



# Tecnologías de remediación para suelos contaminados

Tania Volke Sepúlveda y  
Juan Antonio Velasco Trejo

Tecnologías de remediación  
para suelos contaminados

D.R. © Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT)  
Periférico sur 5000. Col. Insurgentes Cuicuilco, C.P. 04530. México, D.F.  
Internet: [www.ine.gob.mx](http://www.ine.gob.mx)

COORDINACIÓN EDITORIAL Y TIPOGRAFÍA: Raúl Marcó del Pont Lalli  
DISEÑO DE LA PORTADA: Álvaro Figueroa  
FOTO DE LA PORTADA: Claudio Contreras Koob  
CORRECCIÓN DE ESTILO: Eduardo Chagoya

Volke Sepúlveda, Tania  
Tecnologías de remediación para suelos contaminados /  
Tania Volke Sepúlveda y Juan Antonio Velasco  
México: INE-SEMARNAT, 2002, 64 pp.  
1. Contaminación del suelo 2. Tecnología apropiada  
3. Tratamiento del suelo 4. Desarrollo tecnológico  
628.55  
V65

ISBN: 968-817-557-9

Impreso y hecho en México

Tecnologías de remediación  
para suelos contaminados

*Tania Volke Sepúlveda y Juan Antonio Velasco Trejo*

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	9
DATOS REQUERIDOS PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS .....	10
FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA DE UNA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN .....	11
CARACTERIZACIÓN DEL CONTAMINANTE .....	13
CARACTERIZACIÓN DEL SUELO .....	16
FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN MÉXICO .....	18
INDUSTRIA PETROQUÍMICA .....	20
INDUSTRIA MINERA .....	21
AGROQUÍMICOS .....	23
ESTACIONES DE SERVICIO .....	24
FERROCARRILES .....	24
DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS .....	24
TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN .....	27
CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN .....	27
TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICAS (BIORREMEDIACIÓN) .....	31
TECNOLOGÍAS IN SITU.....	32
TECNOLOGÍAS EX SITU .....	37
TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN FÍSICOQUÍMICAS .....	39
TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN TÉRMICAS .....	46

TRENES DE TRATAMIENTOS .....	50
SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN .....	51
TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN UTILIZADAS EN MÉXICO .....	54
A. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES .....	56
B. COMPUESTOS ORGÁNICOS SEMIVOLÁTILES .....	58
C. ACIDOS Y BASES .....	58
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS .....	59
BIBLIOGRAFÍA .....	60

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una revisión de las principales tecnologías para el tratamiento de suelos contaminados, así como los datos que deben tomarse en cuenta para la selección de la tecnología más adecuada de acuerdo con las características del sitio a tratar, las propiedades del suelo y el tipo de contaminante.

Se presentan y definen las principales tecnologías de remediación de suelos utilizadas en Estados Unidos de América y se hace un recuento de las tecnologías más comúnmente empleadas en México. Para los propósitos de exposición, las tecnologías de remediación para suelos fueron divididas con base en su principio de acción o tipo de tratamiento: biológicas, fisicoquímicas y térmicas. Adicionalmente, se presentan los costos y tiempos estimados para la remediación de un sitio contaminado.

Algunas de las conclusiones más importantes de esta obra acerca del uso de tecnologías de remediación para sitios contaminados son:

- En México existe actualmente una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, debido principalmente a las actividades de la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina y derrames de residuos peligrosos.
- Antes de considerar el uso de una tecnología de remediación para un sitio en particular, es indispensable contar con información del sitio y llevar a cabo su caracterización, así como la del contaminante a tratar. Posteriormente, la tecnología puede elegirse con base en sus costos y a la disponibilidad de materiales y equipo para realizar el tratamiento.
- Resultados acerca del tipo de contaminantes tratados en sitios contaminados en Estados Unidos de América, indican que más del 80% de los proyectos de remediación están dirigidos hacia contaminantes orgánicos (EPA 2001).

- En México, al igual que en EE.UU., la mayor parte de los suelos contaminados están sometidos a tratamientos de remediación *in situ* (~88%), más que tratamientos *ex situ* (~12%).
- Del total de las empresas autorizadas para remediar suelos en México, más de la mitad emplean métodos biológicos, siendo los más utilizados el composteo y la biolabranza. El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física constituyen otra parte importante de las tecnologías de remediación más empleadas. Ninguna empresa ofrece servicios para la remediación de suelos contaminados con metales.

#### DATOS REQUERIDOS PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS

Cada sitio a tratar presenta un reto único. No obstante, cada sitio puede analizarse en términos de un juego limitado de características fundamentales y de una solución que sea efectiva en cuanto a los costos de dichas características. Las opciones de remediación para sitios contaminados, dependen de cuatro consideraciones generales (Sellers 1999):

- El tipo de contaminante y sus características físicas y químicas determinan si un sitio requiere ser remediado y la manera en la que el contaminante debe tratarse. Además, dichas propiedades determinan cómo puede ser el movimiento del contaminante y si éste es o no persistente en el ambiente. La estructura química de un contaminante determina su toxicidad y por consiguiente permite fijar ciertos criterios para establecer los límites de limpieza.
- La localización y las características del sitio, así como el uso de suelo (industrial, residencial o agrícola), fundamentalmente afectan la meta de la limpieza y los métodos que pueden emplearse para alcanzarla.

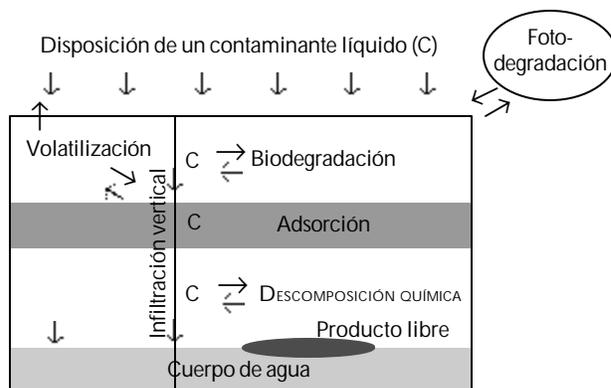
- Las características naturales de los suelos, sedimentos y cuerpos de agua, a menudo determinan las particularidades de los sistemas de tratamiento. Para suelos o lodos, el manejo del material a tratar (conversión del contaminante a una forma en la que pueda tratarse y/o transportarse desde la fuente de la contaminación hasta el lugar de tratamiento), es el paso crítico en la mayoría de los procesos de tratamiento. Los pretratamientos para modificar las características naturales de un suelo contaminado pueden ser componentes muy caros en un proceso de remediación.
- Las capacidades de las tecnologías de remediación pueden variar ampliamente en función de las condiciones específicas del sitio. Las tecnologías de remediación pueden actuar conteniendo la contaminación, separando el contaminante del suelo o destruyendo el contaminante. El uso de una tecnología en particular depende, además de los factores mencionados, de su disponibilidad, fiabilidad (demostrada o proyectada), estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo.

#### FACTORES QUE INCIDEN EN LA EFICIENCIA DE UNA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN

El comportamiento de un contaminante en el suelo, así como la efectividad de una tecnología de remediación, están determinados por una variedad de factores que interactúan de manera compleja y que dependen de las características propias del contaminante así como de las del suelo (figura 1). Por consiguiente, para la selección adecuada de una tecnología de remediación con buenas perspectivas de éxito, es indispensable considerar tanto las propiedades del contaminante como las del sitio contaminado. En general, dentro de los factores a considerar se encuentran los siguientes: (i) procesos químicos (reacciones de hidrólisis, oxidación, reducción, fotólisis); (ii) procesos físicos o de transporte (sorción, advección, dispersión, difusión,

volatilización y solubilización); y (iii) procesos biológicos (biodegradación, biotransformación y toxicidad) (Eweis *et al.* 1998, Riser-Roberts 1998).

FIGURA 1. DIAGRAMA DE ALGUNOS PROCESOS IMPORTANTES QUE INFLUYEN EN EL DESTINO Y TRANSPORTE DE UN CONTAMINANTE (C) DURANTE SU INFILTRACIÓN VERTICAL



FUENTE: Eweis *et al.* 1998.

Además de considerar las propiedades del suelo y las de los contaminantes, y para facilitar la selección preliminar de las tecnologías que podrían emplearse para tratar un sitio en particular, es indispensable obtener una descripción detallada de los siguientes aspectos:

- Ubicación geográfica y uso del suelo afectado.
- Tipo de instalación que dio origen a la contaminación.
- Magnitud y distribución de la mancha.

- Formas de acceso al sitio, ubicación de poblaciones y cuerpos de agua.
- Tipo de vegetación, clima y topografía del sitio.
- Características ecológicas.
- Características hidrogeológicas (formaciones geológicas, ciclo hidrológico y flujo de cuerpos de agua).

En las siguientes secciones, se describen algunos de los factores más importantes que deben considerarse para la caracterización del contaminante, así como del sitio a remediar.

#### CARACTERIZACIÓN DEL CONTAMINANTE

Los compuestos químicos pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos. Los primeros, se componen básicamente de átomos de carbono, y pueden ser de origen antropogénico o natural. Los compuestos inorgánicos en cambio, generalmente no contienen átomos de carbono e incluyen a los metales (Sellers 1999). Para los fines de este trabajo los contaminantes orgánicos se han dividido a su vez en seis grupos: (i) compuestos orgánicos volátiles (COV) no halogenados; (ii) COV halogenados; (iii) compuestos orgánicos semivolátiles (COS) no halogenados; (iv) COS halogenados; (v) combustibles y (vi) explosivos (Van Deuren *et al.* 1997).

Antes de seleccionar una tecnología de remediación, es esencial contar con información acerca del tipo de contaminante (orgánico o inorgánico), su concentración y toxicidad, su distribución a través del sitio y el medio en el que se encuentra (agua o partículas de suelo), entre otras.

Para cualquier acción de remediación, ya sea en fase de investigación o de limpieza, es importante definir los perfiles horizontal y vertical de los contaminantes, tanto como sea posible. La información acerca del rango y diversidad de la contaminación en todo el

sitio, también es crítica para la elección de una tecnología de tratamiento (Van Deuren *et al.* 1997).

A continuación se describen algunas de las características fisicoquímicas importantes a determinar en un contaminante.

*Estructura del contaminante.* Cada compuesto químico posee características únicas que dictan el mecanismo o combinación de ellos, que controlan su movimiento y degradabilidad. Independientemente de la naturaleza del contaminante, su estructura química determina su polaridad, solubilidad, volatilidad y capacidad para reaccionar con otras sustancias. Algunos compuestos son altamente resistentes a la transformación, mientras que otros son completamente química o bioquímicamente reactivos (Alexander 1994, Eweis *et al.* 1998, Sellers 1999).

