organismos coliformes no fecales en las aguas subterráneas poco profundas de países tropicales.

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

CUADRO 2.2 a) Resumen de las guías de la oms para la calidad del agua potable y su relación con la contaminación de las aguas subterráneas

CONSTITUYENTES INORGANICOS

Constituyente <sup>a</sup>	GUIA		Fuente de aguas subc. <sup>c</sup>	Nivel de ocurrencia <sup>d</sup>
	Valor	Criterio <sup>b</sup>		
	(mg/l)			
Aluminio (Al)	0.2	E	-	n *
[Amonio (NH <sub>4</sub> -N)	0.01	E	EEC, 1992	Pn **]
Arsénico (As)	0.5	S	-	Mp **
Cadmio (Cd)	0.005	S	-	P *
Cloruro (Cl)	250	E	-	NP ***
Cobre (Cu)	1	E	-	np *
Cromo (Cr)	0.05	S	Cr <sup>6+</sup> tóxico	P **
Cianuro (CN)	0.1	S	-	p **
[Detergentes (ABS)	0.2	E	OHS, 1974	P **]
Fluoruro (F)	1.5	S	-	N **
Hierro (Fe)	0.3	E	Fe <sup>2+</sup> solub.	NP- ***
Plomo (Pb)	0.05	S	-	np *
Manganeso (Mn)	0.1	E	Mn <sup>2+</sup> solub.	NP- **
Mercurio (Hg)	0.001	S	-	np *
Nitrato (NO <sub>3</sub> -N)	10	S	-	Pn ***
Selenio (Se)	0.01	S	-	np *
Sodio (Na)	200	E	-	NP ***
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	400	E	Hg > 50 mg/l	NP ***
Zinc (Zn)	5	E	-	np **

- a. se han omitido parámetros compuestos tales como Conductividad Eléctrica (CE), Sólidos Disueltos Totales (SDT), pH, etc., que tienen principalmente importancia estética
- b. S de consideración para la salud (tóxico, cancerígeno, mutagénico)  
E aspectos estéticos (sabor, olor, color) de consideración secundaria
- c. (las letras mayúsculas indican ocurrencia más frecuente)  
N que ocurre en forma natural  
P contaminación causada por el hombre  
P- producto indirecto de contaminación orgánica mediante la reducción de Eh a niveles en los cuales Fe y Mn son solubles
- d. indica el menor o mayor grado de frecuencia relativa y persistencia en aguas subterráneas contaminadas (o producto de cloración de aguas contaminadas por bencenos, ácidos fúlvicos/húmicos y fenoles, respectivamente)

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

CUADRO 2.2 b) Resumen de las guías de la OMS para la calidad del agua potable y su relación con la contaminación de las aguas subterráneas

CONSTITUYENTES ORGANICOS

Constituyente	GUIA		Usos Comunes o Fuentes	Ocurrencia <sup>d</sup>
	Valor	Criterio <sup>a</sup>		
	(µg/l)			
<u>Benceno<sup>f</sup> y Derivados</u>				
benceno	10	S	gasolina, alquitranes	**
benzo (a) pireno (PAH)	0.01	S	solventes, tintes	
clorobencenos	0.1	E(S)	desinfectantes	(**)
<u>Alcanos halogenados</u>				
1,2 dicloroetano	10	S	intermedios,	*
tetracloruro de carbono	3	S	solventes	**
cloroformo	30	S		(*)
<u>Alquenos halogenados</u>				
1,1 dicloroetileno	0.3	S	solventes	**
tricloroetileno <sup>e</sup>	30	S	industriales	**
tetracloroetileno <sup>e</sup>	10	S		**
<u>Fenoles halogenados<sup>f</sup></u>				
2,4,6 triclorofenol	0.1 (10)	E(S)	efluentes de	(**)
pentaclorofenol	0.1 (10)	E(S)	plantas de gas	(*)
<u>Compuestos pesticidas</u>				
aldrin/dieldrin	0.03	S	insecticida	
clorodano	0.03	S	insecticida	
DDT (diclorodifenil-tricloroetano)	1	S	insecticida	
HCH (hexaclorobenceno)	0.01	S	fungicida	*
heptacloro/epóxido	0.1	S	insecticida	
HCH (lindano)	3	S	insecticida	
metoxicloro	30	S	insecticida	*
2,4 D (ácido dicloro-fenoxiacético)	100	S	herbicida	**

e guía tentativa sólo para el presente

f EEC (1982) da una guía de un total de 10 µg/l de hidrocarburos disueltos y de 0.5 µg/l de fenoles sintéticos sobre consideraciones estéticas

## **2.8 Fundamentos para la evaluación de la contaminación de aguas subterráneas**

### **2.8.1 Distribución de aguas subterráneas y transporte de contaminantes**

Los perfiles naturales del suelo atenúan activamente muchos, aunque no todos, los contaminantes del agua. Estos han sido reconocidos por mucho tiempo como un sistema potencialmente efectivo para la disposición segura de excretas humanas y aguas residuales domésticas. En menor grado los procesos de atenuación continúan a mayor profundidad, especialmente donde hay sedimentos no consolidados.

Adicionalmente, la dispersión hidrodinámica que acompaña al flujo de aguas subterráneas resulta en dilución de los contaminantes persistentes y móviles, especialmente en la zona saturada de los acuíferos. Habrá mezcla y más dilución en pozos de producción ya que, por lo general, éstos interceptan o inducen flujo de aguas subterránea a varias profundidades y direcciones, y no todos ellos estarán contaminados, véase Figura 2.4

Sin embargo, no todos los perfiles de los suelos ni las condiciones hidrogeológicas son igualmente efectivos para atenuar los contaminantes. Más aún, el grado de atenuación variará ampliamente en una condición dada, según los tipos y la disposición de contaminantes.

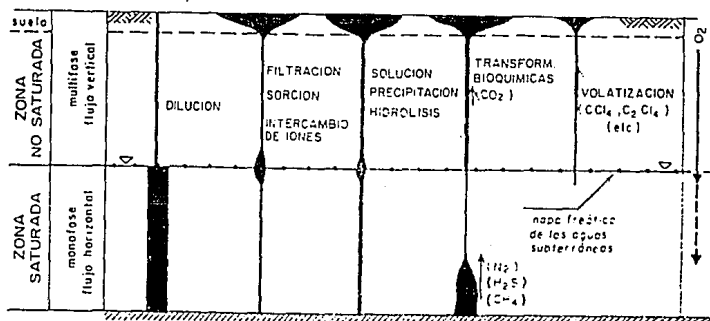


Figura 2.4. Procesos que producen atenuación de contaminantes en los sistemas de aguas subterráneas. (El grosor de la línea correspondiente indica típicamente la importancia relativa del proceso en el suelo, sobre, dentro y debajo del nivel freático.

La preocupación por la contaminación de las aguas subterráneas se relaciona principalmente a los llamados acuíferos no confinados o freáticos, sobre todo en lugares donde la zona no saturada es delgada y el nivel freático poco profundo. También pueden existir importantes riesgos de contaminación, incluso donde los acuíferos son semiconfinados, si los acuitados superficiales son relativamente delgados y/o permeables. Por lo general, los abastecimientos de aguas subterráneas derivados de acuíferos más profundos y altamente confinados, no serán afectados por contaminación desde la superficie del suelo, salvo por los contaminantes más persistentes, y a muy largo plazo.

### 2.8.2 Concepto de riesgo de contaminación de aguas subterráneas

La apreciación más lógica para la definición de riesgo de contaminación de aguas subterráneas es conceptualizarlo como la interacción entre dos factores semindependientes:

- a) La carga contaminante que es, será o podrá ser, aplicada en el subsuelo como resultado de la actividad humana.
- b) La vulnerabilidad natural a contaminación del acuífero.

Adoptando este esquema podemos tener alta vulnerabilidad pero no riesgo de contaminación, debido a la ausencia de una carga contaminante, y viceversa. Ambos son perfectamente consistentes en la práctica. Aún más, la carga contaminante puede ser controlada o modificada, pero no así la vulnerabilidad del acuífero.

Otras consideraciones determinarán si el riesgo de contaminación del acuífero resultará en una seria amenaza para la calidad del agua subterránea usada o designada para abastecimiento de agua:

- a) La magnitud del episodio de contaminación.
- b) El valor de los recursos de aguas subterráneas.

## FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

las que a su vez dependen de una serie de factores relacionados, veáse Figura 2.5

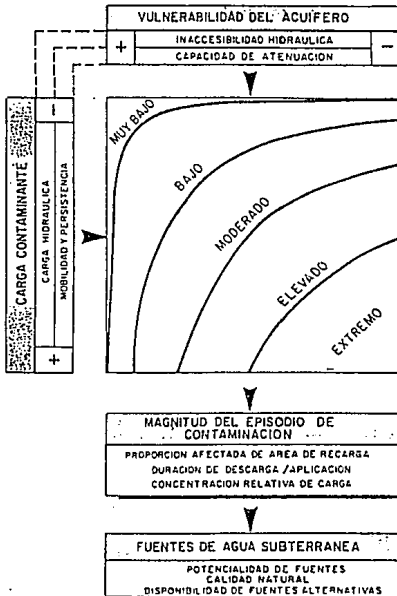


Figura 2.5. Esquema conceptual para la evaluación del riesgo de contaminación de recursos y abastecimientos de aguas subterráneas. (La interacción entre la carga contaminante y la vulnerabilidad del acuífero, y otras consideraciones, como el impacto de esta contaminación en abastecimientos de aguas subterráneas derivados del acuífero.)



El término vulnerabilidad a contaminación del acuífero se utiliza para representar las características intrínsecas que determinan la sensibilidad de una parte del acuífero a ser adversamente afectadas por una carga contaminante impuesta. Es en efecto lo inverso a la capacidad de asimilación de contaminantes de un cuerpo de agua receptor (como en el caso de la calidad de los ríos).

Todos los acuíferos, son vulnerables a contaminantes persistentes derivados de una actividad contaminante que sigue a largo plazo.

### **2.8.3 Clasificación de la vulnerabilidad a contaminación**

Con base en la génesis de de los ambientes hidrogeológicos a gran escala se tiene la clasificación que muestra en la Figura 2.6

- a) Cordillera con valles intermontañosos. Esta áreas incluyen importantes acuíferos volcánicos conformados por lavas basálticas, andesíticas, riolíticas y rocas piroclásticas, y por algunas formaciones aluvio-volcánicas y, en áreas limitadas donde los acuíferos aluviales de alta permeabilidad tiene un nivel freático poco profundo.

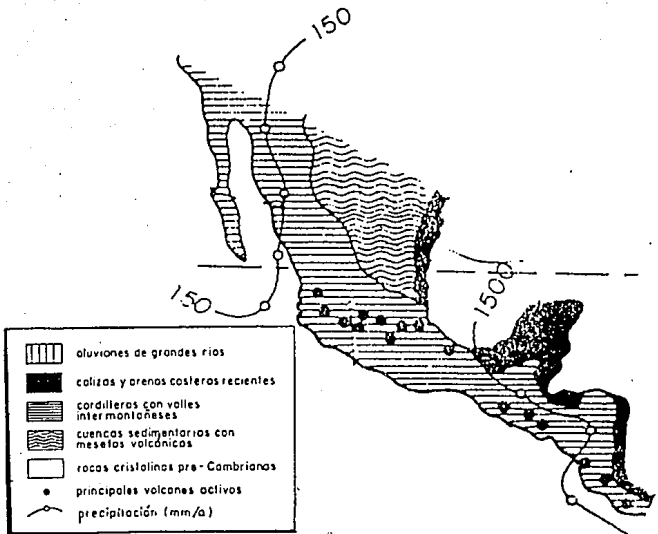


Figura 2.6. Clasificación regional de ambientes hidrogeológicos. (Esta clasificación de riesgo no refleja solamente la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación sino también el potencial del recurso hídrico subterráneo.)

- b) Basamento ígneo continental. Estas rocas cristalinas metamórficas pueden dar origen a acuíferos poco profundos y menores en su zona de meteorización que son importantes para los suministros rurales de agua y altamente vulnerables a la contaminación.
  
- c) Cuencas sedimentarias y mesetas volcánicas. En estas condiciones geológicas pueden hallarse acuíferos regionales mayores, especialmente dentro de las formaciones de calizas y areniscas más significativas. La primera, sobre todo cuando tiene un aspecto cárstico, es altamente vulnerable a la contaminación.
  
- d) Sedimentos costeros calizos y arenosos recientes. Estas formaciones, especialmente las calizas, pueden conformar acuíferos muy productivos de una elevada o extrema vulnerabilidad a la contaminación, especialmente en áreas densamente pobladas, tales como islas, en donde no existen otras fuentes de abastecimiento de agua.
  
- e) Aluviones recientes de grandes ríos. Se pueden encontrar acuíferos importantes en las partes más arenosas de las acumulaciones aluviales mayores, pero éstas están casi siempre semiconfinadas y, a pesar de tener un nivel freático poco profundo, no siempre son muy vulnerables a la contaminación, excepto en el caso de los contaminantes más móviles y

persistentes.

## **2.9 Formas de contaminación del agua subterránea**

El Cuadro 2.3 muestra las principales actividades que pueden afectar la calidad del agua.

### **2.9.1 Formas de contaminación del agua subterránea:**

El proceso de contaminación se lleva a cabo de dos maneras fundamentales:

- a) Por la acción del hombre conciente o inconscientemente, debido a una mala planeación económica y técnica, a la incapacidad y falta de cooperación por parte de las autoridades, lo que se ha dado por denominar contaminación antropógena.
  
- b) Por la acción de la naturaleza, proceso al que se le ha llamado alteración natural de la calidad, más que contaminación.

FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

Cuadro 2.3. Resumen de las principales actividades que potencialmente generan una descarga al subsuelo

Actividad	Características de la Carga Contaminante			
	Categoría de Distribución	Princ. Tipos de Contaminante	Sobrecarga Hid. Relativo	Puede ser de bajo nivel del Suolo
<b>Urbanización</b>				
SANEAMIENTO SIN ALCANTARILLADO	u/r P-D	n f o	*	*
Fugas de Alcantarillado(a)	u P-L	o f n	*	*
LAGUNAS DE OXIDACION DE AGUAS SERVIDAS SIN REVESTIMIENTO(a)	u/r P	o f n	**	*
Descarga de aguas servidas sobre terreno(a)				
DESCARGA DE AGUAS SERVIDAS A RIOS(a)	u/r P-D u/r P-L	n s o f n o f	*	*
Lixiviación de rellenos sanitarios o botaderos de basura(a)	u/r P	o s n	*	*
Tanques de combustible	u/r P-D	o	*	*
Drainaje de carreteras	u/r P-D	s o	*	*
<b>Desarrollo Industrial</b>				
Fugas de tanques y tuberías(b)	u P-D	o s	*	*
Derivamientos de productos químicos	u P-D	o s	*	*
LAGUNAS DE AGUA DE PROCESAMIENTO Y EFLUENTES SIN REVESTIMIENTO	u P	o s	**	*
DESCARGA DE EFLUENTES SOBRE TERRENO	u P-D	o s n	**	*
DESCARGA DE EFLUENTES A RIOS	u P-L	o s n	**	*
Lixiviado de relleno de residuos sólidos	u/r P	o s	*	*
Drainaje de patios	u/r P	o s	**	*
Deposición aérea	u/r D	s o	*	*
<b>Prácticas agrícolas(c)</b>				
a. CULTIVOS				
- CON PRODUCTOS AGRONOMICOS	r D	n o		
- Y CON IRRIGACION	r D	n o s	*	
- Y con estiércol, lodo, desperdicios	r n	n o s	*	
- Y CON IRRIGACION DE AGUAS RESIDUALES	r D	n o s f	*	
b. Cría de ganado/procesamiento de cosechas				
- lagunas de efluentes sin revestimiento	r P	f o n	**	*
- descarga de efluentes sobre terreno	r P-D	n o f.	*	*
- descarga de efluentes a rios	r P-L	o n f	**	*
<b>Extracción mineral</b>				
Cambios de régimen hidráulico	r/u P-D	s o	*	*
Desechos de aguas de drenaje	r/u P-D	s o	**	*
LAGUNAS DE AGUA DE PROCESAMIENTO O LODO SIN REVESTIMIENTO	r/u P	s o	*	*
LIXIVIADO DE RELLENOS DE RESIDUOS SOLIDOS	r/u P	s o	*	*

- (a) Puede incluir componentes industriales.  
 (b) También puede ocurrir en áreas no industriales.  
 (c) La intensificación de cultivo presenta mayores riesgos de contaminación.

u/r urbano/rural  
 P/L/D puntual/línea/difusa

n nutrientes  
 f patógenos fecales  
 o compuestos microorgánicos sintéticos y/o carga orgánica  
 s salinidad  
 n netales pesados

### 2.9.2 Intrusión Salina

Uno de los mecanismos de contaminación antropógena es la intrusión salina, la cual es generada por el bombeo excesivo en las zonas costeras. Existen varios mecanismos por los cuales el agua de mar puede intrusar a una acuífero costero. Estos, están relacionados con la disminución de la elevación del nivel piezométrico y la inversión del gradiente hidráulico, que permite al agua de mar moverse hacia tierra adentro. Bajo condiciones 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. Debido a que 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.

### 2.9.3 Aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas producidas por labores domésticas como lavado, eliminación de excretas, pozos, fosas sépticas mal planeadas; por servicios como lavado de calles, escurrimiento urbana, alcantarillado y drenajes en malas condiciones; o por actividades comerciales e industriales (que pueden ser las más contaminantes por su variado contenido de compuestos orgánicos sintéticos). Su inadecuada disposición a través del tiempo a

llevado a que haya infiltración al subsuelo y por consiguiente a los mantos acuíferos que se han ido contaminando paulatinamente.

#### **2.9.4 Lodos y residuos sólidos**

Los lodos son aquellos residuos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, los cuales muchas veces no son tratados en la forma más adecuada antes de disponerlos en algún sitio. Por lo que generan focos de infección y en caso de ser dispuestos sobre el suelo tienen la tendencia a infiltrarse en el subsuelo provocando de esta forma la contaminación del agua subterránea.

Los residuos sólidos son aquellos restos orgánicos e inorgánicos que se generan en casas habitación, parques, jardines, vía pública, oficinas, mercados, comercios, construcciones, establecimientos de servicios e inclusive desechos peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios y centros de investigación. La característica más notable de los residuos sólidos urbanos es su diversidad lo cual representa un problema de múltiples facetas. Debido a que el sistema de recolección con que se cuenta actualmente es incompatible con nuestras necesidades la disposición final de la basura no es la adecuada, ya que se deja a la intemperie, provocando su descomposición la cual produce los lixiviados que pueden infiltrarse al subsuelo y provocar la contaminación del agua subterránea.

### 2.9.5 Lluvia ácida

Es aquella cuyo pH es menor que 5.6, o sea, es una mezcla de ácidos fuertes y débiles. El pH de la lluvia es el resultado final de las reacciones de neutralización entre ácidos y bases presentes en la misma. Los ácidos fuertes son las sustancias que influyen sobre el pH de la lluvia. Los contaminantes emitidos a la atmósfera van a ser dispersados por el viento, éstos son eliminados de la atmósfera por deposición húmeda, o sea, por la lluvia, granizo o nieves. El proceso es muy complejo, ya que según el tipo de sustancia ésta se puede eliminar en diferentes formas.

La incorporación dentro de las nubes consiste en la introducción de contaminantes durante los procesos de condensación del vapor de agua en las nubes, aquí los contaminantes forman parte de los núcleos de condensación, quedando atrapados dentro de las gotas que integran la nube.

Al caer las gotas como tales, o en forma de granizo o nieve, llevan los elementos contaminantes al suelo, éstos a su vez se filtran a través del subsuelo, llegando así al acuífero y por lo tanto lo contaminan. Los principales ácidos contaminantes por el fenómeno de la lluvia ácida son:

- a)  $H_2SO_4$                       Acido sulfúrico



b)	SO <sub>4</sub>	Sulfatos
c)	Ca <sup>++</sup>	Calcio
d)	NH <sub>4</sub>	Amoniaco
e)	HNO <sub>3</sub>	Acido nítrico
f)	NO <sub>3</sub>	Nitratos
g)	Mg <sup>++</sup>	Magnesio

## 2.10 Clasificación de las fuentes de contaminación de las aguas subterráneas

Las fuentes de contaminación de aguas subterráneas se pueden clasificar en:

- a) Puntual
- b) Lineal
- c) Dispersa

Las fuentes puntuales son tales como fosas sépticas, desperdicios municipales sólidos, desperdicios de animales, desperdicios mineros y otros sistemas relativamente pequeños de distribución de desechos en el suelo.

