

# ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS

CARLOS GUTIÉRREZ OJEDA  
LETICIA BECERRA SORIANO





# **ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS**

---

M.C. Carlos Gutiérrez Ojeda  
M.I. Leticia Becerra Soriano

Coordinación de Hidrología Subcoordinación  
de Hidrología Subterránea

2014

---

553.79 Gutiérrez Ojeda, Carlos  
G69 Estado del arte de la remediación de acuíferos contaminados / Carlos Gutiérrez  
Ojeda y Leticia Becerra Soriano.– Jiutepec, Mor., Instituto Mexicano de Tecnología  
del Agua, ©2014.  
88p.  
ISBN: 978-607-7563-83-9

1. Acuíferos 2. Contaminación de aguas subterráneas 3. Investigación

---

Coordinación editorial:  
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Coordinación de Hidrología

Coordinación de Comunicación,  
Participación e Información.

Subcoordinación de Vinculación, Comercialización  
y Servicios Editoriales.

Diseño editorial:  
Gema Alín Martínez Ocampo

Diseño de portada:  
© Óscar Alonso Barrón

Primera edición: 2014.

Colección: *Avances del conocimiento.*

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
Paseo Cuauhnáhuac 8532  
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos  
MÉXICO  
ISBN: 978-607-7563-83-9

Impreso en México – *Printed in Mexico*

## CONTENIDO

Contenido	
Introducción	9
1. ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN	11
1.1. CONTAMINACIÓN NATURAL	12
1.2. CONTAMINACIÓN ANTROPOGÉNICA	13
1.2.1. Agrícolas	14
1.2.2. Contaminación colateral a actividades urbano–industriales	16
1.2.3. Industriales y energéticas	17
1.2.4. Mineras	17
1.2.5. Nucleares	18
1.2.6. Urbanas	18
2. CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO	21
2.1. MICROORGANISMOS PATÓGENOS	22
2.2. COMPUESTOS QUÍMICOS INORGÁNICOS	24
2.3. COMPUESTOS ORGÁNICOS	28
3. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL TRATAMIENTO	35
3.1. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRATAMIENTO	36
3.2. FLUJO	37
3.3. CONCENTRACIÓN DEL FLUJO DE ENTRADA	40
3.4. REQUERIMIENTOS DE DESCARGA	44
4. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS	47
4.1. TÉCNICA DE CONFINAMIENTO	49
4.1.1. Barreras de lodo	49
4.1.2. Lechada de cemento	50
4.1.3. Barreras químicas	50
4.1.4. Barreras de paneles	51
4.1.5. Membranas sintéticas	51
4.1.6. Vitrificación in situ	52
4.2. TÉCNICA DE TRATAMIENTO IN SITU	53
4.2.1. Biológico	53
4.2.2. Fisicoquímico	55
4.3. TÉCNICA DE TRATAMIENTO EX SITU	60
4.3.1. Desadsorción térmica	60

4.3.2.	Lavado del suelo	61
4.3.3.	Extracción por solventes	62
4.3.4.	Deshalogenación química	63
5.	TÉCNICAS DE SANEAMIENTO DE GASOLINA	67
5.1.	ASPECTOS GENERALES	67
5.2.	MEDICIÓN Y DETECCIÓN DE VOLÁTILES EN EL SUBSUELO	68
5.3.	CARACTERÍSTICAS DE LAS GASOLINAS	68
5.4.	TRANSPORTE DE LÍQUIDOS	69
5.5.	TRANSPORTE DE VAPORES	70
5.6.	TÉCNICAS DE SANEAMIENTO	70
5.6.1.	Excavación	71
5.6.2.	Volatilización	71
5.6.3.	Biodegradación	72
5.6.4.	Vitrificación	73
5.6.5.	Aislamiento	73
5.6.6.	Extracción de agua y tratamiento	75
5.6.7.	Autoeliminación	77
5.7.	CONCLUSIONES	77
6.	APLICACIONES DE TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN EN MÉXICO Y EL MUNDO	79
7.	REFERENCIAS	85

## ÍNDICE DE TABLAS

2.1	Contaminantes biológicos de origen antropogénico.	23
2.2	Contaminantes químicos de origen antropogénico (inorgánicos).	25
2.3	Contaminantes químicos de origen antropogénico (orgánicos).	29
4.1	Matriz de selección de tecnologías de remediación.	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

1.1 Fuentes de contaminación antropogénicas.	13
1.2 Actividades antropogénicas que producen contaminación.	14
2.1 Clases de contaminantes.	21
2.2 Algunos tipos de contaminantes microbiológicos de origen antropogénico.	22
2.3 Algunos tipos de contaminantes químicos inorgánicos de origen antropogénico.	24
2.4 Algunos tipos de contaminantes químicos orgánicos de origen antropogénico.	28
3.1 Pluma de contaminación en un acuífero.	37
3.2 Zona de influencia de un pozo de bombeo	39
3.3 Derrame de gasolina flotando sobre el nivel freático de un acuífero	41
3.4 Derrame de tricloroetileno atravesando un acuífero.	42
3.5 Variación de la concentración del contaminante con el tiempo.	43
3.6 Efecto de un pozo de recarga en la dirección del flujo subterráneo	45
3.7 Efecto de un pozo de recarga en la dirección del flujo subterráneo	45
4.1 Esquema de una sección de sistema de barrera de lodo ( <a href="http://www.uclm.es">www.uclm.es</a> ).	49
4.2 Esquema del proceso de inyección de lechada de cemento por debajo de un área contaminada ( <a href="http://www.uclm.es">www.uclm.es</a> ).	50
4.3 Esquema de una barrera química, inyectada bajo la zona contaminada ( <a href="http://www.uclm.es">www.uclm.es</a> ).	50
4.4 Instalación de una barrera de paneles, cuyas uniones quedan selladas mediante un dispositivo mecánico ( <a href="http://www.uclm.es">www.uclm.es</a> ).	51
4.5 Extensión de una geomembrana en una zanja perimétrica respecto al área a aislar ( <a href="http://www.uclm.es">www.uclm.es</a> ).	51
4.6 Esquema de funcionamiento de un sistema de vitrificación, sobre la base de una corriente de alto voltaje y un sistema de recuperación de los gases emitidos para su tratamiento ( <a href="http://www.uclm.es">www.uclm.es</a> ).	52
4.7 Procesos involucrados en la fitorremediación	54
4.8 Procesos de eliminación por atenuación natural controlada.	55
4.9 Representación esquemática de una barrera reactiva permeable.	56
4.10 Combinación de las técnicas de extracción de vapor y aireación por debajo del mismo.	56
4.11 Sistema de "flushing in situ" sobre una porción de suelo contaminado.	57

4.12 Técnica de tratamiento térmico basada en la extracción de contaminantes a través de la inyección de vapor.	57
4.13 Representación de la técnica de oxidación química.	58
4.14 Técnica de tratamiento térmico basada en la extracción de contaminantes a través de la electrodescontaminación.	59
4.15 Sistema de fracturación neumática basado en el empleo de aire a presión para ayudar en la movilización de los contaminantes del suelo.	60
4.16 Esquema de un sistema de desadsorción térmica.	61
4.17 Representación de un sistema de lavado de suelos.	62
4.18 Esquema de un sistema de extracción por solventes.	63
4.19 Proceso de la técnica de deshalogenación química.	64
5.1 Productos del petróleo flotando en la parte superficial del acuífero (Nyer, 1985).	67
5.2 Ventilación del suelo y arrastre de volátiles (Lesser y Asociados, 1990).	72
5.3 Biodegradación aplicando nutrientes y oxígeno (Lesser y Asociados, 1990).	72
5.4 Barrera para el aislamiento de zonas contaminadas (Lesser y Asociados, 1990).	74
5.5 Barrera mediante inyección de bentonita y cemento (Lesser y Asociados, 1990).	75
5.6 Recolección de productos del petróleo por abatimiento del nivel freático (Nyer, 1985).	76
5.7 Separación de agua y gasolina en un pozo con bombas controladas por detectores de agua y gasolina (Lesser y Asociados, 1990).	76



## INTRODUCCIÓN

El objetivo de este libro es el proporcionar al lector un panorama de las tecnologías de remediación de aguas subterráneas contaminadas. La limpieza del agua subterránea es un problema complejo y caro. Existe una amplia variedad de tecnologías para la remoción de los componentes presentes en el agua, sin embargo los sistemas de tratamiento convencionales deben ser modificados antes de su aplicación en la limpieza del agua subterránea. Este libro pretende ser una breve guía introductoria para que el lector interesado en el tema conozca los principios básicos de la contaminación y de las técnicas de remediación existentes del agua subterránea. Muchos problemas de contaminación son tratados con reserva por los problemas sociales que pueden involucrar, mientras que la mayoría de las tecnologías de remediación se encuentran en desarrollo o están patentadas por instituciones de países desarrollados, por lo que en ocasiones la información disponible es limitada. Muchas tecnologías han surgido de las actividades de investigación que se llevan a cabo en los programas de gobierno especiales como los “Superfund” de los Estados Unidos de América (EUA) para la remediación de acuíferos contaminados. Para mayor información de cada técnica se recomienda consultar la referencia mencionada.

El libro trata de resumir el conocimiento actual y experiencia en la limpieza del agua subterránea. El objetivo de la limpieza no debe ser la simple remoción de toda la contaminación. La solución a largo plazo debe ser permanente así como técnica y económicamente factible. Una rápida solución a un problema de contaminación puede presentar problemas dos o tres años después de terminados los trabajos de limpieza. Por otro lado, el método de limpieza más caro no debe ser considerado necesariamente como la mejor estrategia de limpieza. Es importante que los ingenieros que diseñan y que regulan los trabajos de limpieza entiendan lo que es posible y lo que económicamente es factible en cuestiones de limpieza del agua subterránea.



## ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN

Los mecanismos de recarga del agua subterránea y la capacidad de atenuación natural del suelo a los contaminantes varían ampliamente con las condiciones geológicas cercanas a la superficie del terreno (Foster, 2003). Para determinar la necesidad de remediación de la contaminación del agua subterránea, por lo general es necesario realizar un análisis del sistema suelo-agua subterránea y analizar tres aspectos determinantes: 1) foco de la contaminación, 2) mecanismo de infiltración y 3) tipo de contaminante.

La mala calidad del agua subterránea puede ser debida a causas naturales o actividad humana.

El “progreso” dirigido a mejorar la calidad de vida de la población, ha motivado la producción y el uso desordenado de compuestos químicos con diferentes fines: productos de limpieza, agrícolas y tecnológicos. Uno de los resultados negativos ha sido la contaminación del recurso hídrico, ya que algunos contaminantes son relativamente fáciles de retirar y depurar pero otras veces el daño es prácticamente irreversible. En el caso del agua subterránea, la contaminación es perceptible cuando alcanza niveles altos de deterioro, e invariablemente se detecta el problema cuando han transcurrido meses o años. Y dado que el flujo en los acuíferos es lento y los volúmenes de agua son grandes, se requiere mucho tiempo para que se depure lo contaminado, incluso en algunas ocasiones el problema persiste por las sustancias que quedan adsorbidas en la matriz del acuífero.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency, EPA por sus siglas en inglés,) define a la **contaminación** como la introducción de microorganismos, sustancias químicas, sustancias tóxicas, desperdicios, o aguas negras en el agua, el aire o el suelo, en tal concentración que el medio no es apto para su uso. Es en general, la presencia de una sustancia en cantidad

o composición química en el ambiente que, inhibe el funcionamiento de procesos naturales y produce efectos indeseables para la salud y el medio ambiente.

La misma EPA define a la **contaminación del agua** como la presencia de materiales dañinos o inaceptables en el agua en cantidad suficiente como para arruinar la calidad del agua (EPA, 2012).

## 1.1 CONTAMINACIÓN NATURAL

La **contaminación natural** engloba a la mineralización y la intrusión salina de los acuíferos. La mineralización es el resultado de la interacción química entre el agua subterránea y los minerales del acuífero. La evaporación causa una mayor concentración de estas sales minerales. La intrusión marina es el fenómeno en el que el agua de mar se introduce por el subsuelo hacia el interior del continente ocasionando la salinización del agua subterránea (Conagua, 2011).

La contaminación natural exhibe variaciones geográficas y es un serio problema en varias regiones del país. Las sustancias químicas más conocidas que se encuentran de manera natural en el agua subterránea, son el arsénico y el flúor, producto de la disolución en los sedimentos de partículas de origen volcánico; los carbonatos de sodio y magnesio, provenientes de la disolución de rocas calcáreas y magnésicas; los nitratos y nitritos son producto de la descomposición de plantas y animales.

En su movimiento a través del ciclo hidrológico la calidad del agua varía dentro de límites muy amplios en respuesta a los diferentes medios por los que atraviesa. La calidad natural refleja el tipo y cantidad de sustancias solubles e insolubles con las cuales el agua ha estado en contacto. El agua superficial generalmente contiene menos sólidos disueltos que el agua subterránea.

Aunque la calidad química del agua en los acuíferos someros o superficiales puede tener variaciones muy grandes de un tiempo a otro, el agua subterránea profunda se caracteriza por su cuasi constante propiedad física y química, al menos en una escala local. Como regla general, los sólidos totales se incrementan con la profundidad, el tiempo y la distancia que el agua viaja en el suelo, habiendo algunos casos excepcionales como son áreas termales.

## 1.2 CONTAMINACIÓN ANTROPOGÉNICA

La contaminación antropogénica es aquella producida por los humanos. A continuación se listan cada una de las actividades antropogénicas que producen contaminación (Figura 1.1 y Figura 1.2).

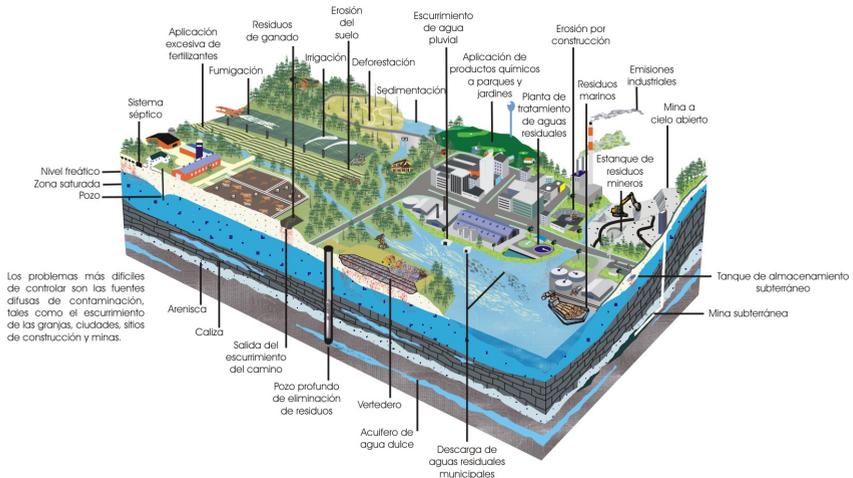


Figura 1.1 Fuentes de contaminación antropogénicas.

# ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS

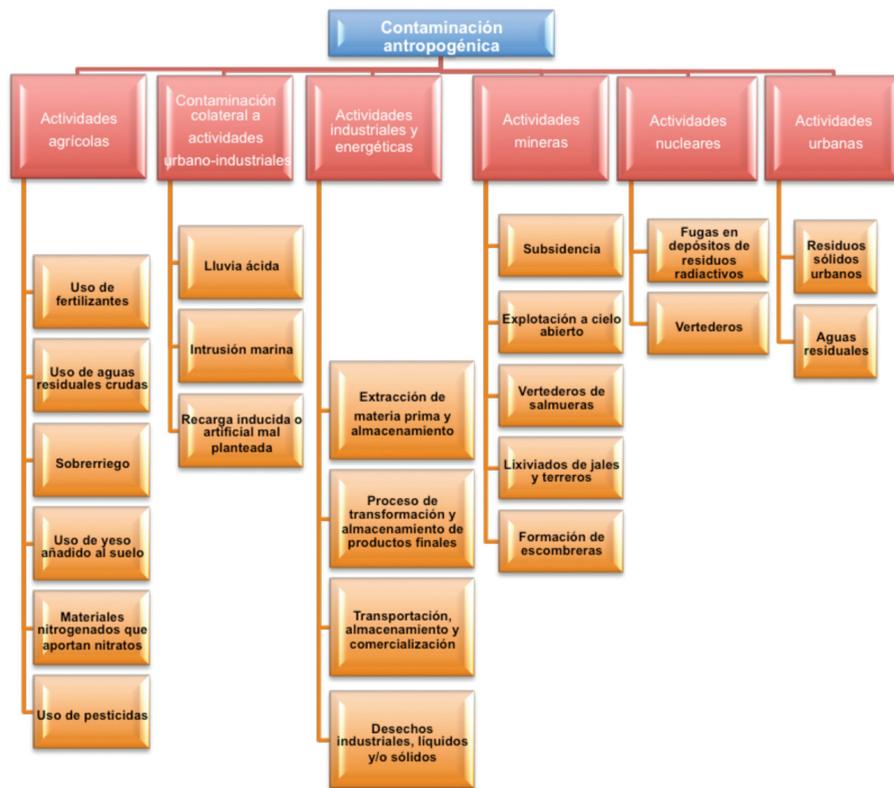


Figura 1.2 Actividades antropogénicas que producen contaminación.

## 1.2.1 AGRÍCOLAS

La contaminación agrícola son los desechos agrícolas, tales como escurrimientos y filtraciones de insecticidas y fertilizantes, erosión y polvo de arado, desechos improprios de estiércol y cadáveres, residuos de cosecha y escombros (EPA, 2012).

El agua subterránea se contamina fundamentalmente por la presencia de nitratos (FAO/CEPE, 1991), la presencia de **fertilizantes** minerales, especialmente la aplicación extensiva e intensiva de fertilizantes orgánicos (**estiércol**). La necesidad de una mayor demanda de alimentos ha llevado a la expansión del riego

y a la utilización cada vez mayor de fertilizantes y plaguicidas con el fin de lograr y mantener rendimientos superiores (FAO, 1997). El escurrimiento de terrenos cultivados, efluentes de lagunas y tanques sépticos, deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos (Heaton, 1985). Otra fuente de contaminación son el conjunto de elementos o sustancias que alteran en forma nociva las condiciones normales de cualquier medio incluyendo las propiedades físicas, químicas o biológicas del agua (NOM-014-CONAGUA-2003) ha sido atribuida a los fertilizantes usados en césped y jardines además de las descargas de tanques sépticos (Flipse *et al.*, 1984).

Las **aguas residuales crudas** son aguas procedentes de usos domésticos, comerciales, agropecuarios y de procesos industriales, o una combinación de ellas, sin tratamiento posterior a su uso; el uso indiscriminado de estas aguas contaminadas aumenta la producción de CO<sub>2</sub> y la actividad biológica del terreno. Al regar con agua residual suelos de alta permeabilidad, es factible contaminar acuíferos con microorganismos.

Hay acuíferos que se contaminan con elementos solubles con agua proveniente de la percolación por **sobrerriego**, cuando se inunda un terreno agrícola con volúmenes de agua que exceden el volumen consuntivo de las plantas (NOM-014-CONAGUA-2003).

La acidez del suelo y en particular la del subsuelo, es un factor limitante del rendimiento de los cultivos debido a la toxicidad del aluminio y a la deficiencia del calcio. La **aplicación de yeso** como mejorador de indicios de acidez del **subsuelo** en suelos muy arenosos, puede tener potenciales efectos tóxicos en términos de la lixiviación del magnesio más allá de la zona de las raíces.

Los nitratos en el agua subterránea se derivan de la descomposición natural, por microorganismos, de **materiales nitrogenados** orgánicos como las proteínas de las plantas, animales y excretas de animales. De estas últimas sólo el 10% vuelve a las tierras cultivadas, pudiendo el resto ser arrastrado o percolado y llegar a las aguas superficiales o subterráneas, se ha comprobado que la concentración total de nitrógeno en distintos arrastres de aguas pluviales puede oscilar entre 50 y más de 5,500 mg/l, lo cual demuestra la existencia de un problema grave de contaminación ambiental (García *et al.*, 1994).

