



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TÉCNICAS DE
REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS EN
MÉXICO**

T E S I S A

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

P R E S E N T A

FAVIOLA DANIELA VALLEJO PÉREZ



MÉXICO, CDMX.

2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:	Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara
VOCAL:	Profesor: Luz María Lazcano Arriola
SECRETARIO:	Profesor: Luis Antonio García Villanueva
1er SUPLENTE:	Profesor: Sergio Adrián García González
2do SUPLENTE:	Profesor: Alejandra Mendoza Campos

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

EDIFICIO DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Luis Antonio García Villanueva

SUPERVISOR TÉCNICO:

Dra. Georgina Fernández Villagómez

SUSTENTANTE:

Faviola Daniela Vallejo Pérez

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	4
LISTA DE TABLAS	5
ACRÓNIMOS.....	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Planteamiento del problema.....	9
1.2. Objetivos	11
1.2.1 Objetivo general	11
1.2.3 Objetivo específicos	11
1.3 Alcances y limitaciones	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 Características del suelo	13
2.1.1 Composición del suelo.....	14
2.1.2 Propiedades físicas del suelo	16
2.1.3 Propiedades químicas del suelo	18
2.2 Definición de suelo de acuerdo a la legislación	19
2.3 Contaminación del suelo en México.....	19
2.3.1 Fuentes de contaminación en México.....	20
CAPÍTULO 3. LEGISLACIÓN	22
3.1 Legislación internacional sobre el suelo contaminado.....	22
3.2 Legislación nacional sobre el suelo contaminado.....	25
3.2.1 Bases constitucionales	25
3.2.2 Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)	27
3.2.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)	28
3.2.4 Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA).....	31

CAPÍTULO 4. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DEL SUELO CONTAMINADO	32
4.1 Clasificación de las estrategias de remediación	32
4.2 Tratamiento biológico.....	35
4.2.1 In-situ	35
4.2.2 Ex-situ	41
4.3 Tratamiento fisicoquímico	46
4.3.1 Destrucción.....	47
4.3.2 Separación.....	50
4.3.3 Inmovilización	51
4.4 Tratamiento térmico	55
CAPÍTULO 5. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN PRESENTADAS EN EUROSOIL	59
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS	76
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	96
REFERENCIAS	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Perfil general de un suelo	14
Figura 2.2. Esquema del tamaño de las partículas que componen el suelo	15
Figura 4.1. Proceso de bioestimulación	35
Figura 4.2. Bioventeo.....	37
Figura 4.3. Barreras reactivas permeables	38
Figura 4.4. Sistema de bioslurping.....	39
Figura 4.5. Diagrama del proceso de compostaje	41
Figura 4.6. Esquema para el proceso de fitorremediación	42
Figura 4.7. Diagrama para el proceso de compostaje	44
Figura 4.8. Diagrama para el proceso de biopilas	45
Figura 4.9. Proceso de inundación.....	47
Figura 4.10. Proceso de electroremediación.....	48
Figura 4.11. El proceso de lavado de suelo	49
Figura 4.12. Proceso de bombeo de agua	52
Figura 4.13. Combinación de las técnicas de extracción de vapor del suelo y aireación del suelo.....	63
Figura 4.14. Proceso de desorción térmica.....	67
Figura 4.15. Procesos de incineración	68
Figura 6.1. Estrategias de remediación presentadas en Eurosoil 2012.....	75
Figura 6.2. Tecnologías de remediación para suelos utilizadas en México por empresas autorizadas.	81
Figura 6.3. Tecnologías de remediación para suelos presentadas en Eurosoil 2012 de acuerdo al tipo de tecnología.....	81
Figura 6.5. Área de aplicación de las técnicas de remediación de Eurosoil que podrían emplearse en México.....	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Política internacional en materia ambiental.	23
Tabla 4.1. Tecnologías de remediación y su clasificación.	34
Tabla 5.1. Países participantes en el Eurosoil 2012..	60
Tabla 5.2. Técnicas de remediación presentadas por Alemania.	61
Tabla 5.3. Técnicas de remediación presentadas por Alemania.	61
Tabla 5.4. Técnicas de remediación presentadas por Alemania.	62
Tabla 5.5. Técnicas de remediación presentadas por Alemania.	62
Tabla 5.6. Técnicas de remediación presentadas por Alemania.	63
Tabla 5.7. Técnicas de remediación presentadas por España	64
Tabla 5.8. Técnicas de remediación presentadas por España.	64
Tabla 5.9. Técnicas de remediación presentadas por España.	65
Tabla 5.10. Técnicas de remediación presentadas por España.	65
Tabla 5.11. Técnicas de remediación presentadas por España.	66
Tabla 5.12. Técnicas de remediación presentadas por Francia.	67
Tabla 5.13. Técnicas de remediación presentadas por Francia..	67
Tabla 5.14. Técnicas de remediación presentadas por Francia..	68
Tabla 5.15. Técnicas de remediación presentadas por Francia..	68
Tabla 5.16. Técnicas de remediación presentadas por Francia..	69
Tabla 5.17. Técnicas de remediación presentadas por Italia.	70
Tabla 5.18. Técnicas de remediación presentadas por Italia.	70