## FORMAS DE CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

---

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

Las fuentes dispersas se extienden a través de grandes áreas, tales como la aplicación de químicos sobre el terreno para la agricultura, rellenos sanitarios, desperdicios mineros, "cementeros" clandestinos de sustancias o elementos tóxicos, intrusión del agua del mar, etc.

## CAPITULO 3

### 3. INTRUSION SALINA

#### 3.1 Intrusión salina

Los acuíferos costeros constituyen una importante fuente de agua dulce, especialmente en zonas áridas y semi-áridas que se encuentran colindando con el mar. Se encuentra agua dulce en contacto con agua salada con mayor frecuencia:

- 1) En islas, penínsulas, bancos o barras rodeados por el mar o cercanos a él.
- 2) En acuíferos artesianos que afloran al mar.

Bajo estas condiciones, el rendimiento de agua dulce y la penetración del agua salada hacia las fuentes de agua dulce se ejemplifica por la dinámica del agua dulce en las islas arenosas, volcánicas y de coral.

Dependiendo de la naturaleza del subsuelo, el agua de lluvia se percola hacia abajo para unirse al cuerpo de agua dulce soportado, como una lente subterránea, sobre el agua salada.

Generalmente, cuando existen acuíferos cercanos a la costa, se crea en el estrato del acuífero, una faja de difusión entre el agua de mar y el agua dulce que conviene mantener inalterada para evitar la contaminación total del acuífero por el agua salada.

Normalmente, la dirección del flujo de agua en el acuífero es con descarga al mar, escurriendo el agua dulce sobre un manto de agua salada, y un aprovechamiento racional de estos acuíferos debe ser de modo tal que se mantenga esta descarga y se impida el cambio de dirección que provocaría la penetración del agua de mar en todo el acuífero.

La captación de agua en los acuíferos costeros debe ser objeto de atención especial, por el hecho de que una vez provocada la intrusión, aún cuando las condiciones hidráulicas se restablezcan, la contaminación perdurará por mucho tiempo, en ocasiones muchos años.

En nuestro país se cuenta con una considerable extensión de costas a lo largo de las cuales se desarrollan diversas actividades económicas, tales como: la pesca, la agricultura, industria, etc., originándose con ello una importante extracción de agua subterránea y por consiguiente, una sustancial modificación de las relaciones entre el agua dulce y el agua salada. Además de las extracciones, existen otras causas que producen modificaciones en dichas relaciones, como son la ejecución de obras de ingeniería que aumentan el drenaje natural de los acuíferos o, provocan la penetración del agua de mar por ríos o canales.

La intrusión salina, es una fuente de contaminación debida al movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando el agua dulce. El agua captada en un acuífero se contamina (saliniza) cuando la porción activa de la captación se ve afectada por la zona de mezcla de agua dulce y agua salada o por la propia agua salada, porque la extracción ocasiona movimientos relativos de la superficie piezométrica, los cuales dan lugar a movimientos ascendentes de la interfase. Esta contaminación puede provenir de la infiltración de agua de otros acuíferos salinizados. También debe considerarse la contaminación por inundaciones de agua salada durante tormentas si el pozo está en una llanura costera muy baja, o debido a la mayor penetración del agua del mar en ríos y lagunas costeras durante las mismas, o incluso por lluvias salinas originadas por fuertes tormentas litorales.

En México debido a la sobreexplotación de acuíferos, en muchas zonas costeras se ha presentado el fenómeno de intrusión salina. Véase Cuadro 3.1.

Un aspecto importante en este tipo de acuíferos, es el estudio y la determinación de la posición de la "interfase salina" cuando ésta no los ha afectado nocivamente. La interfase salina es la línea que divide el agua dulce (acuífero) del agua salada (mar), variando en espesor según sean las condiciones existentes en ambos medios, formándose en el lugar una zona de mezcla de aguas. En la Figura 3.1 se muestra la posición natural de la interfase y de la formación acuífera, cuando no se ha presentado aún la afectación provocada por el

fenómeno de la intrusión salina.

Cuadro 3.1 Zonas con problemas de intrusión salina por explotación del agua subterránea

Zona	Sobreexplotación media anual (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	Abatimiento medio anual	Comentarios
Valle Santo Domingo, B.C.S.	190.0	0.90	Actualmente parte del acuífero tiene abatimientos totales hasta de 9 m, bajo el nivel del mar que provoca intrusión salina del mismo.
Valle San Quintín, B.C.N.	12.0	0.45	El nivel estático ha disminuido hasta alcanzar valores máximos totales del orden de 12 m bajo el nivel del mar. El efecto más notable es la intrusión salina del mismo que amenaza gravemente el desarrollo de esta región.
Valle Mexicali, B.C.N.	900.0	0.50	En la porción sur del valle, los niveles dinámicos de los pozos se encuentran bajo el nivel del mar y propician la intrusión del mismo.
C. Rfo Magdalena (Coyote Costa), Son.	104.0	1.00	El nivel estático se encuentra actualmente bajo el nivel del mar provocando así la intrusión salina que contamina los acuíferos del agua dulce. La concentración de sólidos totales alcanza valores del orden de 2000 ppm.
Costa de Hermosillo, Son.	500.0	2.00	El efecto causado por la explotación en exceso ha sido un descenso general del nivel estático que actualmente se encuentra bajo el nivel del mar. Esta situación propicia la intrusión salina, disminuye el espesor saturado de los acuíferos y aumenta las columnas y los costos.

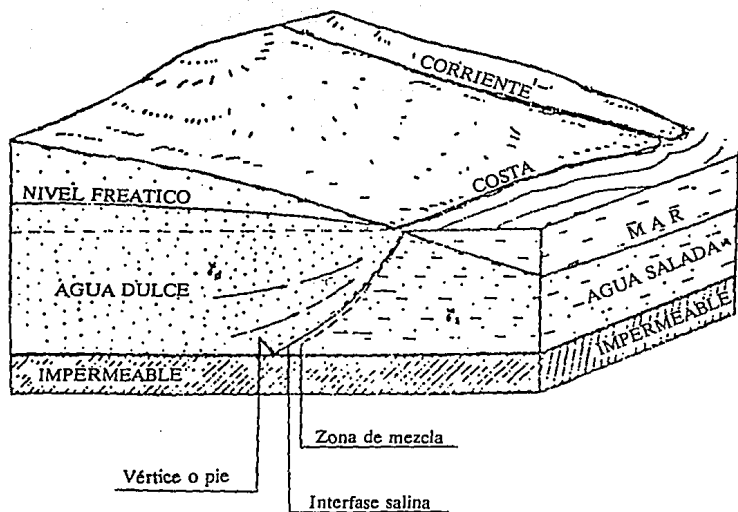


Figura 3.1. Posición natural de la interfase y de la formación acuífera.

Entre dos fluidos miscibles, tales como agua dulce y agua salada, no existe una interfase brusca sino que se pasa de un fluido a otro a través de una zona de mezcla. Esta zona de mezcla o de transición, refleja con intensidad variable las propiedades químicas e hidráulicas de cada uno de los líquidos originales y su anchura depende de la difusividad y dispersividad del medio y de las características del movimiento.

La zona de mezcla dentro de la cual se sitúa la interfase teórica, es una zona dinámica en la cual se mueve no sólo como consecuencia de las diferencias de densidades sino también debido a cambios de nivel piezométrico en ambos líquidos. El peso específico del agua dulce se puede tomar como  $1000 \text{ kg/m}^3$  con escaso error dentro del margen de temperaturas normales. El peso específico del agua marina es mayor, y puede tomarse entre  $1020$  y  $1030 \text{ kg/m}^3$  según la salinidad y temperatura, siendo el valor más usual el de  $1025 \text{ kg/m}^3$ . La viscosidad del agua marina es del orden de un 30% mayor que la del agua dulce a igual temperatura.

Las relaciones entre el agua dulce y el agua salada en regiones costeras es de gran interés ya que muchos acuíferos vierten sus aguas directamente en el mar. Este flujo de agua dulce crea un estado de equilibrio entre ambas aguas que sólo sufre modificaciones naturales a largo plazo, debidas a cambios climáticos o movimientos relativos de la tierra y el mar.



Dentro de los estudios necesarios para la determinación de la posición de la interfase, es esencial conocer la posición del nivel piezométrico y sus fluctuaciones con el tiempo, así como el registro de los incrementos de salinidad en los pozos. Si se cuenta con estos datos, puede conocerse la profundidad a la que se encuentra la interfase salina y su respectivo avance con el tiempo; de este manera sabremos el grado de avance y/o peligrosidad de la intrusión salina, planteando posteriormente las alternativas más convenientes para su control.

### **3.1.1 Mecanismos de avance de la intrusión salina y características físicas de la misma.**

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

a) Continuidad hidráulica

En muchas cuencas costeras de nuestro país existe continuidad hidráulica en los materiales que forman las planicies costeras, la cual se continúa hasta el mar cerca de la línea de costa, presentándose también capas de material permeable confinado hasta cierta profundidad y más allá de la costa.

Algunos acuíferos se encuentran cubiertos por lodos y otros materiales relativamente impermeables que impiden que el agua de mar los contamine, como es el caso de la costa de Hermosillo, en el estado de Sonora.

b) Inversión del gradiente hidráulico

La inversión del gradiente hidráulico se genera cuando la carga hidráulica del mar es mayor que la del acuífero esto sucede si el nivel piezométrico del acuífero es abatido por diversas causas, a profundidades bajo el nivel del mar.

### 3.2 Principios hidrostáticos

Investigaciones hechas desde hace más de 50 años, han demostrado que la contaminación de agua salada en acuíferos cercanos a la costa, no ocurre a la profundidad del nivel del mar, sino que se presenta a un poco más de 40 veces la carga de agua dulce en el punto considerado atribuyéndose estos, el equilibrio hidrostático existente entre dos líquidos de diferentes densidades.

El agua de mar tiene una concentración de aproximadamente 30,000 p.p.m. de

cloruro de sodio, siendo su peso específico  $1.025 \text{ gr/cm}^3$  a  $15^\circ\text{C}$ , y el agua dulce tiene un peso específico de  $1.0 \text{ gr/cm}^3$  a las mismas condiciones de temperatura, es decir, que el agua de mar es aproximadamente  $1/40$  más pesada que el agua dulce.

La presión hidrostática en cualquier punto es:

$$P = \gamma h \quad (3.1)$$

siendo  $\gamma$  = peso específico

$h$  = altura del agua

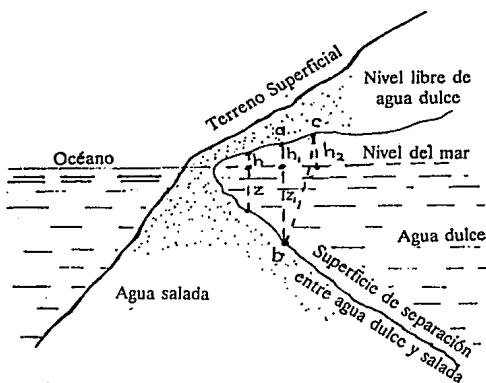


Figura 3.2. Estrato acuífero en contacto con agua salada

Considerando la figura 3.2, en la cual se muestra un estrato acuífero en contacto con agua salada, mediante una superficie de separación, se tiene que la columna de agua dulce en cualquier punto deberá estar equilibrada por la columna Z de agua salada.

$$P_b = \gamma_s Z (\text{agua salada}) \quad (3.2)$$

$$P_b = \gamma_d (h + Z) (\text{agua dulce}) \quad (3.3)$$

$$\gamma_s Z = \gamma_d h + \gamma_d Z$$

$$Z(\gamma_s - \gamma_d) = \gamma_d h$$

$$Z = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h$$

$$\frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} = \frac{1,0}{0,025} = 40$$

$$z = 40h$$

$$\text{para } h = 1\text{m}, \quad Z = 40\text{m}$$

Es decir, que el agua salada estará desplazada 40 m por debajo del nivel del mar por cada metro de carga de agua dulce que exista en el acuífero por sobre este nivel.

En términos generales, si hacemos  $\frac{y}{y_1 - y_2} = a$ , podemos decir que el límite para el agua salada estará bajo el nivel del mar a una distancia  $z = ah$

Las consideraciones hechas están basadas en que las equipotenciales de escurrimiento del acuífero son verticales, y que, por tanto, en una sección tal como  $ab$ , se tendrá que  $z_1 = ah$ , sin embargo, la realidad es que las equipotenciales son curvas como la  $bc$ , y que la profundidad del agua salada será, por tanto, mayor, ya que  $z_1 = ah_2 > ah_1$ , lo cual nos permite introducir un factor de seguridad.

### 3.3 Principio de Ghyben-Herzberg

Los primeros estudios sobre la relación agua dulce-agua salada en zonas costeras se realizaron en Holanda y Alemania por Badon Ghyben y Herzberg en el año de 1889. Este principio está basado en las siguientes hipótesis:

- El flujo de agua dulce es perfectamente horizontal y por lo tanto el potencial es constante a lo largo de cualquier vertical.
- No existe flujo de agua salada.
- La interfase salina es un plano, no existiendo zona de mezcla.

La ley de Ghyben-Herzberg, describe correctamente la posición de la interfase salina si el ancho de la zona de mezcla es pequeño comparado con el espesor del acuífero y si el flujo de agua dulce es prácticamente horizontal. Sin embargo, aún en ausencia de zona de mezcla dicha ley no describe correctamente la posición de la interfase cerca del afloramiento del acuífero en el mar, ya que de existir un gradiente piezométrico en el agua dulce, debe haber circulación de ésta con velocidades crecientes y aparición de componentes verticales en la zona de la cuña de agua salada, debido a la cada vez menor sección de salida, la cual debe hacerse por una longitud finita y no por un punto, véase Figuras 3.3 y 3.4.

El consiguiente aumento de velocidad del agua dulce en las proximidades de la costa provoca un aumento del gradiente, de modo que el nivel de agua en el acuífero tiene una cota superior a la que se obtendría al suponer que el flujo es completamente horizontal. Esto explica la existencia de afloramientos de agua dulce en playas y lugares costeros que se encuentran a una elevación ligeramente mayor a la del mar.

Las limitaciones de estas relaciones, conocidas como el principio de Ghyben-Herzberg, son principalmente:

1. La mesa de agua o nivel piezométrico del acuífero está sobre el nivel del mar.
2. La pendiente del acuífero es hacia el mar.

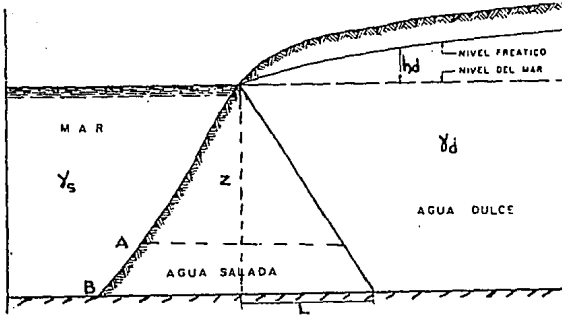


Figura 3.3 Equilibrio del agua dulce y el agua salada en una zona costera de acuerdo al principio de Ghyben-Herzberg

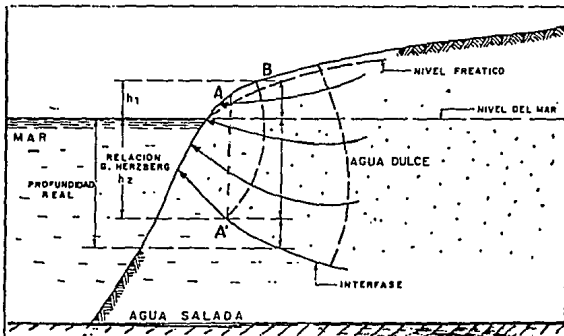


Figura 3.4 Red de flujo en un acuífero costero sin zona de mezcla

### **3.4 Alteraciones en las condiciones naturales en los acuíferos cercanos a la costa y contaminación salina.**

Al construir un pozo en un acuífero en contacto con un manto de agua salada, existirá el peligro de que al alterar las condiciones normales mediante la extracción de agua por bombeo, disminuya la carga de agua dulce, motivándose el ascenso de la superficie de separación y por tanto provocando la penetración de agua salina al acuífero.

Hay una expresión que permite determinar la profundidad máxima que debe tener el pozo, en función de la concentración salina admisible y del gasto que se pretende extraer.

Considerando un pozo profundo construido en un acuífero que escurre sobre un manto de agua salada, debe determinarse el gasto máximo a extraerse, de modo que no se provoque la intrusión salina por efectos de haberse alterado las condiciones normales que mantienen la superficie de separación entre ambas aguas.

Si el gasto extraído y la profundidad del pozo son tales que la superficie que limita la afluencia al pozo se corta con la superficie de separación entre el agua dulce y el agua de mar, se producirá una intrusión de agua salada en el pozo de bombeo y por lo tanto el agua que se obtenga estará contaminada con cloruros. Véase Figura 3.5.



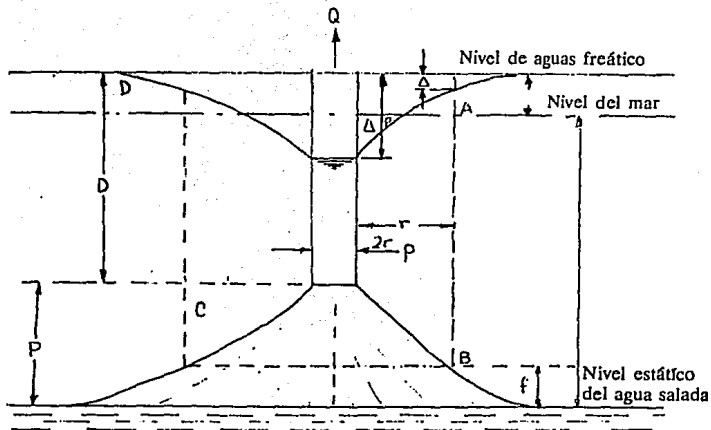


Figura 3.5. Muestra un pozo perforado en estas condiciones, y donde el agua salada ha penetrado al pozo, formando una 'campana' similar al cono de depresión del acuífero.

Para mayor simplicidad se ha supuesto que la mesa de agua o nivel piezométrico del acuífero y la superficie de separación entre el agua dulce y salada son horizontales.

Siendo

$h =$  altura de agua dulce sobre el nivel del mar,

$Z =$  profundidad a que se encuentra el agua salada bajo el nivel del mar;

$p$ = distancia entre el fondo del pozo y la superficie estática de agua salada;

$Q_d$ = caudal de agua extraído del pozo,

$Q_s$ = caudal de agua salada extraída;

$\Delta p$ = depresión o abatimiento del pozo;

$\Delta$ = depresión a una distancia cualquiera;

$r_p$ = radio del pozo,

$f$ = altura que se levanta el agua salada, sobre su N.E. y a una distancia del centro del pozo.

Se consideró las equipotenciales, representadas por las rectas AB, BC y CD.

La superficie de separación deberá siempre cumplir la condición de que la presión a ambos lados en la misma, luego  $P_d = P_s$ .

$P_d$ = presión sobre la superficie de separación (agua dulce),

$P_s$ = presión bajo la superficie de separación (agua salada).

$$P_d = P_s = (Z + h - f - \Delta)\gamma_d \quad (3.4)$$

siendo  $h_s$  la cota piezométrica del agua salada en la superficie de separación de ambos líquidos, referida al nivel estático del agua salada.

$$h_s = \frac{P_s}{\gamma_s} + f \quad (3.5)$$

Siendo el gradiente hidráulico del movimiento del agua salda  $i_s$ , se tiene

$$i = \frac{dh}{ds} \quad (3.6)$$

$$i_s = \frac{dh_s}{df}$$

Substituyendo las expresiones (3.4) y (3.5) en (3.6) y derivando, se tiene:

$$i_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} (Z + h - f - \Delta) + f$$

$$i_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \left( \frac{d\Delta}{df} - \frac{1}{a} \right)$$

Por otra parte, el caudal de agua de mar que llega al pozo es el mismo que pasa a través de cualquier sección transversal de la campana; por tanto

$$Q_s = \pi r^2 k i_s = \text{constante}$$

siendo  $k$  = coeficiente de permeabilidad.

$$i_s = \frac{Q_s}{\pi r^2 k} \quad (3.7)$$

Igualando las expresiones de (3.6) y (3.7)

$$\frac{Q_s}{\pi r^2 k} = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \left( \frac{d\Delta}{df} - \frac{1}{a} \right)$$

La solución de esta ecuación diferencial nos dará la superficie de separación entre las aguas dulce y salada, pero sólo nos interesa conocer el valor de  $f$  para  $r = r_p$ .