*Concentración.* La concentración de un compuesto en un suelo es un factor de gran importancia para definir si el sitio puede remediarse con el uso de tecnologías biológicas, o si es necesario utilizar tecnologías fisicoquímicas o térmicas. Por ejemplo, compuestos tolerados a bajas concentraciones por muchos microorganismos, pueden ser tóxicos a concentraciones mayores (Alexander 1994).

*Toxicidad.* El factor clave para decidir la remediación de un sitio contaminado, es la toxicidad para los seres vivos. La descarga de químicos tóxicos a un suelo implica, entre muchos otros problemas, que son generalmente resistentes a la biodegradación. Si el contaminante como tal no es tóxico, algunos de sus componentes pueden ser tóxicos o inhibitorios para ciertos microorganismos, retardando o impidiendo la biodegradación de otros contaminantes degradables (Alexander *op. cit.*).

*Solubilidad.* Es la cantidad de un compuesto que puede disolverse en agua, es decir, define la disponibilidad potencial de los compuestos en la fase líquida. En general, la solubilidad disminuye al aumentar el tamaño de la molécula, y los compuestos polares son más solubles que los no polares. Por otra parte, para que la transformación

biológica de un compuesto se lleve a cabo, es necesario que éste se encuentre en solución, por lo tanto la biodegradabilidad de un compuesto depende de su solubilidad (Alexander 1994, Eweis *et al.* 1998, Sellers 1999).

*Coeficiente de partición octanol/agua ( $K_{OW}$ ).* El  $K_{OW}$  indica la hidrofobicidad de una molécula y es un parámetro clave para determinar el destino de ésta en un medio. Es la relación entre la concentración de un compuesto en una fase de octanol y una fase acuosa, en un sistema octanol/agua. En otras palabras, el  $K_{OW}$  es una medida de la tendencia de un compuesto para separarse entre una fase orgánica y una acuosa. Los compuestos con valores bajos de  $K_{OW}$  (<10) se consideran relativamente hidrofílicos, mientras que los que tienen un  $K_{OW}$  alto (>104) son considerados hidrofóbicos y tienden a acumularse en superficies orgánicas como suelos con alto contenido de materia orgánica y especies acuáticas (Van Deuren *et al.* 1997).

*Polaridad y carga iónica.* Los compuestos no polares tienden a ser hidrofóbicos y se concentran preferencialmente en la materia orgánica del suelo. Los compuestos no polares generalmente tienen menor movilidad en el suelo que los compuestos polares. La carga iónica determina la capacidad de un compuesto para su adsorción en un sólido.

*Difusión.* La velocidad de movimiento de un contaminante a través del suelo, es proporcional a su concentración y a su coeficiente de difusión. La difusión de un contaminante hacia dentro y fuera de los poros del suelo controla su degradación. Es uno de los procesos abióticos que compite más efectivamente con los microorganismos por el sustrato (Alexander 1994 y Riser-Roberts 1998).

*Sorción.* Los mecanismos de sorción incluyen la adsorción, que es la atracción de un compuesto hacia una superficie sólida, y la absorción, que es la penetración de un contaminante en un sólido. La sorción de un químico tiene un gran impacto en su degradación y depende de las propiedades del contaminante y del suelo. La adsorción afecta la volatilización y difusión del contaminante (y por consiguiente su

transporte y destino), así como su disponibilidad para microorganismos (Alexander 1994, Riser-Roberts 1998).

*Volatilización.* Es el proceso en el que un químico se mueve de una fase líquida o sólida a la gaseosa. La velocidad de volatilización de un compuesto en el suelo, es una función de su concentración, su presión de vapor y su solubilidad. Depende del tipo de compuesto, contenido de humedad, temperatura y porosidad del suelo, contenido de materia orgánica y de arcillas (Eweis *et al.* 1998).

*Densidad.* La migración de un compuesto inmisible depende de su densidad y viscosidad. La densidad determina la tendencia de la fase inmisible a flotar o sumergirse en la superficie del suelo, y por consiguiente el lugar en donde éste quedará concentrado (Bouwer y Zehnder 1993).

*Biodegradabilidad.* Es la susceptibilidad de un compuesto para ser transformado a través de mecanismos biológicos. Los compuestos orgánicos metabolizables y no tóxicos, normalmente son oxidados muy rápidamente por los microorganismos del suelo (Eweis *et al.* 1998).

*Reacciones de oxidación-reducción.* Este tipo de reacciones pueden degradar compuestos orgánicos, o bien, convertir compuestos metálicos a formas que son más o menos solubles que la forma original del contaminante (Sellers 1999).

#### CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

El suelo constituye un recurso natural que desempeña diversas funciones en la superficie de la Tierra, proporcionando un soporte mecánico así como nutrientes para el crecimiento de plantas y microorganismos. La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos. Los materiales minerales son los principales componentes estructurales y constituyen más del 50% del volumen total del suelo. El aire y el

agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman de 25% a 50% del volumen total. La proporción relativa de aire/agua fluctúa considerablemente con el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3% y 6% del volumen promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1% (Eweis *et al.* 1998).

Todos estos factores definen el tipo de suelo, que junto con las condiciones particulares de un sitio frecuentemente pueden limitar la selección de un proceso de tratamiento en particular. Por otra parte, la posibilidad de usar una tecnología de tratamiento, puede eliminarse con base en la clasificación del suelo u otras características propias de éste (Van Deuren *et al.* 1997). A continuación se describen algunos de los datos del suelo, que pueden obtenerse con relativa facilidad y que controlan la eficiencia de una tecnología de remediación.

*Tamaño de partícula.* Los suelos se clasifican en función de su tamaño de partícula, siendo sus tres principales componentes las arcillas (< 0.002 mm), los sedimentos (0.002 - 0.05 mm) y las arenas (0.05 - 2.0 mm). Es importante considerar esta propiedad, ya que la relación área/volumen de los diferentes tipos de partícula, tienen un impacto directo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, y por consiguiente en las tecnologías de remediación. En general, los materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar (Van Deuren *et al.* 1997, Eweis *et al.* 1998).

*Heterogeneidad.* Un suelo demasiado heterogéneo puede impedir el uso de tecnologías *in situ* que dependan del flujo de un fluido. Pueden crearse canales indeseables de fluidos en las capas arenosas y arcillosas, dando como resultado tratamientos inconsistentes (Van Deuren *et al.* 1997).

*Densidad aparente.* Es el peso del suelo por unidad de volumen, incluyendo agua y espacios. Es importante considerar que el suelo está compuesto por sólidos y espacios llenos de agua y/o aire, y que su densidad dependerá de su humedad. Es útil para realizar cálculos para el transporte del material (Van Deuren *et al.* 1997).

*Permeabilidad.* Se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías *in situ* (Sellers 1999). En general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación.

*pH.* El pH determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad, disponibilidad y formas iónicas de un contaminante y otros constituyentes del suelo (Alexander 1994). La solubilidad de muchos contaminantes inorgánicos cambia en función del pH y normalmente su movilidad disminuye con altos valores de pH.

*Humedad.* La humedad del sitio a tratar es un factor importante para la elección de una tecnología en particular. Una alta humedad puede impedir el movimiento de aire a través del suelo, lo que afecta los procesos de biorremediación, así como provocar problemas durante la excavación y transporte, además de aumentar costos durante el uso de métodos de remediación térmicos (Van Deuren *et al.* 1997).

*Materia orgánica.* La fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, que generalmente se le conoce como humus. Un suelo con alto contenido húmico, disminuye la movilidad de los compuestos orgánicos y así la eficiencia de ciertas tecnologías (extracción de vapores, lavado de suelo) (Van Deuren *op cit.*, Eweis *op. cit.*).

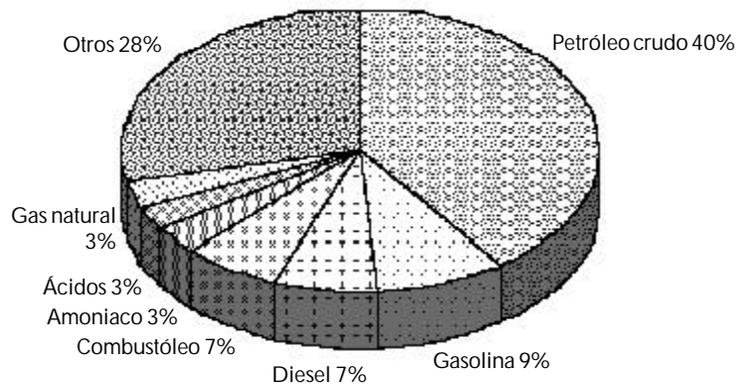
## FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN MÉXICO

Como consecuencia de varios siglos de actividad minera en México y posteriormente, debido a la industria de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, se han producido cantidades muy grandes, pero muy difíciles de cuantificar de residuos peligrosos. Aunado a lo anterior, la intensa actividad de otras industrias, junto con accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias (fu-

gas, derrames, incendios) y la disposición clandestina e incontrolada de residuos, contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos (SEMARNAT 2002). El número de sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, asciende a varios miles de lugares cuyo riesgo potencial es desconocido. De acuerdo con datos publicados por el INEGI (2000), la superficie de suelo degradado por causas de contaminación en 1999 fue de 25,967 km<sup>2</sup>.

Todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos. Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diesel), agroquímicos, gas LP y natural, entre otros (figura 2).

FIGURA 2. PRINCIPALES SUSTANCIAS INVOLUCRADAS EN EMERGENCIAS AMBIENTALES REPORTADAS A LA PROFEPA ENTRE 1997 Y 1999



FUENTE: PROFEPA 2002.

Dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente, se encuentran los siguientes: dioxinas, furanos, hexaclorobenceno, bifenilos policlorados (BPC), plaguicidas organoclorados, mercurio, plomo, cromo, cadmio, compuestos tóxicos atmosféricos e hidrocarburos poliaromáticos (HAP). De éstos, compuestos como los BPC se han almacenado en tambores que, en muchas ocasiones, han sido dispuestos clandestinamente. Por su parte, los HAP se encuentran como componentes de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP).

Como se mencionó, en todo el país existen problemas de contaminación aún no cuantificados con precisión. Sin embargo, pueden mencionarse de manera cualitativa los problemas de contaminación generados por el uso de agroquímicos, tanto fertilizantes (en especial los nitrogenados) como de pesticidas (fungicidas, herbicidas e insecticidas); los que son consecuencia del derrame y fugas de combustibles (petróleo y derivados), así como los ligados a actividades mineras, en sus etapas de extracción como en las de procesamiento de los materiales obtenidos (INEGI-SEMARNAP 1997). A continuación se mencionan algunas de las principales fuentes de contaminación de suelos en México.