Los **pesticidas** son sustancias o mezclas usadas para prevenir, destruir, repeler o mitigar cualquier plaga. Hay varios tipos de pesticidas: como lo son los *microbianos*

(toxicidad mínima para seres humanos), *persistentes* (no se descomponen químicamente o que se descomponen muy lentamente y permanecen en el medio ambiente después del periodo de cultivo), *biológicos* (no tienen efectos tóxicos en los animales ni en las personas y no dejan residuos químicos tóxicos o persistentes en el ambiente). Algunos pesticidas pueden lixiviarse en el agua subterránea, provocando problemas para la salud humana a través de los pozos contaminados (FAO, 1997).

### 1.2.2 CONTAMINACIÓN COLATERAL A ACTIVIDADES URBANO-INDUSTRIALES

Un fenómeno químico y atmosférico complejo que ocurre cuando las emisiones de compuestos de azufre y nitrógeno y otras sustancias son transformadas por procesos químicos en la atmósfera, a menudo lejos de sus fuentes originales, y luego depositados en la tierra en forma húmeda o seca. La forma húmeda, es llamada “**lluvia ácida**” puede caer a la tierra como lluvia, nieve o niebla. La forma seca son gases o materia de partículas ácidas. Las actividades humanas son la principal causa de la **lluvia ácida**; las centrales eléctricas emiten una gran cantidad de dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno cuando queman combustibles fósiles, tales como carbón, para producir electricidad. La lluvia ácida produce contaminación de aluminio que se escapa al suelo, y con el tiempo daña lagos y arroyos (EPA, 2012a).

En los acuíferos costeros cuando se produce una extracción intensa de agua dulce el flujo de ésta hacia el mar disminuye, lo que provoca un avance hacia tierra adentro de la cuña de agua salada; a la invasión de agua salada en agua dulce de la superficie o subterránea se le llama intrusión de agua salada. Si viene del océano se le llama **intrusión** de agua del **mar** (EPA, 2012). Este proceso evoluciona con extrema rapidez y su vuelta al estado de equilibrio puede requerir mucho tiempo, además deteriora grandes volúmenes de agua. El agua subterránea sufre una serie de modificaciones en su contenido de sólidos disueltos y en determinadas especies iónicas. Las especies mayoritarias que sufren los aumentos más significativos son los cloruros, sulfatos, sodio y magnesio.

La EPA (2012) le denomina recarga al proceso por el cual se añade agua a una zona de saturación, normalmente por percolación desde la superficie del suelo. La recarga artificial de un acuífero es un método que permite introducir agua en general de buena calidad y/o tratada en los acuíferos, con la finalidad de frenar la intrusión marina y por ende la contaminación. Cuando la **recarga inducida o artificial** está mal planteada, pueden vulnerar sustancialmente la calidad del sistema acuífero.

## 1.2.3 INDUSTRIALES Y ENERGÉTICAS

Las actividades **industriales y energéticas** tienen como finalidad transformar las materias primas en productos elaborados y/o servicios. La contribución de cada actividad a la contaminación es muy variable. La industria química es la principal fuente de contaminación orgánica. Otras industrias que aportan grandes cantidades de sustancias muchas de ellas nocivas son la petroquímica, farmacéutica, electroquímica, etc. El riesgo de contaminación está asociado a un deficiente almacenamiento de las materias primas, productos, subproductos y residuos; pérdidas en los procesos industriales (especialmente en contenedores enterrados y conducciones); vertederos y plantas de tratamiento de residuos; falta de desmantelamiento de antiguas instalaciones industriales; infiltración de la lluvia a través de escombreras.

Las fugas industriales de hidrocarburos, como son depósitos auxiliares y establecimientos de distribución; ocurren durante la producción, manipulación, almacenamiento y transporte. Hay fugas sistémicas, debidas a pequeños defectos en los tanques, tuberías, durante la producción o manipulación; fugas ocasionales, normalmente por negligencias; fugas accidentales debidas a instalaciones defectuosas.

Las actividades industriales y energéticas generan un alto costo energético y medioambiental, acentuado si el foco de contaminación no es detectado a corto plazo.

## 1.2.4 MINERAS

Estas actividades provocan fuertes impactos ambientales como son: destrucción de los suelos naturales (provocando dificultad en la reinstauración de vegetación y erosión), destrucción de hábitat, contaminación de aguas superficiales y subterráneas. Un fenómeno asociado a la explotación minera junto con la contaminación de acuíferos profundos es la **subsistencia** (hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras).

La **explotación** del carbón en yacimientos poco profundos se realiza a **cielo abierto**, pero por lo general, la explotación se hace con minería subterránea ya que la mayoría del mineral se encuentra a cientos de metros de profundidad. La contaminación de

esta actividad puede producirse por las labores de tratamiento del mineral o por la infiltración de la lluvia a través de escombreras (la constituyen las rocas estériles procedentes de la cobertura de las operaciones a cielo abierto o de las labores de preparación en las actividades subterráneas, se depositan como fragmentos gruesos en montones). La práctica habitual de **formación de escombreras** provoca una fuente puntual de contaminación.

Los **vertederos de salmueras**, productos de efluentes originados en la extracción de minerales y combustibles, contaminan con sus aguas ácidas.

Los **lixiviados de jales y terreros** pueden contaminar los suelos, la concentración de los metales en los lixiviados depende tanto de la oxidación de las fases potencialmente contaminantes, como de la posible precipitación de fases secundarias o de la adsorción en la superficie de los minerales (Mendoza-Amézquita *et al.*, 2006).

#### 1.2.5 NUCLEARES

En los reactores nucleares e instalaciones de apoyo (plantas de reprocesamiento de combustibles e instalaciones de enriquecimiento de uranio) u otras industrias que utilicen combustible nuclear, se producen residuos de baja actividad, también puede generarse durante el procesamiento de combustible para los reactores o armas nucleares o en las aplicaciones médicas como la radioterapia o la medicina nuclear que son residuos de media a alta actividad.

El almacenamiento de los residuos debe tener un cuidado especial, depositarse en lugares donde no exista flujo de agua subterránea. Los residuos de baja y media actividad suelen ubicarse en superficie o a baja profundidad, en ocasiones aprovechando minas abandonadas. Para los de alta actividad se utiliza el almacenamiento geológico profundo, durante un periodo de miles de años. Los accidentes han producido fugas radiactivas a la atmósfera, **fugas en depósitos de residuos radiactivos** han dejado escapar cesio, estroncio y plutonio. Los **vertederos** de residuos radiactivos mal aislados contaminan el suelo.

#### 1.2.6 URBANAS

Los **residuos sólidos urbanos** son generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que

proviene de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos (NOM-083-SEMARNAT-2003).

Las **aguas residuales** son las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (NOM-001-SEMARNAT-1996).



## CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO

**S**e puede diferenciar dos clases de contaminantes de origen **natural** y **antropogénica**. Ambas clases se pueden subdividir en dos tipos: biológico y químico. En las de origen natural–biológica comprenden meteorización y descomposición de plantas, en natural–química se indican meteorización y disolución de la roca.

Si nos referimos a antropogénica–biológica comprende microorganismos, que ponen en riesgo la salud de las personas que beben agua extraída de pozos; se produce por el contacto del agua subterránea con agua residual sin tratar, excretas de animales o humanos. Estos contaminantes llegan a través de filtraciones de pozos ciegos, de pozos con problemas de construcción. En el antropogénica–química comprenden elementos químicos y compuestos, derivados de la actividad doméstica, industrial y agrícola. Contaminantes que pueden llegar al agua subterránea por filtración o percolación; su persistencia en el ambiente varía, algunos son poco biodegradables o no degradables. La concentración puede ser muy baja, pero cuando su ingesta es cotidiana, puede acumularse en el organismo y provocar problemas de salud (Figura 2.1).

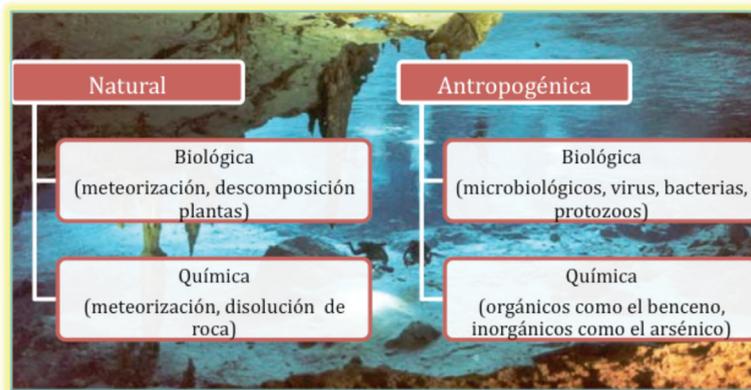


Figura 2.1 Clases de contaminantes

## 2.1 MICROORGANISMOS PATÓGENOS

De una manera sencilla los microorganismos pueden clasificarse en virus, bacterias y protozoos. Se llama microorganismos patógenos a los microorganismos que producen enfermedad. En la Figura 2.2 se muestra el origen de la contaminación y el proceso de infiltración, en general. También se listan algunos contaminantes biológicos y las enfermedades que provoca en la Tabla 2.1.

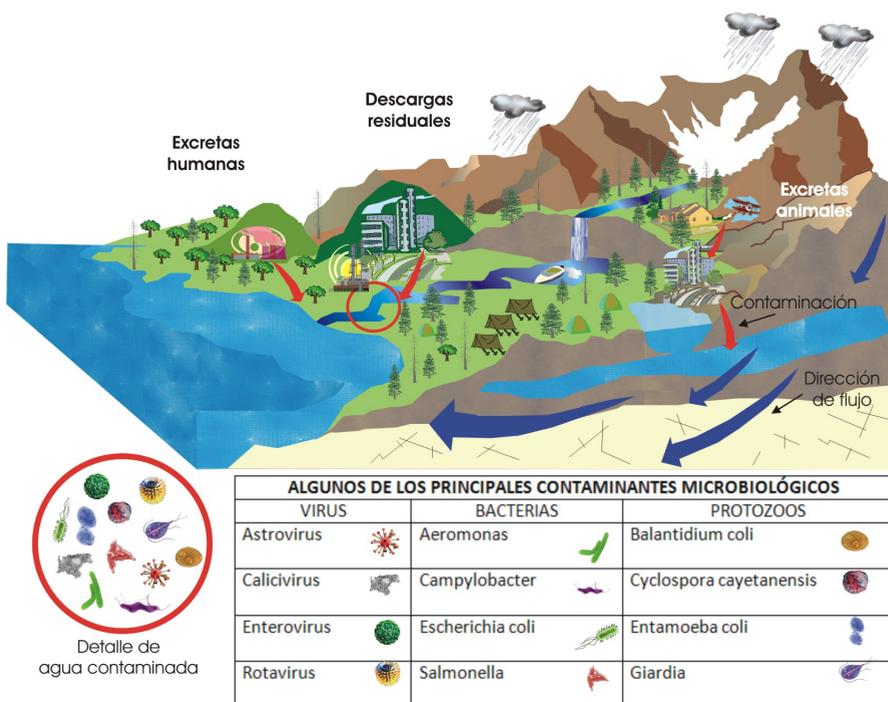


Figura 2.2 Algunos tipos de contaminantes microbiológicos de origen antropogénico.

## CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO

Tabla 2.1 Contaminantes biológicos de origen antropogénico.

Contaminantes biológicos		
Virus	Bacterias	Protozoos
<i>Enfermedad que provoca</i>	<i>Enfermedad que provoca</i>	<i>Enfermedad que provoca</i>
<b>Astrovirus</b>	<b>Aeromonas sp.</b>	<b>Balantidium coli</b>
Gastroenteritis	Diarrea, dolor abdominal, náuseas, dolor de cabeza y colitis.	Dolor abdominal, diarrea con moco y sangre, sensación de necesidad constante de evacuar los intestinos.
<b>Calicivirus</b>	<b>Campylobacter jejuni</b>	<b>Cyclospora var. Cayetanensis</b>
Gastroenteritis	Gastroenteritis.	Diarrea acuosa con frecuentes deposiciones, náuseas, anorexia, dolor abdominal, fatiga, pérdida de peso, dolores musculares, meteorismo, y escasa fiebre.
<b>Enterovirus</b>	<b>Eschericia coli enterohemorágica</b>	<b>Cryptosporidium parvum</b>
Poliomielitis, parálisis, enfermedades gastrointestinales, encefalitis, enfermedades respiratorias, meningitis, hiperanginas, conjuntivitis.	Diarrea acuosa con sangre y moco, dolor abdominal agudo, vómitos.	Provoca diarrea acuosa, con dolor abdominal y pérdida de peso.
<b>Rotavirus A y E</b>	<b>Eschericia coli enteronativa</b>	<b>Entamoeba histolytica</b>
Gastroenteritis, el tipo A presenta además náuseas y vómito.	Diarrea, fiebre, cefalea, mialgias, dolor abdominal, a veces las heces son mucosas y con sangre.	Amebiasis.
<b>Virus de la hepatitis A y E</b>	<b>Eschericia coli enterotoxigena</b>	<b>Giardia lamblia</b>
Cansancio, debilidad muscular, síntomas gastrointestinales, ictericia.	Dolores abdominales, diarrea acuosa, fiebre con escalofríos, náuseas, mialgia.	Puede ser asintomático (hasta 50%) o provocar una diarrea leve.
<b>Virus Norwalklike</b>	<b>Plesiomonas shigelloides</b>	
Diarrea, náusea, vómito, dolor de cabeza, dolor abdominal.	Fiebre, escalofríos, dolor abdominal, náusea, diarrea y vómito.	
	Salmonella sp.	
	Diarrea acuosa con sangre	
	Salmonella typhi y S. paratyphi	
	Fiebre tifoidea y paratifoidea.	
	Shigellae sp.	
	Disenteria bacilar	
	Vibrio cholerae	
	Cólera, disenteria bacilar.	
	Vibrio cholerae 01	
	Diarrea acuosa.	
	Yersinia enterocolitica	
	Diarrea y septicemia	

Fuente: Colección Educar para el Ambiente. Manual para el docente. Conceptos Básicos sobre Medio Ambiente y Desarrollo sustentable. <http://www.unlam.edu.ar>

## 2.2 COMPUESTOS QUÍMICOS INORGÁNICOS

Se le llama compuesto químico inorgánico a todo aquel compuesto que está formado por distintos elementos, pero en el que su componente principal no siempre es el carbono, siendo el agua el más abundante. Los contaminantes químicos inorgánicos de mayor importancia en suelos contaminados son: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg) y plomo (Pb).

Bajo la autoridad del Acta de Agua Potable Segura (SDWA, por sus siglas en inglés), la EPA establece los estándares relacionados a aproximadamente 90 contaminantes del agua potable. Para cada uno de estos contaminantes, la EPA establece el límite legal llamado un nivel máximo de contaminación o exige un tratamiento específico. En la Figura 2.3 se muestra los procesos de intercambio entre el agua subterránea y la superficial, el detalle del proceso de contaminación en un pozo. Los principales contaminantes inorgánicos, sus posibles efectos en la salud y las fuentes de contaminación se describen en la Tabla 2.2.

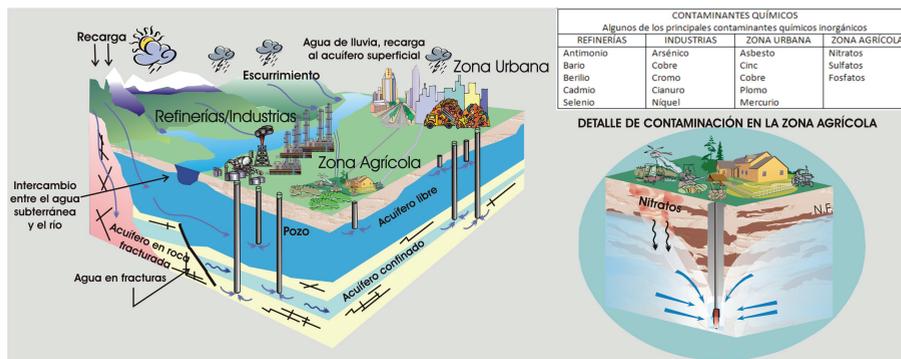


Figura 2.3 Algunos tipos de contaminantes químicos inorgánicos de origen antropogénico.

**CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES DE  
ORIGEN ANTROPOGÉNICO**

Tabla 2.2 Contaminantes químicos de origen antropogénico (inorgánicos).

Contaminantes químicos				
Químicos inorgánicos				
<i>Contaminante</i>	<i>MNMC (mg/l)</i>	<i>NMC o TI (mg/l)</i>	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Antimonio	0.006	0.006	Aumento de colesterol en sangre; descenso de azúcar en sangre (aumento de colesterolhemia; hipoglucemia).	Efluentes de refinerías de petróleo; retardadores de fuego; cerámicas; productos electrónicos; soldaduras.
Arsénico	Ninguno	0.05	Lesiones en la piel; trastornos circulatorios; alto riesgo de cáncer.	Erosión de depósitos naturales; agua de escurrimiento de huertos; aguas con residuos de fabricación de vidrio y productos electrónicos.
Asbestos (fibras >10 micrómetros)	7 millones de fibras por litro (MFL)	7 MFL	Alto riesgo de desarrollar pólipos intestinales benignos.	Deterioro de cemento amiantado (fibrocemento) en cañerías principales de agua; erosión de depósitos naturales.
Bario	2	2	Aumento de presión arterial.	Aguas con residuos de perforaciones; efluentes de refinerías de metales; erosión de depósitos naturales.
Berilio	0.004	0.004	Lesiones intestinales.	Efluentes de refinerías de metales y fábricas que emplean carbón; efluentes de industrias eléctricas, aeroespaciales y de defensa.
Cadmio	0.005	0.005	Lesiones renales.	Corrosión de tubos galvanizados; erosión de depósitos naturales; efluentes de refinerías de metales; líquidos de escurrimientos de baterías usadas y de pinturas.
Cromo (total)	0.1	0.1	Dermatitis alérgica.	Efluentes de fábricas de acero y papel; erosión de depósitos naturales.

**ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE  
ACUÍFEROS CONTAMINADOS**

Tabla 2.2 Contaminantes químicos de origen antropogénico (inorgánicos).  
(continuación)

Contaminantes químicos				
Químicos inorgánicos				
Contaminante	MNMC (mg/l)	NMC o TT (mg/l)	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Cobre	1.3	Nivel de acción= 1.3 TT	Exposición a corto plazo: molestias gastrointestinales. Exposición a largo plazo: lesiones hepáticas o renales. Aquellos con enfermedad de Wilson deben consultar a su médico si la cantidad de cobre en el agua supera el nivel de acción.	Corrosión de cañerías en el hogar; erosión de depósitos naturales; percolado de conservantes de madera.
Cianuro (como cianuro libre)	0.2	0.2	Lesiones en sistema nervioso o problemas de tiroides.	Efluentes de fábricas de acero y metales; efluentes de fábricas de plásticos y fertilizantes.
Flúor	4.0	4.0	Enfermedades óseas (dolor y fragilidad ósea). Los niños podrían sufrir de dientes manchados.	Adición al agua para tener dientes fuertes; erosión de depósitos naturales; efluentes de fábricas de fertilizantes y de aluminio.
Plomo	0.0	Nivel de acción = 0.015 TT	Bebés y niños: retardo en desarrollo físico o mental; los niños podrían sufrir leve déficit de atención y de capacidad de aprendizaje. Adultos: trastornos renales; hipertensión.	Corrosión de cañerías en el hogar; erosión de depósitos naturales.
Mercurio (inorgánico)	0.002	0.002	Lesiones renales.	Erosión de depósitos naturales; efluentes de refinерías y fábricas; lixiviados de vertederos y tierras de cultivo.
Nitrato (medido como nitrógeno)	10	10	Los bebés de menos de seis meses que tomen agua que contenga mayor concentración de nitratos que el NMC, podrían enfermarse gravemente; si no se los tratara podrían morir. Entre los síntomas se incluye dificultad respiratoria y síndrome de bebé cianótico (azul).	Agua contaminada por el uso de fertilizantes; percolado de tanques sépticos y de redes de alcantarillado; erosión de depósitos naturales.

## CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES DE ORIGEN ANTROPOGÉNICO

Cont. Tabla 2.2 Contaminantes químicos de origen antropogénico (inorgánicos)  
(continuación).