Luego, si llamamos

$$A = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \pi r_p^2 k$$

$$Q_s = A \left( \frac{d\Delta p}{df} - \frac{1}{a} \right)$$

Para las condiciones

$$Q_s = 0, \quad fp = p \quad \text{y} \quad \Delta = \frac{p}{a}$$

Esta ecuación sólo es válida para

$$\Delta p \geq \frac{p}{a}$$

En estas condiciones

$$fp = P$$

Luego

$$Q_s = A(\Delta p P - \frac{1}{a}) \quad (3.8)$$

Si designamos por  $n$  las p.p.m. de cloruros que tiene el agua de mar, el gasto total de agua  $Q$  extraída tendrá una concentración de cloruros

$$C = \frac{nQ_s}{Q}$$

y sustituyendo  $Q_s$  por su valor obtenido en (3.8)

$$C = \frac{nA}{Q} \left( \frac{\Delta p}{P} - \frac{1}{a} \right) = \left( \frac{\Delta P A'}{Q P} - \frac{1 A'}{Q a} \right)$$

Esta ecuación permitirá predecir el grado de contaminación salina que se tendría en una captación de un pozo en estas condiciones.

Si construimos un gráfico para cada pozo, en el cual el eje de abscisas sea  $\Delta p$  y el eje de ordenadas  $CQ$ , se tiene que al variar  $Q$  variarán las depresiones del nivel, por tanto, las concentraciones salinas que se obtienen formará una línea recta, como la Figura 3.6.

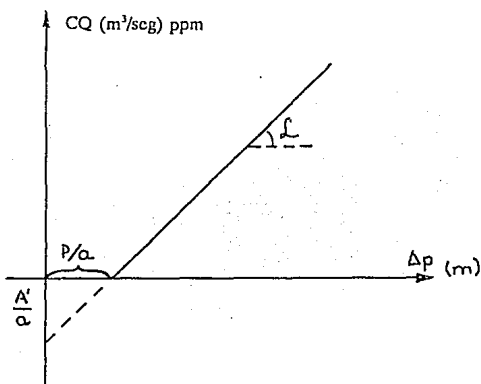


Figura 3.6. Concentraciones salinas en un pozo, graficando en las abscisas  $p$  y en el eje de las ordenadas  $CQ$ .

Para acuíferos artesianos, resulta más conveniente construir el gráfico  $CQ$  contra  $Q$ , y la expresión anterior se transforma.

Dada la solución de la expresión, se deduce, que para acuíferos artesianos, a medida

$$CQ = \left( \frac{\Delta P}{Q} \cdot \frac{A'}{P} \right) Q - \frac{A'}{a}$$

que aumentamos el gasto extraído  $Q$  y por tanto aumentamos las depresiones del pozo, las concentraciones salinas que se obtengan tienen un valor límite definido

$$C_{\text{limite}} = \frac{\Delta P}{Q} \cdot \frac{AP}{P}$$

En acuíferos no confinados este valor máximo no está bien definido debido a que el aumento de  $\Delta P$  al aumentar  $Q$  es variable.

Ejemplo.

En una zona cercana a la costa se han hecho 2 perforaciones de prueba, con una profundidad total de 80 m. A los 76 m se encuentra una capa acuífera que tiene carácter confinado.

El acuífero está en contacto con un manto de agua salada, cuya concentración de cloruros es del orden de 20 000 p.p.m., que puede contaminar el acuífero al tratar de aprovecharlo.

Una prueba de bombeo realizada independientemente en ambos pozos, arroja los siguientes resultados:

## POZO 1

Q(M <sup>3</sup> /s)	C(p.p.m.)	ΔP(m.)
0.0033	500	0.38
0.0040	575	0.44
0.0050	680	0.60
0.010	820	1.25

## POZO 2

Q(M <sup>3</sup> /s)	C(p.p.m.)	ΔP(m.)
0.0015	280	1.2
0.0040	750	3.0

Se quiere conocer cuáles serán los máximos gastos que podrán extraerse de cada uno de los pozos para:

- Que la concentración de cloruros sea cero.
- Que la concentración no sea mayor de 250 p.p.m. de cloruros.

## Solución

Tabulando para cada pozo CQ vs Q, se obtiene la Figura 3.7.

	$\frac{\Delta P}{Q}$	$\frac{A'}{a}$	$\frac{A'}{P}$	$\frac{P}{a}$	A'	P	C(p.p.m.)
Pozo 1	1.000	1.5	8.35	0.18	60	7.20	1.000-1.5 $\frac{1}{Q}$
Pozo 2	575	0.5	0.8	0.65	20	26.0	575-0.5 $\frac{1}{Q}$



De los datos obtenidos en la prueba se deduce que para no tener contaminación de cloruros el gasto deberá ser.

Pozo 1:

$$C = 1.000 - 1.5 \frac{1}{Q} = 0, \quad Q = 1.5 \text{ l/s}$$

Pozo 2:

$$C = 575 - 0.5 \frac{1}{Q} = 0, \quad Q = 0.87 \text{ l/s}$$

Y para una concentración de 250 p.p.m. de cloruros:

Pozo 1:

$$Q = 2.0 \text{ l/s}$$

Pozo 2:

$$Q = 1.5 \text{ l/s}$$

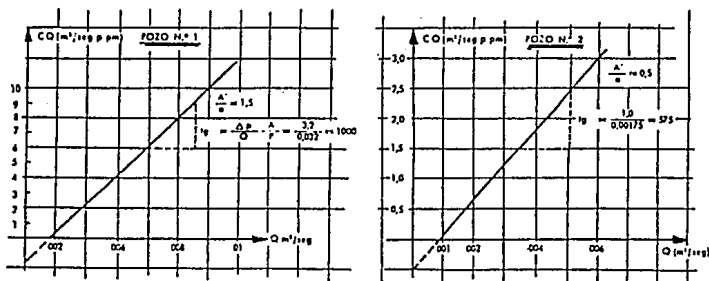


Figura 3.7. Gráficas de resultados

Debe tenerse sumo cuidado al realizar la prueba de bombeo ya que al provocar una extracción de agua cuyo gasto sea superior al recomendable para determinado grado de contaminación de cloruros, al hacer la perforación definitiva se obtendrá una contaminación mayor que la esperada para determinado gasto, en virtud de no ser reversible este fenómeno.

## CAPITULO 4

### 4. DISPOSICION INADECUADA DE AGUAS RESIDUALES

#### 4.1 Panorama de la contaminación del agua subterránea

El acelerado crecimiento demográfico de México en las últimas décadas, ha propiciado una disminución en la disponibilidad de agua en las zonas más pobladas y una creciente contaminación de los cuerpos hídricos susceptibles de servir como fuentes de abastecimiento. Y este crecimiento es lo que conlleva a generar una mayor producción de aguas residuales. Estas son aquellas que han sido alteradas en sus características, de manera que han dejado de ser adecuadas para diferentes usos específicos. Básicamente las fuentes fundamentales de aguas residuales son cuatro:

1. Aguas domésticas o urbanas
2. Aguas residuales industriales
3. Escorrentías de usos agrícolas
4. Aguas pluviales

Aunque antiguamente se le daba prioridad solo a las aguas residuales industriales y domésticas, la contaminación debida a los usos agrícolas así como las aguas pluviales de

zonas urbanas están adquiriendo una gran importancia. Las escorrentías de usos agrícolas que arrastran fertilizantes (fosfatos) y pesticidas está empezando a constituir una de las causas mayores de eutroficación de lagos y pantanos, además de que al infiltrarse en los terrenos producen una seria contaminación en las aguas subterráneas. Normalmente las aguas residuales, tratadas o no, se descargan finalmente a un receptor de aguas superficiales (mar, río, lago, etc.) que se considera un medio receptor.

### 4.2 Fuentes de contaminación

Los grandes polos de desarrollo demandan cantidades cada vez mayores de agua; también ellos son los que aportan más contaminantes, al descargar sus aguas residuales (municipales e industriales) en los cuerpos receptores, muchas veces sin tratamiento alguno.

En 1991, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara generaban 46, 8.5 y 8.2 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales respectivamente, lo que corresponde al 34% del total a nivel nacional, estimado en 184 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 105 los producía la población y 79 la industria.

Para 1992, la descarga total de aguas residuales municipales e industriales ascendió aproximadamente a 200 m<sup>3</sup>/s. De estos, el 40% proviene del sector industrial, caudal que

constituye el efluente más contaminante y heterogéneo en la medida que proviene de diversas actividades de extracción y transformación de los recursos naturales; entre éstas destacan por su importancia volumétrica y grado de contaminación; la industria azucarera, la industria química, la producción de celulosa y papel, la industria petrolera, la producción de bebidas, alimentos y textiles y la industria siderúrgica.

Debido a que el sector industrial, utiliza agua en procesos de elaboración, transformación y en ocasiones de enfriamiento, es difícil precisar la cantidad requerida para elaborar un producto. En términos globales, el volumen anual ocupado en 1980 fue de 4 600 millones de m<sup>3</sup>. Para 1990, la cifra se incrementó a 9 500 millones de m<sup>3</sup> y se estima que para el 2000, calculado a partir de proyecciones del crecimiento de la demanda de productos y el volumen requerido para no afectar la tasa de desarrollo general, el consumo ascienda a 22 700 millones de m<sup>3</sup>.

Con respecto al sector agropecuario, se estimaba que su consumo de agua generó en 1991, 8 345 millones de m<sup>3</sup> de aguas residuales y para el año 2000, se calculan, 11 085 millones de m<sup>3</sup>.

Como resultado de que la mayoría de las descargas de estos sectores no reciben ningún tipo de tratamiento previo. Los ríos, lagunas, acuíferos y aguas marinas que constituyen los depósitos de efluentes, se encuentran contaminados. Este proceso

acumulativo de contaminación, ha dado como resultado la degradación total o parcial de diversos cuerpos de agua susceptibles de aprovecharse para el desarrollo social y económico del país.

Otra forma de contaminación es el saneamiento "in situ", sin alcantarillado, o por las fugas que producen las redes de alcantarillado. Los cuales se contaminan en una zona puntual y dependiendo del tipo de material que están constituidos puede llegar a infiltrarse hasta las aguas subterráneas.

En muchos países aún continúan sin alcantarillado extensos sectores de áreas urbanas y marginales. Un creciente número de industrias y actividades (tales como textileras, talleres de metales y de vehículos, imprentas, estaciones de combustible, etc.) con frecuencia tiende a localizarse en forma dispersa en estas áreas. La mayoría de estas industrias genera efluentes líquidos, tales como aceites y solventes.

Ante la falta de control, estos efluentes son descargados directamente al suelo, debido al costo prohibitivo de alternativas tales como tratamiento "in-situ", o almacenamiento y transporte hasta lugares seguros de disposición. Con la creciente variedad y complejidad de productos químicos sintéticos que se usan en estas empresas, algunas actividades podrían representar una seria amenaza a largo plazo para la calidad de las aguas subterráneas locales con respecto a una amplia lista de compuestos, especialmente los hidrocarburos

halogenados, algunos de los cuales, a pesar de su volatilidad, son solubles y móviles en los sistemas de aguas subterráneas. Algunas de las formas de contaminación se puede apreciar en las Figuras 4.1 y 4.2.

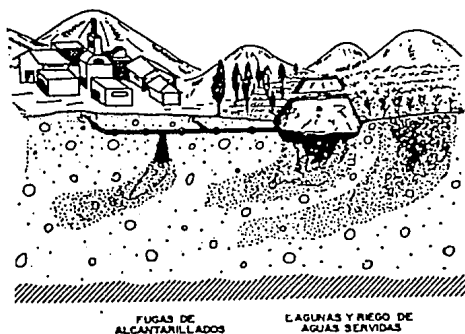


Figura 4.1. Formas de contaminación urbana

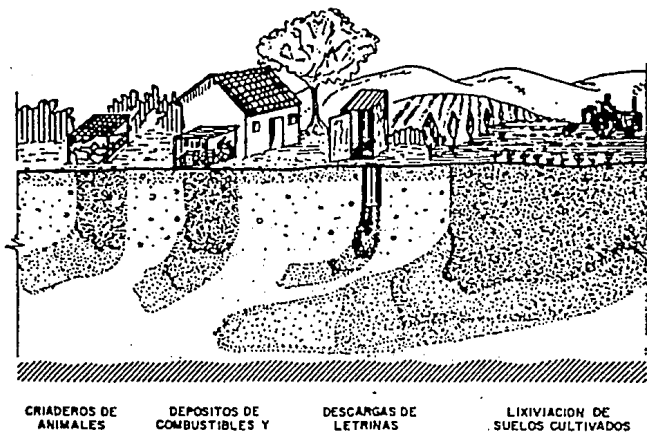


Figura 4.2. Formas de contaminación rural

#### 4.3 Calidad del agua residual municipal, industrial y agrícola

El agua es uno de los principales medios transmisores de enfermedades, que pueden ser causadas por agentes biológicos o químicos. En países en desarrollo la contaminación biológica suele ser la que produce mayor incidencia de enfermedades y muerte. De especial importancia debe considerarse la contaminación del agua subterránea, ya que en nuestro país el subsuelo suministra alrededor de 90% del volumen de agua destinado a consumo



humano y uso doméstico. Y es bastante frecuente encontrar gérmenes patógenos protozoarios, bacterias y virus en el agua del subsuelo, aún a profundidades insospechadas, aportados principalmente por la infiltración de aguas residuales que han estado en contacto con materia fecal. Son numerosas las enfermedades que pueden ser causadas por contaminantes biológicos que con frecuencia se encuentran en el agua subterránea, entre ellas, las más comunes son: cólera, tifoidea, paratifoidea y disentería bacilar, transmitidas por bacterias así como hepatitis y poliomielitis, propagadas por virus.

Las aguas residuales, se componen de agua, sólidos disueltos y en suspensión. La cantidad de sólidos es pequeña, casi siempre menor al 0.1% en peso, pero representa el mayor problema para el tratamiento y disposición adecuada.

Los sólidos totales que contienen las aguas residuales, se clasifican en dos grupos: sólidos suspendidos y sólidos disueltos, los cuales pueden ser orgánicos e inorgánicos.

Los sólidos orgánicos, son de origen animal o vegetal y están sujetos a la degradación por medio de bacterias. Los sólidos inorgánicos, son sustancias inertes que no sufren degradación.

Las aguas residuales varían tanto en composición como en volumen, de hora en hora y de acuerdo con los cambios de la actividad de la comunidad que las desaloja ya sea

industrial, municipal o agrícola.

#### **4.4 Contaminación industrial**

Toda industria en proceso de transformación de los recursos naturales desecha una gran variedad de sustancias químicas, orgánicas e inorgánicas en estado sólido, líquido y gaseoso que forma parte de los recursos o que se incorporan en alguna parte del proceso, los cuales pueden actuar como contaminante del agua subterránea al infiltrarse en el terreno donde los desechos se depositan. La Figura 4.3 muestra algunas formas de contaminación industrial.

Algunos desechos industriales son compuestos orgánicos que pueden ser degradados por las bacterias, pero muy lentamente de modo que llevan olores y sabores desagradables a lo largo de las corrientes de agua y hasta distancias considerables.

##### **4.4.1 Fuentes principales de contaminación industrial**

- a) Aguas residuales vertidas sin control ni tratamiento en cauces, en pozos de inyección, depósitos de aguas tratadas o en cualquier tipo de terreno. Por lo

general su contenido es rico en grasas aceites y otros derivados del petróleo.

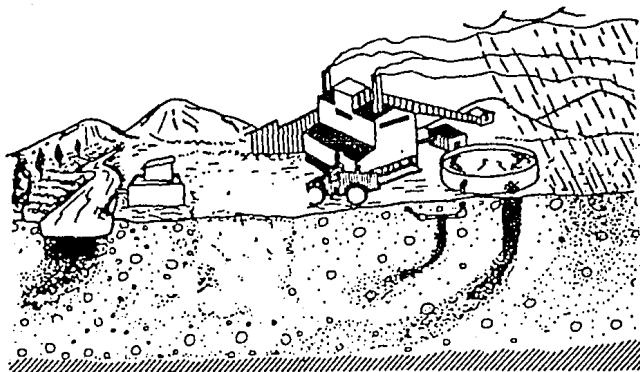


Figura 4.3. Formas de contaminación industrial

- b) Aguas con tratamiento insuficiente e incorporadas a la red hidrológica local.
- c) Residuos sólidos o líquidos que son vertidos en terrenos permeables con un poder depurador natural insuficiente.
- d) Desperdicios mineros: Es una contaminación netamente mineral que se relaciona con evacuaciones de aguas de mina y con lavaderos de mineral, por lavado de escombreras por el agua de lluvia o aguas de superficie, en especial aquellas escombreras que contienen materiales oxidables, tales como sulfuros

y materias carbonosas. La acumulación de los residuos mineros recibe la denominación de "hales". En el procesamiento de sales solubles como en la fabricación de la potasa, se pueden tener vertidos muy importantes de salmueras. En la minería del petróleo se obtienen cantidades considerables de aguas de salinidad elevada que son también una importante fuente de contaminación mineral de aguas subterráneas. Algunas veces puede existir una contaminación orgánica derivada del vertido de aceites de flotación degradados o de productos relacionados con el petróleo.

Existen métodos de explotación minera que son determinantes en los procesos de contaminación y que a continuación se citan:

- I) El sistema de explotación con hundimientos controlados, puede ocasionar la conexión de acuíferos situados al techo, o provocar acceso de aguas superficiales a través de la acción antropogénica desarrollada en la explotación.
  
- II) La explotación a cielo abierto es un camino directo a la entrada de aguas contaminantes desde el exterior o a través de la acción antropogénica desarrollada en la explotación.

- III) La explotación con relleno supone la introducción de materiales contaminantes y rocas solubles con aportes también contaminantes a las aguas, a través de la fácil comunicación que constituyen los huecos mineros.
  
- IV) La explotación por disolución de minerales solubles en aguas, tales como la sal común, potasa, bórax y fosfatos a través de pozos y sondeos con la posterior extracción de agua. El recorrido del agua puede alterar la calidad del acuífero, por tratarse de productos altamente contaminantes.
  
- V) En muchos casos también hay que tener presente la utilización de los huecos formados en profundidad, para el almacenamiento de gas licuado, gas natural u otros hidrocarburos, así como los residuos radiactivos, que a su vez pueden ser fuente de contaminación.

Estos procesos de explotación a menudo requieren eliminar importantes cantidades de salmueras.

Las sustancias contaminantes aportadas por las fuentes anteriores sufren un proceso de autodepuración cuando se infiltra por la zona no saturada y dependiendo de su espesor y del tipo de terreno, será el grado de depuración.

## DISPOSICION INADECUADA DE AGUAS RESIDUALES

---

El programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) considera prioritarios las siguientes desechos peligrosos por la contaminación que pueden producir en aguas subterráneas.

- Ácidos
- Bases industriales
- Intermediarios químicos
- Plastificantes compuestos
- Solventes
- Saborizantes y aromas
- Cianuros
- Productos farmacéuticos
- Plaguicidas, pesticidas y herbicidas
- Metales y sus derivados
- Productos para la guerra química
- Catalizadores y reactivos
- Productos derivados del petróleo como acetonas, fenoles, ésteras, etc.

Los problemas de contaminación de aguas subterráneas por sustancias peligrosas pueden ser agrupadas en tres categorías generales:

## DISPOSICION INADECUADA DE AGUAS RESIDUALES

---

- 1) Contaminación causada por líquidos que permiten mezclarse con otros (miscibles) y por medios porosos que ayudan a llevarse a cabo la mezcla.
- 2) Contaminación causada por líquidos poco factibles a mezclarse (inmiscibles), de menor densidad que el agua tal que éstos no se mueven en y por debajo del acuífero y
- 3) Contaminación por líquidos inmiscibles que son más densos que el agua y por lo tanto pueden hundirse por la zona permeable.