Tabla 5.19. Técnicas de remediación presentadas por Italia..	71
Tabla 5.20. Técnicas de remediación presentadas por Italia.	71
Tabla 5.21. Técnicas de remediación presentadas por Italia..	72
Tabla 5.22. Técnicas de remediación presentadas por Reino Unido.	73
Tabla 5.23. Técnicas de remediación presentadas por Reino Unido	73
Tabla 5.24. Técnicas de remediación presentadas por Reino Unido	74
Tabla 5.25. Técnicas de remediación presentadas por Reino Unido	74
Tabla 5.26. Técnicas de remediación presentadas por Reino Unido	75
Tabla 6.1. Clasificación de las técnicas de remediación presentadas en Eurosoil 2012...	77
Tabla 6.2. Ventajas y desventajas de los tratamientos de remediación.	83
Tabla 6.3. Ventajas y desventajas de los tratamientos de remediación de acuerdo a su aplicación.	85
Tabla 6.4. Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo a la zona de aplicación.....	88
Tabla 6.5. Políticas ambientales presentadas en Eurosoil 2012.	95



ACRÓNIMOS

- BPC:** Bifenilos Policlorados.
- BTEX:** Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno.
- CENAPRED:** Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CETENAL:** Centro de Estudios del Territorio Nacional.
- CICLOPLAFEST:** Comisión Intersecretarial para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Sustancias Tóxicas.
- CMNUCC:** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- CONABIO:** Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONUMAD:** Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.
- DGGE:** Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (Electroforesis en Gel con Gradiente de Desnaturalización).
- DNAPL:** Dense Non-Aqueous Phase Liquid (Líquidos Densos de Fase no Acuosa).
- EPA:** Environmental Protection Agency (Agencia de Protección del Medio Ambiente).
- FAO:** Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
- FMCN:** Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza.
- FRTR:** Federal Remediation Technologies Roundtable (Mesa Redonda de Tecnologías Federales de Remediación).



- HAP:** Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos.
- INEGI:** Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- LGEEPA:** Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.
- LGPGIR:** Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos.
- LRFA:** Ley Federal De Responsabilidad Ambiental.
- OCDE:** Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- PCP:** Pentaclorofenol.
- PFT:** Perfluorinated Surfactants (surfactantes perfluorados).
- PROFEPA:** Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.
- RP:** Residuos Peligrosos.
- SEMARNAT:** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SISCO:** Sistema Informático de Sitios Contaminados.
- SRF:** Short Rotation Forestry (Silvicultura de Rotación Corta).
- SVOC:** semivolatile organic compounds (Compuestos Orgánicos Semivolátiles).
- TPH:** Total Petroleum Hydrocarbons (Hidrocarburos Totales del Petróleo).
- USEPA:** United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos).
- VOC:** Volatile Organic Compounds (Compuestos Orgánicos Volátiles).



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

En México, para el periodo 1995-2000, el SISCO (Sistema Informático de Sitios Contaminados) tenía identificados 166 sitios contaminados registrados con materiales o RP (residuos peligrosos); para el año 2011 ya se tenían registrados 582 sitios. Del total de sitios, 55% se originó por disposición de residuos, 13% por actividades mineras, 11% industriales y 3.4% a extracción de petróleo y sus derivados (SEMARNAT, 2012). En nuestro país se contamina el suelo y cuerpos de agua con hidrocarburos, metales y metaloides (Volke y Velasco, 2002).

El desarrollo industrial de México ha estado aparejado al desenvolvimiento de la industria minera. La explotación del petróleo en México, en particular, tuvo, a lo largo del siglo XX, distintos periodos de expansión y contracción, los cuales han influido de manera sustancial en el desarrollo económico del país (Salinas, 1997).

Sumado a lo anterior, en la década de los 70's, la reestructuración productiva de la industria se modificó debido al crecimiento petrolero. La petroquímica básica se convirtió en la actividad con mayor contribución a la contaminación, que pasó a ser de las actividades más relevantes por su impacto potencial al ambiente (Quadri, 1994).