Contaminantes químicos				
Químicos inorgánicos				
Contaminante	MNMC (mg/l)	NMC o TT (mg/l)	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Nitrito (medido como nitrógeno)	1	1	Los bebés de menos de seis meses que tomen agua que contenga mayor concentración de nitritos que el NMC, podrían enfermarse gravemente; si no se los tratara, podrían morir. Entre los síntomas se incluye dificultad respiratoria y síndrome de bebé cianótico (azul).	Aguas contaminadas por el uso de fertilizantes; percolado de tanques sépticos y de redes de alcantarillado; erosión de depósitos naturales.
Selenio	0.05	0.05	Caída del cabello o de las uñas; adormecimiento de dedos de manos y pies; problemas circulatorios.	Efluentes de refinerías de petróleo; erosión de depósitos naturales; efluentes de minas.
Talio	0.0005	0.002	Caída del cabello; alteración de la sangre; trastornos renales, intestinales o hepáticos.	Percolado de plantas procesadoras de minerales; efluentes de fábricas de vidrio.

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. EPA 815-F-00-007. Abril de 2000. <http://water.epa.gov/drink/agua/estandares.cfm>

**Notas:**

Meta del Nivel Máximo del Contaminante (MNMC). Es el nivel de un contaminante en el agua potable por debajo del cual no se conocen o no se esperan riesgos para la salud. Los MNMC permiten contar con un margen de seguridad y no son objetivos de salud pública obligatorios.

Nivel Máximo del Contaminante (NMC). Es el máximo permitido de un contaminante en agua potable. Los NMC se establecen tan próximos a los MNMC como sea posible, usando para ello la mejor tecnología de tratamiento disponible y teniendo en cuenta también los costos. Los NMC son normas obligatorias.

Técnica de Tratamiento (TT). Proceso obligatorio, cuya finalidad es reducir el nivel de un contaminante dado en el agua potable.

Las unidades se expresan en miligramos por litro (mg/l) a menos que se indique otra cosa.

Los MNMC se establecieron luego de la Enmienda de 1986 a la Ley de Agua Potable Segura. El estándar para este contaminante se fijó antes de 1986. Por lo tanto, no hay MNMC para este contaminante.

El plomo y el cobre se regulan mediante una Técnica de Tratamiento que exige la implementación de sistemas que controlen el poder corrosivo del agua. El nivel de acción sirve como un aviso para que los sistemas de agua públicos tomen medidas adicionales de tratamiento si los niveles de las muestras de agua superan en más del 10% los valores permitidos.

Todos y cada uno de los sistemas de agua deben declarar al estado, por escrito, que si se usa acrilamida y/o epiclorhidrina para tratar agua, la combinación (o producto) de dosis y cantidad de monómero no supera los niveles especificados, a saber: acrilamida = 0.05% dosificada a razón de 1 mg/l.

## 2.3 COMPUESTOS ORGÁNICOS

Algunos de los compuestos químicos orgánicos son dicloroetano, diclorometano, lindano, acrilamida, oxamil, alaclor, etilbenceno, dibromuro de etileno, etc. (Figura 2.4). En el caso de contaminación de tipo industrial o minera, su origen es el lavado de aguas de hulla, lignito o turba, aguas de lavado de coquerías, destilerías de alquitrán, fábricas de materias plásticas. Los pesticidas pueden actuar como cancerígenos para los humanos (alaclor). En la Tabla 2.3 se presentan los principales contaminantes y sus posibles repercusiones en la salud humana.

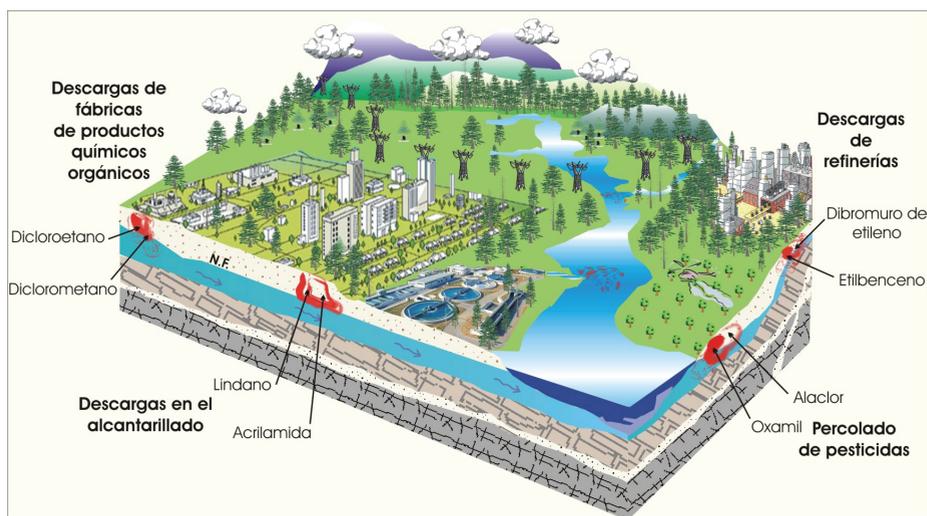


Figura 2.4 Algunos tipos de contaminantes químicos orgánicos de origen antropogénico.

**CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES DE  
ORIGEN ANTROPOGÉNICO**

Tabla 2.3 Contaminantes químicos de origen antropogénico (orgánicos).

Contaminantes químicos				
Químicos orgánicos				
Contaminante	MNMCM (mg/l)	NMC o TT (mg/l)	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Acrilamida	0.0	TT <sup>7</sup>	Trastornos sanguíneos o del sistema nervioso; alto riesgo de cáncer.	Se agrega al agua durante el tratamiento de efluentes y de agua de alcantarillado.
Alaclor	0.0	0.002	Trastornos oculares, hepáticos, renales o esplénicos; anemia; alto riesgo de cáncer.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas para cultivos.
Atrazina	0.003	0.003	Trastornos cardiovasculares o del sistema reproductor.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas para cultivos.
Benceno	0.0	0.005	Anemia; trombocitopenia; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de fábricas, percolado de tanques de almacenamiento de combustible y de vertederos para residuos.
Benzo (a) pireno	0.0	0.0002	Dificultades para la reproducción; alto riesgo de cáncer.	Percolado de revestimiento de tanques de almacenamiento de agua y líneas de distribución.
Carbofurano	0.04	0.04	Trastornos sanguíneos, del sistema nervioso o del sistema reproductor.	Percolado de productos fumigados en cultivos de arroz y alfalfa.
Tetracloruro de carbono	0.0	0.005	Trastornos hepáticos; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de plantas químicas y de otras actividades industriales.
Clordano	0.0	0.002	Trastornos hepáticos o del sistema nervioso; alto riesgo de cáncer.	Residuos de termiticidas prohibidos.
Clorobenceno	0.1	0.1	Trastornos hepáticos o renales.	Efluentes de plantas químicas y de plantas de fabricación de agroquímicos.
2,4-D	0.07	0.07	Trastornos renales, hepáticos o de la glándula adrenal.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas para cultivos.

**ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE  
ACUÍFEROS CONTAMINADOS**

Tabla 2.3 Contaminantes químicos de origen antropogénico (orgánicos)  
(continuación).

Contaminantes químicos				
Químicos orgánicos				
Contaminante	MNNC (mg/l)	NNC o TT (mg/l)	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Dalapón	0.2	0.2	Pequeños cambios renales.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas utilizados en servidumbres de paso.
1,2-Dibromo-3-cloropropano (DBCP)	0.0	0.0002	Dificultades para la reproducción; alto riesgo de cáncer.	Aguas contaminadas/ percolado de productos fumigados en huertos y en campos de cultivo de soja, algodón y piña (ananá).
o-Diclorobenceno	0.6	0.6	Trastornos hepáticos, renales o circulatorios.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial.
p-Diclorobenceno	0.075	0.075	Anemia; lesiones hepáticas, renales o esplénicas; alteración de la sangre.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial.
1,2-Dicloroetano	0.0	0.005	Alto riesgo de cáncer.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial.
1-1-Dicloroetileno	0.007	0.007	Trastornos hepáticos.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial.
cis-1, 2-Dicloroetileno	0.07	0.07	Trastornos hepáticos.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial.
trans-1,2-Dicloroetileno	0.1	0.1	Trastornos hepáticos.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial.
Diclorometano	0.0	0.005	Trastornos hepáticos; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de plantas químicas y farmacéuticas.
1-2-Dicloropropano	0.0	0.005	Alto riesgo de cáncer.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial.
Adipato de di-(2-etilhexilo)	0.4	0.4	Efectos tóxicos generales o dificultades para la reproducción.	Efluentes de plantas químicas.

**CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES DE  
ORIGEN ANTROPOGÉNICO**

Cont. Tabla 2.3 Contaminantes químicos de origen antropogénico (orgánicos)  
(continuación).

Contaminantes químicos				
Químicos orgánicos				
<i>Contaminante</i>	<i>MNMC (mg/l)</i>	<i>NMC o TI (mg/l)</i>	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Dioxina (2,3,7,8-TCDD)	0.0	0.00000003	Dificultades para la reproducción; alto riesgo de cáncer.	
Ftalato de di-(2-etilhexilo)	0.0	0.006	Dificultades para la reproducción; trastornos hepáticos; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de plantas químicas y de fabricación de goma.
Dinoseb	0.007	0.007	Dificultades para la reproducción.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas utilizados en soja y vegetales.
Diquat	0.02	0.02	Cataratas	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas.
Endotal	0.1	0.1	Trastornos estomacales e intestinales.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas.
Endrina	0.002	0.002	Trastornos hepáticos.	Residuo de insecticidas prohibidos.
Epiclorohidrina	0.0	TI <sup>7</sup>	Alto riesgo de cáncer y a largo plazo, trastornos estomacales.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial; impurezas de algunos productos químicos usados en el tratamiento de aguas.
Etilbenceno	0.7	0.7	Trastornos hepáticos o renales.	Efluentes de refinerías de petróleo.
Dibromuro de etileno	0.0	0.00005	Trastornos hepáticos, estomacales, renales o del sistema reproductor; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de refinerías de petróleo.
Glifosato	0.7	0.7	Trastornos renales; dificultades para la reproducción.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas.

**ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE  
ACUÍFEROS CONTAMINADOS**

Cont. Tabla 2.3 Contaminantes químicos de origen antropogénico (orgánicos)  
(continuación).

Contaminantes químicos				
Químicos orgánicos				
<i>Contaminante</i>	<i>MNMC (mg/l)</i>	<i>NMC o TT (mg/l)</i>	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Heptacloro	0.0	0.0004	Lesiones hepáticas; alto riesgo de cáncer.	Residuos de termiticidas prohibidos.
Heptaclorepóxido	0.0	0.0002	Lesiones hepáticas; alto riesgo de cáncer.	Descomposición de heptacloro.
Hexaclorobenceno	0.0	0.001	Trastornos hepáticos o renales; dificultades para la reproducción; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de refinerías de metales y plantas de agroquímicos.
Hexacloro- ciclopentadieno	0.05	0.05	Trastornos renales o estomacales.	Efluentes de plantas químicas.
Lindano	0.0002	0.0002	Trastornos hepáticos o renales.	Aguas contaminadas/ percolado de insecticidas usados en ganado, madera, jardines.
Metoxicloro	0.04	0.04	Dificultades para la reproducción.	Aguas contaminadas/ percolado de insecticidas usados en frutas, vegetales, alfalfa, ganado.
Oxamil (Vidato)	0.2	0.2	Efectos leves sobre el sistema nervioso.	Aguas contaminadas/ percolado de insecticidas usados en manzanas, papas y tomates.
Bifenilos policlorados (PCB)	0.0	0.0005	Cambios en la piel; problemas de la glándula tiro; inmunodeficiencia; dificultades para la reproducción o problemas en el sistema nervioso; alto riesgo de cáncer.	Agua de escurrimiento de vertederos; aguas con residuos químicos.
Pentaclorofenol	0.0	0.001	Trastornos hepáticos o renales; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de plantas de conservantes para madera.

**CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES DE  
ORIGEN ANTROPOGÉNICO**

Cont. Tabla 2.3 Contaminantes químicos de origen antropogénico (orgánicos)  
(continuación).

Contaminantes químicos				
Químicos orgánicos				
<i>Contaminante</i>	<i>MNMC (mg/l)</i>	<i>NMC o TI (mg/l)</i>	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Picloram	0.5	0.5	Trastornos hepáticos.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas.
Simazina	0.004	0.004	Problemas sanguíneos.	Aguas contaminadas por la aplicación de herbicidas.
Estireno	0.1	0.1	Trastornos hepáticos, renales o circulatorios.	Efluentes de fábricas de goma y plástico; lixiviados de vertederos.
Tetracloroetileno	0.0	0.005	Trastornos hepáticos; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de fábricas y empresas de limpieza en seco.
Tolueno	1	1	Trastornos renales, hepáticos o del sistema nervioso.	Efluentes de refinerías de petróleo.
Trihalometanos totales (TTHM)	Ninguno	0.10	Trastornos renales, hepáticos o del sistema nervioso central; alto riesgo de cáncer.	Subproducto de la desinfección de agua potable.
Toxafeno	0.0	0.003	Problemas renales, hepáticos o de tiroides; alto riesgo de cáncer.	Aguas contaminadas/percolado de insecticidas usados en algodón y ganado.
2,4,5-TP (Silvex)	0.05	0.05	Trastornos hepáticos.	Residuos de herbicidas prohibidos.
1,2,4-Triclorobenceno	0.07	0.07	Cambios en glándulas adrenales.	Efluentes de fábricas de textiles.
1,1,1-Tricloroetano	0.20	0.20	Problemas circulatorios, hepáticos o del sistema nervioso.	Efluentes de plantas de desgrasar metales y de otros tipos de plantas.
1,1,2-Tricloroetano	3	5	Problemas hepáticos, renales o del sistema inmunológico.	Efluentes de fábricas de productos químicos de uso industrial.

# ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS

Cont. Tabla 2.3 Contaminantes químicos de origen antropogénico (orgánicos)  
(continuación).

Contaminantes químicos				
Químicos orgánicos				
<i>Contaminante</i>	<i>MNMC (mg/l)</i>	<i>NMC o TT (mg/l)</i>	<i>Posibles efectos sobre la salud por exposición que supere el límite permitido (mg/l)</i>	<i>Fuentes de contaminación comunes en agua potable</i>
Tricloroetileno	0.0	5	Trastornos hepáticos; alto riesgo de cáncer.	Efluentes de plantas para desgrasar metales y de otros tipos de plantas.
Cloruro de vinilo	0.0	2	Alto riesgo de cáncer.	Percolado de tuberías de PVC; efluentes de fábricas de plásticos.
Xilenos (total)	10	10	Lesiones del sistema nervioso.	Efluentes de refinerías de petróleo; efluentes de plantas químicas.

Fuente: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. EPA 815-F-00-007. Abril de 2000. <http://water.epa.gov/drink/agua/estandares.cfm>

Notas:

Meta del Nivel Máximo del Contaminante (MNMC). Es el nivel de un contaminante en el agua potable por debajo del cual no se conocen o no se esperan riesgos para la salud. Los MNMC permiten contar con un margen de seguridad y no son objetivos de salud pública obligatorios.

Nivel Máximo del Contaminante (NMC). Es el máximo permitido de un contaminante en agua potable. Los NMC se establecen tan próximos a los MNMC como sea posible, usando para ello la mejor tecnología de tratamiento disponible y teniendo en cuenta también los costos. Los NMC son normas obligatorias.

Técnica de Tratamiento (TT). Proceso obligatorio, cuya finalidad es reducir el nivel de un contaminante dado en el agua potable.

Las unidades se expresan en miligramos por litro (mg/l) a menos que se indique otra cosa.

Los MNMC se establecieron luego de la Enmienda de 1986 a la Ley de Agua Potable Segura. El estándar para este contaminante se fijó antes de 1986. Por lo tanto, no hay MNMC para este contaminante.

El plomo y el cobre se regulan mediante una Técnica de Tratamiento que exige la implementación de sistemas que controlen el poder corrosivo del agua. El nivel de acción sirve como un aviso para que los sistemas de agua públicos tomen medidas adicionales de tratamiento si los niveles de las muestras de agua superan en más del 10% los valores permitidos.

Todos y cada uno de los sistemas de agua deben declarar al estado, por escrito, que si se usa acrilamida y/o epiclorhidrina para tratar agua, la combinación (o producto) de dosis y cantidad de monómero no supera los niveles especificados, a saber: acrilamida = 0.05% dosificada a razón de 1 mg/l.

## DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL TRATAMIENTO

**E**l desarrollo de las técnicas de remediación se inició en los países desarrollados después de las conflagraciones mundiales. El Departamento de Energía de EUA (U. S. DOE, por sus siglas en inglés) encomendó a laboratorios públicos y privados la realización de investigaciones diseñadas para la limpieza de suelos y acuíferos contaminados durante la Segunda Guerra Mundial con la finalidad de proteger la salud humana y reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos (Saval, 1994).

La prevención es por mucho, más lógica, simple y económica que la corrección del problema de contaminación del agua subterránea. Se utiliza una gran cantidad de tiempo, esfuerzo y dinero en el desarrollo de medidas de remediación que contrarresten los efectos de la contaminación en acuíferos contaminados y en fuentes de abastecimiento público. Estas medidas incluyen técnicas de tratamiento tradicionales e innovadoras, manejo del agua así como extensos trabajos de investigación.

En la actualidad se cuenta con una amplia variedad de técnicas de remediación y generalmente se utiliza una combinación de ellas al mismo tiempo para restaurar acuíferos contaminados a sus condiciones naturales u originales o cercanas a ellas. Un método puede involucrar el tratamiento in situ natural o inducido, mientras que otro el uso de sistemas de ingeniería para contener el agua subterránea contaminada.

Cualquier fuente o fuentes que contaminen el agua subterránea en forma continua o intermitente deberían ser removidas, aisladas o tratadas, independientemente del método de remediación a utilizar. El tratamiento o remoción de una fuente de contaminación existente eventualmente puede resultar en la remediación de la calidad del agua subterránea a través de los procesos naturales. En otras situaciones, el agua subterránea contaminada se remueve del acuífero por medio de bombas

o se permite su descarga en un río en el cual el flujo es lo suficientemente grande para diluir la contaminación a concentraciones permitidas. Los procesos de remediación natural del agua subterránea requieren generalmente de muchos años para completarse, por lo que se emplean una combinación de métodos para reducir o acelerar dichos tiempos.

Las condiciones del sitio específico, propiamente bien definidas y entendidas, proporcionan al investigador de la información básica requerida para la adecuada determinación del método o métodos de remediación viables, con lo cual es además posible seleccionar y diseñar los esquemas de remediación más adecuados al presupuesto considerado.

En los siguientes capítulos se presenta una revisión de las tecnologías de remediación de acuíferos actualmente en uso, las cuales utilizan técnicas derivadas de diversas disciplinas interrelacionadas: geología, hidrología, geoquímica, ingeniería, construcción, biología, agronomía, etc.

### **3.1 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRATAMIENTO**

Durante las pasadas décadas se han desarrollado una gran cantidad de técnicas muy eficientes para el tratamiento o remoción de los contaminantes presentes en el agua, con el fin de proteger o limpiar los cuerpos de agua superficiales. Dichas técnicas abarcan desde los desechos domésticos urbanos hasta los compuestos tóxicos pasando por los metales pesados.

Para tratar los problemas de contaminación del agua subterránea se utilizan generalmente las mismas técnicas desarrolladas para los cuerpos de agua superficiales. Casi todos los compuestos que se alojan actualmente en el agua subterránea se encuentran también en las aguas residuales.

Sin embargo debemos ser cautelosos en escoger el método de tratamiento de agua más adecuado ya que aunque las técnicas son las mismas, la ingeniería y el diseño de los métodos son distintos ya que la limpieza del agua subterránea es distinta a la del agua residual.

La principal diferencia es que en el caso del agua subterránea hay que limpiar el agua y el medio que la contiene. Además, una vez que controlamos y tratamos las aguas

contaminadas, los cuerpos de agua superficial tienen la capacidad de autodepuración o limpieza por sí mismos. Sin embargo este proceso es muy lento en el caso del agua subterránea. Así, en el caso del agua subterránea debemos limpiar la fuente de contaminación además de limpiar el acuífero.