La primera categoría es el problema clásico de contaminación de aguas subterráneas, la segunda incluye problemas referentes a aceites y gasolinas, la tercera se refiere a un gran número de productos líquidos producidos por la industria química. Algunos hidrocarburos son menos viscosos que el agua mientras que otros son moderadamente solubles. Estas características representan una severa amenaza a la calidad del agua porque pueden moverse en la parte baja de la zona permeable. Los contaminantes están sujetos a la influencia de proceso de atenuación como dispersión, absorción, intercambio iónico y biodegradación.

A continuación se presenta un ejemplo de tipo de contaminación industrial

- a) Valle de León, Guanajuato

En este valle, localizado en la porción central de la república, prevalece un clima templado con precipitación media anual de 600 mm. En su posición alta se encuentra un gran asentamiento urbano-industrial cuyas aguas residuales han originado un serio problema de contaminación de aguas subterráneas, véase Figura 4.4.

Asentada en la porción norte del valle, la ciudad de León tiene una población aproximada de 750 mil habitantes y notable desarrollo industrial en el que destaca la industria del cuero. Las aguas residuales, sin tratamiento alguno, se descargan al cauce del río Los Gómez y al vaso de una pequeña presa, de donde son derivadas para riego de terrenos agrícolas. Aguas abajo de los sitios de descarga y en las proximidades de los terrenos de cultivo, se hallan algunos de los pozos que abastecen a la ciudad.

El acuífero del valle es de tipo libre y está compuesto por intercalaciones de materiales aluviales y derrames basálticos fracturados; su espesor es del orden de 150 m, y su coeficiente de trasmisividad varía en el rango de 0.003 A 0.02 m<sup>2</sup>/seg. Por sobreexplotación los niveles del agua subterránea se han abatido durante los últimos 30 años, encontrándose ahora la superficie freática a profundidades de 30 a 80 m. El bombeo está concentrado en el área urbano-industrial, hacia donde converge el flujo



subterráneo.

Los análisis del agua muestreada en 34 estaciones superficiales y subterráneas, en las que están incluidos 14 pozos, revelaron que en un porcentaje significativo de las muestras varios de los parámetros de calidad rebasan las normas respectivas: en 75% de los casos, las correspondientes a la demanda química de oxígeno DQO, dureza y salinidad total; en 56%, la de alcalinidad; en 62%, la de cloruro; en 27%, la de sulfato; en 93%, las de coliformes totales y fecales. Además, en el agua de los pozos localizados en las inmediaciones de una industria química, se determinaron concentraciones hasta de 21.4 ppm de cromo hexavalente, y en otros sitios de muestreo se registraron contenidos de plomo mayores que 0.05 ppm.

Los resultados anteriores denotan el serio deterioro de la calidad del agua subterránea, causado por la infiltración de las aguas residuales de la ciudad y de las instalaciones industriales; específicamente, los coliformes y el cromo son los contaminantes más nocivos.

Este último procede de los materiales utilizados en el procesamiento del cuero, cuyos residuos son descargados al drenaje o despositados a la intemperie y lixiviados por el agua meteórica. Aunque no se dispone de estadísticas médicas

confiables al respecto, se cree que la contaminación del acuífero ha elevado significativamente la incidencia de enfermedades gastrointestinales y de cáncer en la población local.

#### 4.5 Saneamiento sin alcantarillado

El saneamiento "in-situ", sin alcantarillado, puede brindar niveles adecuados de servicio para la disposición de excretas en comunidades, pueblos pequeños, e incluso en grandes áreas urbanas, a un costo mucho más bajo que el de los sistemas de alcantarillado con tuberías troncales. Se pueden usar varios tipos de instalaciones, incluyendo tanque sépticos, fosas sépticas y letrinas secas o con descarga manual. Como aún se necesitan amplia y urgentemente mejoras en el saneamiento, es probable que se continúen produciendo grandes aumentos en la disposición de excretas al suelo, véase Figura 4.5.

Es importante reconocer que existen diferencias significativas entre el tanque séptico y las otras unidades más económicas de disposición de excretas "in-situ":

- a) Los campos y zanjas de infiltración del tanque séptico descargan a niveles significativamente más altos en el perfil del suelo que las letrinas, donde las condiciones son más favorables para la eliminación de agentes patógenos.

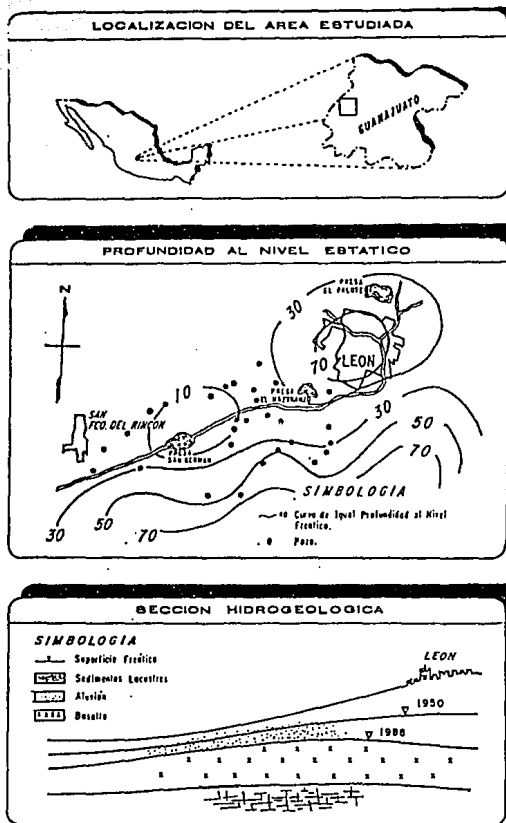


Figura 4.4. Localización de la zona de estudio

- b) La descarga hidráulica de los tanques sépticos normalmente está diseñada para que no exceda de 30 mm/d, mientras que en algunas otras unidades de saneamiento "in situ" se puede alcanzar 100 mm/d.
  
- c) Los tanques sépticos están revestidos en su interior y su efluente sólido, de alto contenido de nitrógeno, es evacuado periódicamente, mientras que en otras unidades, aunque no es recomendable, éste suele permanecer en el suelo.

Bajo algunas condiciones hidrogeológicas, ciertas unidades de saneamiento "in-situ" presentan el riesgo de una migración directa de bacterias y virus patógenos hacia acuíferos subyacentes y fuentes vecinas de aguas subterráneas. La contaminación de los suministros de aguas subterráneas debido a un saneamiento sin alcantarillado ha constituido una de las causas comprobadas de transmisión de agentes patógenos en numerosos brotes de epidemias. Con frecuencia, éste es el resultado de la falta de espacio en los asentamientos densamente poblados, pero también puede ocurrir en urbanizaciones más prósperas y mejor organizadas que emplean un saneamiento "in-situ" y que construyen pozos excavados o tubulares particularmente para reemplazar, o aumentar, las fuentes comunales de agua.

En algunas regiones se ha mostrado, una fluctuación en la intensidad de la contaminación del agua subterránea por bacterias fecales y nitratos provenientes de letrinas,

bajo condiciones hidrogeológicas similares a las del área de Mérida, en la península de Yucatán, México veáse Figura 4.6.

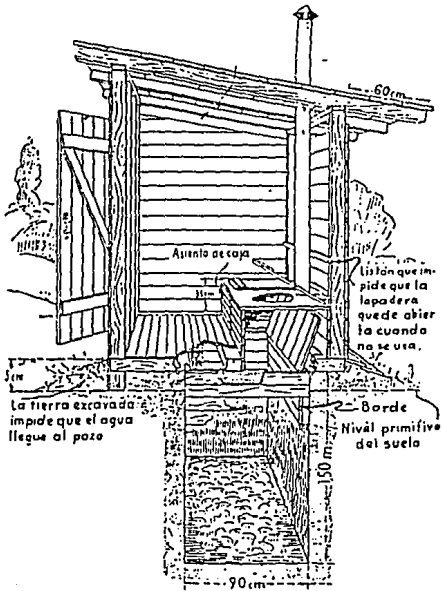


Figura 4.5. Saneamiento sin alcantarillado

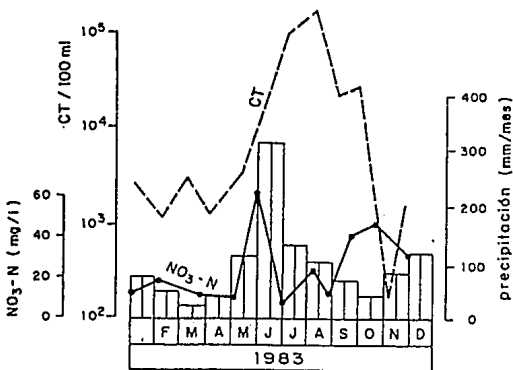


Figura 4.6. Fluctuación temporal de la contaminación de un pozo somero en el acuífero cársico de Yucatán, México, al norte de Mérida. (Se cree que la causa de la contaminación localizada con nitrato y coliformes totales es el saneamiento sin alcantarillado y que los incrementos marcados en la concentración se relacionan con la presencia de mayores lluvias).

Si las aguas grises o industriales también se descargan a los sistemas de saneamiento "in-situ", esto conducirá, a largo plazo, a exponer las aguas subterráneas a riesgo de una seria contaminación adicional como consecuencia de la diseminación progresiva de productos químicos comunales que contienen un rango y una concentración creciente de compuestos orgánicos sintéticos.

En los lugares donde se justifican técnica y económicamente, se pueden considerar numerosas medidas para reducir el riesgo o la escala de contaminación de las aguas subterráneas por sistemas de saneamiento "in-situ". Estas medidas incluyen modificaciones en los diseños para reducir la profundidad de descarga y la carga de residuos sólidos nitrogenados y la estimulación de una desnitrificación "in-situ". Sin embargo, bajo condiciones hidrogeológicas desfavorables, ambas tecnologías de bajo costo, el abastecimiento por pozos someros de agua potable y los sistemas de saneamiento "in-situ", pueden resultar incompatibles.

### **4.6 Prácticas agrícolas de cultivo**

El impacto de las prácticas agrícolas modernas sobre la calidad de las aguas subterráneas se hizo totalmente evidente en algunos países industrializados durante la década de los 70's. Se demostró la existencia de altas tasas de lixiviación de nitratos y otros iones móviles de muchos suelos sometidos a continuas siembras, sostenidas por aplicaciones de grandes cantidades de fertilizantes inorgánicos. El incremento de las concentraciones de nitratos, cloruros y, posiblemente, trazas de otros elementos y de compuestos orgánicos en las aguas subterráneas, son posibles consecuencias de las excesivas aplicaciones de efluentes, lodos o desperdicios animales sobre las tierras cultivadas. Por otro lado, las tierras de pastoreo no pierden mucho nitrato por lixiviación, a menos que estén excesivamente

abonadas e intensivamente pastadas por animales.

Actualmente se está expandiendo en forma rápida el uso de fertilizantes inorgánicos en todas las naciones como un esfuerzo para incrementar la producción agrícola. En consecuencia, numerosos suelos cultivados cambiarán de ser casi invariablemente deficientes en nutrientes, a tener un exceso intermitente de nutrientes. Aún no se ha establecido qué condiciones de suelos, regímenes climáticos y sistemas de cultivo serán los más vulnerables a lixiviación de nutrientes, aunque las regiones costeras calizas, entre otras, parecen ser muy sensibles en este aspecto.

En climas donde la mayor parte de la demandas de agua para los sembradíos proviene de irrigación, existe la posibilidad de controlar el drenaje y la infiltración en los suelos y, por lo tanto, las pérdidas de nutrientes por lixiviación hacia aguas subterráneas. Existe el riesgo de una importante lixiviación de nutrientes especialmente de los suelos más delgados, de textura más gruesa, y más permeables que se encuentran bajo un régimen de cultivo con irrigación. En lugares en que el agua residual es la fuente principal de irrigación, esta práctica puede causar un aumento de la salinidad de las aguas subterráneas, y de las concentraciones de nitrato y microcontaminantes orgánicos. A continuación se presentan algunos ejemplos de este tipo de contaminación.



a) El valle de Yaqui (Sonora),

Incluye una sección de la planicie costera del Golfo de California. Esta área tiene un clima cálido y seco, con precipitaciones de alrededor de 300 mm/a y una evaporación potencial total de más de 2,000 mm/a. Casi 250,000 ha han sido cultivadas por el sistema de irrigación desde el año de 1940, principalmente con agua de la presa del río Yaqui. Una gruesa serie de sedimentos aluviales forman un acuífero muy útil que es explotado por aproximadamente 300 pozos que actualmente producen más de 500 Mm<sup>3</sup>/a. Esta área es la más productiva en cuanto al cultivo de cereal en México, pero existe una creciente preocupación acerca del incremento de salinidad en el agua subterránea. Esto ocurre en áreas en donde el nivel freático es +10 m SNM, y es más marcada en pozos con captaciones poco profundas. No está, por lo tanto, asociada con intrusión salina costera. El fenómeno está muy difundido y en las áreas más afectadas las concentraciones actualmente exceden de 500 mg Cl/l y 300 mg SO<sub>4</sub>/l, y la salinidad está incrementándose a 50-100 ppm/a. La salinización a poca profundidad debajo del nivel freático de aguas subterráneas es presumiblemente peor que aquella registrada en pozos profundos de producción, véase Figura 4.7.

Por lo consiguiente al evaluar la fuente de salinidad de las aguas

subterráneas es importante notar que se cree que el agua de irrigación superficial y las lluvias contienen 30 y 10 mg Cl/l respectivamente, lo que podría, después de la evaporación incrementar las concentraciones en la recarga actual de aguas subterráneas a casi 200 mg Cl/l. Una proporción de este cloruro, de hecho, se descarga al sistema de drenaje de la tierra, pero el agua subterránea también se utiliza para irrigación recirculando de esta manera la salinidad. Se incrementará a más de 600 kg Cl/ha/a y podría aumentar las concentraciones en la recarga de aguas subterráneas a 500 mg Cl/l. Otra contribución importante al incremento en la salinidad del agua subterránea observada estará asociada con el efecto del lavado inicial de las tierras desérticas habilitadas para agricultura. Aún más, se estima que es muy improbable que la recarga asociada con este proceso haya penetrado por 40 m de profundidad en gran parte del área.

El uso de crecientes cantidades de diferentes plaguicidas no ha causado extensa contaminación de las aguas subterráneas de los países industrializados, por lo menos así se cree en la actualidad. No obstante hay excepciones significativas, especialmente en relación con los compuestos más solubles y débilmente absorbidos, que han dado origen a contaminación seria de las aguas subterráneas localmente, a pesar de que sufren una relativa rápida biodegradación en suelos fértiles. En la mayoría de los países el incremento en el uso de plaguicidas para la agricultura sigue muy cerca al uso de fertilizantes inorgánicos. Las

condiciones hidrogeológicas con nivel freático poco profundo y suelos de textura gruesa de bajo contenido orgánico, tales como calizas y arenas costeras, y algunos depósitos aluviales, parecen vulnerables a la lixiviación de algunos plaguicidas hacia las aguas subterráneas.

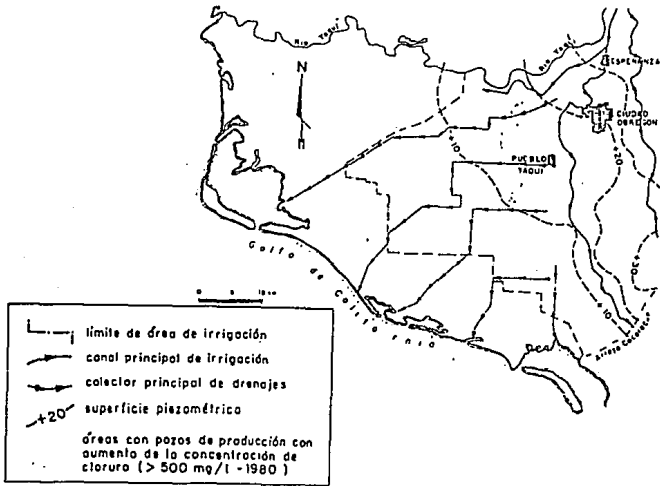


Figura 4.7. Distribución de áreas de salinización de aguas subterráneas en el acuífero aluvial costero del Valle Yaquí, (Sonora), México. Consecuente al cultivo agrícola con irrigación. (La irrigación se hace con recursos tanto superficiales como de aguas subterráneas en un área de precipitación de menos de 200 mm/a, y se inició en el año 1940).

Para el planeamiento efectivo del uso de la tierra es imperativo reconocer el estrecho vínculo entre el cultivo agrícola, el recurso y la calidad de las aguas subterráneas. Un

análisis de la vulnerabilidad de contaminación del acuífero debería indicar aquellas áreas amenazadas por una seria contaminación de las aguas subterráneas asociada con la posible infiltración de algunos nutrientes, sales, y ciertos plaguicidas.

b) Valle del Mezquital

Esta zona se localiza en la porción sur del altiplano mexicano, en una región semidesértica con precipitación pluvial menor que 300 mm/año. La agricultura local empezó a florecer hace varias décadas al transferirse a esa zona las aguas residuales generadas en la Ciudad de México, cuyo volumen ha crecido hasta alcanzar la cifra de 1300 millones de metros cúbicos por año.

Las aguas residuales son conducidas a través de un gigantesco emisor profundo, almacenadas en varias presas, donde son mezcladas con aguas blancas y distribuidas por medio de una red de canales de gran longitud (2500 km). Debido a que los suelos predominantes en la zona son tobáceos, con escasa materia orgánica, se aplican a los cultivos láminas muy altas, con el propósito de fertilizarlos, esta práctica agrícola origina excedentes de riego a gran magnitud que en parte se infiltran, acarreando en solución todo tipo de contaminantes.

Superficie freática somera, permeabilidad alta y carga contaminante intensa, aplicada con láminas muy altas, han dado lugar a la contaminación regional del acuífero. El agua de pozos, manantiales y drenes contienen elementos menores y metales pesados, varios de ellos en concentraciones muy superiores a la norma respectiva; asimismo, las aguas freáticas someras contienen plaguicidas, coliformes y detergentes. Dado que las necesidades de agua para usos doméstico y de abrevadero son satisfechas por el acuífero, la contaminación de éste ha tenido grave repercusión sobre la salud pública.

c) Zona de Aguascalientes, Ags.

La zona de Aguascalientes está emplazada en la porción central de la República Mexicana, en una región de clima templado y precipitación media anual de 550 mm. (Figura 4.8)

El acuífero local es de tipo "libre" y está constituido por conglomerados poco cementados y tobas riolíticas fracturadas, cubiertos por una delgada capa superficial de aluvión no saturado. Debido a la sobreexplotación del acuífero con fines municipales, industriales y agrícolas, los niveles del agua subterránea han descendido más de 60 m en los últimos 30 años de 100 m de la superficie

del terreno.

Con una población del orden de 550,000 habitantes, la Ciudad de Aguascalientes ocupa la porción central de la zona y genera alrededor de 45 millones de metros cúbicos de agua residual, que son descargados al cauce del río del mismo nombre, almacenados en la presa "El Niágara" y utilizados aguas abajo en la agricultura. Como efecto colateral de los abatimientos, la superficie del terreno se ha fracturado y asentado por consolidación de los estratos acuíferos, causando daños a la infraestructura urbana y, en particular, a la red de alcantarillado.

La fuga de aguas residuales, la circulación de éstas en el cauce permeable, su almacenamiento en el vaso de la presa con un tirante de varios metros y su aprovechamiento en riego agrícola poco tecnificado, constituyen fuentes de contaminación que están deteriorando lentamente la calidad del agua subterránea, a pesar de la gran profundidad a que se halla la superficie freática. La percolación del agua residual es propiciada por el fracturamiento de las rocas acuíferas, y la concentración del bombeo en el área urbano-industrial ha inducido el flujo subterráneo de agua contaminada hacia las captaciones que abastecen a la ciudad.