#### INDUSTRIA PETROQUÍMICA

La industria petroquímica en México se ha desarrollado aceleradamente, generando diversos satisfactores económicos. Sin embargo, su expansión y desarrollo también ha dado origen a graves problemas ambientales, derivados de emergencias ambientales, con graves repercusiones a la salud de la población y al equilibrio ecológico de los ecosistemas (Quadri 1994, PROFEPA 2000). Entre las causas que han generado este deterioro ambiental por la contaminación de cuerpos de agua y suelos a lo largo de todo el país, se encuentran las siguientes: (i) manejo inadecuado y abandono de materiales y resi-

duos peligrosos; (ii) mantenimiento inadecuado o falta de éste en instalaciones petroleras; (iii) explosiones en instalaciones de alto riesgo; (iv) fugas en líneas de conducción y (v) derrames de hidrocarburos (CENAPRED 2001, PROFEPA 2002).

En el inventario de residuos peligrosos de PEMEX en el 2001 reportan la generación de más de 270 mil toneladas de residuos peligrosos. Aproximadamente el 86% del volumen total de estos residuos, corresponde a lodos y recortes de perforación (72%), lodos aceitosos (8%) y aceites gastados (6%).

Con respecto a los derrames y fugas de hidrocarburos, PEMEX reporta que durante el año 2001 hubo un total de 8,031 toneladas de hidrocarburos (crudo, diesel y gasolina) derramados en su mayoría en tierra, en los cuatro sectores de ductos del país (PEMEX 2001). Esta última cifra es importante, ya que de esta manera puede estimarse la magnitud de la contaminación en los sitios cercanos a los derrames. Uno de los estados con mayor incidencia de sitios contaminados por actividades petroleras es Veracruz. De acuerdo con información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería Lázaro Cárdenas y el pantano de Santa Alejandrina, ambos ubicados en el sureste de México.

#### INDUSTRIA MINERA

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, que contribuye en gran medida con el desarrollo económico del país, suministrando insumos a una serie de industrias (construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica). De acuerdo con información de la Dirección General de Minas, la industria minera nacional es mayoritariamente metálica, y se dedica principalmente a la producción de cobre, zinc, plata y plomo.

Debido al desarrollo y modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la gene-

ración de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en México ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país. La producción minera en México, se concentra en doce entidades: Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco. En el cuadro 1 se resumen las etapas de los procesos mineros y su relación en cuanto a impacto al ambiente.

CUADRO 1. RELACIÓN DE LA ACTIVIDAD MINERA  
Y SU IMPACTO AL AMBIENTE

FASE	DESCRIPCIÓN	IMPACTO AMBIENTAL
Exploración	Barrenación, obras y perforaciones	Dstrucción de vegetación
Explotación	Obras diversas: tiros, socavones, patios para depósito de minerales, zonas para descarga de materiales	Operación de presas de jales: arrastre de residuos peligrosos. Descarga de aguas residuales
Beneficio	Concentración Trituración y molienda Tratamientos previos	Generación de ruido Vibración y emisión de polvo
Fundición y refinación	Obtención de metales y sus aleaciones (uso de hornos industriales)	Emisiones a la atmósfera, residuos peligrosos y aguas residuales
	Eliminación de impurezas en los metales para aumentar la ley de contenido	

FUENTE: SEMIP 1994.

En general, todas las etapas que incluye un proceso minero, con excepción de la prospección, que implica estudios preliminares, generan problemas ambientales de alto impacto. Como puede verse, en todas las etapas se generan aguas residuales, residuos peligrosos y, en algunos casos, emisiones a la atmósfera. Sin embargo, dos de las etapas que más contaminación producen son las de explotación de los minerales y la de fundición/refinación.

#### AGROQUÍMICOS

El uso excesivo de agroquímicos, así como el inadecuado manejo y disposición de sus envases, ha sido un problema generalizado en México. Muchos de los plaguicidas empleados en el país hasta la fecha, se han prohibido en otros países por su toxicidad. Sin embargo, el número de plaguicidas se incrementa a razón de 10% al año. Esto ha permitido que el número de productos que entran en contacto con la población, se incremente en más de seis veces (CICLOPLAFEST 2000).

Los plaguicidas son el nombre genérico que recibe cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se utiliza para controlar plagas que atacan los cultivos o insectos que son vectores de enfermedades. Según su composición química se clasifican en: insecticidas (organoclorados, organofosforados, piretroides y carbamatos), herbicidas (dinitrofenoles y triazinas) y fungicidas (fenoles y compuestos de cobre y azufre) (CICLOPLAFEST 1996).

Todas estas sustancias son compuestos químicos tóxicos y por su aplicación en tierras de cultivo, evidentemente son compuestos que se encuentran como contaminantes de grandes extensiones de suelos en todo el país. En México aún continúan en el mercado agroquímicos organoclorados como el ácido 2,4 dicloro-fenoxiacético (2,4-D), el pentaclorofenol (PCP) y dicofol, además de plaguicidas a base de carbamatos y los organofosforados como el malatión.

#### ESTACIONES DE SERVICIO

Los productos combustibles como gasolina, diesel, combustóleo, gasóleo, gas avión y gas LP, son producidos y distribuidos en México por PEMEX. La distribución al menudeo de gasolina y diesel, se lleva a cabo en estaciones de servicio (gasolineras). Uno de los riesgos ambientales que involucra el manejo de estas estaciones, son los derrames o fugas de combustibles, que provocan la contaminación de los sitios en donde se encuentran los tanques de almacenamiento (CENAPRED 2001).

#### FERROCARRILES

Otra de las empresas paraestatales que ha contribuido a la contaminación de aguas y suelos, es Ferrocarriles Nacionales, que se ha caracterizado por la generación de aceites gastados. La principal razón por la que esta empresa ha provocado la contaminación de suelos es por el almacenamiento inadecuado de residuos y combustibles como creosota y aceites gastados (PROFEPA 2002).

#### DISPOSICIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

Debido al creciente volumen de residuos peligrosos generados en nuestro país y a las capacidades existentes para su manejo, frecuentemente se presenta la disposición clandestina de éstos en diversos sitios (tiraderos municipales, terrenos baldíos, patios de empresas, drenajes), ocasionando así un aumento de sitios contaminados con sustancias peligrosas de naturaleza tanto orgánica como inorgánica. Por ejemplo, en 1980 en la mina Rosicler (Nuevo Mercurio, Zacatecas), se encontraron abandonados cientos de tambores que contenían residuos peligrosos como cloruro de mercurio, mezclas de químicos y

BPC. Se tiene información de que el contenido de varios de los tambores se ha derramado accidental o deliberadamente.

En el cuadro 2 se muestra una relación de sitios ilegales y/o abandonados, que se detectaron por la PROFEPA en el periodo 1995-1997, en donde se han desechado residuos peligrosos provenientes de diversas industrias (Kreiner 2002).

CUADRO 2. TIPOS DE RESIDUOS PELIGROSOS QUE SE ENCUENTRAN COMO PRINCIPALES CONTAMINANTES EN SITIOS ABANDONADOS Y/O ILEGALES EN VARIAS ENTIDADES FEDERATIVAS

ESTADO	NÚMERO DE SITIOS	PRINCIPALES RESIDUOS*
Baja California	8	Aceites, metales, polvo de fundición, solventes
Baja California Sur	2	Escorias de fundición, jales
Campeche	4	Aceites, lodos de perforación
Chiapas	17	Hidrocarburos, plaguicidas, solventes
Chihuahua	13	Aceites, hidrocarburos, químicos
Coahuila	15	Aceites, hidrocarburos, jales, metales, químicos
Durango	3	Hidrocarburos, insecticidas
Estado de México	10	Aceites, escorias de fundición, químicos
Guanajuato	10	Aceites, escorias de fundición, lodos, metales, compuestos organoclorados
Hidalgo	6	Escorias de fundición, pinturas
Jalisco	7	Diesel y combustible, baterías, lodos, químicos
Nayarit	5	Hidrocarburos, jales
Nuevo León	22	Aceites, cianuros, escorias de fundición, hidrocarburos, metales
San Luis Potosí	10	Asbesto, escorias de fundición, lodos, metales, pinturas
Sinaloa	4	Agroquímicos

(continúa)

CUADRO 2. TIPOS DE RESIDUOS PELIGROSOS QUE SE ENCUENTRAN COMO PRINCIPALES CONTAMINANTES EN SITIOS ABANDONADOS Y/O ILEGALES EN VARIAS ENTIDADES FEDERATIVAS

ESTADO	NÚMERO DE SITIOS	PRINCIPALES RESIDUOS*
Tamaulipas	8	Aceites, escorias de fundición, químicos
Veracruz	8	Azufre, hidrocarburos
Zacatecas	9	Jales, metales, químicos
TOTAL	161	

\* No se mencionan los residuos biológico-infecciosos.

\* FUENTE: PROFEPA 1998.

En el periodo de 1995 a 1997, se detectaron 161 sitios abandonados contaminados con residuos peligrosos en 18 estados de la República. Sin embargo, se estima que el número de sitios de este tipo que contienen residuos peligrosos, es mucho mayor y se desconoce su ubicación. Desde 1988, más de 27 mil empresas han cumplido con la obligación de informar acerca de la generación de residuos peligrosos. Sin embargo, se desconoce el universo de empresas generadoras que no informan y desechan sus residuos clandestinamente, y se estima que el universo potencial es mayor a 100,000 (Mosler 2002).

De acuerdo con esta información, dentro de los residuos peligrosos encontrados con mayor frecuencia en tiraderos clandestinos se encuentran los desechos provenientes de la industria minera (jales, metales y escorias de fundición) y petroquímica (hidrocarburos y químicos), además de aceites gastados provenientes de talleres mecánicos.

## TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

El término «tecnología de tratamiento» implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA 2001). Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente.

Como ya se mencionó, el uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo (Sellers 1999).

### CLASIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios: (i) estrategia de remediación; (ii) lugar en que se realiza el proceso de remediación, y (iii) tipo de tratamiento. Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación. A continuación se describen con más detalle las clasificaciones anteriores (Van Deuren *et al.* 1997, Sellers 1999, EPA 2001).

*Estrategia de remediación.* Son tres estrategias básicas que pueden usarse separadas o en conjunto, para remediar la mayoría de los sitios contaminados:

- Destrucción o modificación de los contaminantes. Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante.
- Extracción o separación. Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica).
- Aislamiento o inmovilización del contaminante. Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.

*Lugar de realización del proceso de remediación.* En general, se distinguen dos tipos de tecnología:

- In situ. Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.
- Ex situ. La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (*on site*) o fuera de él (*off site*).

En el cuadro 3 se presenta un resumen de las ventajas y desventajas de ambos tipos de tecnología.