### 3.2 FLUJO

Es importante saber que el flujo es el parámetro que define la técnica de tratamiento a utilizar así como el diseño final del sistema. En los sistemas de tratamiento de aguas residuales el flujo es un parámetro fácil de determinar. Sin embargo en los problemas de limpieza del agua subterránea es una variable de diseño. Los ingenieros no determinan el flujo por fórmulas estándar ya que deben de tomar en cuenta el efecto del flujo en el costo total del sistema y en el tiempo requerido para la limpieza total.

La Figura 3.1 muestra una situación típica de un derrame que se ha introducido a un acuífero. El contaminante viaja a través de la zona no saturada hasta el nivel freático y de ahí se mueve a velocidades muy lentas (1.5 m/año a 1.5 m/día). Como se infiere la pluma de contaminación viaja en la dirección del flujo subterráneo.

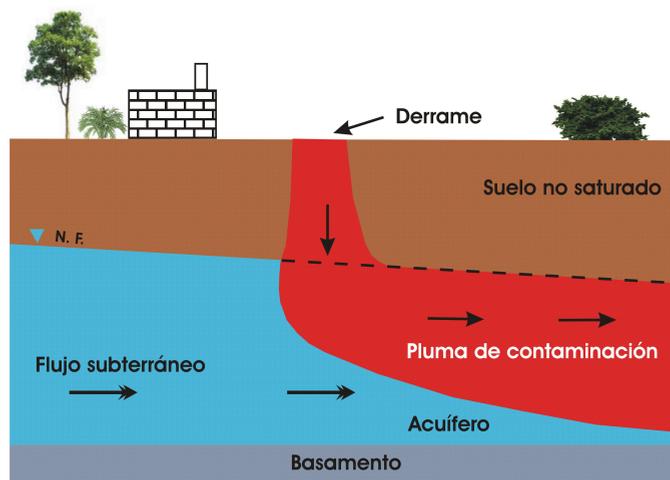


Figura 3.1 Pluma de contaminación en un acuífero.

El caudal del sistema de tratamiento se obtiene del bombeo de un pozo o pozos que intersectan la pluma de contaminación. Durante el bombeo del agua subterránea el nivel del agua en el acuífero varía lo cual ocasiona a su vez un cambio en el flujo.

Después de un tiempo se obtiene una condición de equilibrio tanto para el flujo como para el nivel del agua en el acuífero.

Si el pozo se coloca correctamente y se extrae un volumen de agua adecuado, el movimiento de la pluma contaminante puede ser detenido y revertido. Esto permitirá concentrar el contaminante en un punto donde puede ser bombeado al sistema de tratamiento. El primer factor a considerar para el diseño del sistema de tratamiento es el flujo necesario para detener y revertir el movimiento de la pluma contaminante. Sin embargo existen otros métodos para contener la pluma contaminante. Se puede colocar una pantalla o barrera impermeable aguas arriba del sitio de contaminación (o alrededor de toda la pluma de contaminación) para inhibir el flujo de agua subterránea en el área contaminada, lo que a su vez ocasiona que la pluma contaminante se contraiga. Las barreras impermeables son caras, por lo que un equipo multidisciplinario compuesto por hidrogeólogos, biólogos, ingenieros, etc., deben trabajar conjuntamente para determinar los costos de la mejor alternativa: detener físicamente el movimiento de la pluma contaminante o el bombeo.

El segundo factor que hay que considerar como parte del flujo, es el volumen de agua que entra al área contaminada. Las barreras o pantallas impermeables interrumpen el flujo subterráneo al interior del área contaminada. Sin embargo, existen al menos otras dos posibles entradas. El agua de lluvia o escurrimiento puede infiltrarse hacia el acuífero desde la superficie del terreno y el basamento del acuífero puede tener fracturas por donde el acuífero puede recibir también agua. El primero se controla al cubrir el área contaminada con una capa impermeable mientras que el segundo es mucho más difícil de controlar y debe ser agregado al flujo para el sistema de tratamiento.

El tercer factor relacionado con el flujo en los sistemas de tratamiento es la velocidad de limpieza. Mientras más agua se extrae de los pozos más disminuye el nivel freático o piezométrico alrededor de los mismos. El límite es la velocidad con que el agua y los contaminantes pueden fluir a través del acuífero. Por lo que se debe decir entre los costos de incrementar el tamaño del sistema de tratamiento y los ahorros de reducir el tiempo de limpieza.

La relación entre el flujo y el tiempo de limpieza no es perfecta. Por ejemplo, la Figura 3.2 muestra a los contaminantes fluyendo a través de la zona no saturada. Asuma que se coloca un pozo en la pluma de contaminación y que se requieren tres meses a flujo máximo para limpiar el acuífero. Terminado el trabajo se retira el equipo de

tratamiento y todos se retiran. El problema es que aún puede haber contaminación en la zona no saturada que puede moverse hacia el acuífero tres meses después, formando una nueva pluma de contaminación.

Una posible solución a este problema es el reducir la limpieza original para que mediante algún método de lavado se pueda extraer la mayor parte de los contaminantes presentes en la zona no saturada. Por supuesto una alternativa sería acelerar el lavado de la zona no saturada manteniendo la velocidad original de la limpieza.

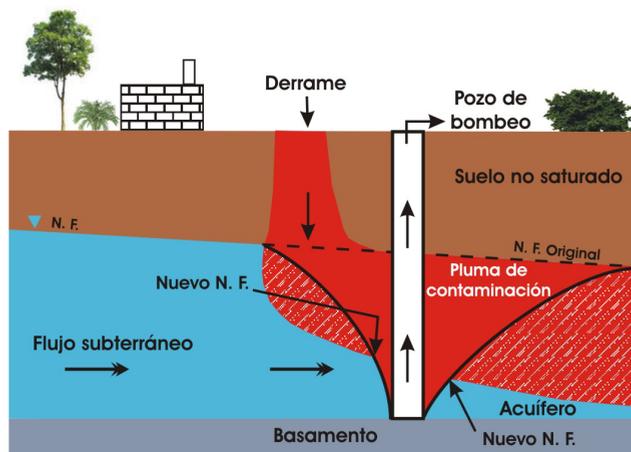


Figura 3.2 Zona de influencia de un pozo de bombeo.

Otro ejemplo que no se puede resolver fácilmente son las variaciones estacionales del agua subterránea. Como es de esperarse, los niveles del agua en el acuífero se incrementan en épocas de lluvias. El problema se presenta cuando los niveles del agua retroceden mientras que los contaminantes se quedan en la zona no saturada. Los contaminantes se reincorporan al acuífero en la siguiente ocasión en que los niveles del agua se elevan. La mejor solución en estos casos puede ser el reducir el flujo del sistema de tratamiento y el realizar la limpieza solo en temporadas de niveles de agua altos.

El número de pozos también tiene efecto en el flujo de agua requerido para la limpieza. Un pozo ubicado cerca del frente de la pluma contaminante requerirá menos agua para detener su movimiento que el requerido por un pozo ubicado en el sitio de la fuente de contaminación. Sin embargo, como la idea es limpiar el agua subterránea, se requiere por lo tanto instalar un segundo pozo en el centro de la

pluma contaminante. Mientras más se aleje la pluma de la fuente de contaminación se requerirán más pozos.

Los requerimientos de la descarga también pueden afectar al flujo. Si se requiere agua para lavar la zona no saturada se requerirá también un mayor flujo de agua. El agua que regresa al acuífero puede reducir el tiempo de limpieza al incrementar la carga hidráulica y el flujo de agua subterránea que se mueve hacia el pozo de bombeo.

En resumen, se deben de considerar los siguientes factores en la determinación del flujo de agua subterránea del sistema de tratamiento:

1. Reducir o revertir el movimiento de la pluma de contaminación.
2. Cuantificar el volumen de agua que entra al sitio contaminado.
3. La velocidad a la cual ocurre la limpieza
4. El número de pozos a utilizar
5. La disposición final o uso del agua tratada.

### **3.3 CONCENTRACIÓN DEL FLUJO DE ENTRADA**

La concentración de los contaminantes en el agua subterránea normalmente se determina mediante muestreo y análisis de agua de pozos o norias. El tipo de contaminante depende del material originalmente liberado al acuífero, mientras que la concentración relativa dependerá del sitio donde el pozo intersecta a la pluma de contaminación. Mientras más lejos esté el pozo del punto donde se liberó el contaminante, se producirá una mayor dilución de la pluma de contaminación y se requerirán varios pozos para tener una idea completa de distribución de la pluma.

Existen muchos otros factores que afecta a la concentración del contaminante además de la distancia del sitio de contaminación: volumen de material que llega al acuífero, su solubilidad y densidad, la transformación a otros compuestos, flujo del agua subterránea y el tiempo. Todos estos factores tienen un efecto directo en el tamaño del sistema de tratamiento a utilizar y en el tiempo requerido por dicho sistema para la limpieza total del acuífero.

El volumen de material que llega al acuífero esta a su vez compuesto de varios factores. El primero es la cantidad de material liberado y la primera pregunta que uno debe responder es si la fuente de contaminación ha sido controlada ya que hay casos donde el contaminante aún se introduce al acuífero. Por ejemplo, considere una contaminación provocada por un tiradero de basura.

## DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL TRATAMIENTO

---

Los lixiviados producidos en el tiradero de basura deben ser recolectados y tratados sin permitir que entren en contacto con el acuífero o el agua subterránea. Si ocurre una contaminación del suelo-agua, se debe controlar primero la entrada de lixiviados antes de iniciar la limpieza del acuífero ya que no tiene sentido limpiar si aún se presenta la entrada de lixiviados.

Una vez que la fuente de contaminación ha sido controlada se debe calcular la cantidad de lixiviados que entraron al suelo. Una parte de dicho volumen quedará adsorbido en la zona no saturada mientras que la otra llegará al acuífero. Por ejemplo, en el caso de derrames de gasolina se reporta que solo el 50% llega al acuífero. Por supuesto que el porcentaje depende del tipo de suelo que compone la zona no saturada, de la profundidad al espejo de agua y del volumen de material derramado.

La siguiente componente de la concentración en el acuífero proviene de la solubilidad y la densidad de los materiales derramados. Una gran cantidad de materiales liberados al suelo no son solubles en el agua. Las gasolinas comerciales por ejemplo, tienen solubilidad de 20–80 mg/litro. Cuando estos materiales se introducen al acuífero no se mezclan con el agua. La Figura 3.3 muestra un derrame

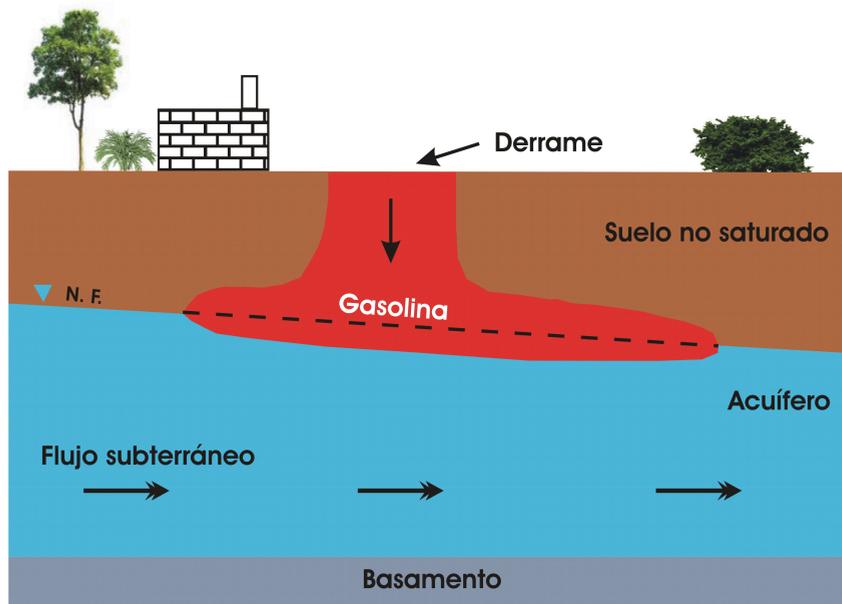


Figura 3.3 Derrame de gasolina flotando sobre el nivel freático de un acuífero.

de gasolina que flota sobre el nivel freático sin mezclarse con el agua subterránea. El material flotante fluye en la misma dirección del agua subterránea. Solo un pequeño porcentaje de la gasolina, compuestos de anillos de carbonos y los alcoholes, entra al acuífero y forma la pluma normal.

La gasolina es más ligera que el agua así que flota sobre el nivel freático. Los hidrocarburos de cadena lineal son más ligeros que el agua y también permanecen en la parte superior del acuífero. Sin embargo, los compuestos que son más pesados que el agua, como los hidrocarburos clorados, se hundirán hasta el fondo del acuífero. La Figura 3.4 muestra un derrame de tricloroetileno.

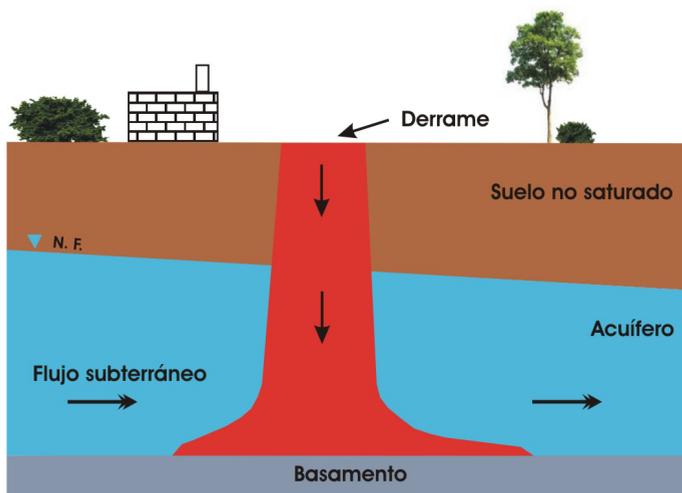


Figura 3.4 Derrame de tricloroetileno atravesando un acuífero.

Los contaminantes también pueden ser transformados en el suelo por reacciones químicas o biológicas, por lo que las concentraciones del contaminante en el acuífero y en la zona no saturada pueden ser muy diferentes a las encontradas en la fuente de contaminación. Esta transformación puede afectar la naturaleza y estructura de los compuestos y por lo tanto también afecta la concentración de los compuestos en el acuífero.

Otros factores considerados menores también se combinan para afectar la concentración de los contaminantes. Por ejemplo, mientras más rápido sea el flujo del agua subterránea en el sitio original de contaminación menor será la concentración del contaminante en el acuífero. La pluma de contaminación muestra también una

## DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL TRATAMIENTO

---

tendencia a dispersarse y mezclarse en la dirección perpendicular al flujo, lo cual afecta también a la concentración del contaminante en el acuífero.

Finalmente, todos los componentes anteriores junto con el proceso de tratamiento tienen efecto en la concentración a lo largo del tiempo. Mientras más se aleje uno del sitio de contaminación menor será la concentración del contaminante en la pluma. Si se perfora un pozo en la parte central de la pluma la concentración del contaminante se reducirá con el tiempo. Este proceso se acelerará aún más cuando se inicie la limpieza y aunque se presenta un mezclado normal del agua y el contaminante, el sistema de tratamiento podrá remover del acuífero la máxima concentración del contaminante.

Si el pozo se localiza al final de la pluma, la concentración se incrementará durante el bombeo. La Figura 3.5 muestra la variación de la concentración del contaminante con el tiempo para tres situaciones: (a) un derrame activo donde el contaminante continua entrando al acuífero; (b) un pozo ubicado al inicio de la pluma de contaminación y con la fuente de contaminación controlada; y (c) un pozo ubicado al final de la pluma. Para diseñar el sistema de tratamiento se debe de considerar no solo la concentración original del contaminante sino también diseñar los cambios en la concentración a lo largo de la vida útil del proyecto.

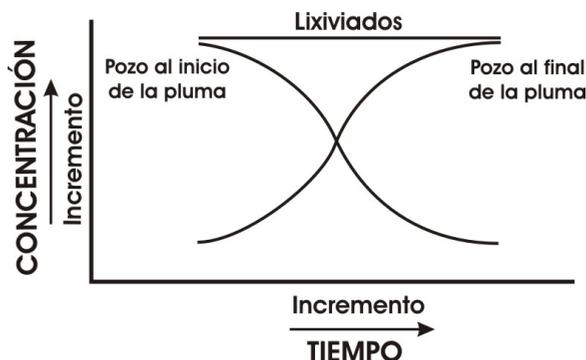


Figura 3.5 Variación de la concentración del contaminante con el tiempo.

En general la concentración de un contaminante en el agua subterránea es menor que la encontrada en las descargas industriales o municipales. La mayoría de las aguas residuales son tratadas con métodos biológicos, mientras que las bajas

concentraciones encontradas en el agua subterránea hacen que los métodos más utilizados sean “extracción y adsorción con carbón”.

En síntesis, se deben considerar los siguientes factores cuando se determina la concentración para el sistema de tratamiento del agua subterránea:

1. La distancia del pozo de muestreo al sitio de entrada del contaminante al acuífero.
2. La cantidad de material que llegó al acuífero.
3. La solubilidad del contaminante en el agua.
4. La densidad relativa de los componentes con respecto al agua.
5. Las posibles transformaciones de los contaminantes.
6. La velocidad del agua subterránea.
7. Las características de mezcla del acuífero.
8. El efecto del tiempo en la concentración.

### **3.4 REQUERIMIENTOS DE DESCARGA**

El diseño de las plantas de tratamiento también depende de la disposición final del agua tratada: cuerpo de agua superficial, ríos, sistemas de tratamiento municipales, o regresada al acuífero. Los requerimientos de descarga en cada caso son distintos y afectan en gran medida al tamaño y complejidad del sistema de tratamiento.

En caso de que la descarga producto de la limpieza del acuífero se realice al drenaje municipal o urbano, se debe asegurar que los contaminantes serán compatibles con el agua residual municipal que es procesada en una planta de tratamiento municipal. En algunos casos se puede requerir un pretratamiento adicional, por ejemplo, la remoción de metales pesados o compuestos puros.

Si el agua tratada es regresada al suelo o al acuífero debe ser colocada en un sitio adecuado para afectar de manera estratégica el movimiento de la pluma contaminante. La Figura 3.6 muestra como el agua tratada colocada al final de la pluma contaminante incrementa la carga hidráulica lo cual induce el movimiento de regreso de la pluma hacia un pozo central.

El agua también se puede utilizar para lavar la zona no saturada de la contaminación (Figura 3.7). A este proceso se le conoce como tratamiento in situ. Si el agua tratada

# DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL TRATAMIENTO

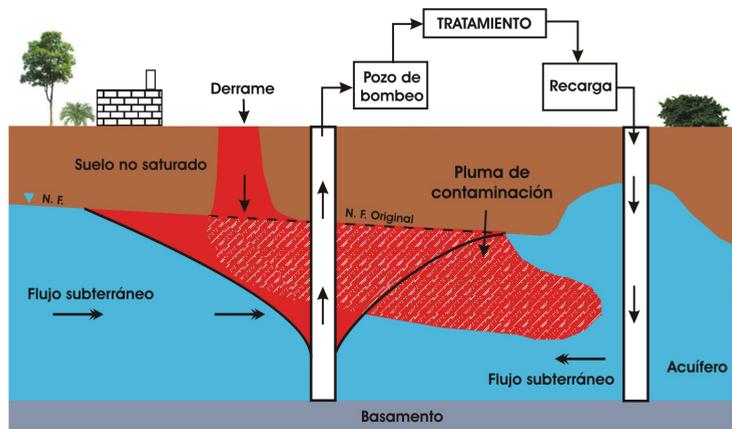


Figura 3.6 Efecto de un pozo de recarga en la dirección del flujo subterráneo.

se aplica al final de la pluma, los requerimientos de descarga son más estrictos debido a que parte del agua tratada no regresará al pozo central. Cualquier volumen de agua que escape de la zona de influencia de los pozos debe tener concentraciones menores o iguales a las naturales o de fondo del acuífero.