DISPOSICION INADECUADA DE AGUAS RESIDUALES

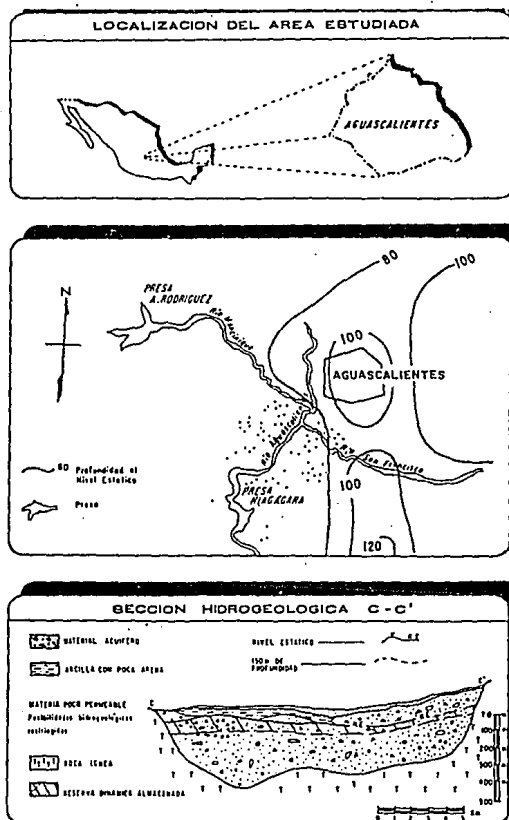


Figura 4.8. Localización de la zona en estudio

#### 4.7 Lagunas artificiales

La necesidad de almacenar volúmenes importantes de agua o de otros líquidos para fines de desarrollo urbano, industrial y agrícola, a obligado al hombre a construir cada vez con mayor frecuencia lagunas artificiales de grandes dimensiones. Los tipos más comunes son los siguientes:

- Almacenamiento de agua para riego
- Vasos reguladores para control de escurrimientos superficiales
- Almacenamientos de desechos líquidos industriales o de aguas negras
- Estanques de enfriamiento para plantas termoeléctricas
- Lagunas de evaporación para la industria química
- Lagunas solares para la producción de energía eléctrica
- Lagunas para piscicultura
- Almacenamientos utilizados como precarga para consolidación de suelos compresibles.

En las lagunas artificiales, es común que se almacene un producto escaso, contaminante o de alto valor económico; el problema del control de filtraciones reviste entonces una especial importancia, debido principalmente a que estas filtraciones pueden causar un serio problema de contaminación en las aguas subterráneas, ya que dentro de las



lagunas algunas veces se manejan residuos peligrosos lo que implica cierto riesgo cuando el acuífero está contaminado. Existen tres tipos de filtración más comunes:

El primero se presenta cuando la posición del nivel freático puede considerarse como una condición frontera fija del problema. El líquido se infiltra entonces en forma esencialmente vertical descendente del almacenamiento al manto acuífero. Para que prevalezca esta condición, es necesario que las infiltraciones no alteren en forma significativa el nivel freático. Lo anterior ocurre cuando el manto acuífero tiene una posibilidad de descarga muy superior a las aportaciones por filtración del almacenamiento.

El segundo mecanismo corresponde a suelos sensiblemente homogéneos en los cuales las filtraciones son suficientes para elevar la posición del nivel freático en el área del almacenamiento. En este caso, el flujo tiende a generarse exclusivamente debajo de los bordos perimetrales.

Cabe hacer notar que la existencia de un mecanismo del tipo uno o dos no depende solamente de las condiciones físicas del subsuelo sino también de las dimensiones de la laguna y de la posición del nivel freático.

El tercer mecanismo se presenta cuando existe una capa continua prácticamente

impermeable a determinada profundidad.

Por lo tanto es importante que se evalúe la necesidad de impermeabilización en cada laguna que se construya, ya que debe evitarse cualquier infiltración que se pueda generar en las mismas, debido a que causaría riesgo y graves problemas de contaminación sobre todo en los acuíferos.

## **CAPITULO 5**

### **5. INADECUADA DISPOSICIÓN DE LODOS Y RESIDUOS SOLIDOS**

#### **5.1 DISPOSICION INADECUADA DE LODOS**

Las materias finales principales del tratamiento de las aguas y aguas residuales son:

- 1) el agua producida o el efluente de la planta de tratamiento y
- 2) los lodos o suspensiones de sólidos obtenidos como subproductos.

El agua producida se envía a las ciudades o industrias; el efluente de la planta de tratamiento se descarga hacia las aguas receptoras o a los suelos receptores. El agua producida y el efluente de la planta de tratamiento son productos terminados, mientras que los lodos y suspensiones no lo son. Debido a su origen, su consistencia acuosa, volumen y putrescibilidad, la mayor parte de ellos requieren proceso antes de ser evacuados. El proceso tiende a asegurar la higiene y aceptabilidad sensorial de los lodos o suspensiones, y a reducir el volumen y peso de los materiales que se van a manejar transportar o evacuar.

La evacuación satisfactoria de los lodos y suspensiones crea problemas económicos de magnitud considerable, principalmente los de transporte y almacenamiento final.

Aún cuando las clases individuales de sólidos pueden contener además de agua, otras sustancias de algún valor económico, rara vez las poseen en cantidad suficiente para que sea atractivo su aislamiento o recuperación.

En general el manejo de las suspensiones, lodos y otros residuos del tratamiento es una tarea difícil en la purificación de aguas y en el tratamiento de aguas residuales. De hecho, el manejo de los sólidos puede ser un determinante principal entre la selección específica de los procesos de purificación de agua y el tratamiento de aguas residuales.

Las operaciones unitarias del tratamiento y remoción de las suspensiones y lodos incluyen el transporte, la concentración, o espesamiento, digestión, deshidratación, secado, incineración y evacuación segura.

Esto se lleva a cabo mediante dos procesos: el químico y el biológico. En el proceso químico las materias suspendidas no sedimentables y algunos sólidos disueltos se convierten en sólidos sedimentables susceptibles de asentamiento por floculación y precipitación con productos químicos. Es en los tanques de floculación química o de precipitación, en donde se producen los lodos precipitados.

En el proceso biológico la materia orgánica coloidal y disuelta es metabolizada y convertida en sustancia celular sedimentable mediante crecimientos biológicos o lodos. Las

masas de células vivientes que existen en los lodos utilizan las materias residuales para crecimiento y energía. Su crecimiento produce extensas interfases en las que la adsorción, absorción, difusión y otras fuerzas interfaciales o fenómenos de contacto llevan a cabo intercambios entre las aguas cloacales y los lodos. Para que las masas biológicas permanezcan activas y aerobias, se les proporciona aire.

El lodo, producto del tratamiento del agua residual debe someterse a un tratamiento capaz de modificar sus características, para que puedan disponerse sin poner en peligro la salud pública y el medio ambiente, además de disminuir su volumen para facilitar su manejo y disposición final. Los lodos por su estado se clasifican en crudos o frescos, digeridos, húmedos y secos; por su origen en primarios, secundarios y exceso de lodos activados. Veáse Figura 5.1.

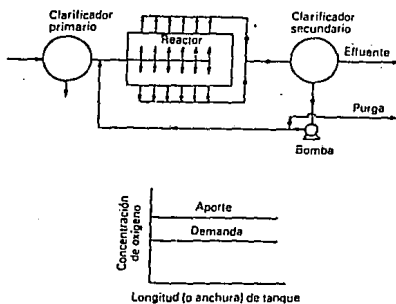


Figura 5.1. Proceso de lodos activados con mezcla completa

## 5.2 Características de los lodos

Las características de los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales pueden variar grandemente debido a las diferencias en los procedimientos, diseño y operación de plantas de tratamiento de las mismas. Sin embargo es importante conocer sus características para poder seleccionar en donde se pueden utilizar; la compleja naturaleza de los mismos, ha hecho necesario desarrollar algunos parámetros operacionales. A continuación se mencionan algunas características de ellos.

### 5.2.1 Características físicas

#### a) Gravedad específica

La gravedad específica es definida como el peso del material para un volumen igual de agua, los lodos deben tener una gravedad específica de aproximadamente 1.0, en otras palabras estos son aproximadamente iguales al peso del agua.

Si un litro de lodo pesa 1010 gr. la gravedad específica se calcula como:

$$S = \frac{1010g}{1000g} = 1.01 \quad (5.1)$$

Los lodos son rara vez compuestos de solo un sólido y solo un líquido; así la gravedad específica se calcula como:

$$\frac{1}{S} = \sum \left( \frac{W_i}{S_i} \right) \quad (5.2)$$

donde:

S = gravedad específica

$W_i$  = fracción peso del número de componentes en el lodo

$S_i$  = gravedad específica del número de componentes.

El peso de los sólidos de desecho es el peso de los sólidos sedimentables en el momento de la separación de los sólidos o de la transferencia de fase desde el agua que los tiene en suspensión. Se encuentran incluidos:

- 1) los sólidos naturalmente presentes en las aguas y aguas residuales
- 2) los aditivos coagulantes y precipitantes químicos,
- 3) las películas biológicas desprendidas y los flóculos biológicos de desecho u otras biomasas generadas por los organismos vivientes a partir de materia orgánica nutritiva durante el tratamiento de aguas residuales.

## b) Relaciones peso-humedad-volumen

El porcentaje de contenido de humedad,  $p$ , de un lodo que contiene un peso  $w_s$  de sólidos secos y un peso  $w_w$  de agua es  $p = 100w_w/(w_s+w_w)$ . El peso específico relativo de los lodos secos (o de sus sólidos en base seca), es una función de los pesos específicos de sus componentes. Si las dos fracciones principales (volátil  $s_v$  y fija  $s_f$ ) que se determinan por la evaporación de la humedad e ignición del residuo, poseen pesos específicos de  $s_v$  y  $s_f$ , respectivamente, el peso específico  $s_s$  de sólidos, como un conjunto, se puede calcular a partir del porcentaje de materia volátil,  $p_v$ . Debido a que  $100/s_s = (p_v/s_v) + (100 - p_v)/s_f$ .

## c) Concentración de sólidos

Las fracciones relativas de sólido y líquido de un lodo son comúnmente descritas por la concentración de sólidos, expresados como mg/l o en porcentaje (%) de sólidos. Si asumimos que el lodo tiene una gravedad específica de 1.0, entonces

$$10,000 \text{ mg/l} = 1 \% \text{ sólidos} \quad (5.3)$$



y el porcentaje es expresado en términos de peso/peso, los lodos compuestos de sólidos pesados, pueden tener gravedad específica alta, por lo tanto la pequeña relación de mg/l a por ciento es válida.

Los sólidos totales en un lodo son iguales a la suma de sólidos disueltos y suspendidos, éste último definido como la fracción que no pasa a través de un filtro . Cada uno de estos tres tipos (total, disuelto y suspendido) pueden ser subdivididos en: fijos y volátiles, lo anterior se define como la fracción que se oxida a 600°C. Esto es comúnmente asumiendo que la medida de sólidos volátiles es una aproximación razonable del material orgánico en el lodo. Para definirlos se usará la siguiente notación:

ST = sólidos totales

SD = sólidos disueltos

SS = sólidos suspendidos

SSV= sólidos volátiles suspendidos

SSF= sólidos fijos suspendidos

El método común para medir sólidos es por evaporación. De acuerdo al procedimiento estándar, los sólidos totales son medidos vaciando exactamente 100 ml de éstos en una cápsula de evaporación, secándolos en

el horno a 103°C y pesando la cápsula y el material seco. Sustrayendo el peso de la tara de los sólidos, la concentración se calcula en mg/l.

### 5.2.2 Posibles usos de los lodos

a) Utilización como combustible

Muchos lodos contienen altas concentraciones de material orgánico, y por lo tanto tienen un valor como combustible, los lodos tienen un valor de cerca de 5,500 cal/g de sólidos volátiles. Usualmente el combustible auxiliar se requiere en la combustión de lodos.

b) Uso como fertilizante

La mayoría de los fertilizantes requieren la presencia de nitrógeno, fósforo y potasio. Un fertilizante común es el 8-8-8, el cual contiene 8% de nitrógeno, 8% de fósforo y 8% de potasio. Los lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales contienen altos porcentajes de esos nutrientes, algunos valores típicos se muestran en el Cuadro 5.1

Cuadro 5.1 Concentración típica de nutrientes en los lodos de las aguas residuales domésticas

LODO	% de nitrógeno (N)	% de fósforo ( $P_2O_5$ )	% de potasio ( $K_2O$ )
Tratamiento primario	2.9	1.6	0.40
Filtros percoladores	3.0	3.0	0.50
Lodos activados	5.6	5.7	0.40
Digestión mixta	4.6	1.4	0.38

Parte del problema es que mucho del nitrógeno se pierde como amoníaco en la digestión anaerobia y mucho del fósforo que contiene se resolubiliza en el digestor. Además casi todos los lodos tienen bajo contenido de potasio.

Otra consideración para decidir sobre el uso de lodos como fertilizantes, es la presencia de materiales indeseables como son los metales pesados y los hidrocarburos, en el cuadro 5.2 se presenta una lista de algunos de estos materiales.

Cuadro 5.2. Elementos que se pueden encontrar en los lodos de aguas residuales

ELEMENTO	
a) Bario (Ba)	j) Astató (As)
b) Calcio (Ca)	k) Cobalto (Co)
c) Sodio (Na)	l) Molibdeno (Mo)
d) Magnesio (Mg)	m) Mercurio (Hg)
e) Hierro (Fe)	n) Cadmio (Cd)
f) Aluminio (Al)	ñ) Cobre (Cu)
g) Manganeso (Mn)	o) Niquel (Ni)
i) Boro (B)	

## c) Uso como alimento

Los lodos pueden algunas veces utilizarse como fuente de alimento, adicionándolo al alimento del ganado, ya que se ha demostrado que los lodos domésticos tienen una alta concentración de complemento vitamínico. Sin embargo, si los lodos contienen concentraciones muy grandes, de hidrocarburos y materiales pesados no deben utilizarse como alimento.

### **5.3 Estabilidad del lodo de acuerdo al tipo de tratamiento**

Los lodos crudos se obtienen del tanque sedimentador primario, son los lodos sedimentables que contiene el agua residual. Estos lodos son muy inestables, ya que prácticamente no han sufrido descomposición, presentan color y olor desagradables, se componen principalmente de desperdicios y sólidos fecales.

El exceso de lodos, del proceso de lodos activados, presentan un estado parcial de putrefacción, tienen color café, consistencia floculenta y olor desagradable. Si no se tiene cuidado en su manejo se hacen sépticos, de olor desagradable debido a la descomposición de la materia orgánica.

Los lodos, de métodos de precipitación química, se descomponen o digieren con más lentitud que los de procesos biológicos, presentan un color negro y su volumen es muy grande, dificultando su manejo.

### **5.4 Disposición de lodos**

La disposición de los lodos originados en el tratamiento de aguas residuales y en los métodos de tratamiento de los mismos, en donde se han modificado su volumen y

características, puede hacerse en agua o tierra.

a) **Disposición en el mar**

El método de disposición de lodos en agua, depende de la disposición de masas de lodos adecuadas para este fin. Los lodos se bombean crudos o digeridos mar adentro, a suficiente distancia de la playa, donde son vertidos en aguas profundas. Resulta ser económico, pero se recomienda hacer un estudio comparativo con el tratamiento de lodos y del aprovechamiento del gas producido en la digestión. Sin embargo para producir el menor impacto ambiental, deberá analizarse cual será realmente el impacto producido en el medio después de que se deposita el lodo.

b) **Disposición en la tierra**

El método de disposición en tierra, presenta tres variantes: enterrarlos, utilizarlos como material de relleno o como fertilizante.

El método de enterrarlos se emplea generalmente para lodos crudos,

se entierran en zanjas de 0.60 a 0.90 m de ancho y 0.60 m de profundidad aproximadamente, cubriéndose con tierra un mínimo de 0.40 m. Cuando se cuenta con terrenos adecuados (sin agrietamientos y fisuras de materiales poco permeables), este método resulta ser económico, pero es poco usado, debido a la superficie que se requiere y a que los lodos permanecen en las zanjas húmedos y mal olientes durante varios años, limitando el uso nuevamente del terreno.

**Los lodos empleados como material de relleno**, son exclusivamente los digeridos, ya que estos permanecen a la intemperie sin producir condiciones insalubres, es uno de los métodos más empleados.

**Los lodos usados como fertilizantes**, contienen elementos como el nitrógeno y fósforo entre otros nutrientes, que ayudan al desarrollo de la vida vegetal, lo que hace útil su uso como fertilizante o mejorador del suelo con buenos resultados, pero se hace necesario controlar la concentración de algunos elementos que contiene (metales pesados, hidrocarburos, nutrientes en altas concentraciones) ya que pueden resultar perjudiciales por su composición de desechos industriales.

### **5.5 Contribución de los lodos a la contaminación del agua subterránea**

Los lodos producto del tratamiento de aguas residuales contienen una alta concentración de elementos ya sea nutrientes (fósforo, nitratos, etc.) o materiales pesados (hierro, cobre, níquel, mercurio, etc.) dependiendo del tipo de su procedencia (aguas residuales industriales o municipales). Su disposición en los países en vías de desarrollo es generalmente a ciclo abierto, lo cual genera serios riesgos en la contaminación ambiental, y a nivel de las aguas subterráneas tiene una repercusión muy importante, porque la mayoría de las sustancias que contienen pueden infiltrarse en los terrenos de deposición y percolarse hasta los mantos acuíferos, los cuales paulatinamente se van deteriorando; lo que a través del tiempo es poco perceptible, pues los lodos son una fuente de contaminación dispersa. Y debido a que son producto de tratamiento de aguas residuales pueden contener elementos tóxicos que en pequeñas concentraciones pueden ser fatales para la vida humana.

### **5.6 DISPOSICION INADECUADA DE RESIDUOS SOLIDOS**

En la mayoría de las ocasiones la disposición de los residuos sólidos en los países en vías de desarrollo, se ubican en lugares que no son adecuados además de ser elegidos arbitrariamente. Estos sitios pueden convertirse en una fuente potencial de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales así como del aire mismo, ya que el gas que



desprende principalmente en su descomposición es metano, que es muy peligroso por ser un gas volátil. En estas condiciones inapropiadas se produce la infiltración del agua de lluvia hacia los residuos sólidos, generando líquidos que se percolan extrayendo de la basura el material disuelto o suspendido formando así los lixiviados.

En cuanto a residuos sólidos municipales, una familia urbana tipo, compuesta por cinco personas, produce cerca de un metro cúbico de basura al mes. En el Valle de México, se generan todos los meses 3 millones de metros cúbicos de residuos. Para la recolección de la basura se requieren, tan sólo en el Valle de México, cerca de 3 mil camiones, cuyo consumo de combustible contribuye, a su vez, a contaminar la atmósfera.

Según datos proporcionados por la extinta SEDUE, la cantidad de residuos sólidos no tóxicos de origen doméstico e industrial se elevará diariamente 0.5 kg per cápita y día en 1988, a 0.6 kg en 1992 y a 0.7kg en el 2000, lo que representa un aumento de entre el 20 y el 40 por ciento. Entre 1988 y el 2000, la totalidad de los desechos domésticos crecerá en un 60 por ciento debido al incrementos de la población y al mayor uso de embalaje, dentro de otras causas. Casi el 20 por ciento le corresponde al Distrito Federal, otro 38 por ciento a la meseta central. Los estados más pobres del sur y sureste aportan sólo el 13 por ciento de la producción de basura, la población más pobre produce entre el 20 y el 30 por ciento menos basura que las clases media y alta (SEDUE, 1988).

### 5.6.1 Codiciones hidrogeológicas de un sitio de disposición de residuos sólidos municipales

Las características hidrogeológicas de los sitios de disposición de residuos sólidos son importantes debido al escurrimiento y dilución de los lixiviados. La contaminación que puede resultar de la migración de los lixiviados, depende de:

- a) la capacidad de retención de la zona no saturada de agua respecto a la cantidad global de contaminación liberada,
- b) la capacidad de dilución y dispersión de la zona saturada.

La zona no saturada, es decir, la franja de terreno situada, entre la superficie del suelo y la zona saturada está caracterizada por la presencia de tres fases: líquida, sólida y gaseosa. El escurrimiento en esta zona es esencialmente vertical; el agua y los productos disueltos se desplazan a velocidades diferentes debido a la acción de las fuerzas ocasionadas por las tensiones superficiales. El escurrimiento es mucho más lento que en la zona saturada.

En la zona no saturada, es en donde se elimina la mayor parte de la contaminación acarreada por lo lixiviados, mediante proceso físicos, químicos y bioquímicos.

Los procesos físicos de atenuación de contaminantes, que se llevan a cabo en la zona no saturada son:

- a) filtración, al llevarse a cabo este proceso, los medios porosos juegan el papel de filtro para el lixiviado, atrapando una parte de la materia orgánica en suspensión y a los microorganismos
- b) retención capilar, a medida que la contaminación llega a la zona saturada, una parte de la carga contaminante es detenida en el agua capilar de la zona no saturada.