Es necesario remediar los daños ambientales que deriven del derrame de hidrocarburos y contaminantes de origen minero. Para lograr lo anterior, existen múltiples tratamientos de diferente naturaleza; seleccionar el más adecuado dependerá de diversos factores, tales como las características y concentración del contaminante, tipo de suelo afectado, superficie contaminada, eficiencia de remoción de la tecnología, etc.

Hay muchas formas de combatir la contaminación, y existen legislaciones internacionales que regulan las emisiones contaminantes de los países que adhieren estas políticas. La contaminación está generalmente ligada al desarrollo



económico y social. Actualmente muchas organizaciones internacionales como la ONU ubican al desarrollo sostenible como una de las formas de proteger al medioambiente para las actuales y futuras generaciones.

En los últimos años, la gestión ambiental en nuestro país se ha visto fortalecida, tanto por la creación de instituciones como por la actualización y modernización de nuestro marco jurídico, por lo que es un aspecto que resulta indispensable a incluir en dicho trabajo: la normativa relacionada con la contaminación de suelos, aquéllos criterios que son observados por las autoridades ambientales y los particulares. (Cancino, 2001).

Actualmente, en la búsqueda de nuevas soluciones a los problemas medioambientales en el tema de suelos, expertos, científicos e investigadores se reúnen en el congreso Eurosoil que se celebra cada cuatro años para intercambiar conocimientos, experiencias y métodos de campo; sirviendo como red de apoyo para países con menor desarrollo tecnológico.

En este trabajo se busca analizar las técnicas más novedosas presentadas en el ámbito internacional y comparar con la tecnología disponible en nuestro país, analizando los posibles lugares de aplicación además de realizar la clasificación de estrategias correspondiente.



1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de las técnicas y estrategias de remediación de suelos contaminados disponibles en México con la información presentada por el Congreso Eurosoil 2012.

1.2.2 Objetivos específicos

- Mostrar el valor que posee el suelo y el papel que juega en el medio ambiente y en la socio economía.
- Reconocer la importancia de un suelo sano.
- Presentar las principales fuentes de contaminación de suelos en México de acuerdo a su origen antropogénico.
- Demostrar la importancia de la legislación ambiental en materia de suelos.
- Recopilar en medios impresos y electrónicos la información sobre las técnicas de remediación de suelos contaminados considerando su clasificación de estrategias.
- Presentar las técnicas, tecnologías y políticas más novedosas para la remediación de suelos contaminados del último Congreso de Eurosoil 2012 de acuerdo al origen geográfico de los principales expositores.
- Revisar la legislación internacional referente a los suelos contaminados y cómo México ha participado y/o adoptado tales políticas ambientales.



1.3 Alcances y limitaciones

Se llevará a cabo una revisión bibliográfica sobre las técnicas de remediación para realizar un compendio actualizado, el cual no contendrá información técnica a detalle, tiempo requerido, costos, ni áreas de alcance estimadas para cada estrategia.

La información presentada en este trabajo sobre el Congreso Internacional Eurosoil 2012 no abarcará todas las técnicas exhibidas ni se presenta el estudio completo que se llevó a cabo para cada una de ellas; debido a que este texto tiene como finalidad compilar técnicas de análisis de suelos más trascendentes de los principales países expositores, necesarias para el seguimiento de la remediación y caracterización de sitios contaminados para su comparación con la tecnología disponible en México.



CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Características del suelo

El suelo es la capa que se encuentra entre la corteza terrestre y la atmósfera y su importancia radica en que es un elemento natural dinámico y vivo, que forma parte fundamental en los ciclos biogeoquímicos, por lo cual desarrolla varias funciones esenciales en la naturaleza de carácter ecológico, económico, social y cultural.

Actualmente el suelo se define como un cuerpo natural formado por sólidos (material mineral y materia orgánica), líquidos y gases, que ocurren sobre la superficie de la tierra, que ocupan un lugar en el espacio y que presenta horizontes o capas, (Soil Survey Staff, 1998).

Un suelo sano es muy importantes para garantizar el crecimiento continuo de la vegetación natural y ordenada que nos proporciona fibras, combustibles, productos medicinales y otros servicios ecosistémicos, como la regulación del clima y la producción de oxígeno.