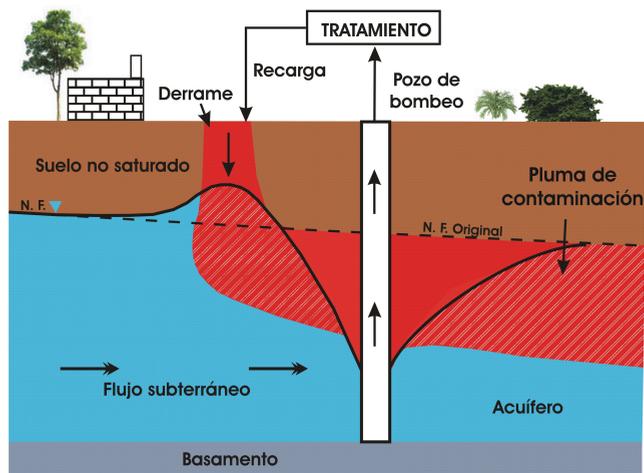


Figura 3.7 Efecto de una recarga superficial en la dirección del flujo subterráneo.

## ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS

---

Si se utiliza agua tratada para lavar los contaminantes como parte de un sistema de tratamiento in situ, el nivel de tratamiento del agua contaminada debe ser mucho menor. De hecho, el dejar algunas bacterias y enzimas en el agua tratada ayudará a estabilizar y lavar los contaminantes del suelo en el caso de sistemas de tratamiento biológico.

En resumen, el agua subterránea tratada puede ser:

1. Descargada a sistemas de tratamiento de aguas residuales ya establecidos.
2. Descargada a cuerpos de agua superficiales: lagos, ríos, etc.
3. Regresada al acuífero vía pozos o aplicada al suelo.

# TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS

Por su naturaleza, los acuíferos son lentos para contaminarse pero una vez que se han contaminado, difícilmente se autodepuran. Por ejemplo, la única opción para evitar futuras contaminaciones por nitratos en acuíferos someros susceptibles, es iniciar con el control del uso del suelo (Hendry, 1988).

En las zonas industriales, el problema principal lo constituyen los hidrocarburos de petróleo y los clorinados. La permanencia de estos contaminantes disueltos en el agua subterránea puede ser de décadas, lo que ha estimulado el desarrollo de las técnicas de remediación del agua subterránea (Keller, 1998).

Las principales alternativas de remediación dependen del tipo de contaminante. Enseguida se mencionan las principales fuentes de contaminación.



## PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN

En el medio subterráneo, la mayor parte de los microorganismos se encuentran adheridos a la matriz sólida y sólo una pequeña parte está libre en el agua o adherida a partículas en suspensión. Estas últimas suelen ser poco problemáticas, debido a que tienden a ser filtradas con facilidad por el suelo o subsuelo.

La máxima filtración se produce cuando el agua tiene que atravesar un cierto espesor de materiales poco permeables (como arcillas o margas) antes de llegar a la zona

saturada y regularmente ocurre en la zona no saturada de acuíferos detríticos. En este caso se produce de manera natural una depuración efectiva del agua.

### **SALES EN DISOLUCIÓN**

La mayoría de las sustancias disueltas en un agua subterránea natural se encuentran en estado iónico (presencia de aniones y cationes). El agua subterránea llamada dulce contiene como máximo 1,000 o quizá 2,000 ppm de sustancias disueltas; si el contenido es mayor, hasta 5,000 ppm se llama agua salobre o agua salada (hasta 40,000 ppm). Al agua que supera los 40,000 ppm llegando a veces a los 300,000 ppm, se llama salmuera y está asociada regularmente a depósitos salinos, agua de yacimiento petrolífero o bien agua muy antigua situada a gran profundidad.

### **OTROS CONTAMINANTES FISICOQUÍMICOS**

La presencia de sales en disolución con frecuencia va acompañada de acidez, alcalinidad o condiciones redox inapropiadas. La infiltración a través del suelo, o la naturaleza de la roca que constituye el acuífero, a menudo mitiga el problema. En suelos arenosos la filtración es mucho menos efectiva que en uno arcilloso. En rocas fracturadas y especialmente en acuíferos kársticos la circulación por la zona no saturada es muy rápida y no hay filtración.

### **NAPLs**

Los “Non Aqueous Phase Liquids” (NAPLs, por sus siglas en inglés), es español se les conocen como fase líquida no acuosa o líquidos inmiscibles con el agua y de menor densidad. Ejemplo de ellos son los hidrocarburos líquidos en fase no acuosa los cuales presentan una baja solubilidad en agua, se infiltran en el subsuelo y pueden alcanzar el agua subterránea (Zhuo y Blunt, 1997). Gran parte de la contaminación en el agua subterránea ocurre por fugas, derrames y disposición de NAPL (Rodríguez, 2003).

### **DNAPLs**

A los compuestos orgánicos líquidos inmiscibles en el agua cuya densidad es mayor a la del agua se les denomina “Dense Non Aqueous Phase Liquid” (DNAPLs, por sus siglas en inglés) y son altamente persistentes. Representan un grave problema por su capacidad de infiltración y migración en el subsuelo.

## **4.1 TÉCNICA DE CONFINAMIENTO**

Se basa en el aislamiento del agua o suelo contaminado y su objetivo básico es evitar que esa contaminación se transfiera lateralmente. Por lo general se aplica cuando la contaminación está muy localizada y no resulta viable ninguna de las demás alternativas (<http://uclm.es/users/higuera/mam/MMAM10.htm>). Dentro de este tipo de técnicas se incluyen las barreras de lodo, lechada de cemento, barreras químicas, barreras de paneles, membranas sintéticas, vitrificación in situ.

### **4.1.1 BARRERAS DE LODO**

Consisten en trincheras verticales que se excavan alrededor del área contaminada y se rellenan con un lodo que impermeabiliza el perímetro a aislar. El relleno está constituido por mezclas más o menos complejas del propio suelo con arcillas especiales (sepiolita, bentonita), que le confieran mayor estanqueidad (bien cerrado e incomunicado), o impermeabilidad a la barrera. El cemento también puede utilizarse para aumentar el grado de confinamiento. Este tipo de barreras suelen tener profundidades máximas de 15 m, entre 0.6 y 1.2 m de espesor y su mayor efectividad se consigue cuando quedan ancladas en una capa subyacente de menor permeabilidad (Figura 4.1).



Figura 4.1 Esquema de una sección de sistema de barrera de lodo ([www.uclm.es](http://www.uclm.es)).

#### 4.1.2 LECHADA DE CEMENTO

Consiste en impermeabilizar todo el perímetro inferior del área contaminada mediante la inyección de una capa continua de cemento. La perforación es dirigida, inclinada u horizontal, hasta la profundidad o distancia requeridas, seguida de una inyección forzada de lechada a presión mientras se retira la sonda de perforación. Para ello se requiere de una máquina perforadora por inyección de lechada de cemento equipada con un cabezal y un sistema de transmisión mecánico, además de una estructura hidráulica, lo cual le permite realizar perforaciones de agujeros con ángulos entre 0–90°. (Figura 4.2).

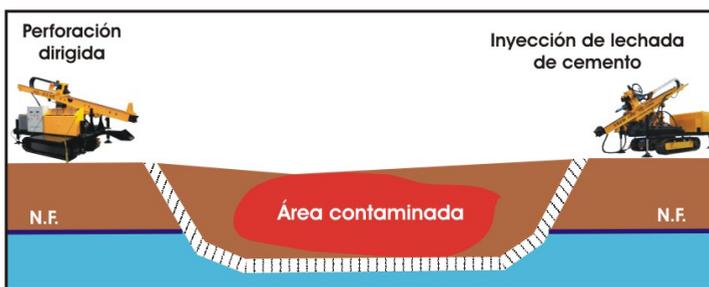


Figura 4.2 Esquema del proceso de inyección de lechada de cemento por debajo de un área contaminada ([www.uclm.es](http://www.uclm.es)).

#### 4.1.3 BARRERAS QUÍMICAS

Como en el caso anterior, se inyecta bajo el área afectada un producto que impide la dispersión del contaminante. Algunos productos químicos permiten reducir la permeabilidad del sustrato, y otros reducen la toxicidad o movilidad del contaminante (Figura 4.3).

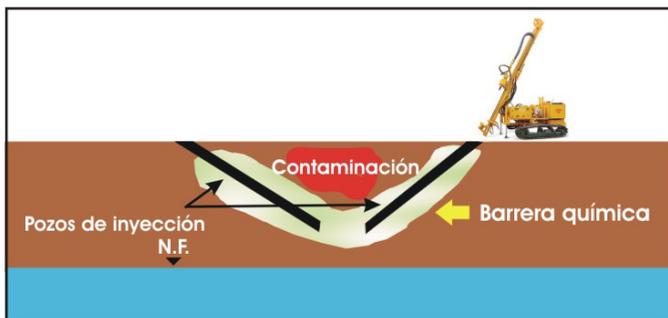


Figura 4.3 Esquema de una barrera química, inyectada bajo la zona contaminada ([www.uclm.es](http://www.uclm.es)).

## 4.1.4 BARRERAS DE PANELES

Consiste en implantar barreras formadas por paneles o tabiques de madera, cemento, hormigón armado, acero, de forma que en algunos casos puedan penetrar el terreno sin necesidad de excavación (Figura 4.4).

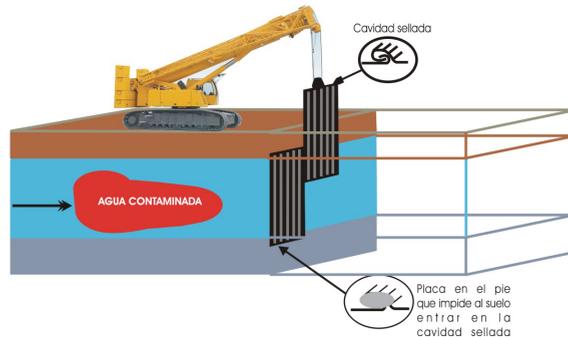


Figura 4.4 Instalación de una barrera de paneles, cuyas uniones quedan selladas mediante un dispositivo mecánico (www.uclm.es).

## 4.1.5 MEMBRANAS SINTÉTICAS

Las geomembranas son láminas impermeables fabricadas con materiales sintéticos entre los que destacan el PVC y el polipropileno, estas pueden instalarse mediante la correspondiente excavación en el entorno del área afectada. La principal función es la de impermeabilizar el suelo o estructuras de concreto (Figura 4.5).

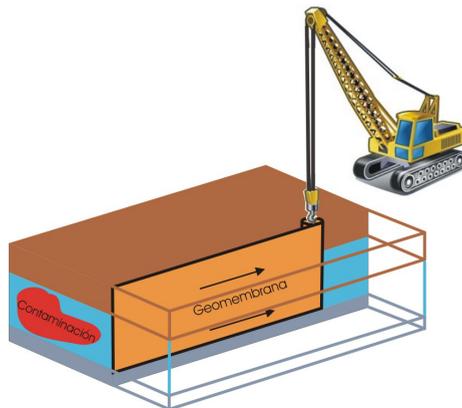


Figura 4.5 Extensión de una geomembrana en una zanja perimétrica respecto al área a aislar (www.uclm.es).

#### 4.1.6 VITRIFICACIÓN IN SITU

Esta técnica consiste en fundir el suelo a muy alta temperatura (1,600–2,000°C) mediante una corriente eléctrica, de forma tal que se consiga:

- La destrucción total de los contaminantes orgánicos que se transforman en gases que son recogidos mediante una campana instalada en la zona.
- El aislamiento completo de otros contaminantes que el suelo-agua pueda contener (inertización): sobre todo, metales pesados que quedan formando parte de un vidrio muy resistente a la meteorización (Figura 4.6).

La vitrificación in situ constituye una alternativa agresiva, pero muy efectiva para contaminaciones polifásicas (gaseosa, sólida) que incluyen compuestos muy refractarios (dioxinas, bifenilos policlorados) y para problemas relativamente superficiales. Esta técnica se ha llegado a aplicar con éxito hasta unos 6 m de profundidad. El suelo fundido originado como resultado de la vitrificación es muy resistente, cerca de diez veces más que el hormigón; la vitrificación permite obtener un suelo estable, no soluble y no tóxico. La desventaja es que es muy costoso y hay emisión de gases.

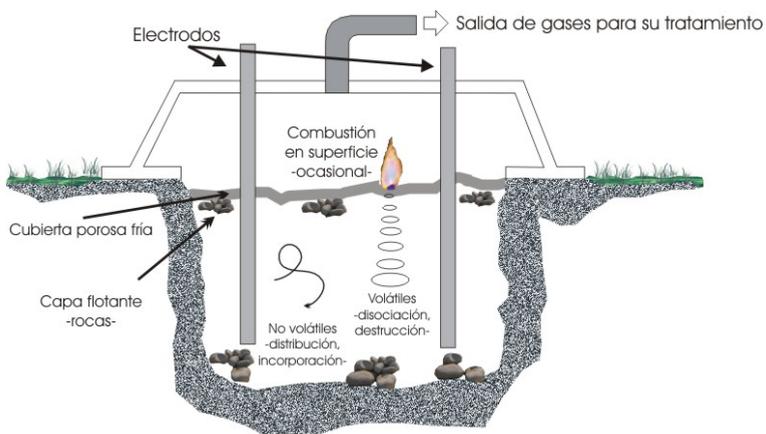


Figura 4.6 Esquema de funcionamiento de un sistema de vitrificación, sobre la base de una corriente de alto voltaje y un sistema de recuperación de los gases emitidos para su tratamiento ([www.uclm.es](http://www.uclm.es)).

## 4.2 TÉCNICA DE TRATAMIENTO *IN SITU*

Estas técnicas son las que se aplican sin necesidad de trasladar el suelo o el agua subterránea afectados por el problema. Suelen ser de utilidad cuando el problema afecta a un volumen muy importante del suelo, que haga inviable su aislamiento y su tratamiento *ex situ*, o cuando éste supone un costo que lo hace inviable, ya que el tratamiento *in situ* suele implicar un menor costo. El tratamiento *in situ* puede ser de dos tipos: biológico o fisicoquímico.

### 4.2.1 BIOLÓGICO

Las técnicas biológicas *in situ* son de dos tipos: biorremediación y fitorremediación.

La técnica de **biorremediación** consiste en utilizar microorganismos (bacterias) para resolver o mitigar el problema, y es especialmente efectiva en el tratamiento de contaminantes orgánicos, incluido el petróleo. Para que las bacterias puedan eliminar las sustancias químicas dañinas, el suelo y el agua subterránea deben tener la temperatura, los nutrientes y la cantidad de oxígeno apropiados. Estas condiciones permiten que las bacterias crezcan y se multipliquen, y asimilen más sustancias químicas. Cuando las condiciones no son las adecuadas, las bacterias crecen muy despacio o mueren, o incluso pueden crear sustancias químicas más dañinas.

Si las condiciones del área no son las adecuadas, se intenta mejorarlas. Una manera de hacerlo es bombear aire al interior del suelo, así como nutrientes u otras sustancias, como la melaza. A veces se añaden microbios si no los hay, para ayudar a eliminar la contaminación, mezclando el agua con nutrientes y aire antes de reinyectarla al suelo. También pueden bombearse nutrientes y aire por los pozos, de forma que la mezcla se produzca directamente a profundidad. Los nutrientes y el aire añadidos ayudan a las bacterias a biorremediar el agua subterránea, una vez que se han eliminado las sustancias químicas dañinas, las bacterias ya no tienen alimento disponible y mueren.

Su aplicación es únicamente para la descontaminación de hidrocarburos biodegradables, en condición relativamente superficial.

La técnica de **fitorremediación** tiene varios subtipos: fitoextracción, fitoestabilización, fitovolatilización y fitofiltración/rizofiltración (Figura 4.7).

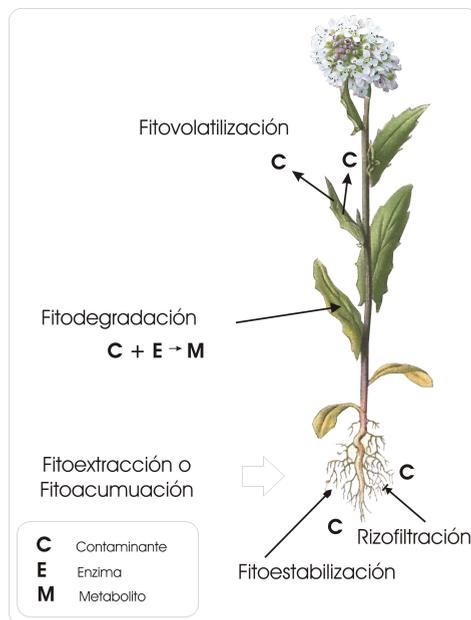


Figura 4.7 Procesos involucrados en la fitorremediación.

La fitoextracción consiste en el empleo de plantas hiperacumuladoras, capaces de extraer los metales pesados contenidos en el suelo; las plantas deben ser capaces de producir biomasa abundante en poco tiempo la cual debe ser almacenada o procesada adecuadamente.

La fitoestabilización consiste en el uso conjunto de plantas metalófitas endémicas y de mejoradores de sustratos adecuados para estabilizar física y químicamente sustratos ricos en metales. Esta técnica a menudo requiere fertilización o modificación del suelo así como mantenimiento para evitar la formación de lixiviados.

La fitovolatilización consiste en la extracción del contaminante del suelo por la planta y su emisión a la atmósfera a través de su sistema metabólico. Los inconvenientes que tiene esta técnica es que el contaminante o sus derivados tóxicos pueden acumularse en la vegetación pasando a frutos o partes comestibles.

Por último la fitofiltración/rizofiltración consiste en el uso de plantas terrestres y acuáticas para absorber, concentrar y precipitar contaminantes de medios acuáticos.

El pH del medio debe controlarse en forma continua para optimizar la captación del metal, siendo necesario controlar posibles procesos de especiación e interacciones entre especies que puedan darse en el medio. Esta técnica funciona como un biorreactor y requiere un mantenimiento intensivo.

#### 4.2.2 FÍSICOQUÍMICO

Las técnicas fisicoquímicas incluyen atenuación natural controlada, barreras reactivas permeables, extracción de vapor y aireación del suelo, flushing in situ, tratamientos térmicos, oxidación química, electrodescontaminación y fracturación.

La atenuación natural controlada (MNA por sus siglas en inglés, monitored natural attenuation) se basa en el aprovechamiento y potenciación de los procesos naturales para eliminar o reducir la contaminación en suelo y agua subterránea.

Cuando el medio ambiente se contamina con sustancias químicas, la naturaleza las elimina por cuatro vías (Figura 4.8): a) acción bacteriana, b) adsorción, c) mezcla y dilución y d) evaporación. La MNA funciona con mayor eficacia en sitios donde se ha eliminado previamente la fuente de contaminación.

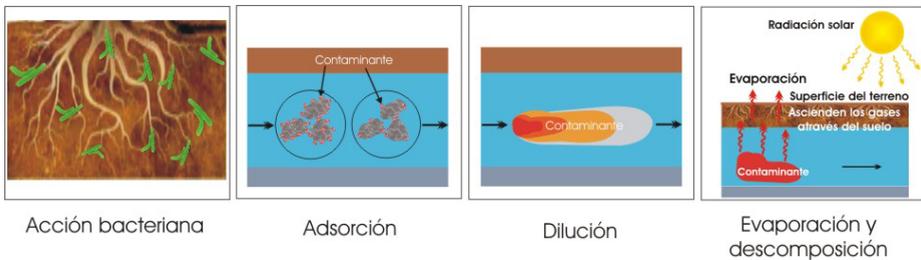


Figura 4.8 Procesos de eliminación por atenuación natural controlada.

Las barreras reactivas permeables se instalan en sitios donde se ha identificado un flujo de agua subterránea contaminada, para su depuración. Se construyen cavando una zanja larga y estrecha transversal a la dirección del agua subterránea contaminada. La zanja se llena de material reactivo (hierro, caliza, carbón, carbón activado) capaz de eliminar o atrapar las sustancias químicas dañinas. El material reactivo se mezcla con arena para facilitar que el agua fluya a través de la barrera en lugar de alrededor de ella (Figura 4.9).

## ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS

Los materiales reactivos eliminan la contaminación por distintos métodos: 1) atrapando o adsorbiendo las sustancias químicas en su superficie (carbón), 2) precipitando las sustancias químicas disueltas en el agua (caliza), 3) transformando las sustancias químicas dañinas en inofensivas (hierro) y 4) estimulando a los microorganismos del suelo a que se alimenten de las sustancias químicas.