Dentro de los procesos bioquímicos, se lleva a cabo la biodegradación de la materia orgánica mediante los microorganismos que se desarrollan en los residuos, aunque estos no pueden sobrevivir al pasar al suelo, debido a que las condiciones de vida son muy diferentes en estos dos medios.

Los procesos químicos que se llevan a cabo en la zona de saturación son:

- a) Precipitación y coprecipitación
- b) intercambio de iones

- c) adsorción

Además de generar fenómenos químicos complejos como:

- a) Reacciones ácido-base
- b) Reacciones óxido-reducción

En la zona no saturada, el lixiviado se incorpora y dispersa en el sistema de flujo en forma horizontal; cuando esto sucede la migración y la atenuación de la contaminación están regidas por:

- a) Dilución del lixiviado
- b) Dispersión del lixiviado
- c) Intercambios físicos en el medio y reacciones químicas

#### **5.6.2 Etapas bioquímicas de la descomposición de los residuos sólidos municipales**

Dado que la naturaleza de los residuos sólidos es diversa, se pueden clasificar en función de su estructura química en:

proteínas

carbohidratos

lípidos

o por su composición física, la cual se presenta en el Cuadro 5.3

Cuadro 5.3 Clasificación de los residuos sólidos por su composición física

RESIDUOS SOLIDOS	
- algodón	- material de construcción
- cartón	- papel
- cenizas	- poliuretano
- pañal desechable	- poliestireno expandido
- plástico de película	- residuos de jardinería
- plástico rígido	- residuos alimenticios
- cuero	- trapos
- cartón encerado	- vidrios
- fibra dura vegetal	- residuos voluminosos (autos, muebles, etc.)
- hueso	- residuos de mercado
- hule	- material ferroso
- latas	- material no ferroso
- loza y cerámica	- desechos hospitalarios
- madera	

La transformación de la materia orgánica hasta su estabilización, se lleva a cabo mediante procesos bioquímicos y geoquímicos, que se realizan por vía aerobia o anaerobia, según sean las condiciones del medio.

La transformación aerobia es un proceso que se da en presencia de oxígeno, la cual se caracteriza por un aumento muy fuerte de la temperatura de los desechos después de algunos días de la disposición y por la formación de una mezcla gaseosa compuesta de bióxido de carbono, amoníaco y agua.

La transformación anaerobia se da en ausencia de oxígeno y se caracteriza por la oxidación y reducción de la materia orgánica en bióxido de carbono y metano. Este es un proceso que toma más tiempo que el aerobio y es el proceso predominante en un sitio de disposición de residuos sólidos.

### **5.6.3 Factores que intervienen en la formación de lixiviados**

El suelo que rodea al sitio de disposición de residuos sólidos es de gran importancia, tanto por su naturaleza, litología, concentración en materia orgánica y en organismos vivos, así como sus características hidrogeológicas, debido a que existe la posibilidad de escurrimiento y dilución de los lixiviados. El volumen de lixiviación producido en un sitio es función de la capacidad de absorción del suelo, área expuesta, composición, localización, material de cubierta y cantidad de recarga por infiltración.

Cuando el agua se pone en contacto directo con los residuos sólidos, pueden iniciarse

procesos de contaminación, ya que muchos materiales en los residuos sólidos son solubles en el agua, en cambio otros se forman como productos solubles de la degradación natural de los residuos sólidos; y en general, la mayor parte de agua que fluye a través de los residuos sólidos, arrastrando una alta concentración de contaminantes.

En sitios de disposición de residuos sólidos ocurren fenómenos complejos debido a las interacciones entre los constituyentes de los residuos y el agua de la lluvia que se infiltra entre la masa de los sólidos.

Un sitio de disposición de residuos sólidos, se debe considerar como un medio de constante evolución, en donde se realizan reacciones fisicoquímicas, químicas y biológicas. Estas reacciones son las responsables de:

- la solubilización
- precipitación
- óxido reducción
- intercambio iónico o generación de algunos gases contaminantes

También contribuyen las reacciones de degradación biológica de materiales disueltos y suspendidos que se efectúan por vía aerobia o anaerobia, según las condiciones del medio.

Estas reacciones tiene como resultado la deformación de metabolitos (es una sustancia de bajo peso molecular que interviene en el metabolismo y actua generalmente por acción enzimática) susceptibles de interactuar con otros elementos contaminantes. Las consecuencias directas de estas transformaciones son la liberación de gas y la formación de lixiviado.

#### **5.6.4 Estimación de la generación de lixiviados**

Un procedimiento para estimar la generación de lixiviados es el método de balance del agua, comúnmente usado en el campo de la conservación del suelo y del agua. Este método considera los movimientos del agua en el suelo:

- precipitación
- evapotranspiración
- superficie de escurrimiento
- almacenamiento de la humedad en el suelo

El factor de almacenamiento de humedad en el suelo, depende del tipo de suelo, su estructura y capacidad de campo, así como de la profundidad de la capa de suelo.



La evapotranspiración depende del tipo de vegetación, suelo y factores climáticos del área, representa la cantidad de agua presente en el suelo, la cual se pierde a la atmósfera por evaporación y en la transpiración vegetal. Los valores de evapotranspiración difieren de acuerdo a la estación del año y área geográfica.

Los valores de superficie de escurrimiento dependen de la intensidad y duración de la tormenta, las condiciones antecedentes de humedad del suelo, la permeabilidad y capacidad de infiltración del material de cubierta, las pendientes, la cantidad y tipo de vegetación, veáse Figura 5.2.

En la mayoría de los casos, la generación de lixiviados representa un problema potencial en áreas húmedas, sin embargo, este problema disminuye en zonas áridas. El patrón que sigue al flujo intermitente de lixiviados es similar a las precipitaciones que se presentan en el área. La mayor parte de los lixiviados se producen, durante los meses de percolación significativa.

Cuando el agua excede la capacidad de campo del suelo de cobertura y se percola hacia el interior de los residuos, saturándolos, entonces se lleva a cabo la percolación hacia el terreno virgen, formando el lixiviado.

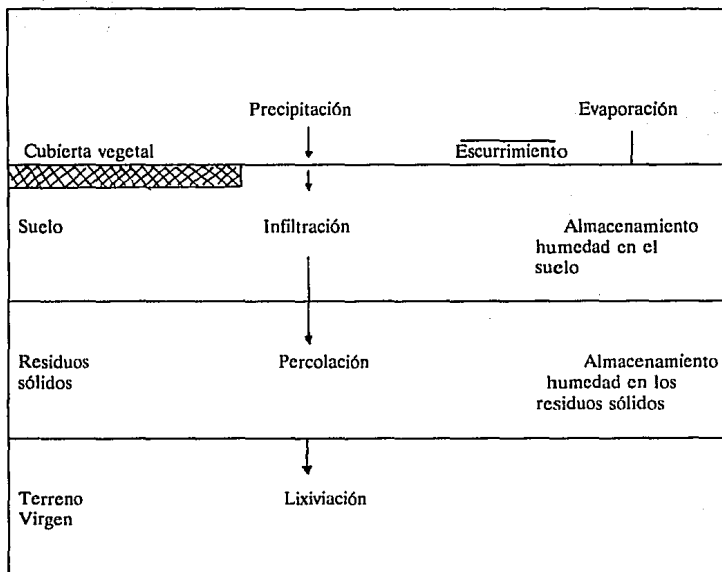


Figura 5.2 Componentes del agua en un relleno sanitario.

El almacenamiento de agua puede estar cambiando continuamente; aumenta debido a la infiltración y disminuye debido a la evapotranspiración; es decir, depende del tipo y estructura del suelo y su capacidad de campo, así como del espesor de la capa de cobertura. La disminución del agua debido a la evapotranspiración está limitada a una zona del suelo

definida principalmente por la profundidad efectiva de raíz.

#### 5.6.5 Características de los lixiviados

Siempre que la cantidad de agua que entra a un depósito de residuos sólidos excede la capacidad de campo del desecho depositado, el lixiviado será producido y descargado al medio ambiente.

Las características de los lixiviados varían en color, olor y turbiedad, y para determinarlas se lleva a cabo los muestreos que nos indican la cantidad y tipo de desperdicio sólido, así como las prácticas de almacenamiento y disposición. En general, un lixiviado tomado directamente de la base de un tiradero puede tener altas concentraciones de las sustancias siguientes:

- Hierro
- Nitrógeno
- Dureza
- DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)
- Fosfatos
- Sulfatos

- Sólidos totales
- DQO (Demanda química de oxígeno)
- Compuestos orgánicos

Es importante señalar que, cuando se depositan los desechos sólidos en un terreno sin haber sido planeado de acuerdo a las normas internacionales de sanidad, lo que en nuestro medio es lo más común, son los denominados tiraderos, basureros y depósitos a cielo abierto; al caer la precipitación se incorpora a la basura, contribuyendo a acelerar los procesos de degradación, formando un residuo líquido con gran cantidad de sólidos en suspensión (lixiviado) el cual junto con los líquidos que se derivan de los desechos mismos, puede infiltrarse e incorporarse a un acuífero de dos maneras según el tipo de terreno: si es fisurado o con grietas el lixiviado llega rápido al agua subterránea y con todo su poder contaminante íntegro; cuando el terreno es poroso, tarda en llegar al acuífero o no llega por ser retenido y/o absorbido sufriendo parte del lixiviado modificaciones en su composición.

### 5.7 Disposición inadecuada de residuos sólidos industriales

La actividad industrial origina gran diversidad de productos de desechos sólidos, que se depositan en basureros industriales, los cuales no siempre son diseñados ni supervisados, pudiéndose originar lixiviados con alto grado de toxicidad, véase Cuadro 5.4.

Cuadro 5.4. Residuos sólidos industriales

<b>Desechos sólidos industriales</b>	
- Desechos de acetileno	- Vidrio
- Desechos agrícolas	- Escoria de fluorito de hidrógeno
- Aluminio	- Plomo
- Antimonio	- Cal
- Ceniza, escorias y polvos de chimenea	- Magnesio
- Desechos de la manufactura de alimentos	- Mica
- Residuos de productos animales	- Melazas
- Asfalto	- Chatarra no ferrosa
- Residuos de bauxita	- Desechos orgánicos
- Berilio	- Papel
- Latón	- Salmuera
- Desechos de ladrillería	- Desechos de cerámica
- Bronce	- Escoria y desechos de piritas
- Calcio	- Espumas de sal
- Desperdicios químicos	- Productos pesqueros comestibles
- Carbón	- Remolacha
- Café	- Azufre
- Algodón	- Estaño
- Desperdicios de Fluoruro	- Tabaco
- Residuos de frutas	- Uranio
- Vidrio	- Desperdicios de hortalizas
	- Lana
	- Aleación de circonio

**Desechos sólidos industriales**

- |  |                            |
|--|----------------------------|
| - Bismuto  | - Refractario              |
| - Desechos de cervecería, destilación y fermentación | - Caucho                   |
| - Cadmio   | - Arena                    |
| - Carburos   | - Sodio                    |
| - Cromo  | - Almidón                  |
| - Cobalto  | - Fibras de caña de azúcar |
| - Cobre  | - Tantalio                 |
| - Desperdicios de lechería                           | - Textiles                 |
| - Desechos de fundición                              | - Titanio                  |
| - Germanio   | - Tungsteno                |
| - Fibra de vidrio                                    | - Vanadio                  |
| - Cáñamo   | - Desechos de madera       |
| - Residuos inorgánicos                               | - Cinc                     |
| - Hierro   | - Etcétera.                |
| - Desechos de curtido y manufactura de pieles        |                            |
| - Manganeso  |                            |
| - Lana mineral                                       |                            |
| - Molibdeno  |                            |
| - Nylon  |                            |
| - Pintura  |                            |
| - Residuos de petróleo                               |                            |

En nuestro medio no existe el control y manejo óptimos de los desechos industriales peligrosos como son los derivados del petróleo, industria química y farmacéutica, gasera, cementera, minera y otras pequeñas como son las tintorerías, laboratorios, talleres mecánicos y de material eléctrico y electrónico. En los valles de México y Toluca la presencia de industrias ha producido la acumulación de desechos tóxicos que han ocasionado trastornos

en la salud de la población, como es el caso de una planta procesadora de cromatos de sodio, potasio y sulfatos de sodio, con el consiguiente "entierro" sin mayor estudio o medidas adecuadas de depositación de éstos compuestos. Los desechos industriales peligrosos constituyen un riesgo potencial en todas las etapas de su ciclo, durante su generación, recolección y transporte, almacenamiento en los sitios de recepción, así como durante su tratamiento y disposición final. Considerando cada una de las etapas mencionadas, debe haber un control sistemático como parte de una política integral del manejo adecuado de éstos desechos. Este control permitiría que desde la fuente generadora se separaran los desechos de acuerdo con sus propiedades y características. Con ello se facilitaría su reuso, en caso de ser factible, así como su tratamiento adecuado y se evitaría que se mezclaran con otras sustancias que aumentan su volumen y peligrosidad, o bien se lograría hacer más seguro su confinamiento en los sitios destinados para su deposición final.

Un estudio financiado por una ONG (Organización no gubernamental) sobre residuos tóxicos en México intentó estimar su volumen. Y los resultados reportaron que: en 1980 se produjeron 2.8 millones de toneladas de desechos peligrosos; para 1990 se estimaron 3.2 millones y para el año 2000 se estiman alrededor de 3.5 millones de toneladas. Esto significa una producción per cápita de unos 2.6 kg diarios.

Desde el punto de vista regional, la mayor cantidad de residuos tóxicos se generan en el Valle de México, en otras grandes ciudades industriales (Monterrey, Guadalajara,

Tijuana) y, sobre todo en aquellos lugares donde se extraen y procesan el petróleo y el gas natural (Coatzacoalcos-Minatitlán, Salamanca, Salina Cruz, Cactus). En especial, en las proximidades de los parques industriales, establecimientos químicos y petroquímicos y refinerías existe una grave amenaza para la salud de la población.

## **5.8 Casos Estudio**

### **5.8.1 Zona de Celaya, Guanajuato:**

Localizada en la porción central del país, la zona de Celaya tiene un clima templado y precipitación media anual de 600 mm. La ciudad de Celaya cuenta con una población cercana a los 300 mil habitantes y ocupa la porción central; sus aguas residuales son utilizadas para riego inmediatamente aguas abajo del área urbana.

El acuífero local, de tipo libre, está compuesto en su parte superior por depósitos lacustres y materiales aluviales y en la inferior por derrames basálticos fracturados, el espesor de aquéllos cambia bruscamente de 60 m en la porción occidental de la zona, a 250 m en su porción oriental, debido a que la roca subyacente presenta un escalón de falla. A causa del bombeo de los pozos, los niveles del agua han descendido varias decenas de metros en la zona, formándose una depresión piezométrica hacia la cual converge el flujo subterráneo; la superficie freática se halla a profundidades de 45 a 80 m y está descendiendo



con una rapidez de 2 m/año.

Una fuente de contaminación es un basurero municipal localizado en una excavación profunda, cuyo fondo se encuentra a unos 40 m del nivel medio del valle y a unos cuantos metros sobre la superficie freática.

Tales focos de contaminación han deteriorado la calidad del agua subterránea, en 11 de 54 pozos muestreados, en dicha fuente de estudio se ha registrado un aumento del contenido de nitratos y de coliformes. Tampoco en este caso se dispone de estadísticas médicas relativas al impacto de la contaminación sobre la salud pública, pero a ella se atribuye, al menos en parte, la alta incidencia de enfermedades gastrointestinales en los habitantes de la ciudad, véase Figura 5.3.

### **5.8.2 Zona de Cuautitlán, México**

Dado que en muchos casos no se lleva un registro de la naturaleza y de la cantidad de los desechos volcados en un lugar determinado y los basureros y rellenos abandonados pueden representar, por décadas, un peligro potencial para el agua subterránea. Se cree que la seria y persistente contaminación con cromo hexavalente de varios pozos, ubicados en una zona industrial al norte de la ciudad de México, proviene de la disposición al suelo de residuos sólidos de una planta procesadora de metal, véase Figura 5.4.

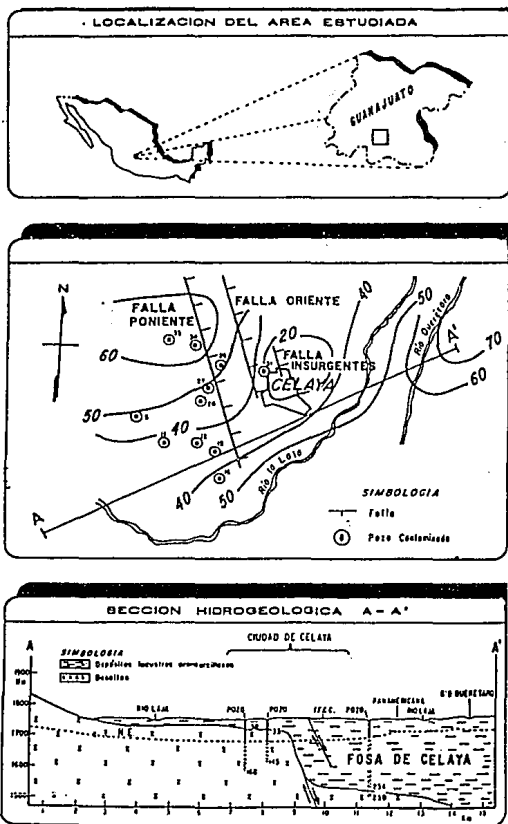


Figura 5.3 Localización de la zona en estudio. Celaya, Gto.

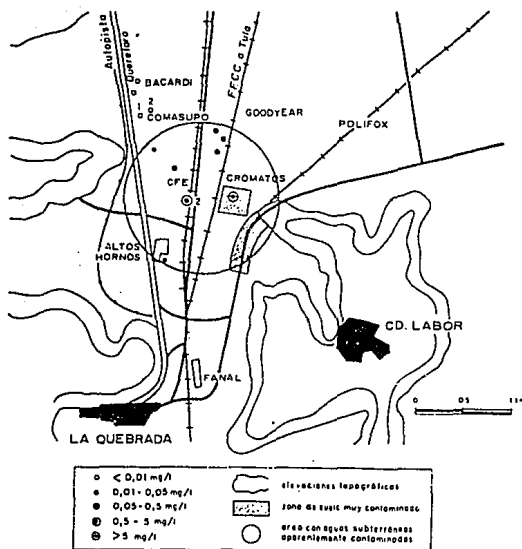


Figura 5.4 Distribución de los pozos afectados por concentraciones elevadas de cromo hexavalente resultante de la disposición al suelo de residuos de la industria metálica cerca a Cuatitlán, México. (Se indica el promedio de concentración de cada pozo de producción en el área mientras que el valor máximo recomendado por la OMS para agua de bebida es de 0.05 mg/l).

## **CAPITULO 6**

### **6. METODOS PARA EVITAR O CONTROLAR LA CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA**

Desde hace unos 25 años se están realizando estudios geohidrológicos a nivel nacional para localizar y evaluar las fuentes de agua subterránea, habiéndose cubierto a la fecha alrededor de 75% de la extensión del país. En términos generales, los estudios incluyen la definición del marco hidrogeológico y el análisis de los aspectos relativos a la hidrología subterránea; no contemplan expresamente problemas de contaminación, pero sí contienen datos valiosos acerca de las características fisicoquímicas del recurso, interpretadas con criterio hidrogeoquímico.

En los últimos 15 años se ha prestado mayor atención institucional al deterioro de la calidad del agua causado por actividades humanas. Inicialmente, la atención estuvo centrada en cuerpos de agua superficiales y recientemente se extendió a las fuentes

### **6.1 Control de la calidad del agua**

El control de la calidad del agua interviene en todas las fases de la administración técnica de las obras hidráulicas. Se inicia con la preparación, supervisión y mantenimiento de las áreas de captación de las fuentes abastecedoras; continúa a través de los ductos, plantas potabilizadoras y sistemas de distribución; y alcanza hasta los accesorios domésticos y equipos de manufactura a los que se suministra el agua. Cada sección de las obras tiene sus problemas de control propios; para todas ellas, el precio de la seguridad es una vigilancia permanente. Además debe de llevarse un control muy específico para el desalojo de las aguas residuales ya sean industriales o municipales que debe planearse previamente para evitar contaminar los acuíferos.