*Tipo de tratamiento.* Esta clasificación se basa en el principio de la tecnología de remediación y se divide en tres tipos de tratamiento:

- Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.
- Tratamientos fisicoquímicos. Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.

CUADRO 3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN *IN SITU* Y *EX SITU*

	<i>IN SITU</i>	<i>EX SITU</i>
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permiten tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar</li> <li>- Potencial disminución en costos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menor tiempo de tratamiento</li> <li>- Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente</li> </ul>
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mayores tiempos de tratamiento</li> <li>- Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo</li> <li>- Dificultad para verificar la eficacia del proceso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necesidad de excavar el suelo</li> <li>- Aumento en costos e ingeniería para equipos</li> <li>- Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante</li> </ul>

- Tratamientos térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo.

En el cuadro 4 se muestran las principales ventajas y desventajas del uso o aplicación de los métodos biológicos, fisicoquímicos y térmicos.

Además de las clasificaciones anteriores, las tecnologías de remediación pueden clasificarse con base en el tiempo que llevan en el mercado y al grado de desarrollo en el que se encuentran, en tecnologías tradicionales y en tecnologías innovadoras (EPA 2001).

CUADRO 4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN, CLASIFICADAS DE ACUERDO CON EL TIPO DE TRATAMIENTO

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tratamientos biológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son efectivos en cuanto a costos</li> <li>- Son tecnologías más benéficas para el ambiente</li> <li>- Los contaminantes generalmente son destruidos</li> <li>- Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requieren mayores tiempos de tratamiento</li> <li>- Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios y/o productos</li> <li>- No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano</li> </ul>
Tratamientos fisicoquímicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Son efectivos en cuanto a costos</li> <li>- Pueden realizarse en periodos cortos</li> <li>- El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los residuos generados por técnicas de separación, deben tratarse o disponerse: aumento en costos y necesidad de permisos</li> <li>- Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes: necesidad de sistemas de recuperación</li> </ul>
Tratamientos térmicos		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es el grupo de tratamientos más costoso</li> </ul>

- *Tecnologías tradicionales.* Son tecnologías utilizadas comúnmente a gran escala, cuya efectividad ha sido probada. La información disponible acerca de costos y eficiencia es de fácil acceso. Entre las tres tecnologías tradicionales usadas con mayor frecuencia, se encuentran: la incineración *in situ* y *ex situ*, la solidificación/estabilización, la extracción de vapores y la desorción térmica.

- Tecnologías innovadoras. Son tecnologías propuestas más recientemente, que pueden encontrarse en diferentes etapas de desarrollo (investigación, escala piloto o gran escala). Su limitado número de aplicaciones genera la falta de datos acerca de sus costos y eficiencias. En general, una tecnología de tratamiento se considera novedosa si su aplicación a gran escala ha sido limitada.

En las siguientes secciones se presentan algunas de las tecnologías de remediación más utilizadas para tratar suelos contaminados, con base en el tipo de tratamiento (biológico, fisicoquímico, térmico), señalando sus principios de operación, principales ventajas, limitaciones y costos estimados. Es importante aclarar que los costos que se presentan, son promedios obtenidos de la aplicación de cada tecnología en los E.U.A. y están dados en dólares americanos.

#### TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN BIOLÓGICAS (BIORREMEDIACIÓN)

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía (Van Deuren *et al.* 1997).

Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos, varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras. El proceso de biorremediación incluye reacciones de oxido-reducción, procesos de sorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales (Eweis *et al.* 1998).

La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis *et al.* 1998). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo (HTP), solventes (benceno y tolueno), explosivos (TNT), clorofenoles (PCP), pesticidas (2,4-D), conservadores de madera (creosota) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Van Deuren *et al.* 1997, Semple *et al.* 2001).

#### *Tecnologías in situ*

Las técnicas *in situ* buscan estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes. Este objetivo generalmente puede lograrse con el suministro de aire u oxígeno (bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y/o humedad, además del control de temperatura y pH (EPA 2001).

#### Bioventeo

El bioventeo es una tecnología relativamente nueva, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias. El aire se suministra en el sitio contaminado a través de pozos de extracción, por movimiento forzado (extracción o inyección), con bajas velocidades de flujo, con el fin de proveer solamente el oxígeno necesario para sostener la actividad de los microorganismos degradadores (Van Deuren *et al.* 1997).

*Aplicaciones.* Se utiliza para tratar compuestos orgánicos biodegradables semivolátiles (COS) o no volátiles. Además de favorecer la

degradación de contaminantes adsorbidos, pueden degradarse COV, por medio de su movimiento a través del suelo biológicamente activo (Eweis *et al.* 1998). Se ha utilizado con éxito para remediar suelos contaminados con HTP, solventes no clorados, pesticidas y conservadores de la madera, entre algunos otros químicos (Van Deuren *et al.* 1997).

*Limitaciones.* Algunos factores que pueden limitar la efectividad del bioventeo son: (i) el tipo y la concentración del contaminante, (ii) falta de nutrientes; (iii) bajo contenido de humedad y (iv) dificultad para alcanzar el flujo de aire necesario (Eweis *et al.* 1998).

*Costos y tiempos de remediación.* Es una tecnología en la que los tiempos de limpieza pueden variar desde algunos meses hasta varios años, y sus costos de operación varían entre 10 y 70 USD/m<sup>3</sup>. Esta tecnología no requiere de equipo caro, pero los costos pueden variar en función de la permeabilidad del suelo, espacio disponible, número de pozos y velocidad de bombeo (Van Deuren *et al.* 1997).

### Bioestimulación

La bioestimulación implica la circulación de soluciones acuosas (que contengan nutrientes y/u oxígeno) a través del suelo contaminado, para estimular la actividad de los microorganismos autóctonos, y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos *in situ* (Van Deuren *et al.* 1997).

*Aplicaciones.* Se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con gasolinas, COV, COS y pesticidas (Alexander 1994). Estudios a escala piloto, han mostrado la biodegradación de suelos contaminados con desechos de municiones.

*Limitaciones.* Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificados o demasiado heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia de O<sub>2</sub>. Otros facto-

res que pueden limitar su aplicación, incluyen: (i) que el tipo del suelo no favorezca el crecimiento microbiano; (ii) incremento en la movilidad de los contaminantes; (iii) obstrucción en los pozos de inyección provocada por el crecimiento microbiano.

*Costos y tiempos de remediación.* La limpieza de una pluma de contaminación, puede tomar varios años. Su costo oscila entre 30 y 100 USD/m<sup>3</sup>. La naturaleza y profundidad de los contaminantes y el uso de bioaumentación puede aumentar sus costos (Van Deuren *et al.* 1997).

### Bioaumentación

Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora. Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación. El tamaño del inóculo a utilizar, depende del tamaño de la zona contaminada, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores (Riser-Roberts 1998).

*Aplicaciones.* Se ha usado para tratar suelos contaminados con herbicidas (2,4-D, clorofam), insecticidas (lindano, clordano, paratión), clorofenoles (PCP) y nitrofenoles, BPC, HTP y HAP (Alexander, 1994). También se ha aplicado efectivamente para tratar desechos con concentraciones relativamente altas de metales (Eweis *et al.* 1998).

*Limitaciones.* Antes de llevar a cabo la bioaumentación en un sitio, deben realizarse cultivos de enriquecimiento, aislar microorganismos capaces de cometabolizar o utilizar el contaminante como fuente de carbono, y cultivarlos hasta obtener grandes cantidades de biomasa (Alexander 1994).

*Costos y tiempos de remediación.* Es una tecnología que puede durar varios meses o años, y su utilización no implica mucho capital ni costos de operación.

### Biolabranza

Durante el proceso de biolabranza, la superficie del suelo contaminado es tratado en el mismo sitio por medio del arado. El suelo contaminado se mezcla con agentes de volumen y nutrientes, y se remueve periódicamente para favorecer su aireación. Las condiciones del suelo (pH, temperatura, aireación) se controlan para optimizar la velocidad de degradación y generalmente se incorporan cubiertas u otros métodos para el control de lixiviados (Riser-Roberts 1998). La diferencia entra la biolabranza y el composteo, es que en la biolabranza, se mezcla el suelo contaminado con suelo limpio, mientras que el composteo generalmente se realiza sobre el suelo (Van Deuren *et al.* 1997).

*Aplicaciones.* Los contaminantes tratados con éxito por biolabranza, incluyen diesel, gasolinas, lodos aceitosos, PCP, creosota y coque, además de algunos pesticidas y HTP (Alexander 1994). Es una tecnología de gran escala, que se practica en los Estados Unidos de América, Canadá, Reino Unido, Holanda, Suiza, Dinamarca, Francia y Nueva Zelanda (Reiser-Roberts 1998).

*Limitaciones.* La biolabranza debe manejarse con cuidado para prevenir la contaminación de acuíferos, superficies de agua, aire o en la cadena alimenticia. El mayor problema es la posibilidad de lixiviados de los contaminantes hacia el suelo y el agua. Otra limitante para su utilización, es que por la incorporación de suelo contaminado en suelo limpio, se genera un gran volumen de material contaminado. No es recomendable su uso para contaminantes diluidos, ni tampoco cuando no todos los contaminantes son biodegradables (Van Deuren *et al.* 1997).

*Costos y tiempos de remediación.* Es una tecnología de mediano a largo plazo. El costo para su aplicación en desechos peligrosos oscila entre 30 y 70 USD/ m<sup>3</sup> (Van Deuren *et al.* 1997, Reiser-Roberts 1998).

#### Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*. Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación y la fitoestabilización (Van Deuren *et al.* 1997, Hutchinson 2001).

La rizodegradación se lleva a cabo en el suelo que rodea a las raíces. Las sustancias excretadas naturalmente por éstas, suministran nutrientes para los microorganismos, mejorando así su actividad biológica. Durante la fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación), y posteriormente éstos son trasladados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (fitoextracción). En la fitoestabilización, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo, debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfase raíces-suelo (Sellers 1999). La fitodegradación consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación.

*Aplicaciones.* Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAP; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr(VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn (Sellers 1999). Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua.

*Limitaciones.* Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación: (i) el tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar; (ii) altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas; (iii) puede depender de la estación del año; (iv) no es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos; (v) la toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden mobilizarse o bioacumularse en animales.

*Costos y tiempos de remediación.* Se estima que la fitorremediación de un suelo contaminado con Pb (50 cm de profundidad) puede costar entre 24,000 y 40,000 USD/ha (Van Deuren *et al.* 1997).

#### *Tecnologías ex situ*

Los procesos de biorremediación *ex situ*, incluyen: (i) procesos de biodegradación en fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes; y (ii) de biodegradación en fase sólida, en donde los suelos colocan en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biolabranza), en donde se agrega agua y nutrientes (EPA 2001).