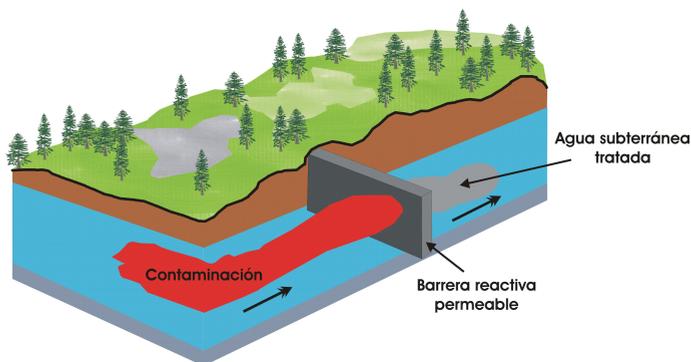


Figura 4.9 Representación esquemática de una barrera reactiva permeable.

La extracción de vapores del suelo y la aireación del suelo se emplean para extraer y vaporizar los contaminantes químicos del suelo. La extracción de vapores del suelo se emplea por encima del nivel freático y consiste en la perforación de pozos, en los que se aspiran los contaminantes volátiles contenidos en el suelo. La aireación del suelo se utiliza por debajo del nivel freático y en la inyección de aire en acuífero (Figura 4.10).

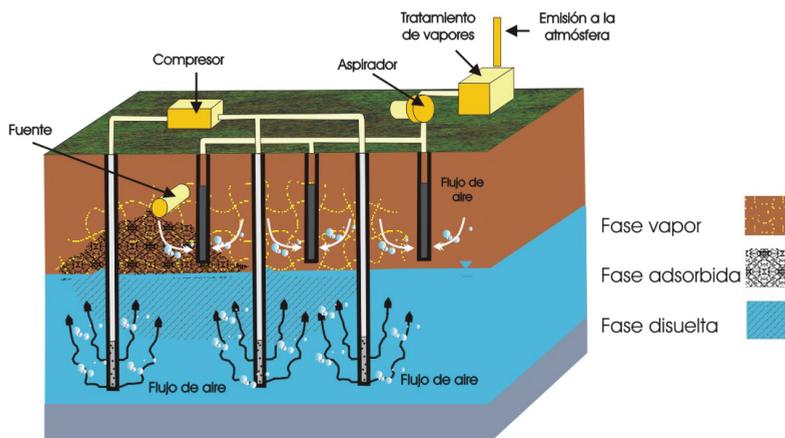


Figura 4.10 Combinación de las técnicas de extracción de vapor y aireación del suelo; la primera actúa por encima del nivel freático y la segunda por debajo del mismo.

## TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS

Flushing in situ es una técnica que se utiliza para eliminar contaminantes de tipo NAPL o DNAPL y se basa en la introducción al suelo (desde la superficie o mediante pozos de inyección) de compuestos químicos (surfactantes, como son los detergentes; y cosolventes, alcoholes) que reaccionan y disuelven el contaminante (Figura 4.11).

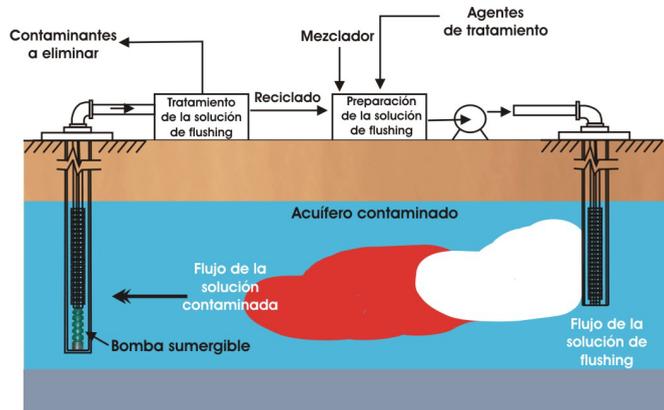


Figura 4.11 Sistema de “flushing in situ” actuando sobre una porción de suelo contaminado.

Tratamientos térmicos son un grupo de técnicas que incluyen la inyección de vapor, aire caliente, agua caliente, calentamiento mediante resistencia eléctrica, mediante radiofrecuencia o por conductividad térmica que se basan en la extracción de contaminantes a través de su movilización a altas temperaturas (Figura 4.12).

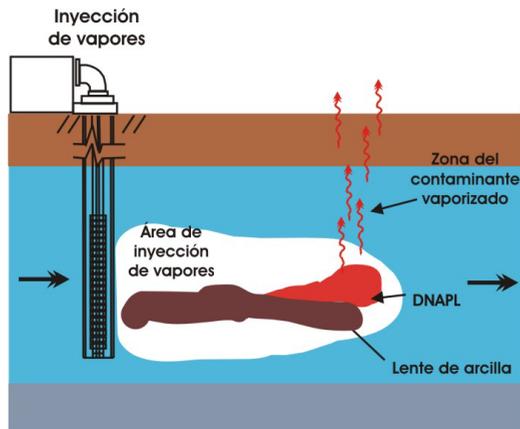


Figura 4.12 Técnica de tratamiento térmico basada en la extracción de contaminantes a través de la inyección de vapor.

La técnica de oxidación química se basa en la introducción al acuífero de oxidantes (agua oxigenada y permanganato de potasio) mediante pozos ubicados a distintas profundidades, lo cual provoca la oxidación química de los contaminantes. En ocasiones no es necesario bombear los productos de la oxidación (Figura 4.13). Ocasionalmente en vez de oxidar el contaminante es necesario reducirlo, como en el caso del  $\text{Cr}^{6+}$  a  $\text{Cr}^{3+}$ , lo cual se logra mediante la inyección al acuífero de sulfitos. El  $\text{Cr}^{3+}$  es menos tóxico que el  $\text{Cr}^{6+}$ .

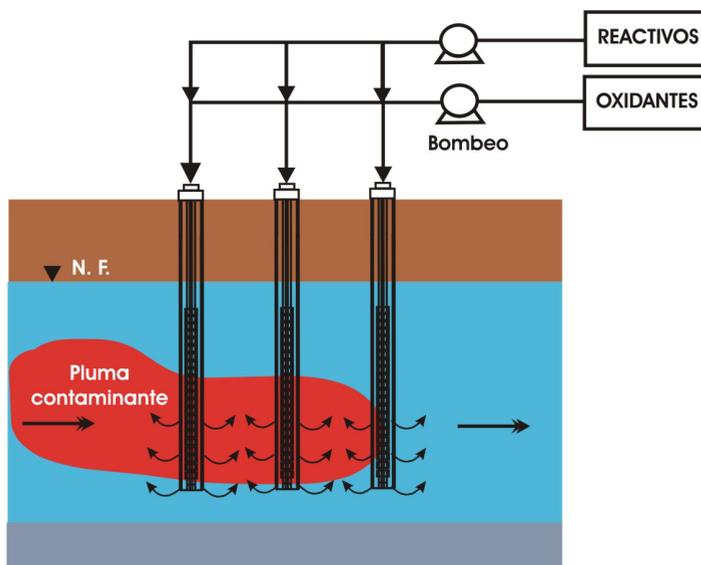


Figura 4.13 Representación de la técnica de oxidación química.

La electrodescontaminación consiste en la movilización de los contaminantes bajo la acción de un campo eléctrico (Figura 4.14). Se basa en la introducción de electrodos en el suelo y la aplicación de diferencial de potencial lo cual ocasiona que los contaminantes sigan el movimiento de las líneas del campo eléctrico.

## TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS

---

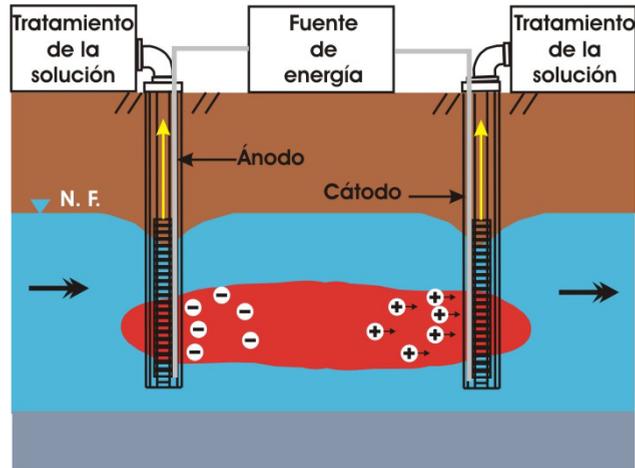


Figura 4.14 Técnica de tratamiento térmico basada en la extracción de contaminantes a través de la electrodescontaminación.

Los mecanismos por los que se produce la migración de los contaminantes son: movilización, electro-osmosis (movimiento de un líquido bajo la influencia de un campo eléctrico, a través de una pared porosa) y electroforesis (migración de sustancias por la acción de un campo eléctrico). La electrodescontaminación presenta buenos resultados en sitios con altos contenidos en metales pesados (Cu, Zn, Pb, As).

La fracturación se emplea a menudo en combinación con otras técnicas, ya que se trata de un procedimiento por el cual se produce una fracturación de suelo muy compacto. Existen dos tipos de fracturación: 1) hidráulica que utiliza agua bombeada a presión mediante pozos (para fracturar suelos a profundidades considerables se añade arena al agua), y 2) neumática que utiliza aire a presión para fracturar la roca y a menudo esto favorece también la movilización de los contaminantes (Figura 4.15).

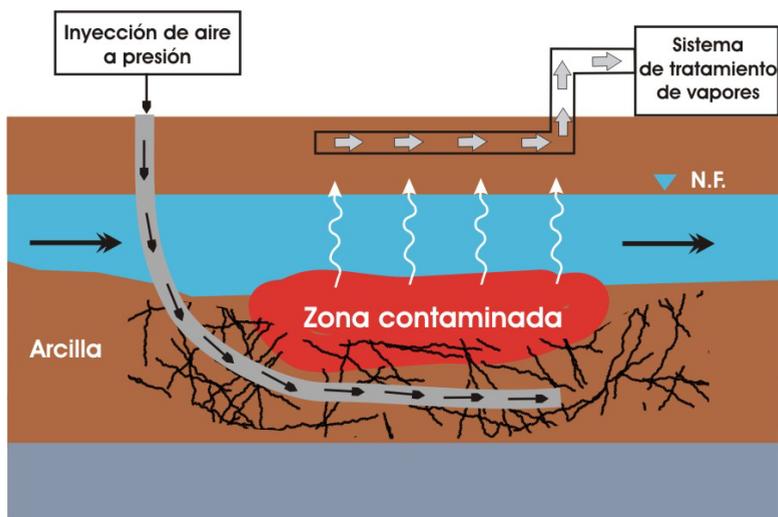


Figura 4.15 Sistema de fracturación neumática basado en el empleo de aire a presión para ayudar en la movilización de los contaminantes del suelo.

### 4.3 TÉCNICA DE TRATAMIENTO *EX SITU*

Estas técnicas tienen en común que el suelo y agua es removido de su lugar original y tratado en una planta externa, para la eliminación del contaminante mediante una variedad de técnicas disponibles. Después del tratamiento, el suelo y agua pueden ser devueltos a su sitio original, siempre y cuando se verifique que está completamente descontaminado.

#### 4.3.1 DESADSORCIÓN TÉRMICA

Técnica basada en el calentamiento del suelo en una “unidad de desadsorción”. Consiste en el calentamiento de la tierra contaminada hasta una temperatura que oscila entre los 90 y 540°C, a fin de que los contaminantes con un punto de ebullición bajo se vaporicen y, por consiguiente, se separen de la tierra. Una vez vaporizados, los contaminantes se recogen y tratan en un sistema de tratamiento de emisiones (Figura 4.16).

## TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS

Los sistemas típicos de desadsorción tienen tres componentes (Miliarium, 2012): 1) sistema de tratamiento preliminar y movimiento de materiales, 2) dispositivo de desadsorción y 3) sistema posterior al tratamiento para gases (contaminantes vaporizados) y sólidos (la tierra que queda).

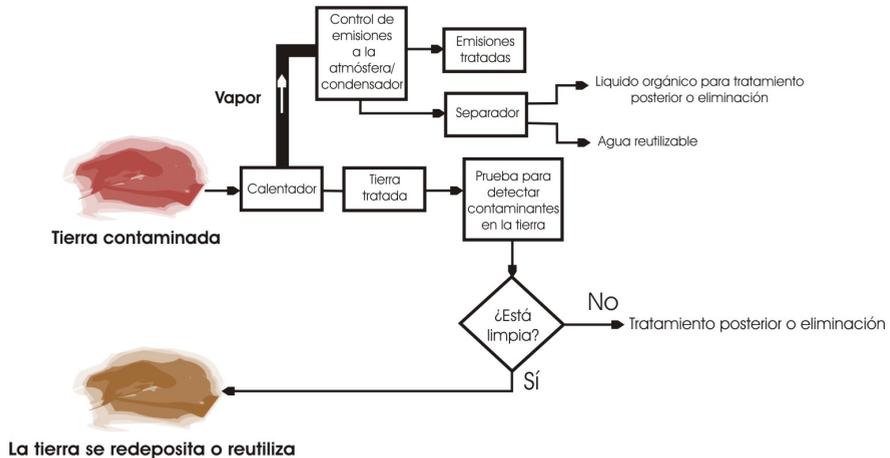


Figura 4.16 Esquema de un sistema de desadsorción térmica.

### 4.3.2 LAVADO DEL SUELO

Técnica basada en el empleo de detergentes y en la separación granulométrica de las fracciones finas y gruesas de los sedimentos que componen la matriz del acuífero. Debido a su mayor capacidad de adsorción, las fracciones finas (arcilla) se encuentran generalmente más contaminadas que las gruesas (arena), por lo que estas últimas son más fáciles de limpiar (Figura 4.17).

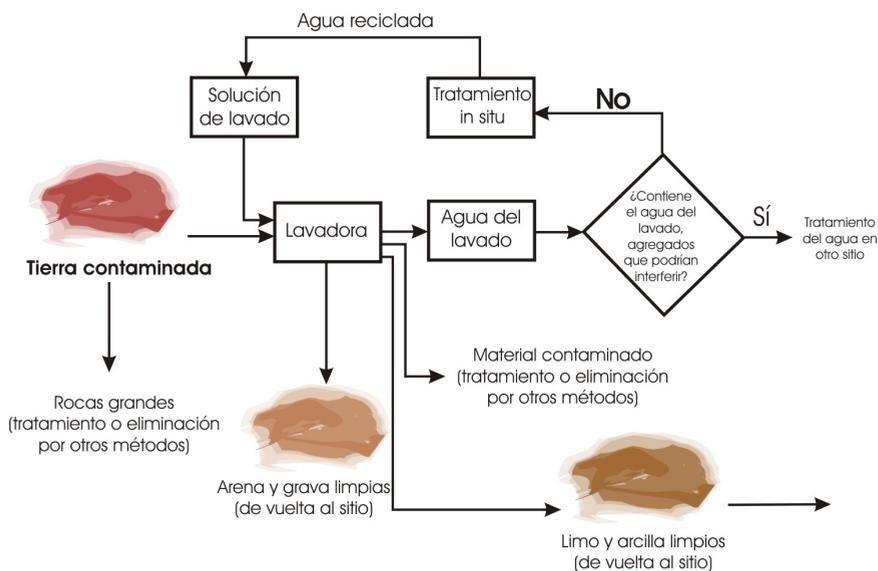


Figura 4.17 Representación de un sistema de lavado de suelos.

#### 4.3.3 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

La extracción por solventes (también denominada extracción química) es un método de limpieza que utiliza solventes para extraer los productos químicos nocivos de los materiales contaminados (Figura 4.18). Productos químicos tales como los bifenilos policlorados, el aceite y la grasa no se disuelven en el agua y permanecen adheridos al suelo, sedimento y lodo, lo cual dificulta su limpieza. Los solventes son químicos que se pueden utilizar en éstos casos para extraer dichos contaminantes.

Antes de realizar la extracción por solventes, se debe extraer el suelo del área contaminada para su tratamiento. Posteriormente se tamiza el suelo para remover los objetos grandes como rocas o escombros. Luego se coloca en una máquina llamada extractor donde se mezcla con el solvente. Se realizan pruebas al suelo limpiado para asegurar que se hayan eliminado los productos químicos nocivos. Si aún quedan indicios de contaminación, se coloca el suelo nuevamente en el extractor para repetir el proceso. Finalmente el suelo limpio se puede volver a colocar en su lugar de origen (<http://nepis.epa.gov/>).

## TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS

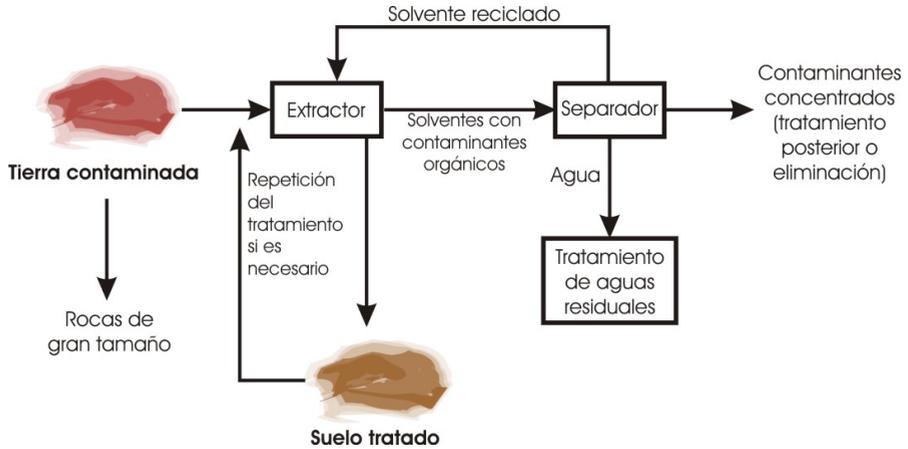


Figura 4.18 Esquema de un sistema de extracción por solventes.

### 4.3.4 DESHALOGENACIÓN QUÍMICA

La deshalogenación química remueve los halógenos de los químicos nocivos y, de esta manera, disminuye su toxicidad. Los halógenos constituyen una clase de elementos químicos que incluyen al cloro, bromo, yodo y flúor. La deshalogenación química se utiliza comúnmente para remover cloro de bifenilos policlorados y dioxinas presentes en suelos, lodo o sedimento contaminados (Figura 4.19).

Antes de realizar la deshalogenación química, es necesario excavar el suelo del área contaminada a fin de tratarlo. El suelo se tamiza y tritura para eliminar objetos grandes como rocas o escombros. Luego el suelo tamizado se mezcla con químicos y se calienta en un recipiente de gran tamaño denominado reactor. Durante el proceso de mezclado y calentamiento, tiene lugar una reacción que convierte el producto químico nocivo en uno menos tóxico.

Los dos tipos más comunes de deshalogenación química son la deshalogenación por glicolato y la descomposición por catalización de base. En el primer caso se usa un reactivo químico llamado APEG compuesto por un hidrato de metales alcalinos (la “A” de las siglas APEG) y un glicol polietilénico (que se abrevia “PEG” en inglés); éste compuesto se agrega al suelo dentro del reactor. Durante la mezcla y el calentamiento, uno de los químicos se combina con los halógenos para formar una

sal no tóxica. El otro químico reemplaza a los halógenos para formar otros químicos no tóxicos. El calor en el reactor puede causar la evaporación de algunos químicos presentes en el suelo.

Después, se vierte el suelo a un separador donde se elimina el exceso de APEG. El agua del lavado se retira del suelo y se trata. Una vez que el suelo está limpio, puede ser colocado nuevamente en el sitio.

En la descomposición por catalización de base, se agrega al suelo dentro del reactor un químico llamado “bicarbonato de sodio”. Este químico permite la evaporación de los químicos nocivos presentes en el suelo a una baja temperatura. Una vez que los químicos se evaporan, se puede volver a colocar el suelo limpio en el sitio (www.epa.gov).