### **6.2 Situación actual de la protección de las aguas subterráneas**

En vista de la importancia de los abastecimientos de aguas subterráneas se podría pensar que se ha prestado bastante atención a la protección de la calidad del agua subterránea, particularmente dentro y en los alrededores de las grandes áreas urbanas. Este es especialmente el caso cuando consideramos:

- a) La práctica de disposición al suelo de efluentes domésticos e industriales no

tratados es cada día más difundida debido al costo excesivamente elevado de soluciones alternas.

- b) Los efectos sobre la salud potencialmente nocivos asociados con la contaminación de los abastecimientos de aguas subterráneas, con los consecuentes incrementos lentos, pero muy persistentes, en la concentración de contaminantes.
  
- c) La recuperación de los acuíferos contaminados casi siempre resultará en una operación costosa y lenta, que puede compararse al intento de tratar de remover el último vestigio de jabón de una esponja. Esto puede, con frecuencia, resultar impracticable, conduciendo al abandono de los escasos recursos de aguas subterráneas con un considerable costo económico.
  
- d) Una vez contaminados, el tratamiento de los abastecimientos de aguas subterráneas resultará costoso porque cada una de las numerosas fuentes dispersas, produciendo pequeños volúmenes, tiene que ser tratada individualmente.

Sin embargo, por un sin número de razones, la protección de los acuíferos aún no ha recibido la debida consideración.

En primer lugar, la migración de los contaminantes desde la superficie hasta los pozos tiende a ser un proceso lento en muchos acuíferos y puede demorar muchos años, incluso décadas, antes de que el impacto total de una contaminación causada por un contaminante persistente se haga notorio en los abastecimientos de aguas subterráneas.

En segundo lugar, la inacción resulta de dificultades significativas asociadas con el muestreo adecuado de las aguas subterráneas, con la responsabilidad dividida para el manejo de aguas subterráneas y con una restringida o mal orientada capacidad analítica de los laboratorios, provocando así la ausencia de un sistema rutinario de monitoreo para contaminantes tales como patógenos, nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos sintéticos. Por ello los datos disponibles la mayoría de las veces no son adecuados para ofrecer una perspectiva confiable sobre la calidad actual de los abastecimientos de aguas subterráneas de los acuíferos del país. La información sobre la magnitud y la distribución de la contaminación de los acuíferos es aún más escasa.

### 6.3 Métodos de control de intrusión salina

Existen varios métodos de control para prevenir la intrusión salina. Los más comunes son:

- a) Reducción de la extracción

- b) Recarga artificial
  - c) Fronteras impermeables
  - d) Barrera con pozos de bombeo
  - e) Barrera de pozos de inyección
- 
- a) Reducción de la extracción:

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



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 pueda llevarse a cabo. Las obras para la recarga pueden consistir en zanjas superficiales construídas 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 intrusión 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 de 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 de pozos de inyección:

Este método para control de intrusión salina, 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 suelo.

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 de mar, por cada 30 metros de

espesor del acuífero bajo el mismo nivel de referencia. La cantidad de agua utilizada para dicho fenómeno puede ser estimada. Después de que en la barrera con pozos de inyección, se establece un equilibrio, la cantidad de agua que fluye hacia el acuífero, será la cantidad de agua de mar que intrusiónaba anteriormente, siempre y cuando la explotación de la planicie se haya conservado igual. Para mantener el balance dinámico de esta zona, es necesario que exista un pequeño flujo de agua dulce hacia el mar. La magnitud de este flujo de agua dulce hacia el mar es variable, pero será de alrededor de 10% de la que fluye hacia el acuífero. El número de pozos requeridos para formar la barrera dependerá de las características hidráulicas del acuífero, en especial de la capacidad específica de un pozo de bombeo perforado en la zona.

f) Método Combinado

Barrera por Pozos de Bombeo-Barrera por Pozos de Inyección. Este método utiliza la combinación de los dos métodos anteriores. Para ello, la barrera por pozos de bombeo, es localizada entre la línea de costa y la zona de explotación del valle y la barrera por pozos de inyección se ubica tierra adentro, del otro lado de la zona de explotación. La barrera combinada, compuesta de los dos sistemas, operando simultáneamente, minimiza el efecto

## MÉTODOS PARA EVITAR O CONTROLAR LA CONTAMINACION DEL AGUA SUBTERRANEA

de extracción de agua, así como otros efectos secundarios y permite una mayor flexibilidad en su operación sobre uno solo de los sistemas previamente descritos. Ver Figura 6.1

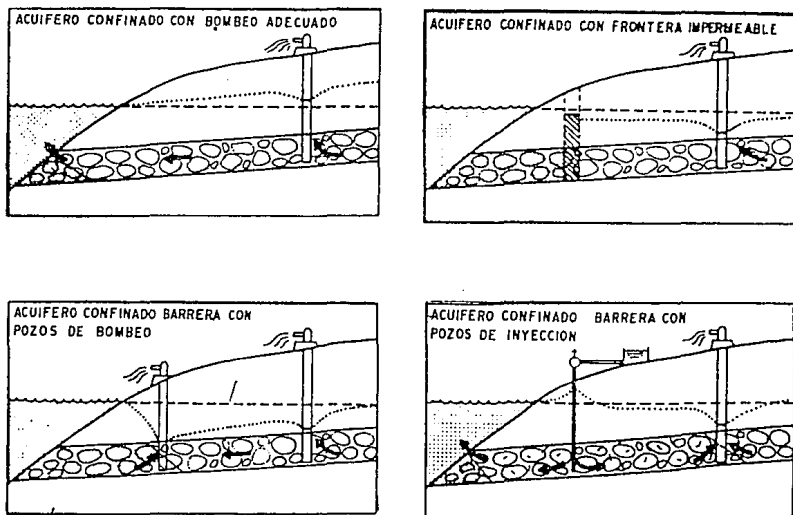


Figura 6.1 Métodos de control de intrusión salina aplicados en un acuífero no confinado.

#### **6.4 Métodos de control de aguas residuales**

##### **6.4.1 Saneamiento de la descarga de aguas residuales**

El abastecimiento de agua como la descarga de las aguas residuales son bienes comunales interrelacionados. Sin embargo, la seguridad y el sabor agradable de su suministro entrañan solamente la preocupación e interés de la comunidad; la evacuación sanitaria de sus aguas residuales es un ejercicio de maduro altruismo y una solicitud para obtener la seguridad y confort de los demás. A causa de esta diferencia, ha sido necesario, generalmente, reforzar el saneamiento de las masas acuáticas receptoras a través de las funciones judiciales, así como legislativas y reguladoras del gobierno. Como se hace constar en el título séptimo de la Ley de Aguas Nacionales en el artículo 86 párrafo cuarto el cual establece que: "La Comisión tendrá a su cargo: formular programas integrales de protección de los recursos hidráulicos en cuencas hidrológicas y acuíferos, considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad de agua. Establecer y vigilar el cumplimiento de las condiciones particulares de descarga que deben satisfacer las aguas residuales que se generen en bienes y zonas de jurisdicción federal de aguas residuales vertidas directamente en aguas y bienes nacionales, o en cualquier terreno cuando dichas descargas puedan contaminar el subsuelo o los acuíferos".

Para satisfacer los requerimientos de la preservación de la calidad del agua, los sistemas de evacuación de aguas residuales deben realizar dos funciones:

- 1) Una colección confiable e inofensiva de las materias de desecho y
- 2) Una evacuación segura de las aguas residuales adecuadamente tratadas a las corrientes receptoras o a la tierra.

De otra manera, como sucedió en las obras antiguas de drenaje, el sistema colector simplemente transfiere los peligros y molestias longitudinalmente desde las inmediaciones de las habitaciones y establecimientos industriales hasta otros sitios.

#### **6.4.2 Control de la calidad de las aguas residuales**

El manejo sanitario de las aguas residuales interviene en cada fase de la evacuación técnica de aquéllas. Se inicia donde termina el suministro de agua, en los accesorios o equipos a través de los que las aguas residuales son vertidas a las atarjeas, continúa con los subcolectores, colectores y emisores hasta las plantas de tratamiento y termina hasta que las corrientes u otras masas receptoras de aguas han sido retornadas a su pureza deseada o se han perdido en el océano.

Además de la transmisión de enfermedades, la contaminación de las aguas receptoras puede causar:

- 1) Deterioro físico, químico y biológico de los abastecimientos de aguas, balnearios, bancos ostrícolas y abastecimientos de hielo
- 2) Condiciones ofensivas a la vista y al olfato
- 3) Destrucción de peces comestibles y de otras formas valiosas de vida acuática
- 4) Enriquecimiento del contenido nutritivo de estanques y lagos (eutroficación) conducente a la degradación y muerte eventual de tales cuerpos receptores de agua
- 5) Efectos sobre el goce y utilidad de las aguas naturales para recreación, agricultura, comercio e industria.
- 6) Efectos nocivos sobre las aguas subterráneas, ya que pueden infiltrarse a los acuíferos y resultar nocivos para la salud, debido a que en algunos lugares de la República Mexicana se consume el agua del pozo sin previo tratamiento y en caso de estar contaminada puede causar efectos nocivos en la salud.



### 6.4.3 Captación y conducción de aguas residuales

Dentro del sistema de drenes ramales que componen los esquemas subterráneos de limpieza urbana, las materias de desecho deberán fluir continua y rápidamente al punto de evacuación. El sistema deberá ser auto limpiante, autoventilante, resistente a la congelación e hidráulicamente hermético. Dentro de los edificios de todas clases, no deberán escapar aire impuro ni líquido del drenaje por los drenes y ventilas de los sistemas de plomería. Tampoco deberán encontrar albergue o rutas convenientes a través de ellos las plagas.

Antes de la introducción de juntas preformadas, muchos alcantarillados perdían algo de líquido en el suelo circundante y recibían algo de agua subterránea. Ambos intercambios son inconvenientes. Su control es económicamente justificable, especialmente cuando las fugas hacia el exterior ponen en peligro al suministro de aguas o la infiltración hacia el interior sobrecarga los colectores. Los modernos materiales para tubería de alcantarillado y los métodos de colocación aseguran hermetismo en situaciones peligrosas; los drenes inferiores dejados en su lugar después de la construcción reducen la percolación, pero pueden contaminar las corrientes de agua donde se vierten.

En sistemas combinados de alcantarillado, existe la posibilidad de que escape algo de aguas negras y residuos industriales con el escurrimiento pluvial a través de los derrames para aguas pluviales.

Entre los objetivos del tratamiento de aguas residuales, tenemos la conservación de los recursos naturales, protección de los medios naturales de recreo, conservación de la salud pública y, la satisfacción de la demanda de agua para diferentes usos.

Los tratamientos más importantes para aguas residuales se basan en procesos biológicos, en el que intervienen microorganismos que degradan los compuestos orgánicos y remueven la materia orgánica. Existen otros tipos de tratamiento, como los físico-químicos.

Para determinar los tipos de tratamiento, se debe determinar la cantidad y calidad del agua residual. El grado de tratamiento que se da a las aguas residuales, varía de acuerdo al empleo para el cual esté destinada. La eliminación de los contaminantes del agua residual puede ser por métodos físicos, químicos o biológicos.

#### **6.4.4 Métodos de tratamiento para el agua residual**

A lo largo de los años, se han desarrollado una gran variedad de métodos para el tratamiento del agua residual. En muchos casos, se combinan varios procedimientos dependiendo de la calidad del agua residual que se va a tratar y la calidad que se desea alcanzar en función del reuso.

#### 6.4.4.1 Métodos físicos

Tratamiento en el cual se llevan a cabo cambios a través de la aplicación de fuerzas físicas. Las unidades típicas incluyen cribado, mezclado, transferencia de gas, sedimentación y filtración.

Rejas y cribas de Barras. Las rejas generalmente tienen una separación de 2.5 a 5 cm, con un ángulo de 45 a 60° con respecto a la vertical. La limpieza puede ser manual o por medio de rastrillos automáticos. Los materiales separados se eliminan enterrándolos, incinerándolos o, triturándolos y reintegrándolos a las aguas de tratamiento.

Desarenadores. La cantidad de sólidos inorgánicos, como la arena y grava, es muy variada y depende principalmente del tipo de sistema de drenaje, sanitario o combinado. Las arenas pueden dañar a las bombas por abrasión, alterar la operación de los tanques de sedimentación y, causar alteraciones en la digestión de los lodos, por acumularse alrededor de las salidas. La eliminación se hace por medio de cámaras, localizadas antes de las bombas y trituradores.

Tanques de preareación. En ocasiones se requiere de una aereación, antes del tratamiento primario para lograr una mayor eliminación de sólidos suspendidos, en los tanques de sedimentación; ayudar a eliminar las grasas y aceites y disminuir la demanda

bioquímica de oxígeno. La aereación propicia la floculación de los sólidos suspendidos más ligeros, formando masas más pesadas que se precipitan rápidamente.

Tanques de sedimentación simple. En estos tanques los sólidos sedimentables, se van acumulando por gravedad en una tolva, de donde se extraen continuamente para evitar que se descompongan y produzcan gases.

#### **6.4.4.2 Métodos químicos**

Operaciones en las cuales la remoción o tratamiento de los contaminantes se realiza mediante la adición de reactivos que llevan a cabo diferentes reacciones químicas. La precipitación y la desinfección son dos de los principales ejemplos de este tipo de método.

##### **Precipitación química**

La remoción de ciertos materiales inorgánicos solubles se puede lograr al agregar reactivos adecuados para convertir las impurezas solubles en precipitados insolubles que pasan así a la fase de floculación y se pueden remover por sedimentación. El grado de remoción que se logra dependerá de la solubilidad del producto. Factores tales como el pH y la temperatura normalmente afectan esto.

Se usa la precipitación química en el tratamiento de agua residual de origen industrial para remover, por ejemplo, metales tóxicos de efluentes del terminado de metales. Es común que tales efluentes contengan cantidades considerables de cromo hexavalente que es dañino para los sistemas biológicos. Si se agrega sulfato ferroso y cal, el cromo se reduce a la forma trivalente que se puede precipitar como un hidróxido.

El uso más extendido de la precipitación química es para el ablandamiento de agua. Las aguas duras, esto es, las aguas que contienen calcio y magnesio en cantidades importantes, frecuentemente requieren ablandamiento para mejorar su calidad para usarlas en el lavado o para calefacción.

### Desinfección

La mayoría de las aguas residuales y efluentes tratados contienen gran cantidad de microorganismos por lo que es conveniente desinfectar tales líquidos, aunque en general no se recomienda la desinfección rutinaria de los efluentes. La desinfección de un efluente antes de la descarga tenderá a retardar las reacciones de autopurificación en el agua receptora; así mismo la formación de productos de reacción que resultan de las interacciones de compuestos orgánicos y desinfectantes suele ser indeseable en aguas que se usan como fuentes de abastecimiento potable.

El cloro se usa ampliamente para la desinfección del agua debido a que se obtiene fácilmente como gas, líquido o polvo, es barato, es fácil de aplicar debido a una solubilidad relativamente alta, deja un residuo en solución que no es dañino para el hombre y protege el sistema de distribución y es muy tóxico para la mayoría de los microorganismos, ya que detiene las actividades metabólicas. Tiene algunas desventajas como el ser un gas venenoso que requiere un manejo cuidadoso y puede causar problemas de sabor y olor, especialmente en presencia de fenoles.

El ozono es un poderoso agente oxidante así como desinfectante, es útil en el blanqueado del color y en la remoción de sabores y olores. Como el oxígeno, es sólo ligeramente soluble en el agua y debido a su forma inestable, no deja residual. A menos que se disponga de energía barata, el tratamiento con ozono es mucho más caro que la cloración, pero tiene la ventaja de remover bien el color.

### **6.4.4.3 Métodos biológicos**

Son los métodos de tratamiento en los cuales se involucra la actividad de los microorganismos para la remoción y/o transformación de contaminantes. Los métodos biológicos son utilizados para la remoción de materia biodegradable del agua residual. Básicamente los contaminantes presentes en el agua residual son transformados por los microorganismos en materia celular, energía para su metabolismo y en otros compuestos

orgánicos e inorgánicos.

Los procesos biológicos se dividen en dos grupos: aerobios y anaerobios.

#### Proceso anaerobio

Se caracteriza por tener una baja tasa de síntesis bacteriana (baja producción de desecho), ya que el 90% de la energía se utiliza en la producción de metano mientras que el 10% restante se emplea para la síntesis celular.

#### Proceso aerobio

En este proceso el 65% de la energía es utilizada para la síntesis celular, por lo que hay mayor generación de biomasa (lodo no estabilizado), cuyo tratamiento y disposición incrementa la dificultad técnica y el costo total de tratamiento.

El proceso anaerobio es un productor de energía ( $\text{CH}_4$ ), mientras que el aerobio es un consumidor de ésta en forma de agitación y oxigenación. Sin embargo, el proceso anaerobio es más sensible a cambios ambientales y requiere un mayor tiempo de arranque.

Con base en los contaminantes que deben ser eliminados, el número de procesos que

pueden combinarse es ilimitado. El término diagrama de flujo se usa para describir una combinación particular de procesos o sistemas empleados para alcanzar un objetivo específico de tratamiento.

Independientemente del análisis de factibilidad técnica de cada tratamiento, la configuración exacta del diagrama de flujo depende de:

- 1) Las necesidades de tratamiento
- 2) La experiencia del diseñador
- 3) Regulaciones dadas por los organismos responsables
- 4) Disponibilidad del espacio
- 5) Facilidad en su operación
- 6) Disponibilidad de personal calificado
- 7) Costos iniciales de construcción



**8) Costos de operación y mantenimiento**

En un tratamiento primario, una porción de los sólidos suspendidos y la materia orgánica es eliminada del agua residual. Esta remoción es generalmente realizada mediante procesos físicos. El efluente del tratamiento primario contiene aún materia orgánica y una DBO (demanda bioquímica de oxígeno) alta. El tratamiento del efluente primario elimina la materia orgánica disuelta residual y suspendida; a esta etapa se le conoce como tratamiento secundario.

**6.4.4.4 Métodos para la impermeabilización de lagunas**

Es muy común que las lagunas requieran un revestimiento para controlar las pérdidas por filtración que, además de resultar costosas, pueden contaminar el área circundante. El punto más importante es que el revestimiento se coloque sobre una base estable aún en estado saturado. Cualquiera que sea el tipo de revestimiento considerado.

Los mecanismos de revestimiento son: por sellado natural y tratamientos químicos, revestimientos rígidos y revestimientos flexibles.

### Mecanismos de sellado natural y tratamientos químicos

El sellado natural de una laguna puede ocurrir por alguno de los mecanismos siguientes:

- a) Taponamiento físico de los vacíos
- b) Taponamiento químico de los vacíos del suelo por intercambio iónico; y
- c) Taponamiento biológico y orgánico por crecimiento microbiano en el fondo del estanque.

Varios productos químicos que se mezclan con el suelo han sido usados con grados de éxito muy variables para sellar lagunas. Los cationes monovalentes (iones de sodio, potasio y amonio) disminuyen químicamente la porosidad del suelo al reemplazar los cationes polivalentes cálcicos.

Otra categoría de productos químicos está constituida por los aditivos que se agregan al agua para reducir las filtraciones. Algunos productos, a base de polímeros, aumentan la atracción iónica de las partículas del suelo hacia el agua, con lo que se incrementa el diámetro efectivo de las mismas y se reducen las dimensiones de los poros. Los principales atractivos de éstos son su bajo costo y la posibilidad que ofrecen de corregir en cierta medida los problemas de filtración sin tener que vaciar la laguna.

Las arcillas altamente expansivas, tales como la bentonita, pueden reducir efectivamente la permeabilidad del suelo natural al humedecerse.

### Revestimientos rígidos

Los revestimientos rígidos más comunes se hacen a base de concreto hidráulico, suelo-cemento y concreto asfáltico. Los revestimientos a base de concreto hidráulico algunas veces presentan una solución óptima, mientras que otras veces han presentado graves problemas de filtración.

El revestimiento suelo-concreto no es muy recomendable, ya que no es impermeable y siempre presenta grietas de contracción que solamente pueden reducirse.

El concreto asfáltico se usa básicamente como protección mecánica de otro revestimiento.

### Revestimientos flexibles

Los revestimientos flexibles más comunes son los siguientes: membranas sintéticas, membranas asfálticas, elementos prefabricados a base de asfalto y revestimientos a base de suelos compactados.