#### Biorremediación en fase sólida (composteo)

El composteo es un proceso biológico controlado, por el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables, para obtener subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezcla con agentes de volumen (paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas), que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, adicionadas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor

durante el proceso. Los sistemas de composteo incluyen tambores rotatorios, tanques circulares, recipientes abiertos y biopilas (Alexander 1994, Eweis *et al.* 1998, Semple *et al.* 2001).

Las pilas estáticas (biopilas) son una forma de composteo en el cual, además de agentes de volumen, el sistema se adiciona con agua y nutrientes, y se coloca en áreas de tratamiento (que incluyen alguna forma de aireación y sistemas para coleccionar lixiviados). Las pilas de suelo generalmente se cubren con plástico para controlar los lixiviados, la evaporación y la volatilización de contaminantes, además de favorecer su calentamiento (Eweis *et al.* 1998).

*Aplicaciones.* El composteo se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con PCP, gasolinas, HTP, HAP. Se ha demostrado también la reducción, hasta niveles aceptables, en la concentración y toxicidad de explosivos (TNT). El uso de estrategias de composteo, se ha adoptado seriamente hasta los últimos tres a cinco años (Van Deuren *et al.* 1997, Semple *et al.* 2001).

*Limitaciones.* Algunas limitaciones del proceso son: (i) necesidad de espacio; (ii) necesidad de excavar el suelo contaminado, lo que puede provocar la liberación de COV; (iii) incremento volumétrico del material a tratar y (iv) no pueden tratarse metales pesados (Van Deuren *et al.* 1997).

*Costos y tiempos de remediación.* El costo del composteo está en función de: (i) la cantidad y fracción de suelo a tratar; (ii) disponibilidad de agentes de volumen; (iii) tipo de contaminantes y proceso; (v) necesidad de tratamientos previos y/o posteriores y (vi) necesidad de equipos para el control de COV. Es una tecnología que puede llevar desde algunas semanas hasta varios meses. Los costos típicos se encuentran entre 130 y 260 USD/m<sup>3</sup> (Riser-Roberts 1998).

#### Biorremediación en fase de lodos (biorreactores)

Los biorreactores pueden usarse para tratar suelos heterogéneos y poco permeables, o cuando es necesario disminuir el tiempo de tra-

tamiento, ya que es posible combinar controlada y eficientemente, procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoren y aceleren la biodegradación (Reiser-Roberts 1998). Es la tecnología más adecuada cuando existen peligros potenciales de descargas y emisiones.

Uno de los reactores más utilizados para biorremediar suelos es el biorreactor de lodos, en el cual el suelo contaminado se mezcla constantemente con un líquido, y la degradación se lleva a cabo en la fase acuosa por microorganismos en suspensión o inmovilizados en la fase sólida. El tratamiento puede realizarse también en lagunas construidas para este fin o bien en reactores sofisticados con control automático de mezclado (Alexander 1994).

*Aplicaciones.* Los biorreactores de lodos aerobios, se utilizan principalmente para tratar HTP, COS no halogenados y COV. Se utilizan también reactores secuenciales de lodos aerobios/anaerobios para tratar BPC, COS halogenados, pesticidas y desechos de artillería (Van Deuren *et al.* 1997).

*Limitaciones.* Algunos factores que pueden limitar el uso y efectividad de los biorreactores son: (i) el suelo debe tamizarse; (ii) suelos heterogéneos y arcillosos pueden generar problemas de manipulación; (iii) los productos intermediarios pueden ser más tóxicos que el contaminante original (en caso de explosivos o solventes clorados); (iv) los residuos pueden requerir de tratamiento o disposición final (Van Deuren *et al.* 1997, Riser-Roberts 1998).

*Costos y tiempos de remediación.* Los biorreactores de lodos pueden clasificarse como una tecnología de corto a mediano plazo. El uso de biorreactores de lodos oscila entre 130 y 200 USD/m<sup>3</sup>.

### *Tecnologías de remediación fisicoquímicas*

Como ya se mencionó, los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.

Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de biorremediación. Sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación en las que los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición (Van Deuren *et al.* 1997). Mientras que las tecnologías de biorremediación son principalmente métodos destructivos, las fisicoquímicas incluyen las tres estrategias básicas de acción sobre el contaminante (destrucción, separación e inmovilización).

Al igual que el resto de las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse *in situ* o *ex situ*. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías se aplican *in situ*. Entre las tecnologías fisicoquímicas para tratamiento *in situ*, se encuentra la remediación electrocinética (RE), el lavado de suelos (LS), la extracción por solventes (ES), la extracción de vapores (EV) y la solidificación/estabilización (S/E).

#### Remediación electrocinética (RE)

La remediación electrocinética es una tecnología en desarrollo que aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones). Implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad entre un electrodo positivo y uno negativo (Van Cauwenberghe 1997, Paillat *et al.* 2000).

Los iones metálicos, iones amonio y compuestos orgánicos con carga positiva, migran hacia el cátodo; mientras que los aniones como el cloruro, cianuro, fluoruro, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente se mueven hacia el ánodo (EPA 2001).

*Aplicaciones.* Pueden tratarse contaminantes orgánicos polares y metales pesados. Se ha utilizado a nivel piloto para tratar contaminantes inorgánicos como Pb, Ni, Hg, As, Cu, Zn y Cr; además de

orgánicos como BTX. Es una tecnología que puede emplearse para mejorar otras tecnologías de remediación como la biorremediación y la remoción de contaminantes no solubles (Sellers 1999).

*Limitaciones.* Su eficiencia disminuye en medios con un contenido de humedad menor 10%; la presencia de ciertos metales o materiales aislados provocan variaciones en la conductividad eléctrica del suelo; depósitos minerales (alta conductividad eléctrica) pueden provocar problemas; valores extremos de pH y reacciones de oxido-reducción pueden disminuir su eficiencia y formar productos indeseables.

*Costos.* Los costos varían en función de la cantidad de suelo a tratar, su conductividad, tipo de contaminante y tipo de proceso. Los costos netos son cercanos a 50 USD/m<sup>3</sup>.

#### Lavado de suelos, extracción por solvente e inundación de suelos

Estas tres tecnologías separan contaminantes orgánicos e inorgánicos del suelo por medio de un líquido de extracción. El fluido líquido requiere de un tratamiento posterior para remover o destruir los contaminantes. Cada una de estas tecnologías relacionadas entre sí, trabajan de manera diferente sobre los contaminantes (Sellers 1999).

- Lavado de suelos. Los contaminantes sorbidos en las partículas finas del suelo son removidos con el uso de soluciones acuosas en un suelo excavado. De esta manera se reduce el volumen del material contaminado, ya que las partículas finas son extraídas del resto del suelo.
- Extracción por solventes. Este tipo de procesos, utiliza solventes orgánicos para disolver los contaminantes y así removerlos del suelo.
- Inundación del suelo. Grandes cantidades de agua, en ocasiones con algún aditivo, se aplican al suelo o se inyectan en cuerpos de

agua cercanos, para aumentar el nivel del agua en la zona contaminada, favoreciendo así el paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua. Un sistema de inundación, debe incluir la extracción y tratamiento del agua contaminada (Sellers 1999, EPA 2001).

*Aplicaciones.* El lavado de suelos se ha utilizado con éxito para tratar suelos contaminados con hidrocarburos, HAP, PCP, pesticidas y metales pesados. Por medio de inundación, pueden recuperarse compuestos inorgánicos (metales), y tratarse COV, COS, gasolinas y pesticidas.

*Limitaciones.* Las soluciones utilizadas y los solventes pueden alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo; es difícil tratar suelos poco permeables o heterogéneos; los surfactantes usados en el lavado pueden adherirse al suelo y disminuir su porosidad; los fluidos pueden reaccionar con el suelo reduciendo la movilidad de los contaminantes. En general, se requiere tratar previamente los suelos con alto contenido de materia orgánica y es necesario tratar los vapores generados.

*Costos y tiempos de remediación.* La inundación y el lavado son tecnologías de corto a mediano plazo. Los costos para la inundación oscilan entre 20 y 200 USD/m<sup>3</sup>, y para el lavado el costo promedio es de 150 USD/m<sup>3</sup>.

#### Extracción de vapores (EV)

La EV, también conocida como ventilación del suelo, vaporización y volatilización, es una tecnología en la que se aplica un vacío al suelo, para inducir un flujo controlado y continuo de aire, y remover así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo. La EV usualmente se lleva a cabo *in situ*. Sin embargo, en algunos casos, puede usarse como una tecnología *ex situ* (Riser-Roberts 1998, EPA 2001). La efectividad del sistema de EV depende principalmente de la volatilidad de

los contaminantes y de la permeabilidad y homogeneidad del suelo (Sellers 1999).

*Aplicaciones.* La EV a menudo es usada para remediar sitios contaminados por derrames o fugas de COV y algunas gasolinas; puede aplicarse en zonas insaturadas. Además, la EV puede facilitar e inducir otros procesos de remediación como la biodegradación de contaminantes poco volátiles.

*Limitaciones.* No es recomendable para la remoción de aceites pesados, metales, BPC o dioxinas; la técnica solo es aplicable para compuestos volátiles; la humedad, contenido de materia orgánica y permeabilidad del suelo al aire, afectan la eficiencia del proceso; no es una tecnología adecuada para zonas saturadas; un alto contenido de partículas finas afectan la operación del sistema; la descarga de aire del sistema puede requerir tratamiento y los líquidos residuales deben tratarse o disponerse.

*Costos.* Los costos de operación de la EV se encuentran entre 10 y 50 USD/m<sup>3</sup>.

#### Solidificación/estabilización (S/E)

La S/E es un proceso en el que el suelo contaminado se mezcla con aditivos para inmovilizar los contaminantes, disminuyendo o eliminando la lixiviación. La solidificación se refiere a las técnicas que encapsulan (atrapan físicamente) al contaminante formando un material sólido, y no necesariamente involucra una interacción química entre el contaminante y los aditivos solidificantes. La estabilización limita la solubilidad o movilidad del contaminante, generalmente por la adición de materiales, como cemento Portland, cal o polímeros, que aseguren que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica (Sellers 1999, EPA 2001).

La S/E puede realizarse tanto *in situ* como *ex situ*. Para la S/E *ex situ*, el material a tratar debe excavararse para tratarse, de manera que

el material resultante sea dispuesto. En la *S/E in situ* pueden utilizarse sistemas para cubrir los suelos contaminados sin necesidad de excavar, de manera que el material se deja en el mismo sitio (EPA 2001).

*Aplicaciones.* Los procesos de *S/E* son usualmente utilizados para tratar contaminantes inorgánicos, como suelos y lodos contaminados con metales.