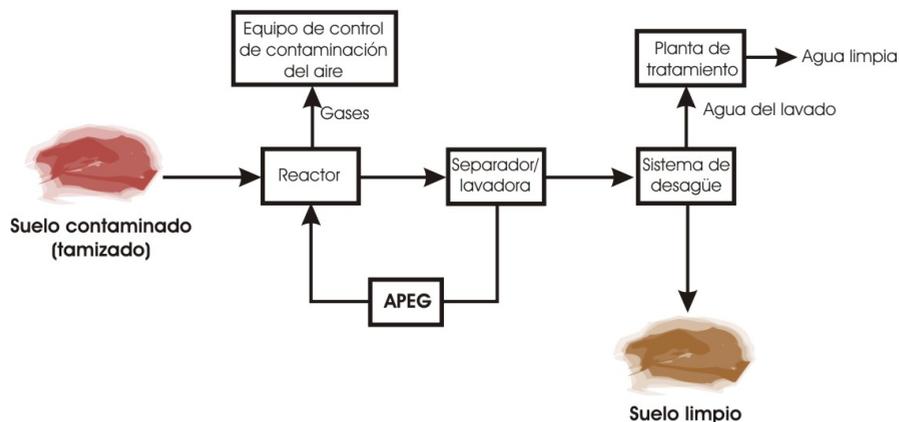


Figura 4.19 Proceso de la técnica de deshalogenación química.

La aplicación de estas técnicas requiere del apoyo de complejos modelos matemáticos (Sleep, 1998; Sleep y Sykes, 1993) tanto para simular el transporte de los contaminantes como para evaluar la efectividad de las variantes de remediación considerados.

La Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR, por sus siglas en inglés) propone utilizar la siguiente matriz de selección de tecnologías de remediación. La cual permite filtrar tecnologías in situ y ex situ para recuperación de agua subterránea. Las variables utilizadas en la detección incluyen contaminantes, estado de desarrollo, el costo total y el tiempo de limpieza (FRTR, 2012).

# TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS

Tabla 4.1 Matriz de selección de tecnologías de remediación. (FRTR, 2012)

Códigos de clasificación ● Arriba de la media ◐ Promedio ○ Debajo de la media N/A No aplicable D/I Datos insuficientes ◊ El nivel de eficacia depende en gran medida del contaminante específico y su aplicación	Estado de desarrollo	Tren de tratamiento	Costo total en relación al rendimiento				Disponibilidad	Compuestos orgánicos volátiles no halogenados	Compuestos orgánicos volátiles halogenados	Compuestos orgánicos semivolátiles no halogenados	Compuestos orgánicos semivolátiles halogenados	Combustibles	Inorgánicos	Radionucleidos	Explosivos	
			Operación y Mantenimiento	Capital	Confiabilidad y mantenimiento	Costos relativos										Tiempo
<b>Agua subterránea, agua superficial y lixiviados</b>																
<b>Tratamiento biológico in situ</b>																
Biorremediación mejorado	●	●	○	◐	◐	●	◊	●	●	◊	●	◊	●	◊	○	◐
Atenuación natural monitoreada	●	●	○	◐	◐	●	◊	●	●	◐	◐	●	○	○	○	
Fitorremediación	●	●	●	●	○	●	○	◐	◐	◐	◐	◐	◊	○	○	
<b>Tratamiento físico/químico in situ</b>																
Inyección de vapor	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◐	◐	◐	●	○	○	○
Bioaspersión	●	◐	●	●	◐	●	◐	●	◐	◐	●	●	●	◐	○	○
Oxidación química	●	●	○	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	○	◐	○	◊	○	◐
Pozos direccionados	●	●	◐	○	◐	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐
Extracción de doble fase	●	○	○	○	◐	◐	◐	●	●	●	●	●	●	○	○	○
Tratamiento termal	●	○	○	○	◐	◐	●	●	◐	●	●	●	●	○	○	○
Fracturamiento hidráulico	●	◐	●	●	●	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐
Extracción de aire dentro de pozos	●	◐	◐	○	◐	◐	○	●	◐	◐	○	◐	○	○	○	○
Tratamiento de barreras pasivas/reactivas	●	●	◐	○	●	◐	○	●	●	●	●	◐	◊	○	○	●
<b>Tratamiento biológico ex situ</b>																
Bioreactores	●	●	◐	○	◐	●	◐	●	●	●	◊	●	○	○	○	●
Humedales artificiales	●	●	◐	○	◊	◐	◊	○	◐	◐	◐	◊	◐	●	○	●

# ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS

Tabla 4.1 Matriz de selección de tecnologías de remediación.  
(continuación)

Tratamiento físico/químico ex situ (asumiendo bombeo)																	
Adsorción/absorción	●	●	○	◐	◑	○	○	●	◐	◑	◐	◑	○	●	◇	○	
Procesos avanzados de oxidación	●	◐	○	○	◐	◑	○	●	●	●	●	●	●	●	◇	◇	●
Separación de aire	●	◐	○	◐	●	●	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○	
Adsorción de carbón en fase líquida/granulado/carbón activado	●	◐	○	◐	●	◐	○	●	●	●	●	●	●	●	◇	○	◇
Bombeo de agua subterránea/bombeo y tratamiento	●	◐	○	○	●	○	○	●	◐	◑	◐	◑	◇	◐	◑	○	◐
Intercambio de iones	●	◐	○	○	●	◐	○	●	○	○	○	○	○	○	●	◐	○
Precipitación/ coagulación/ floculación	●	◐	◐	○	●	◐	○	●	○	○	○	○	○	○	●	◐	○
Separación	●	◐	○	○	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	◇	◇	○
Riego por aspersión	●	●	●	●	●	○	○	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○
Contención																	
Barreras físicas	●	●	◐	○	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●
Inyección de pozos profundos	●	●	●	●	◐	●	○	●	◐	◑	◐	◑	◐	◑	◐	◑	◐
Emisiones de aire/tratamiento de gases emitidos																	
Biofiltración	●	N/A	●	●	◇	●	●	○	●	◇	◇	◇	●	○	D/I	◇	
Destrucción aplicando gran energía	○	N/A	D/I	D/I	○	◐	D/I	◐	●	●	●	●	●	●	◐	D/I	○
Membrana de separación	○	N/A	D/I	D/I	○	◐	D/I	◐	●	●	◐	◑	◐	○	D/I	◐	
Oxidación	●	N/A	●	●	●	●	D/I	●	●	●	●	●	●	○	D/I	◐	
Depuradores	●	N/A	◐	○	●	●	D/I	●	○	○	○	○	○	○	●	D/I	D/I
Adsorción de carbón en fase de vapor	●	N/A	●	●	●	●	D/I	●	●	●	●	●	●	●	◐	D/I	●

# TÉCNICAS DE SANEAMIENTO DE GASOLINA

## 5.1 ASPECTOS GENERALES

**D**e acuerdo a Lesser y Asociados (1990) los tanques subterráneos almacenados de gasolina llegan a ser corroídos y dar origen a fugas que contaminan el suelo. En muchas ocasiones el contaminante circula y se encuentra en contacto con el acuífero. La gasolina, por tener una densidad menor que el agua, tiende a flotar y almacenarse arriba del nivel freático o estático (Figura 5.1).

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

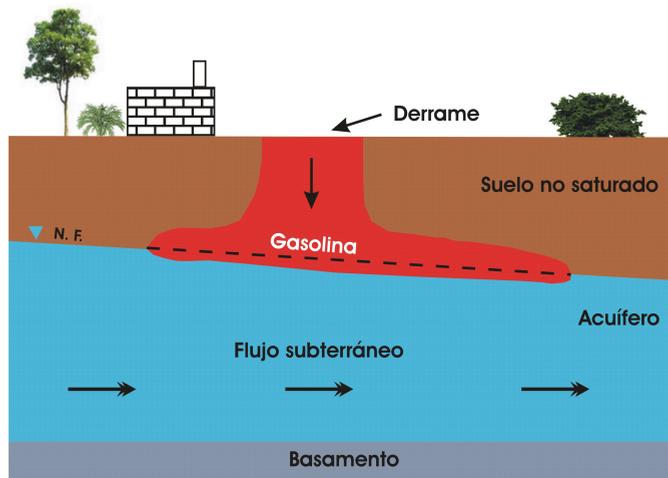


Figura 5.1 Productos del petróleo flotando en la parte superficial del acuífero (Nyer, 1985).

La gasolina infiltrada tiende a avanzar hasta el nivel estático donde, por presentar una menor densidad que el agua, flota sobre ella. Parte de esta gasolina se volatiliza ocupando espacios porosos arriba del nivel freático, que en ocasiones llegan cerca de la superficie del terreno donde pueden ser detectados (algunos componentes de las gasolinas se volatilizan, propiedad que se aprovecha para su detección).

## **5.2 MEDICIÓN Y DETECCIÓN DE VOLÁTILES EN EL SUBSUELO**

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

Para la perforación de los pozos someros de medición se utilizan equipos especiales diseñados para ello, que en general consisten de un martillo eléctrico, al cual se unen barras de perforación. Su operación es manual y su costo bajo.

## **5.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS GASOLINAS**

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

Cada constituyente tiene características físicas y químicas diferentes que controlan su comportamiento en el subsuelo. Así, mientras que algunos pueden ser adsorbidos totalmente por el suelo otros se volatilizan y otros más presentan un comportamiento variado y complejo.

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

1. Los que preferentemente son adsorbidos por la estructura del suelo.
2. Los que se volatilizan rápidamente.
3. Los que pueden causar mayor peligro.
4. Los que no tienen un comportamiento de migración definido.

Los hidrocarburos ligeros tienden a volatilizarse mientras que los pesados tienen a quedarse entre las partículas del suelo. Los hidrocarburos ligeros son conocidos como LNAPLs (Light Non-Aqueous Phase Liquids).

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

#### 5.4 TRANSPORTE DE LÍQUIDOS

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

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

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

$$Vol = \left( \frac{0.2 * V}{P * Sr} \right)$$

Donde:

*Vol* volumen del suelo requerido para inmovilizar una sustancia

*V* volumen de sustancia infiltrada

*P* porosidad

*Sr* saturación residual

Cuando la sustancia contaminante infiltrada alcanza el nivel estático, flotará sobre éste. La migración o transporte de la gasolina sobre el acuífero está gobernada por su densidad, que al ser menor a la del agua ocasionará que flote, invadirá la zona capilar y circulará gradiente abajo.

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

## 5.5 TRANSPORTE DE VAPORES

Muchos de los componentes de las gasolinas son volátiles; al encontrarse expuestos a la presión atmosférica y temperatura ambiente pasan al estado gaseoso. Su presencia es peligrosa ya que llegan a acumularse ocasionando explosiones o incendios.

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

El transporte de los vapores orgánicos en la zona no saturada del subsuelo es gobernado por los procesos de difusión y convección y es descrito por la ley de Fick, aplicada a un gas dentro de un poro, expresada como:

$$Qg = Oa(t) * Dab * \left( \frac{dCa}{dz} \right)$$

Donde

$Qg$  flujo de masa por unidad de área por unidad de tiempo

$C$  concentraciones del soluto "a"

$Oa$  aire que llena el poro

$t$  tortuosidad

$Dab$  coeficiente de difusión del gas a al gas b

$\left( \frac{dCa}{dz} \right)$  gradiente de la concentración en la dirección z

## 5.6 TÉCNICAS DE SANEAMIENTO

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

## 5.6.1 EXCAVACIÓN

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

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

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

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

## 5.6.2 VOLATILIZACIÓN

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

En la Figura 5.2 se muestra un ejemplo de un sistema utilizado para la ventilación del subsuelo y el arrastre de compuestos volátiles. La preinyección de aire con cierta temperatura incrementa el grado de volatilización. En la figura mencionada, se muestra un calentador de aire y un ventilador con el cual el aire es inyectado al subsuelo a través de una serie de tuberías y pozos, el aire es extraído, habiendo arrastrado volátiles a su paso por el subsuelo. La extracción de aire se auxilia mediante un extractor. Ya en la superficie los volátiles pueden ser retenidos mediante un filtro de carbón activado.

# ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS

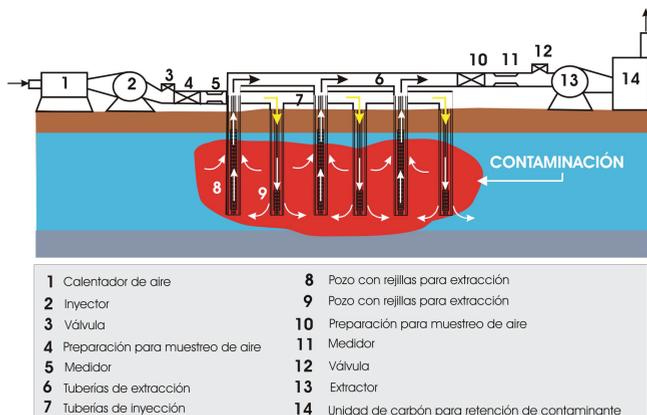


Figura 5.2 Ventilación del suelo y arrastre de volátiles (Lesser y Asociados, 1990).

### 5.6.3 BIODEGRADACIÓN

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

En la Figura 5.3 se ilustra este método; se muestra un pozo del cual se extrae agua del subsuelo la cual es llevada a un tanque en donde recibe oxígeno y nutrientes, como

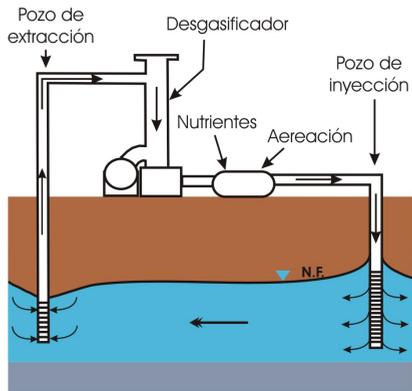


Figura 5.3 Biodegradación aplicando nutrientes y oxígeno (Lesser y Asociados, 1990).

nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes son transportados por el agua al suelo mediante un pozo de inyección.

### 5.6.4 VITRIFICACIÓN

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

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

Este método quema algunos orgánicos e inmoviliza a otros. El calor provocado llega a alcanzar hasta 1,700°C, ya que los suelos generalmente constituidos por sílice y óxidos de aluminio se funden a temperaturas entre 1,100 y 1,600 ° C.

### 5.6.5 AISLAMIENTO

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

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

En la Figura 5.4 se muestra una típica barrera.

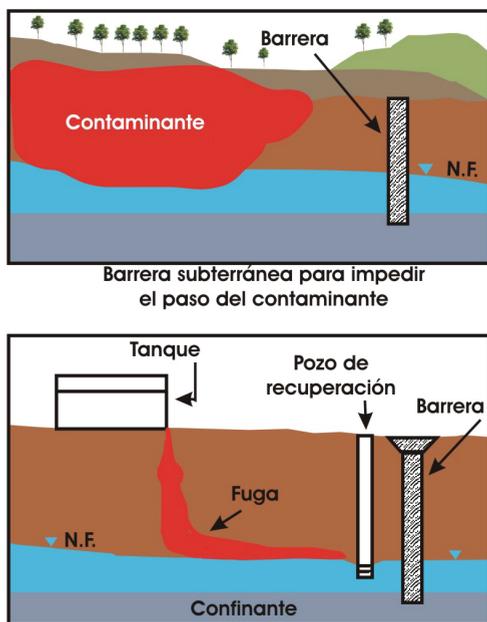


Figura 5.4 Barrera para el aislamiento de zonas contaminadas (Lesser y Asociados, 1990).

Pueden inyectarse al subsuelo mezclas de arcilla con cemento, bentonita o productos químicos como silicato de sodio. La inyección se hace a través de pozos distribuidos a distancias del orden de 1.5 m y traslapados en la forma como se muestra en la parte superior de la Figura 5.5.

La cortina impermeable formada por la inyección de productos en el subsuelo se distribuye tratando de aislar el área hacia donde fluye el contaminante en el subsuelo. En la parte inferior de la Figura 5.5 se muestra el área contaminada y dentro de ella un pozo para recuperar el contaminante.

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

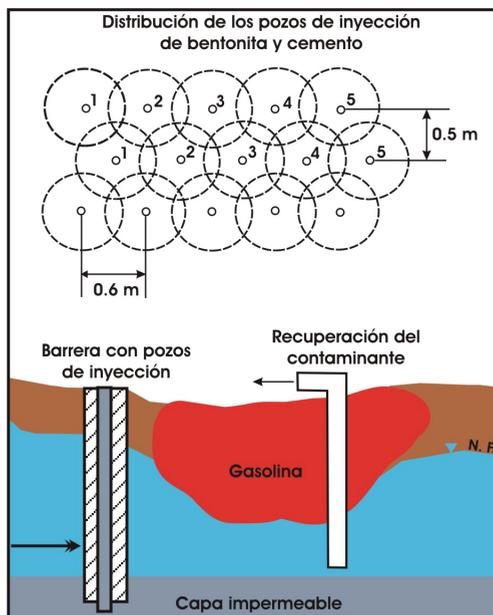


Figura 5.5 Barrera mediante inyección de bentonita y cemento (Lesser y Asociados, 1990).

### 5.6.6 EXTRACCIÓN DE AGUA Y TRATAMIENTO

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

El agua y la gasolina son bombeadas al exterior. Existen varias formas de realizarlo: i) bombeo agua-gasolina y separación en la superficie; ii) bombeo de agua y gasolina en forma independiente.

La primera forma consiste en bombear, en un pozo, tanto agua como gasolina, las que en la superficie son separadas (Figura 5.6). La gasolina puede reutilizarse y el agua se trata para eliminar los residuos de hidrocarburos, pudiendo esto realizarse mediante carbón activado. El agua tratada puede inyectarse para ayudar al flujo del agua y lavar el medio.

La segunda forma de extraer por bombeo el agua y los hidrocarburos del subsuelo se muestra en la Figura 5.7. Consiste en una perforación de diámetro amplio o pozo

## ESTADO DEL ARTE DE LA REMEDIACIÓN DE ACUÍFEROS CONTAMINADOS

a cielo abierto, construido hasta una profundidad bajo el nivel del agua, de manera tal que permita la colocación de dos bombas, una para la extracción del agua, la que se coloca hasta el fondo del pozo y tiene por objeto abatir el nivel del agua y de esta manera provocar un cono de abatimiento que facilita el flujo del hidrocarburo que flota sobre la superficie piezométrica; el flujo contaminante se dirigirá hacia el pozo donde se formará una capa de gasolinas que es extraída por otra bomba. El agua extraída es pasada a través de una torre desgasificadora.

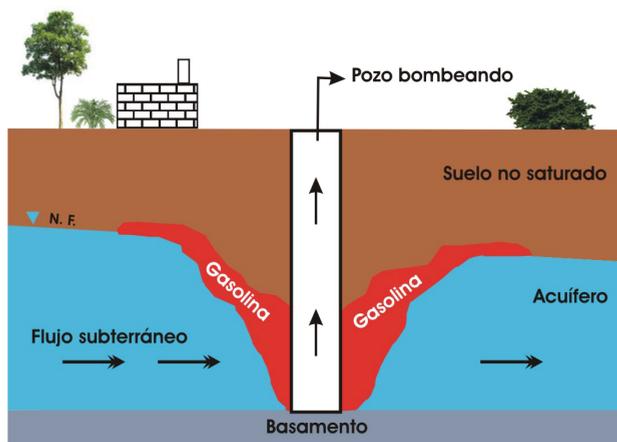


Figura 5.6 Recolección de productos del petróleo por abatimiento del nivel freático (Nyer, 1985).

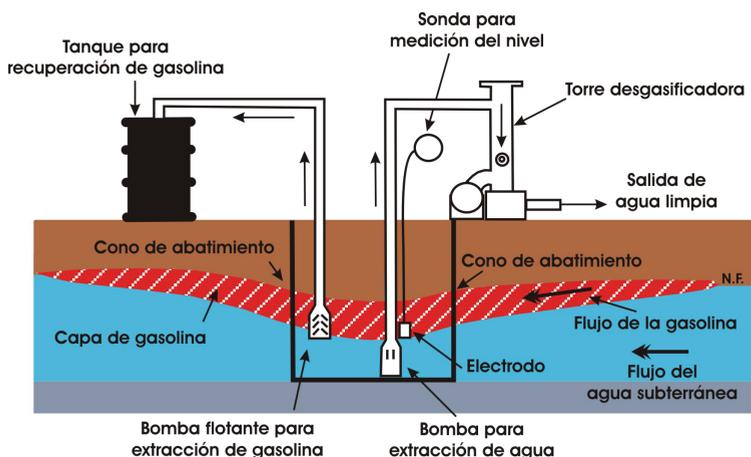


Figura 5.7 Separación de agua y gasolina en un pozo con bombas controladas por detectores de agua y gasolina (Lesser y Asociados, 1990).