Las membranas sintéticas son plásticas y elastoméricas con ellas se obtiene una permeabilidad prácticamente nula. Estas membranas resisten el ataque de la mayoría de los productos químicos y dan lugar a filtraciones muy bajas. Las más conocidas son de cloruro de polivinilo (PVC), Polietileno (PE), Hule butilo (EPT EPDM), Policloropreno (neopreno), polietileno clorosulfonatado (hypalon) y poliiolefin elastizado (3110).

#### **6.5 Procesos para la evacuación de lodos**

El lodo, producto del tratamiento del agua residual debe someterse a un tratamiento capaz de modificar sus características, para que puedan disponerse sin poner en peligro la salud pública y el ambiente, además de disminuir su volumen para facilitar su manejo y disposición final.

Los sólidos separados de las aguas residuales en las plantas de tratamiento contienen mucha agua y materia orgánica.

Entre los objetivos del tratamiento de lodos además de reducir su volumen para facilitar su manejo, es economizar espacio para su almacenamiento en el digestor, capacidad en las bombas y, cantidad de calor y energía por lo que se deshidratan y estabilizan. Los principales métodos de tratamiento son el espesamiento, digestión con o sin calentamiento,

secado sobre lechos de arena, acondicionamiento químico, elutriación, filtración al vacío y, secado por calentamiento.

#### **6.5.1 Tratamiento por espesamiento**

Consiste en concentrar los lodos diluidos para hacerlos más densos, se emplea principalmente para el exceso de lodos acuosos, del proceso de tratamiento de lodos activados. Los lodos del tanque sedimentador son bombeados al tanque espesador, equipado con paletas verticales de movimiento lento que permiten la concentración de sólidos en el fondo. Con este método se pueden obtener lodos con un contenido de sólidos de más del 10% logrando eliminar cerca de 4/5 partes de agua, permitiendo emplear unidades de digestión más pequeñas.

#### **6.5.2 Digestión con o sin calentamiento**

El objetivo de la digestión es disminuir el volumen y lograr la concentración de la materia orgánica, hasta formar compuestos orgánicos e inorgánicos inertes o estables.

La digestión de los lodos se lleva a cabo en tanques diseñados para este propósito

y, en ausencia de oxígeno libre. La composición de los lodos es aproximadamente del 70% de materia orgánica y 30% de inorgánica. La mayor parte del agua es embebida, que no se separa de los sólidos, los microorganismos rompen esta compleja estructura molecular, liberando el agua y obteniendo oxígeno para su desarrollo.

La degradación de la materia realizada por los microorganismos, se clasifica en varias etapas: de fermentación ácida, en esta etapa las bacterias descomponen rápidamente los sólidos disueltos, como azúcares, produciendo ácidos orgánicos y gases, como el anhídrido carbónico y ácido sulfhídrico, el pH del lodo disminuye a valores menores de 5.1.

En la segunda etapa los microorganismos, a los que favorece el ambiente ácido, descomponen con menor rapidez los ácidos orgánicos y compuestos de nitrógeno, el pH aumenta hasta valores de 6.8. En la tercera etapa las bacterias degradan los compuestos nitrogenados más resistentes, como las proteínas y aminoácidos, produciendo gran cantidad de gases, un 70% inflamable, el pH aumenta a valores de 7.4. Los sólidos que no alcanzan a ser degradados son relativamente estables, pudiendo disponerse sin originar condiciones contaminantes.

Los lodos que han tenido buena digestión presentan color negro, olor no desagradable, estructura granular y muestran claramente las canalizaciones por donde ascendió el agua.

La calidad y tiempo requerido para la digestión de lodos, efectuada por lo microorganismos, esta determinada por las condiciones en que se desarrolla, algunos factores determinantes son:

- a) La temperatura afecta directamente el tiempo en que se completa la digestión, en promedio se completa hasta el 90% en 55 días a 13°C. Los métodos que se emplean para suministrar calor son: circulando agua caliente a 50°C a través de tuberías o serpentines fijados en el interior de las paredes del tanque, e inyectando vapor en el fondo del tanque.
  
- b) La cantidad de alimento, proporcionada a las bacterias, afecta de manera directa la eficiencia del tanque digestor. Cuando se introducen demasiados lodos, se produce gran cantidad de ácidos en la primer etapa, originando condiciones desagradables para las siguientes etapas. Cuando se suministran lodos, en pequeñas cantidades a intervalos frecuentes aumenta la eficiencia del tanque digestor.
  
- c) El valor del pH en que se presentan las mejores condiciones para que las bacterias digieran mejor los lodos, varía de 6.8 a 7.4, las variaciones representativas son causadas por las características que presentan los lodos frescos que se agregan y los que se encuentran en el tanque digestor.

### 6.5.3 Secado sobre lechos de arena

Los lechos de arena están formados por una capa de grava de 30 cm de profundidad, bajo una capa de arena limpia de 15 a 20 cm. El riego de lodo se hace a 30 cm de la superficie de la capa de arena. Con este método se logra eliminar gran cantidad del agua contenida en los lodos, quedando con un contenido de humedad menor al 70%. El secado se realiza por dos fenómenos, uno es el drenaje, cuando se riegan los lodos se desprenden los gases, que contiene el lodo, haciendo que los sólidos floten y lo líquidos drenen a través de la arena; y el otro la evaporación del agua, que seca y agrieta la superficie del lodo.

Las tuberías que hacen el riego de lodos sobre el lecho de arena deben escurrirse con agua, no solo para evitar la acumulación de lodos sino para evitar el aumento de presión por los gases que contiene en su interior. Estos gases mezclados con aire son muy explosivos, por lo que debe tomarse precauciones para su manejo.

### 6.5.4 Acondicionamiento químico

La finalidad del acondicionamiento químico es bajar el pH a un valor donde las partículas más finas se coagulan, formando otras de mayor tamaño, permitiendo la separación del agua con mayor facilidad. Algunos productos químicos empleados son: el



ácido sulfúrico, alumbre, sulfato ferroso y cloruro férrico, entre otros. Debe determinarse el valor del pH para cada uno de ellos.

#### **6.5.5 Elutriación**

Este método consiste en extraer con agua los compuestos que se encuentran en cantidades excesivas entre los lodos, con la finalidad de reducir la demanda de coagulantes. Los lodos se mezclan con agua del efluente de la planta, con agitación mecánica o aire difundido, por un período muy corto, menor a 20 seg, después se dejan sedimentar y el agua se regresa al tratamiento, de aguas residuales. Este método se emplea como pretratamiento antes de la coagulación con productos químicos.

#### **6.5.6 Filtración al vacío**

Este método se usa para eliminar el agua de los lodos, para ello se emplea el filtro al vacío, consta de un tambor sobre el cual se coloca un medio filtrante, tela de algodón, fibra de vidrio, plástico entre otros materiales. El tambor va montado en un tanque sobre su eje horizontal y sumergido, aproximadamente una cuarta parte en el lodo; la tubería y válvulas están dispuestos de tal manera que conforme el tambor gira aplicando el vacío en

el interior del medio filtrante va absorbiendo el agua del lodo; se continúa aplicando el vacío hasta que el tambor gira fuera del lodo con esto se logra extraer el agua, quedando una capa de lodo adherida en la superficie exterior del tambor, esta se quita antes de volverlo a introducir en el tanque del lodo.

Los costos de operación son mayores que los de secado en lechos de arena, pero la filtración requiere menor superficie, no es afectada por las estaciones del año y, elimina la necesidad de digerir los lodos, ya que el grado de deshidratación es tal que permite su incineración.

#### **6.5.7 Secado por calentamiento**

Este método se emplea cuando los lodos van a incinerarse, el grado de secado debe permitir encenderlos y quemarlos. En el secado se emplea el horno secador rotatorio y el secador instantáneo. En el horno secador rotatorio, los lodos están por un extremo y son llevados a la descarga por gravedad, deshaciéndose y mezclándose por medio de deflectores helicoidales, fijados en las paredes del cilindro; se inyectan gases calientes quedando en contacto con los lodos más fríos, la temperatura media no debe exceder de 370°C. Estos secadores se emplean generalmente para lodos deshidratados, procedentes de los filtros al vacío, estos lodos están aglomerados, secos en su superficie y húmedos en su centro, se

recirculan con los lodos que entran en el cilindro, para reducir su contenido de humedad.

## **6.6 Métodos de control de disposición de residuos sólidos**

### **6.6.1 El relleno sanitario**

El relleno sanitario es una forma de disposición final de desechos sólidos, en la que éstos son compactados y cubiertos con una capa de suelo al final de cada día de operación. La existencia de un terreno para formar un relleno sanitario hace que éste sea el método más económico y frecuentemente aceptable para la disposición de los desechos sólidos. A continuación se indican las ventajas y desventajas que presenta un relleno sanitario, ya que en el fondo se recubre con una capa de polietileno impermeable y en algunos hay tubos colectores para que en caso de percolación recojan los líquidos lixiviados infiltrados en el terreno, pues de esta manera se mantendrá a los lixiviados alejados de las aguas subterráneas y se evitará la contaminación de las mismas.

#### **6.6.1.1 Consideraciones generales para el establecimiento de un relleno sanitario**

- a) Decidir la cantidad del terreno necesario para la disposición residuos de una

determinada población. En términos generales, su superficie de 0,84 metros cuadrados con una profundidad de 1,80 metros, por persona y año.

- b) Asignar una zona de fácil acceso y, preferentemente, en las inmediaciones de la ciudad.
- c) Procurar que el lugar sea estética e higiénicamente compatible con el medio ambiente.
- d) Evitar poner en riesgo las aguas subterráneas. Para lograr este objetivo es necesario asegurarnos de impermeabilizar en su totalidad la zona de deposición del relleno para evitar que los lixiviados lleguen a los mantos acuíferos, además de llevar un buen control en el manejo diario ya que de lo contrario es probable que se ponga en riesgo las aguas subterráneas.
- e) Buscar que la tierra del sitio sea la indicada para servir como recubrimiento. La mezcla ideal es 50% de arena y 50% de arcilla o limo.
- f) Oposición de los habitantes
- g) Proximidad a las principales carreteras

- h) Límites de velocidad
- i) Limitaciones para el tránsito de vehículos de carga pesada en las carreteras
- j) Capacidad y altura de los puentes existentes
- k) Flujo vehicular y congestionamientos
- l) Disponibilidad de material para cobertura de desechos
- m) Clima
- n) Planeación municipal de uso del suelo
- o) Areas de amortiguamiento alrededor del sitio

Los métodos usados en la operación del relleno sanitario son básicamente el de área y el de trinchera. En algunos casos se utilizan los dos métodos simultáneamente o secuencialmente.

En el método de área los residuos sólidos se depositan en la superficie, se compactan

y se cubren con una capa de suelo compactado al término de las operaciones del día. El uso de éste es restringido por la topografía; es aplicable en terrenos planos o sinuosos, cañones, y otro tipos de depresiones.

El método de trinchera se utiliza donde el terreno tiene una pendiente muy suave y el nivel de aguas freáticas es profundo. El procedimiento que se sigue es excavar la trinchera, esparcir y compactar los residuos sólidos, cubrirlos con el suelo producto de la excavación de la trinchera y finalmente compactarlos. La ventaja de éste es que el material de cubierta que se utiliza es el material producto de la excavación de la trinchera. La profundidad de la trinchera depende del nivel de aguas freáticas y de las características del suelo. El ancho de las trincheras debe ser de al menos dos veces el ancho de la maquinaria para que pueda compactarse el material en el área de trabajo.

Con el fin de prevenir la contaminación del agua subterránea se requieren estrictas medidas de control. Algunos requerimientos para el control de lixiviados en el relleno sanitario incluyen varias acciones para captarlo. Estas son:

1. Tubería de drenaje
2. Membrana plástica

3. Segunda capa de tuberías de drenaje
4. Segunda membrana
5. Arcilla impermeable

En el cuadro 6.1 se presentan las ventajas y desventajas de un relleno sanitario.

Cuadro 6.1 Ventajas y Desventajas de un relleno sanitario

VENTAJAS	DESVENTAJAS
1. Cuando se dispone de terreno, un relleno sanitario generalmente es el método más económico para la disposición de los desechos sólidos.	1. En áreas altamente pobladas, puede no ser adecuado económicamente, si la distancia de transporte es importante.
2. La inversión inicial es menor comparada con otros métodos de disposición.	2. Un relleno sanitario debe ser operado convenientemente o puede resultar en un tiradero a cielo abierto.
3. El relleno sanitario es un método de disposición final comparado con otros métodos. Su único producto problemático es el lixiviado.	3. Los rellenos sanitarios localizados en áreas residenciales pueden provocar fuerte oposición por parte de los habitantes.
4. Un relleno sanitario puede recibir todo tipo de desechos sólidos, eliminando la necesidad de colectores de separación	4. Un relleno terminado puede asentarse y requiere de mantenimiento periódico.
5. Un relleno sanitario es administrativamente flexible: puede aumentarse la capacidad de manejo de desechos sólidos con un incremento limitado en personal o equipo.	5. La construcción de edificios sobre rellenos sanitarios requiere de diseño especial, debido a los asentamientos de terreno.
6. El terreno de un relleno sanitario terminado puede usarse como estacionamientos, parques de recreo, aeropuertos, terrenos de golf, etc.	6. El metano es un gas explosivo, y los demás gases producidos de la descomposición pueden llegar a ser un peligro o impedimento para el uso posterior del relleno terminado.



## CAPITULO 7

### CONCLUSIONES

Del agua dulce que hay en el planeta el 95% es agua subterránea, por lo que resulta un recurso de gran importancia. Además, en muchos lugares el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento de agua para consumo humano y para el desarrollo de actividades productivas.

Debido a la presencia de contaminantes que por procesos naturales o artificiales contiene el agua. En particular la contaminación biológica originada, principalmente, por el contacto del agua con materia fecal, puede generar diversas enfermedades infecciosas, algunas de ellas de proporciones epidémicas.

El suelo y los materiales no consolidados, constituyentes de la zona no saturada, funcionan como una barrera muy eficaz contra la contaminación de los acuíferos, sin embargo, bajo ciertas condiciones hidrogeológicas (alta porosidad, permeabilidad y transmisibilidad) los contaminantes patógenos pueden salvar esa barrera y alcanzar las captaciones de agua subterránea para consumo humano.

El riesgo de contaminación es muy alto cuando el nivel freático se encuentra muy somero y/o cuando un acuífero muy permeable se halla apenas cubierto por una delgada capa de material suelto.

Con el fin de evitar y controlar la contaminación del agua subterránea se considera conveniente efectuar una zonificación de las condiciones existentes en cada cuenca o región, atendiendo al riesgo de contaminación de los acuíferos basada en la clasificación e interacción de la vulnerabilidad natural del acuífero y la carga contaminante generada por el hombre al subsuelo; con objeto de identificar las áreas más problemáticas, establecer prioridades para su atención y formular programas de estudio detallados ya que la escasez de datos confiables ha impedido la realización de una evaluación regional de la situación actual de la calidad de las aguas subterráneas. Sin embargo, en algunas áreas se ha comprobado la existencia de una seria contaminación de aguas subterráneas y, en muchos otros casos existe evidencia de deterioro significativo en su calidad.

La vulnerabilidad del acuífero a la contaminación podría ser empleada para establecer prioridades en las políticas de protección de acuíferos, en las que cada actividad potencialmente contaminante necesitará un control apropiado.

El grado de atenuación dependerá en gran medida del régimen de flujo y del tiempo de retención en la zona no saturada.

La atenuación del problema reside básicamente en tomar en cuenta que la "NO EVIDENCIA", no indica la no presencia de contaminantes en el agua subterránea, tomando ésto como punto de referencia, debemos concientizarnos, ya que las aguas subterráneas no se contaminan de un día para otro, sino que es un proceso paulatino el cual puede tomar muchos años en presentarse y sin embargo puede estar latente.

Otro aspecto importante es que la contaminación del agua subterránea a partir de que se ha presentado es "PRACTICAMENTE IRREVERSIBLE", ya que solamente podemos controlarla a través de procedimientos muy costosos como son:

- Sistemas de drenes para recolectar lixiviados
- Zanjas interceptoras
- Barreras impermeables que conduzcan el flujo
- Cuando la contaminación es puntual puede darse un tratamiento "in situ", ya sea:
  - Biológico
  - Químico

La infiltración de aguas residuales ya sea municipales, industriales o escorrentías de usos agrícolas son un inminente riesgo de contaminación a los acuíferos, ya que el saneamiento "in situ", la creciente variedad y complejidad de productos químicos (algunos hidrocarburos a pesar de su volatilidad son solubles y móviles en los sistemas de aguas

subterráneas) y todas las aguas residuales descargadas directamente al suelo representan una seria amenaza a largo plazo para la calidad de las aguas subterráneas.

La migración de contaminantes hacia el acuífero, en las zonas de influencia de los rellenos sanitarios es un aspecto de gran importancia debido al riesgo de daño al agua subterránea, que en muchas ciudades, como en la de México, es la principal fuente de abastecimiento. Las causas de la migración de contaminantes en las zonas de los rellenos sanitarios, por lo general se debe a la generación y transporte de lixiviados, pero también es fundamental el tipo de suelo, las condiciones geológicas y las obras de drenaje del relleno.

La naturaleza del subsuelo en los acuíferos costeros que son la fuente de abastecimiento en zonas áridas y semi-áridas, y los patrones de bombeo, determinarán en mayor o menor medida si se presenta el fenómeno de intrusión salina, ya que el agua de lluvia podrá percolarse o no para unirse al agua subterránea de tal modo que se mantenga una descarga que impida el cambio de dirección del flujo de agua en el acuífero la cual normalmente es con descarga al mar. Por otro lado, como ya se trató en el capítulo 3 "Intrusión Salina", la sobreexplotación del agua subterránea en acuíferos costeros puede producir la intrusión de agua del mar en el acuífero.

Con base en lo anterior, debe procurarse la disposición adecuada de aguas residuales, lodos biológicos, residuos sólidos y la explotación racional del agua subterránea; así como

también el uso racional del agua, mayor reciclaje de productos y el tratamiento adecuado de los desechos para reducir o eliminar la contaminación del agua subterránea.

## **BIBLIOGRAFIA**

**AARNE, Vestlind**  
Treatment and Disposal of Wastewater Sludges  
Second printing  
United States of America, 1980

**AUVINET, Gabriel; Esquivel, Raúl**  
Impermeabilización de lagunas artificiales  
Limusa  
Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos  
Primera edición  
México, 1986

**BAEZA, Hernán**  
Pozos de Captación Subterránea próximos a la costa  
Trabajo presentado en el VII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria.  
Montevideo, 1960

**BENTAL, Ray**  
Métodos para la recopilación e interpretación de datos sobre aguas subterráneas  
Lito Impresos finos, S. A.  
México, 1968

**CESAR, Valdez Enrique**  
Abastecimiento de Agua Potable  
UNAM  
Segunda edición  
México, 1991

CHAVEZ, Guillén Rúben  
Apuntes de Geohidrología  
Parte 1  
UNAM

ECKENFELDER  
"Process Selection Criteria for the Biological Treatment of Industrial Wastewaters"  
Environmental Progress (V.8, No. 1)  
1979

FAIR, Geyer y Okun  
Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales  
Limusa-Wiley S.A.  
Primera edición  
México, 1971

FAIR, Geyer y Okun  
Abastecimiento de agua y remoción de aguas residuales  
Limusa S.A.  
Quinta reimpresión, primera edición  
México, 1983

FRIEDRICH, Ebert  
Política Ambiental en México  
México, 1991

HERNANDEZ, R.A.  
Depuración de Aguas Residuales  
México, 1990

**ITURBIDE, Rosario**  
**Agua subterránea y Contaminación**  
**Series del Instituto de Ingeniería**  
**México, 1992**

**LESSER, I. Juan Manuel**  
**Apuntes de Geohidrología**  
**Parte 2**  
**UNAM**

**Ley Nacional de Aguas Residuales**  
**Comisión Nacional del Agua**  
**México, 1992**

**MONROY, Oscar**  
**Manejo y Disposición de Residuos Sólidos**  
**Desarrollo y Medio Ambiente**  
**México, 1987**

**RAMALHO, R.S.**  
**Tratamiento de Aguas Residuales**  
**Reverte, S.A.**  
**Barcelona, 1991**

**TEBBUTT, T.H.Y.**  
**Fundamentos de Control de la Calidad del Agua**  
**Limusa S. A. de C.V.**  
**Primera edición**  
**México, 1990**



TODD, D.K.  
Ground Water Hydrology J. Wiley  
1959

Universidad Central de Venezuela  
Desarrollo de Aguas Subterráneas  
Caracas, 1967