*Limitaciones.* Los COV tienden a volatilizarse durante el mezclado del suelo con los agentes de solidificación/estabilización, y generalmente éstos no son inmovilizados; la profundidad a la que se encuentre el contaminante limita algunos procesos; el material solidificado puede impedir el futuro uso del sitio; los metales volátiles (Pb, Cd, As, Hg) pueden volatilizarse durante el tratamiento y no es recomendable para sitios con más de 25% de metales (Riser-Roberts 1998).

*Tiempos de remediación.* La *S/E* son tecnologías de corto a mediano plazo.

#### Tratamiento químico

El tratamiento químico, típicamente involucra reacciones de oxidación-reducción (redox) que convierten químicamente compuestos tóxicos o peligrosos a compuestos menos tóxicos o no peligrosos, que son más estables, menos móviles o inertes. Los agentes oxidantes más usados para tratar contaminantes peligrosos en el suelo, son el ozono, peróxido de hidrógeno, hipocloritos, cloro, dióxido de cloro y el reactivo de Fenton (peróxido de hidrógeno y hierro). Este método puede aplicarse *in situ* o *ex situ* en suelos, lodos, sedimentos y otros sólidos.

*Aplicaciones.* Por este método pueden atacarse principalmente compuestos inorgánicos. Sin embargo, puede usarse con menor eficiencia para COV no halogenados y COS, gasolinas y pesticidas.

*Limitaciones.* Puede ocurrir una oxidación incompleta o formación de compuestos intermediarios, dependiendo del contaminante

y el agente oxidante usado; la presencia de aceites y grasas disminuye la eficiencia y los costos se incrementan para altas concentraciones de contaminantes.

*Costos y tiempos de remediación.* Es una tecnología de corto a mediano plazo, cuyos costos oscilan entre 190 y 600 USD/m<sup>3</sup> (Van Deuren *et al.* 1997).

### Separación física

Las técnicas de separación buscan concentrar los contaminantes sólidos por medios físicos y químicos. La mayoría de los contaminantes orgánicos e inorgánicos tienden a unirse, química o físicamente, a la fracción más fina del suelo. Las partículas finas de arcillas y sedimentos pueden separarse de arenas y gravas gruesas para concentrar los contaminantes en volúmenes menores de suelo. De esta manera, el volumen de suelo obtenido puede tratarse o disponerse.

La separación *ex situ* puede realizarse por varios procesos. La separación por gravedad (por diferencia de densidad entre fases) y la separación por tamaño de partícula (concentración de contaminantes en volúmenes menores) son dos procesos bien desarrollados. En cambio, la separación magnética (extracción de partículas magnéticas) es un proceso mucho más novedoso que aún se encuentra en desarrollo (EPA 2001).

*Aplicación.* Los contaminantes que pueden tratarse por separación física son los COS, gasolinas y compuestos inorgánicos. Pueden usarse para algunos COV y pesticidas. La separación magnética se usa específicamente para metales pesados y partículas magnéticas radioactivas (plutonio y uranio).

*Limitaciones.* Alto contenido de arcillas y de humedad incrementa los costos del tratamiento; la separación por gravedad asume diferencias entre la densidad de la fase sólida y líquida; la gravedad específica de las partículas afectan la eficiencia del proceso.

### *Tecnologías de remediación térmicas*

Los tratamientos térmicos ofrecen tiempos muy rápidos de limpieza, pero son generalmente los más caros. Sin embargo, estas diferencias son menores en las aplicaciones *ex situ* que *in situ*. Los altos costos se deben a los costos propios para energía y equipos, además de ser intensivos en mano de obra. Al igual que las tecnologías fisicoquímicas y a diferencia de las biológicas, los procesos térmicos incluyen la destrucción, separación e inmovilización de contaminantes. Los procesos térmicos utilizan la temperatura para incrementar la volatilidad (separación), quemado, descomposición (destrucción) o fundición de los contaminantes (inmovilización).

Las tecnologías térmicas de separación producen vapores que requieren de tratamiento; las destructivas producen residuos sólidos (cenizas) y, en ocasiones, residuos líquidos que requieren de tratamiento o disposición. Es importante hacer notar que para ambos tipos de tratamiento, el volumen de residuos generados que requieren de tratamiento o disposición, es mucho menor que el volumen inicial (Van Deuren *et al.* 1997).

La mayoría de las tecnologías térmicas pueden también aplicarse *in situ* y *ex situ*. Dentro de las tecnologías térmicas *ex situ*, principalmente se encuentran la incineración, pirólisis y desorción térmica. Una de las tecnologías que se emplean *in situ* es la EV mejorada por temperatura.

#### Desorción térmica (DT)

Los procesos de DT consisten en calentar (90 a 540 °C) el suelo contaminado con contaminantes orgánicos, con el fin de vaporizarlos y por consiguiente separarlos del suelo. El calor acelera la liberación y el transporte de contaminantes a través del suelo, para posteriormente ser dirigidos hasta un sistema de tratamiento de gases con el uso de

un gas acarreador o un sistema de vacío. Es un proceso de separación física no destructivo. Con base en la temperatura de operación, la DT puede clasificarse en dos grupos (EPA 2001):

- Desorción térmica de alta temperatura (DTAT). Es una tecnología a gran escala en la cual los desechos son calentados a temperaturas que varían entre los 320 y los 560 °C. Frecuentemente se utiliza en combinación con la incineración o S/E, dependiendo de las condiciones específicas.
- Desorción térmica de baja temperatura (DTBT). Los desechos se calientan a temperaturas entre 90 y 320 °C. Es una tecnología a gran escala que se ha probado con éxito en el tratamiento de varios tipos de suelos contaminados con HTP.

La DT puede implementarse por: (i) inyección a presión de aire caliente, (ii) inyección de vapor y (iii) calentamiento del suelo por ondas de radio (radio frecuencia) que producen energía que se transforma en energía térmica.

*Aplicaciones.* El proceso de DT puede aplicarse en general, para la separación de compuestos orgánicos de desechos, así como para suelos contaminados con creosota e hidrocarburos. Los sistemas de DTBT pueden usarse para tratar COV no halogenados y gasolinas y, con menor eficiencia, para COS. Los procesos de DTAT se utilizan principalmente para tratar COS, HAP, BPC y pesticidas, pero pueden aplicarse también para COV y gasolinas (Van Deuren *et al.* 1997).

*Limitaciones.* La presencia de cloro puede afectar la volatilización de algunos metales como el plomo. Su uso varía en función de la temperatura que pueda alcanzarse durante el proceso seleccionado. Estas tecnologías no son efectivas en zonas saturadas, suelos muy compactos o con permeabilidad variable, además de que producen emisiones gaseosas.

*Costos.* La limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos por DT varía entre 50 y 350 USD/m<sup>3</sup>. En términos generales, la DT con uso de vapor puede costar más de 400 USD/m<sup>3</sup>.

## Incineración

En los procesos de incineración tanto *in situ* como *ex situ*, se utilizan altas temperaturas de operación que van desde los 870 a los 1,200 °C, con la finalidad de volatilizar y quemar compuestos orgánicos y halogenados en presencia de oxígeno. Generalmente se utilizan combustibles para iniciar el proceso de combustión. Las eficiencias de remoción y destrucción de los incineradores operados adecuadamente exceden el 99.99%. Sin embargo, los gases de combustión generalmente requieren de tratamiento. Existen diferentes tipos de incineradores (Van Deuren *et al.* 1997):

- Combustión de lecho circulante (CLC). Utilizan altas velocidades en la entrada de aire, lo que provoca la circulación de los sólidos, creando una zona de combustión turbulenta favoreciendo la destrucción de hidrocarburos tóxicos. Los incineradores de CLC operan a temperaturas menores que los incineradores convencionales (790 a 880 °C).
- Lecho fluidizado. Utiliza aire a alta velocidad para provocar la circulación de las partículas contaminadas y opera a temperaturas mayores a 870 °C.
- Tambor rotatorio. La mayoría de los incineradores comerciales son de este tipo, y están equipados con un «dispositivo de postcombustión», un extintor y un sistema para el control de emisiones. Son cilindros rotatorios con una ligera inclinación que opera a temperaturas por arriba de los 980 °C.

*Aplicaciones.* Se usa para remediar suelos contaminados con explosivos, residuos peligrosos como hidrocarburos clorados, BPC y dioxinas.

*Limitaciones.* Es necesario tratar los gases de combustión (dioxinas y furanos); para el tratamiento de BPC y dioxinas, deben emplearse incineradores fuera del sitio; los metales pesados pueden producir

cenizas que requieren estabilización; para tratar metales volátiles (Pb, Cd, Hg y As) se necesitan sistemas de limpieza de gases; los metales pueden reaccionar con otros compuestos formando compuestos más volátiles y tóxicos.

*Costos y tiempos de remediación.* Es una tecnología de corto a largo plazo. Los costos de incineradores fuera del sitio oscilan entre 200 y 1000 USD/ton; para tratar suelos contaminados con dioxinas y BPC los costos van desde los 1,500 a 6,000 USD/ton.

### Vitrificación

El proceso de vitrificación puede llevarse a cabo *in situ* o *ex situ*, y utiliza una corriente eléctrica para fundir los suelos contaminados con temperaturas que van de 1,600 a 2,000 °C. Es un proceso de S/E que estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los orgánicos. El producto de la vitrificación es un material cristalino químicamente estable que no produce lixiviados, en el cual quedan incorporados los compuestos inorgánicos. Durante el proceso, las altas temperaturas, provocan la destrucción o remoción de los materiales orgánicos (EPA 2001).

*Aplicaciones.* La vitrificación es usada generalmente para inmovilizar la mayoría de los contaminantes inorgánicos. Sin embargo, se ha probado que el proceso también puede destruir o remover COV y COS y otros compuestos orgánicos como dioxinas y BPC.

*Limitaciones.* Las limitaciones de la vitrificación son las mismas que se señalan en los procesos de estabilización/solidificación.

*Costos.* Los costos de operación de la vitrificación varían en función de los costos de energía eléctrica, humedad del sitio y profundidad a la que se realice el proceso.

### Pirólisis

La pirólisis es la descomposición química de materiales orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. El proceso normalmente se realiza a presión y temperaturas de operación mayores a 430 °C. Los hornos y equipos utilizados para la pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperaturas menores en ausencia de aire. Los productos primarios formados de la pirólisis de materiales orgánicos, en diferentes proporciones de acuerdo con las condiciones del proceso, son: (i) gases residuales (metano, etano y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros); (ii) condensados acuosos y aceitosos y (iii) residuos sólidos carbonosos (coque) que pueden usarse como combustible (Riser-Roberts 1998, Kreiner 2002).