### 5.6.7 AUTOELIMINACIÓN

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

### 5.7 CONCLUSIONES

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

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

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

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



# APLICACIONES DE TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN EN MÉXICO Y EL MUNDO

## APLICACIONES DE TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN EN MÉXICO

### HIDROCARBUROS

En México el primer estudio sobre fugas de hidrocarburos se realizó en 1990 elaborado para el Departamento del Distrito Federal por la empresa Lesser y Asociados (Lesser, 2012). En el país es bajo el porcentaje de acuíferos remediados (Vázquez, 2005).

En 1996 como resultado del estudio de impacto ambiental “Detección de plumas contaminantes y alternativas de saneamiento en Lagunas del Rey, Coah.,” se realizó una caracterización del suelo para localizar áreas contaminadas por hidrocarburos. Se diseñaron alternativas de tratamiento de suelo contaminado que incluyeron incineración y producción de asfalto.

En 1997 se llevó a cabo el proyecto titulado “Remediación y restauración del suelo y agua subterránea en un predio de Tijuana, B. C.” Se construyeron pozos para inyección de agua y pozos para extracción de producto libre y H<sub>2</sub>O/HC. Se separó el hidrocarburo líquido del agua. El agua fue aireada y filtrada con carbón activado para después inyectarse. Se extrajeron más de 2,000 litros de producto y se redujeron los valores de volátiles.

En 1998 en el subsuelo de la Terminal de Almacenamiento y Distribución Satélite Oriente (antes Añil) se efectuó la caracterización del estado en que se encontraba el subsuelo mediante la perforación de 350 pozos someros. Se delimitó el área con contenido de hidrocarburos volátiles y producto líquido. Se implementaron sistemas de remediación (aplicación de surfactantes y técnicas de biorremediación del suelo). En el 2000 en la misma zona, se realizó la reducción de hidrocarburos

mediante extracción. Se construyeron 24 pozos sobre galerías de infiltración para la extracción de producto libre del subsuelo (Lesser, 2012).

## CROMATOS

El cromo es un metal que puede existir en varios estados de oxidación; las formas más comunes y estables en el ambiente son el Cr (III) y el Cr (VI) las cuales poseen propiedades químicas distintas. El Cr (VI) es considerado la forma más tóxica, se encuentra usualmente asociado al oxígeno en forma de cromatos y que debido a su gran solubilidad son altamente móviles en el suelo y en ambientes acuáticos. En presencia de niveles elevados de Cr (VI) se puede sobrepasar la capacidad reductora del ambiente y persistir como un contaminante (Gutiérrez et al., 2010).

La disposición a cielo abierto de residuos de cromo (Cr) y la descarga al subsuelo de aguas residuales con altas concentraciones de ese elemento (1958 a 1978), provocó la contaminación local de un acuífero, principalmente por la introducción al subsuelo de aguas residuales a través de un pozo de adsorción y, en menor medida, por la infiltración de lixiviados de los residuos de cromo.

En 1978, al analizar en laboratorio muestras de agua de pozo se observó que ésta se encontraba contaminada con cromo hexavalente con una concentración de 5 mg/L, concentración que excedía las normas de calidad de agua potable aceptada y recomendada desde 1958 por la Organización Mundial de la Salud (OMS) que es de 0.05 mg/L (NOM-127-SSA1-1994, NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996). En 1984, el bombeo de pozos cercanos a la zona contaminada provocó que el agua subterránea fluyera hacia éstos, manteniéndola dentro de su área de influencia e impidiendo que migrara a mayor distancia. El agua contaminada extraída era utilizada en un sistema de enfriamiento industrial, dando como resultado el saneamiento incidental al disminuir las concentraciones de cromo en el agua subterránea. En el año 2004 se redujo la generación de lixiviados, sin embargo para el 2009 se detectaron concentraciones por arriba de los 105 mg/L y en el año 2013 de hasta 600 mg/L).

Entre las acciones llevadas a cabo del 2007-2012 para la contención del riesgo, preparación del sitio y remediación se encuentran: i) la excavación de residuos de cromo y suelo contaminado, ii) relleno de material de banco limpio, iii) retiro de agua contaminada, iv) retiro de toneladas de residuos de cromo y suelo contaminado y posterior confinamiento, y v) construcción de nueve pozos de monitoreo.

Recientemente, se actualizó el modelo conceptual de funcionamiento hidrodinámico integrando la distribución tridimensional de las unidades hidrogeológicas de la zona, mediante la información de cortes litológicos y sondeos eléctricos verticales obtenidos de 2007-2012. Para la determinación de los parámetros hidráulicos, se reinterpretaron las pruebas de bombeo. La información se integró en un modelo numérico de flujo (Modflow) y transporte de contaminantes (MT3D).

Para efectuar la remediación del acuífero se planteó extraer el agua contaminada, tratarla mediante tecnología apropiada para remoción del cromo e inyectarla al acuífero. Las tecnologías de tratamiento recomendadas para uso y consumo humano que cumplen con la NOM-127-SSA1-1994 modificada en el 2000 ( $Cr \leq 0.05$  mg/L) son las siguientes: a) para concentraciones menores o iguales a 3 mg/L de cromo utilizar la coagulación con sulfato ferroso, seguida de filtración directa. Este tipo de tratamiento se propone para pozos ubicados a lo largo de la pluma de contaminación; b) para concentraciones entre 3–40 mg/L de cromo utilizar el acoplamiento de coagulación química asistida por redox (sulfato ferroso) –clarifloculación–microfiltración; c) para concentraciones entre 40–600 mg/L de cromo se plantea el uso de electrocoagulación–clarifloculación–filtración–nanofiltración. Las tecnologías propuestas para fines de uso industrial y que cumplan con las normas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996 ( $Cr \geq 0.5$  mg/L): a) para concentraciones entre 3 y 40 mg/L de cromo consiste en el acoplamiento de la coagulación química asistida por redox (sulfato ferroso) –clarifloculación–filtración; b) para concentraciones entre 40–600 mg/L se plantea el uso de la electrocoagulación–clarifloculación–filtración. La adecuada y sistemática aplicación de las tecnologías de tratamiento así como la correcta disposición y confinamiento de los lodos producto de la remediación y el monitoreo de la calidad del agua en el acuífero, permitirá mitigar el riesgo potencial para la salud humana y el medio ambiente en la zona contaminada por cromo.

### Aplicaciones de técnicas de remediación en el Mundo

Un caso de estudio de la aplicación de la tecnología **Pump and Treat** (Bombeo y Tratamiento), se llevó a cabo en Onalaska, Wisconsin, USA. Con el proyecto “Pump and Treat and In Situ Bioventing at Onalaska Municipal Landfill Superfund Site”. El periodo de operación se dividió en tres etapas:

1. Bombeo y tratamiento de junio de 1994–noviembre de 2001
2. Atenuación natural controlada de noviembre de 2001–abril de 2003
3. Bioventilación in situ de mayo de 1994–febrero de 1997.

Los contaminantes a tratar fueron compuestos orgánicos volátiles presentes en el agua subterránea (ECT; 1,1-DCA; 1, 1, 1-TCA; 1,1-DCE; 1,2-DCE y BTEX), compuestos orgánicos semivolátiles presentes en el suelo (solventes de hidrocarburos de petróleo, nafta) y metales presentes en el agua subterránea (bario, hierro, arsénico,

manganeso y plomo). El agua subterránea tratada fue de 8.21 millones de litros de agua tratada. El costo por año fue de US\$200,000 (1998–2001) incluía extracción del agua subterránea, tratamiento del agua, muestreo (14 pozos) y monitoreo, mantenimiento de pozo de monitoreo y el reporte. Además de US\$60,000 por año (2002–2003) por mantenimiento de la planta de tratamiento (FRTR, 2012).

De julio 2005–agosto 2007, se realizó el proyecto “Field Application of a Permeable Reactive Barrier for Treatment of Arsenic in Ground Water”. El cual es una aplicación de una **barrera reactiva permeable** (BRP) para el tratamiento de arsénico en el agua subterránea. El sitio se localiza en el este de Helena, Montana. La BRP se compone de hierro granular valencia cero, se coloca perpendicular al flujo del agua subterránea (9 m de largo), 13.7 m de profundidad, y 1.8–2.4 m de ancho (paralelo al flujo de agua subterránea). La fuente de contaminación fue la operación de más de 100 años de la fundición de metales, provocando contaminación del agua subterránea con arsénico. La planta dejó de funcionar en el 2001. En la región superior del acuífero donde el agua subterránea se mueve a través de la BRP, se eliminó aproximadamente del 99% del arsénico, el costo para construcción fue de US\$325,000. Concluyendo que la barrera reactiva permeable es eficaz en el tratamiento de agua subterránea contaminada con arsénico (FRTR, 2012).

La tecnología de **biorremediación in situ** se aplicó a una planta de municiones localizada en Texas, Estados Unidos. El proyecto se denominó “Comparative Demonstration of Active and Semi–Passive in situ Bioremediation Approaches for Perchlorate–Impacted Groundwater at Longhorn Army Ammunitions Plant”. El periodo de operación fue realizado en tres etapas: 1) 25 marzo–14 abril de 2004; 2) 3 dic–28 dic 2004; y 3) 7 nov–30 nov 2003.

El sistema de electrones semipasivo incluía una serie de cinco pozos de recirculación instalado en una línea perpendicular a la dirección del flujo del agua subterránea. El agua subterránea se extraía periódicamente, modificándola con una solución de lactato de sodio (donador de electrones), y se recargaba al acuífero. Se realizaron tres ciclos de solución donante.

De 1942 a 1956 la planta de municiones fue utilizada para producir trinitrotolueno (TNT). Se depositaron varios tipos de residuos industriales hasta la década de 1980 (vertedero), provocando la liberación de perclorato y compuestos orgánicos volátiles diferentes al agua subterránea. El muestreo indicó la presencia de perclorato en el acuífero intermedio y profundo del sitio. Uno de los objetivos del estudio era demostrar que el perclorato puede ser biodegradable in situ a niveles

aceptables, y utilizando el proceso de biorremediación in situ con una metodología de liberación de electrones semipasiva. Los datos de monitoreo del agua subterránea ha demostrado que las reducciones son significativas en las concentraciones de perclorato, verificando durante la prueba de trazador que el perclorato se degradó antes de llegar a los pozos aguas abajo. El valor neto de los 30 años de remediación total se estima en US\$1'560,000. Los costos unitarios se estiman en US\$398/m<sup>2</sup>, además de un costo anual por mantenimiento de US\$36/m<sup>2</sup>.

En el caso de contaminación por **hidrocarburos** de petróleo (DNAPL), en el tratamiento de extracción de vapores se describe lo conseguido en el proyecto “Radio Frequency Heating in Fractured Rock at an Active Manufacturing Facility Impacted by Residual TCA DNAPL” puesto en marcha en diciembre de 2003–operado 36 meses. La tecnología de calefacción por radiofrecuencia fue seleccionada para tratar la contaminación residual en la red de fracturas en la roca madre, presentaba la capacidad de enfocar la energía térmica en el agua subterránea impactada en las fracturas, la capacidad de calentar un volumen de zona independiente de la interconectividad de la fractura, y las características hidrogeológicas eran favorables. El sistema de calefacción de radiofrecuencia lo formaban nueve pozos de 30.5 m de profundidad. Se utilizó termometría de fibra óptica para controlar la temperatura del agua subterránea en la utilización del sistema de radio frecuencia. El sistema se hizo funcionar durante 36 meses a una potencia máxima de 19 kilovatios.

El sistema de extracción de vapores del suelo (SVE) constaba de 26 puntos de extracción y un sistema de despresurización de 12 pozos poco profundos de extracción de escombros se instaló para tratar los vapores de compuestos orgánicos volátiles en el área de origen. También se incorporaron 14 pozos profundos en la roca madre para extracción superficial.

El uso de la calefacción por radiofrecuencia para tratar la contaminación de tricloroetano (TCA) en el sitio fue considerado un éxito, ya que se redujeron en un 97% las concentraciones de tricloroetano en mayo de 2010. En el transcurso del tratamiento, la temperatura del agua subterránea aumentó de 21°C a 52°C, este aumento de la temperatura acelera la velocidad de disolución de TCA, aumenta la velocidad de biodegradación y mejora de las condiciones de transformación abiótica (FRTR, 2012).

En el 2002 se llevó a cabo el proyecto “Electrical Resistive Heating at Hunter Army Airfield, Former Pumhouse #2, Savannah, Georgia, USA”. La pluma contaminante

fue generada por fugas de tanques subterráneos, la pluma tenía una cobertura de aproximadamente 7,972 m<sup>2</sup> (1996) y para 1997 se descubrió LNAPL en unos de los pozos con una cobertura aproximada de 355 m<sup>2</sup> de área. Con el objetivo de poner en práctica del sistema Calefacción Eléctrica Resistiva (ERH, por sus siglas en inglés) en seis fases llamada SPH para remediar el suelo de Hidrocarburos Poli aromáticos (PAHs, por sus siglas en inglés), el agua subterránea y LNAPL. El periodo de operación fue de 5 abril 2002–5 agosto 2002. Fueron tratadas aproximadamente 26,759 m<sup>3</sup>. El costo total fue de US\$1'300,000 (este costo no incluye el costo del generador). Se instalaron 111 electrodos a una distancia de 5.49 m, y a una profundidad de 4.88 m. En el área donde se encontraba producto libre (LNAPL), fueron instalados 18 electrodos como una combinación de electrodo y doble extracción de vapor. Se instalaron 23 pozos de recuperación de vapor. La temperatura del subsuelo promedio era mayor de 90°C (FRTR, 2012).

Hoy en día hay 7,000 millones de personas que alimentar en el planeta y se prevé que haya otros 2,000 millones para el 2050. Mil millones de personas en el mundo viven en condiciones de hambre crónica y los recursos hídricos sufren presiones, se debe afrontar el problema y tomar medidas como son: consumir productos que utilicen menos agua para su uso consuntivo; hacer eficientes el suministro y consumo del agua (Unwater, 2012).

## REFERENCIAS

- CNA. 2008. Comisión Nacional del Agua. Consideraciones técnicas para el saneamiento del acuífero Cuautitlán–Pachuca contaminado por Cr, en los terrenos de la extinta empresa Cromatos de México, S. A., Tultitlán, Edo. de México.
- Conagua, 2011. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del Agua en México, edición 2011. México. Pág. 185.
- EPA, 2012. [www.epa.gov/superfund/spanish/glosario/terminos\\_c.html](http://www.epa.gov/superfund/spanish/glosario/terminos_c.html)
- EPA, 2012a. [www.epa.gov/acidrain/education/site\\_students\\_spanish](http://www.epa.gov/acidrain/education/site_students_spanish).
- FAO. 1997. Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos. Estudio FAO Riego y Drenaje–55. E.D. Ongley. GEMS/Water Collaborating Centre. Canada Centre for Inland Waters. Burlington, Canada. ISBN: 92–5–303875–6.
- FAO/CEPE. 1991. *Legislation and Measures for the Solving of Environmental Problems Resulting from Agricultural Practices (With Particular Reference to Soil, Air and Water), Their Economic Consequences and Impact on Agrarian Structures and Farm Rationalization*. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) y FAO, Agri/ Agrarian Structures and Farm Rationalization Report No. 7. Naciones Unidas, Ginebra.
- Flipse, W. J., Katz, B. G., Lindner, J. B. y Markel, R. 1984. “Sources of nitrate in ground water in a seweraged housing development, Central Long Island, New York”. *Ground Water*, Vol. 22, No. 4, pp. 418-426.
- Foster Stephen, Hirata Ricardo, Gomes Daniel, D’Elia Monica y Paris Marta. 2003. Protección de la Calidad del Agua Subterránea. Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Banco Mundial. Washington, D.C. ISBN: 84–8476–146–0.
- FRTR, 2012. Federal Remediation Technologies Roundtable. <http://costperformance.org/profile.cfm?ID=382&CaseID=382>
- García, R. M., García, M. M. y Cañas, P. R. 1994. Nitratos y compuestos de N–nitroso. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud. Serie Vigilancia 13. Pp. 19–27.
- Gutiérrez Corona, J. Félix; Espino Saldaña, Ángeles E.; Coreño Alonso, Alejandro; Acevedo Aguilar, Francisco Javier; Reyna López, Georgina E.; Fernández, Francisco José; Tomasini, Araceli; Wrobel, Kazimierz y Wrobel, Katarzyna (2010). Mecanismos de interacción con cromo y aplicaciones biotecnológicas en hongos. *Rev. Latinoam Biotecnol Amb Algal* 8 (1): 47–63.
- Heaton, T. 1985. Isotopic and chemical aspects of nitrate in the ground water of the Springbok Flats. *Water, S. A.* Vol. 11, No. 4, pp. 199–208.

- Hendry, T. 1988. "The nitrate problem". *Water Well Journal*. Vol. 42, No. 8, pp. 4–5.
- Keller, A. 1998. Steam injection to displace DNAPLs from fractured media. *Groundwater quality: remediation and protection (proceedings of the GQ'98 Conference held at Tübingen, Germany, September)*. IAHS Publ. no. 250. Pp. 105–110.
- Lesser y Asociados, S. A. 1990. Contaminación de acuíferos por fugas de tanques almacenadores de gasolinas. \_\_\_\_\_ de C. V. 2012. [www.lesser.com.mx](http://www.lesser.com.mx).
- Milarium, \_\_\_\_\_ 2012. ([www.milarium.com/proyectos/SuelosContaminados/DescontaminacionSuelos/TecnicasEx Situ/TecnicasExSitu.asp](http://www.milarium.com/proyectos/SuelosContaminados/DescontaminacionSuelos/TecnicasExSitu/TecnicasExSitu.asp)).
- Mendoza–Amézquita, Elsa, Armienta–Hernández Carlos Ayora, Soler Albert y Ramos–Ramirez Estela. 2006. "Potencial lixiviación de elementos traza en jales de las minas La Asunción y Las Torres, en el Distrito Minero de Guanajuato, México". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, núm. 1, pp. 75–83.
- Nyer, E. K. 1985. Groundwater treatment technology. Published by Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- NOM–001–SEMARNAT–1996. Norma Oficial Mexicana. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM–014–CONAGUA–2003. Norma Oficial Mexicana. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- NOM–083–SEMARNAT–2003. Norma Oficial Mexicana. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- NOM–001–SEMARNAT–1996. Norma Oficial Mexicana, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. SEMARNAT, 1997.
- NOM–002–SEMARNAT–1996. Norma Oficial Mexicana, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. SEMARNAT, 1998.
- NOM–127–SSA1–1994. Norma Oficial Mexicana, Modificación (2000), Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- OMS (1958). Normas internacionales para el agua potable. Organización Mundial de la Salud. Primera edición.
- Rodríguez, R. 2003. Contaminación de acuíferos. Apuntes del Curso de Calidad de Aguas Subterráneas y su Protección, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Saval, S. 1994. La biorremediación de suelos y acuíferos contaminados, Teorema, 2.

- SEMARNAT, 2012. Libro Blanco. Seguimiento a las acciones de contención del riesgo, preparación del sitio y la remediación del predio ubicado en la calle Francisco I. Madero núm. 30, Colonia Lechería, Tultitlán, Estado de México (Ex Fábrica de Cromatos de México). 203 pp.
- Sleep, B. E. y Sykes, J. F. 1993. *Compositional simulation of groundwater contamination by organic compounds*. 1. Model development and verification. *Water Resources Research*. AGU. 6. Pp. 1697–1708.
- Sleep, B. E. 1998. Modeling transient organic vapor transport in porous media with the dusty gas model. *Advances in Water Resources*. Elsevier Sciences Ltd. Pp. 247–256.
- Unwater. 2012. [www.unwater.org/worldwaterday](http://www.unwater.org/worldwaterday).
- USEPA –Technology Innovation Office. Hazardous waste cleanup information. <http://www.cluin.org>
- USEPA –ORD. In situ treatment of soil and groundwater contaminated with Chromium. Technical resource guide. EPA/625/R–00/005, Octubre 2000.
- USEPA –ORF. Manual –Groundwater and leachate treatment systems. EPA/625/R–94/005, Enero 1995.
- Vázquez Sánchez Eliseo. 2005. Propuesta de lineamientos para el saneamiento de acuíferos contaminados por productos del petróleo. AGM V Congreso de Aguas Subterráneas, Hermosillo, Sonora, 2005.