*Aplicaciones.* Se utiliza para tratar COS y pesticidas. Puede aplicarse para tratar BPC, dioxinas, desechos de alquitrán y pinturas, suelos contaminados con creosota y con hidrocarburos. Ha mostrado buenos resultados en la remoción de BPC, dioxinas, HAP y otros compuestos orgánicos. La pirólisis no es efectiva para destruir o separar compuestos inorgánicos de un suelo contaminado.

*Limitaciones.* Se requieren tamaños de partícula específicos y manipulación del material; altos contenidos de humedad (mayor a 1%) aumentan los costos; los medios con metales pesados requieren estabilización; es necesario tratar los gases de combustión.

### *Trenes de tratamientos*

En algunos casos, dos o más tecnologías innovadoras o tradicionales pueden usarse juntas en lo que se conoce como «trenes de tratamiento». Estos trenes de tratamiento son procesos integrados o bien, una serie de tratamientos que se combinan en una secuencia para proporcionar el tratamiento necesario. En general, los trenes de trata-

miento se emplean cuando no todos los contaminantes en un medio particular, pueden tratarse con una sola tecnología.

Por ejemplo, un suelo contaminado con compuestos orgánicos y metales puede tratarse primero por biorremediación para eliminar los compuestos orgánicos y después por S/E para reducir la lixiviación de los metales. En otros casos, un tren de tratamientos puede usarse para: (i) hacer un medio más fácilmente tratable por una tecnología subsecuente; (ii) para reducir la cantidad de desechos que necesitan un tratamiento posterior con una tecnología subsecuente y más costosa; (iii) para disminuir el costo total del tratamiento (EPA 2001).

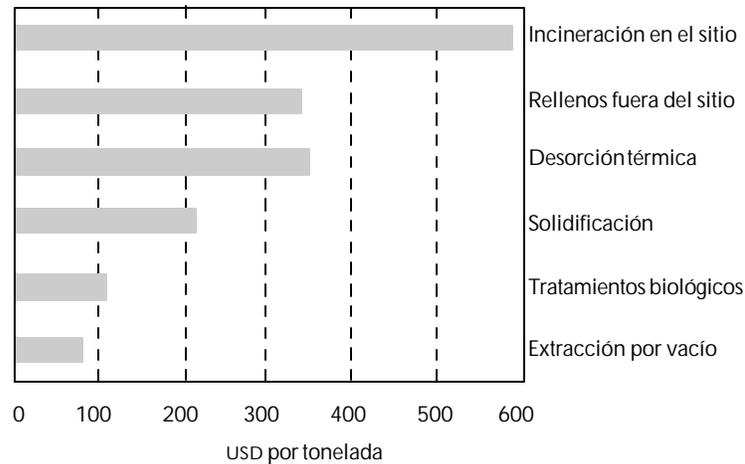
#### SELECCIÓN DE UNA TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN

De acuerdo con la información antes presentada, puede decirse que la selección de una tecnología de remediación para un suelo con características particulares, contaminado con uno o más contaminantes en particular, básicamente depende de los siguientes criterios:

- (i) Características ambientales, geográficas, demográficas, hidrológicas y ecológicas del sitio.
- (ii) Tipo de contaminante (orgánico o inorgánico), concentración y características fisicoquímicas.
- (iii) Propiedades fisicoquímicas y tipo de suelo a tratar.
- (iv) Costo de las posibles tecnologías a aplicar.

En cuanto a costos, como se ha mencionado, las tecnologías térmicas son las más costosas del mercado, mientras que dentro de las más económicas se encuentran las tecnologías de biorremediación aplicadas *in situ*. En la figura 3, se muestran los costos promedio para los diferentes tipos de tecnologías de remediación.

FIGURA 3. COSTOS PROMEDIOS (DÓLARES) POR TONELADA DE SUELO TRATADO, EN FUNCIÓN AL TIPO DE TECNOLOGÍA DE REMEDIACIÓN\*



\* Los valores presentados son el promedio de un total de 230 proyectos aplicados para una variedad de contaminantes biodegradables como gasolinas, lubricantes y HAP (EPA 1998).

En el cuadro 5 se presenta una relación de los tipos de contaminantes que pueden tratarse por una tecnología en particular. Sin embargo, los datos presentados se obtuvieron de la EPA (2001), por lo que es importante aclarar que aunque el uso de ciertas tecnologías puede generalizarse para cierto grupo de contaminantes, las características de los suelos y las condiciones ambientales de México, son completamente diferentes a las de Estados Unidos de América.

Puede verse que la principal tecnología empleada en EE.UU. para el tratamiento de COV, COV halogenados y BTEX, es la extracción de vapores. Mientras que los COS y HAP se tratan generalmente por biorremediación. Para el tratamiento de BPC y COS halogenados, una

CUADRO 5. TIPOS DE CONTAMINANTES TRATADOS  
POR DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

TECNOLOGÍA	COV	COV-H	COS	COS-H	BTEX	HAP	H/P	BPC	METALES	TOTAL
<i>Biológicas</i>										
Biorremediación	25	19	39	8	38	42	28	1	2 <sup>a</sup>	202
Fitorremediación	0	3	0	0	2	0	1	0	1	7
<i>Fisicoquímicas</i>										
TQ	2	3	0	4	1	1	3	3	8 <sup>b</sup>	25
RE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Aireación	0	4	0	1	1	0	0	0	0	6
Inundación	5	8	5	4	6	3	1	0	4	36
EV	31	171	25	24	91	12	2	2	0	358
Lavado	0	0	1	1	0	1	1	1	3	8
S/E	11	15	13	35	7	11	12	30	155	289
ES	1	2	1	3	0	1	0	3	0	11
<i>Térmicas</i>										
DT	12	29	13	20	20	14	9	12	0	129
Incineración	23	48	37	63	29	22	32	38	2 <sup>c</sup>	294
Vitrificación	0	2	0	2	1	0	0	1	0	6
<i>Total de proyectos</i>	<i>110</i>	<i>305</i>	<i>134</i>	<i>165</i>	<i>196</i>	<i>107</i>	<i>89</i>	<i>91</i>	<i>175</i>	

TQ: tratamiento térmico; RE: remediación electrocinética; EV: extracción de vapores; S/E: solidificación /estabilización; ES: extracción por solventes; DT: desorción térmica.

COV: compuestos orgánicos volátiles; COV-H: COV halogenados; COS: compuestos orgánicos semi-volátiles; COS-H: COS halogenados; BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos; HAP: hidrocarburos aromáticos policíclicos; H/P: herbicidas y pesticidas orgánicos; BPC: bifenilos policlorados.

<sup>a</sup> Biorremediación de cromo hexavalente: reducción del Cr (VI) a Cr (III)

<sup>b</sup> Reducción química de Cr (VI) a Cr (III)

<sup>c</sup> Incineración de compuestos orgánicos (alta temperatura), con recuperación de metales de Pb o Hg.

Fuente: EPA2001.

de las tecnologías más usadas ha sido la incineración. Los metales, en cambio, son casi exclusivamente tratados por S/E (EPA 2001).

Contaminantes como los COV halogenados y no halogenados y los BTEX pueden tratarse por tecnologías como la EV debido a su alta volatilidad. En el caso de los metales, que no son volátiles (con excepción del Hg) ni biodegradables, la utilización de la EV, la DT y la biorremediación es limitada. Sin embargo, debido a que éstos pueden formar compuestos insolubles al combinarse con aditivos apropiados (cemento Portland) la S/E puede usarse generalmente para su tratamiento (EPA 2001).

Es importante observar que dentro de las tecnologías más utilizadas en los EE.UU., independientemente del tipo de contaminante, se encuentran (en orden decreciente): EV, incineración, S/E, biorremediación y, por último la DT. Por otra parte, cerca del 80% de los proyectos de remediación en E.U.A. han sido aplicados a compuestos orgánicos, mientras que solamente el 20% restante se ha utilizado para remediar contaminación por metales. En este sentido, el caso de México es similar.

### TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN UTILIZADAS EN MÉXICO

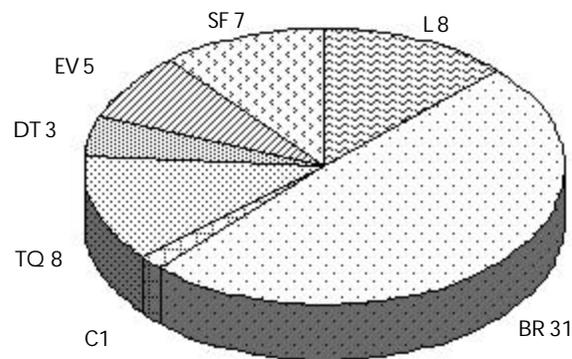
En el mercado ambiental de nuestro país, actualmente existen una gran cantidad de empresas que ofrece diferentes tipos de tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Sin embargo, no fue hasta 1997, que las autoridades ambientales establecieron un programa de verificación y certificación de estas empresas. Actualmente para poder realizar un trabajo de remediación es necesario contar con permisos específicos, como la Licencia ambiental única (LAU). Esta disposición oficial, ha permitido un mayor control acerca de las tecnologías que se ofrecen para remediar suelos y de las posibilidades reales de éxito que estas permiten.

De acuerdo con datos proporcionados por la SEMARNAT (2002) todas las tecnologías que ofrecen las empresas que cuentan con permisi-

Los métodos para remediar suelos contaminados, están enfocadas exclusivamente a la remediación de sitios contaminados con compuestos orgánicos. De un total de 57 empresas autorizadas, ninguna ofrece servicios para la restauración de suelos contaminados con metales. Dentro de los contaminantes tratados, principalmente se encuentran los hidrocarburos (HTP, HAP), lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación.

De acuerdo con datos proporcionados por 40 empresas autorizadas para remediar suelos contaminados con diferentes tipos de contaminantes, la mayoría (31) utilizan métodos biológicos (biorremediación) para el tratamiento. El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física constituyen otra parte importante de las tecnologías más empleadas en México (figura 4).

FIGURA 4. TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS UTILIZADAS EN MÉXICO POR EMPRESAS AUTORIZADAS



BR: biorremediación; L: lavado; SF: separación física; EV: extracción de vapores; DT: desorción térmica; TQ: tratamiento químico; C: centrifugación.

FUENTE: SEMARNAT 2002.

De las empresas que ofrecen servicios de biorremediación, la mayoría utiliza sistemas de composteo y biolabranza. De los tratamientos ofrecidos por estas empresas, el 87.5% se realizan *in situ* y el resto *ex situ*.

Por otra parte, la PROFEPA cuenta con datos acerca de los accidentes (emergencias ambientales) en los que han estado involucradas sustancias peligrosas. A continuación se resumen los principales accidentes ocurridos entre 1993 y 1999 en México, relacionados directamente con la contaminación de suelos, así como las acciones de remediación que se han llevado a cabo en función del tipo de contaminante involucrado (PROFEPA 2002).

#### A. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

Dentro de las tecnologías de remediación más utilizadas en México para el tratamiento de COV no halogenados en suelos, sedimentos y lodos se encuentran la biorremediación, incineración, la EV y la DT a bajas temperaturas. La incineración generalmente se emplea cuando, además de los combustibles, se encuentran presentes COV halogenados. En general estas técnicas pueden emplearse también para tratar sitios contaminados con BTX y combustibles.

#### *Gasolinas*

Entre las tecnologías más empleadas en México para la remediación de sitios contaminados con gasolinas se encuentran: (i) la biorremediación (*in situ* y *ex situ*), incluyendo el uso de biopilas y composteo; (ii) la EV; (iii) la aireación forzada y (iv) el TQ. Estos datos nuevamente confirman que la biorremediación *in situ* ha sido la tecnología más aplicada para este fin. Entre enero de 1997 y noviembre

de 1999, se concluyeron un total de 18 trabajos de remediación de sitios contaminados con gasolinas; actualmente 5 se encuentran en proceso y 8 más por iniciar.

#### *Benceno, tolueno y xilenos (BTX)*

La restauración de sitios afectados a consecuencia de derrames de gasolinas, se basa en el cumplimiento de criterios de limpieza establecidos para HTP, benceno, tolueno y xilenos, e implica necesariamente su limpieza. En el cuadro 6 se presenta el número de emergencias ambientales, ocurridas entre 1993 y 1999, durante el transporte de benceno, tolueno y xilenos, afectando directamente suelos (PROFEPA 2002).

De acuerdo con los datos de dicho cuadro, del total de las emergencias reportadas, casi la mitad tienen un impacto directo en la contaminación de suelos. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se ha realizado ninguna acción de remediación. En el caso de los xilenos, los tres sitios contaminados fueron tratados por biorremediación, dos tecnologías fueron *in situ* y una *ex situ*.

CUADRO 6. RELACIÓN DEL NÚMERO TOTAL DE EMERGENCIAS AMBIENTALES REPORTADAS A LA PROFEPA ENTRE 1993 Y 1999, NÚMERO DE SITIOS AFECTADOS Y DE ACCIONES DE REMEDIACIÓN REALIZADAS

COMPUESTO	EMERGENCIAS	DERRAMES EN TIERRA	ACCIÓN DE REMEDIACIÓN
Benceno	4	4	Ninguna
Tolueno	15	8 (7 durante el transporte, 1 depósito clandestino)	Ninguna
Xilenos	10	5 (4 durante el transporte, 1 depósito clandestino)	Tres sitios (1997-1999)

FUENTE: PROFEPA 2002.

### *Metano*

Entre 1993 y 1999, se presentaron 15 emergencias ambientales con metanol. De los 15 eventos, 9 ocurrieron durante su transportación terrestre, ocasionando la contaminación de suelos. Sin embargo, entre enero de 1997 y octubre de 1999, no se ha realizado en México ninguna restauración ambiental de los sitios contaminados con metanol. Para la restauración de estos sitios puede emplearse la EV, la DT y la incineración.

## B. COMPUESTOS ORGÁNICOS SEMIVOLÁTILES

### *Acrilonitrilo*

Aunque se sabe que han ocurrido emergencias ambientales relacionadas con acrilonitrilo, no se tienen datos exactos que indiquen cuantos son los sitios contaminados con la sustancia. De acuerdo con información de la PROFEPA, entre 1997 y 1999, no se ha llevado a cabo ninguna acción de remediación de sitios contaminados con acrilonitrilo.

## C. ÁCIDOS Y BASES

### *Acido nítrico*

Entre 1993 y 1999 se presentaron 12 emergencias ambientales relacionadas con ácido nítrico. De los 12 eventos, 5 ocurrieron durante la transportación, provocando la contaminación de los sitios en donde se derramó la sustancia. Por ser un ácido inorgánico fuerte, el ácido nítrico puede tratarse químicamente por reacciones de neutralización, que implican la adición de bases fuertes o débiles al

suelo afectado, hasta alcanzar un pH neutro. El área afectada también puede neutralizarse con cal, carbonato de calcio o bicarbonato de sodio.

Desde 1997 hasta 1999, se reportaron 2 sitios contaminados con ácido nítrico, los cuales están siendo remediados a través de la neutralización *in situ* con hidróxido y carbonato de calcio.

### CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Antes de considerar el uso de una tecnología de remediación, es indispensable contar con información del sitio y llevar a cabo su caracterización, así como la del contaminante a tratar. Posteriormente, la tecnología puede elegirse con base en sus costos y a la disponibilidad de materiales y equipo para realizar el tratamiento.

Aunque el uso de las tecnologías de biorremediación se ha limitado para el tratamiento de compuestos orgánicos biodegradables, algunas pueden usarse para separar (fitorremediación) o disminuir la toxicidad (biodegradación) de algunos compuestos inorgánicos no biodegradables. Este tipo de tecnologías son ambientalmente más «amigables» y sus costos no son elevados. Sin embargo, los tiempos de limpieza pueden prolongarse hasta varios meses.

En términos generales, las tecnologías de remediación fisicoquímicas pueden usarse para tratar sitios con características geológicas difíciles, sus costos no son demasiado elevados y los tiempos de limpieza son de corto a mediano plazo. Con las tecnologías térmicas es posible disminuir significativamente los tiempos de limpieza, aunque generalmente es necesario excavar el sitio contaminado y es el grupo de tratamientos más costoso.

Como regla general, cuando un sitio se encuentra contaminado con más de un tipo de contaminantes, puede ser necesario emplear una combinación de varias tecnologías de remediación, en lo que se conoce como «tren de tratamiento».

Aunque existe información disponible acerca de las tecnologías de remediación más utilizadas en México, ésta es aún escasa. Por los datos presentados en este documento, puede pensarse que algunas de las razones que han provocado esta escasez de información pueden ser: (i) muchas de las tecnologías de remediación se encuentran aún poco desarrolladas en el país; (ii) la obligación para la obtención de permisos para empresas remediadoras de suelos contaminados es relativamente reciente, lo que en general se tienen pocas estadísticas; (iii) la falta de legislación respecto de las prácticas adecuadas y límites de limpieza para sitios contaminados con hidrocarburos y metales; (iv) se estima que existe un gran número (desconocido) de empresas generadoras de residuos peligrosos, de los cuales, se cree que una buena parte son dispuestos en tiraderos clandestinos; (v) se desconoce el número real de sitios contaminados históricamente por la actividad minera y petroquímica.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, M. 1994. *Biodegradation and Bioremediation*. Academic Press, San Diego. 302 pp.
- . 1991. *Introduction to Soil Microbiology*. Wiley, New York.
- Bouwer, E.J. y A.J.B. Zehnder 1993. Bioremediation of organic compounds - putting microbial metabolism to work. *Trends Biotechnol.* 11: 360-367.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) 2001. *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México: Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana*. Secretaría de Gobernación, México.
- CICLOPLAFEST 2000. Informe sexenal de la Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas (CICLOPLAFEST) 1994-2000. <http://www.stps.gob.mx/312/publicaciones/cicloplafest.htm>
- . 1996. Catálogo Oficial de Plaguicidas. Comisión Intersecretarial para el Control y uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas.

- (CICOPLAFEST). Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGARPA), Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), Secretaría de Salud (SS), Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI).
- Cortinas, C. y C. Mosler (eds.) 2002. *Gestión de residuos peligrosos*. UNAM, México.
- Eweis, J.B., S.J. Ergas, D.P. Chang y E.D. Schroeder 1998. *Bioremediation Principles*. McGraw-Hill International Editions. 296 pp.
- Hutchinson, S.L., M.K. Banks y A.P. Schwab 2001. Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer. *J. Environ. Qual.* 30: 395-403.
- INEGI-INE 2000. *Indicadores de Desarrollo Sustentable en México*. INEGI, México.
- INEGI-SEMARNAP 1997. *Estadísticas del Medio Ambiente*. INEGI-SEMARNAP, México.
- Instituto Nacional de Ecología (INE) 2002. <http://www.ine.gob.mx>.
- Kreiner, I. 2002. Tecnologías para el tratamiento de residuos peligrosos. En: Cortinas, C. y C. Mosler (eds.). *Gestión de residuos peligrosos*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Mosler, C. 2002. Situación actual de los residuos peligrosos. En: Cortinas, C. y C. Mosler (eds.).
- Paillat, T, E. Moreau, P.O Grimaud y G. Touchard 2000. Electrokinetic phenomena in porous media applied to soil decontamination. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 7: 693-704
- Petróleos Mexicanos (PEMEX) 2001. *Informe 2001: Seguridad, salud y medio ambiente*. Dirección Corporativa de Seguridad Industrial y Protección Ambiental, PEMEX, México.
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPa) 2002. Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación, México. <http://www.profepa.gob.mx/>
- 1998. *Informe Trienal 1995-1997*. PROFEPa, SEMARNAP. México.
- Quadri, G. 1994. Industria y política ambiental. *El Nacional*, sábado 18 de junio, México.

- Riser-Roberts, E. 1998. *Remediation of petroleum contaminated soils*. Lewis Publishers. 542 pp.
- Semple, K.T., B.J. Reid y T.R. Fermor 2001. Impact of composting strategies on the treatment of soils contaminated with organic pollutants. *Environ. Pollution* 112: 269-283.
- Sellers, K. 1999. *Fundamentals of hazardous waste site remediation*. Lewis Publishers. 326 pp.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 2001. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report. 10<sup>th</sup> Edition. Office of Solid Waste and Emergency Response. <http://www.epa.gov/TIO>.
- 1998. An analysis of composting as an environmental remediation technology. 3. Office of Solid Waste and Emergency Response.
- Van Cauwenberghe, L. 1997. Electrokinetics. Technology Evaluation Reports TO-97-03. GWRTAC E Series. USA. <http://www.gwrtac.org>
- Van Deuren, J., Z. Wang, Z. y J. Ledbetter 1997. *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*. 3<sup>a</sup> Ed. Technology Innovation Office, EPA. <http://www.epa.gov/tio/remed.htm>.



*Tecnologías de remediación para suelos contaminados*  
se terminó de imprimir en los talleres gráficos  
de Jiménez Editores e Impresores, S.A. de C.V.,  
Callejón de la Luz 33-20. Col. Anáhuac,  
México, D.F., durante el mes de diciembre  
de 2002, conforme a los términos  
de la invitación restringida  
INE/IR-205/2002.

Se tiraron 1,000 ejemplares.