El suelo y la vegetación mantienen relaciones recíprocas. Un suelo fértil favorece el crecimiento de las plantas al proporcionarles nutrientes y servirles de tanque de retención de agua y de sustrato para sus raíces. Por su parte, la vegetación, la cubierta arbórea y los bosques previenen la degradación y desertificación en los suelos al estabilizarlos, mantienen el ciclo del agua y los nutrientes, reducen la erosión hídrica y eólica. A medida que aumenta la demanda de vegetación y subproductos de la vegetación como la madera, impulsada por el crecimiento económico y los cambios demográficos, el suelos se ve sometido a una enorme presión y el peligro de que se degrade aumenta considerablemente (FAO, 2015).



2.1.1 Composición del suelo

En general, la composición química y la estructura física del suelo están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por el tiempo en que ha actuado la meteorización (desintegración por la acción de agentes atmosféricos), por la topografía y por los cambios resultantes de las actividades humanas (Sposito 1989).

La matriz de suelo es un sistema de tres fases: sólido, líquido y gas. En un suelo ideal la materia sólida comprende el 50% (material inorgánico 45-48% y materia orgánica 2-5%) y el espacio poroso que corresponde al otro 50% (25% es aire y 25% de agua).

Los componentes de un suelo maduro se encuentran dispuestos en una serie de zonas llamadas horizontes (figura 2.1). El arreglo de estos horizontes en un suelo se conoce como un perfil edáfico o perfil del suelo. Cada horizonte se caracteriza por tener diferentes propiedades como color, textura, estructura, espesor y composición (tipo de minerales y elementos químicos presentes), además de su consistencia y reacción. Todas estas propiedades son utilizadas para definir los tipos de horizontes, de los cuales se han identificado a la fecha seis, simbolizados con las letras mayúsculas O, A, E, B, C y R (Miller 1994; Jaramillo 2001).

- **Horizonte O:** Es un horizonte muy rico en materia orgánica, por lo que es oscuro. En este tipo de suelo se encuentran gusanos de tierra, y algunas hojas que se han secado.
- **Horizonte A:** Es el más superficial, único indispensable para que un suelo sea considerado suelo. Con materia orgánica (MO), minerales insolubles y arcilla. Presenta estructura granular.
- **Horizonte E:** Es un horizonte A eluvial, es decir, es un horizonte en el cual se han lavado o removido materiales tales como arcilla u óxidos de hierro, por lo que es de colores muy claros.



- **Horizonte B:** Horizonte subsuperficial mineral, puede presentar vestigios de la roca madre que originó el suelo; presenta color más intenso que los horizontes inferiores o superiores.
- **Horizonte C:** Horizonte mineral o capa de material no consolidado (se excluye la roca madre dura) que han sido afectados por los procesos genéticos de manera mínima y no poseen las propiedades de los horizontes H, O, A, E o B.
- **Horizonte R:** Horizonte constituido por una roca coherente y dura, que no puede romperse con una azada ni cuando está húmeda.

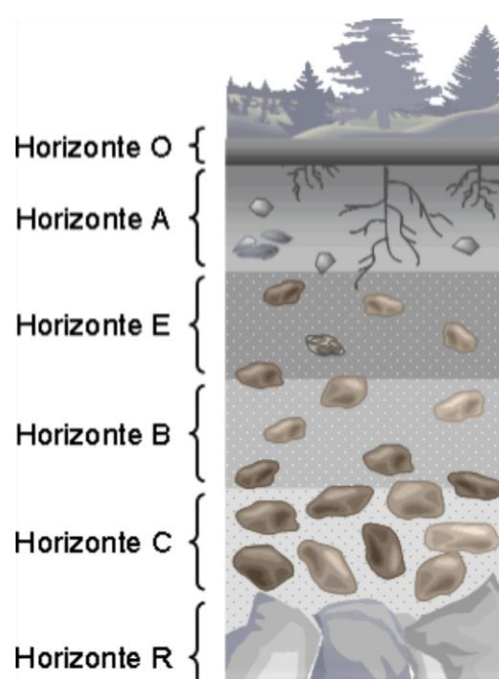


Figura 2.1. Perfil general de un suelo.

Fuente: Tomada y adaptada de Volke y Velasco, 2002.

México no cuenta con un sistema de clasificación de suelos propio, lo que origina que se tenga que adoptar sistemas de clasificación desarrollados en otros países. Por tal motivo, se adoptó la clasificación propuesta por la FAO/UNESO en 1968, y que fue modificada por la Comisión de Estudios de Territorio Nacional (CETENAL; actualmente INEGI) y que es utilizada en la caracterización y cartografía de suelos. (Mendoza, 2010).



2.1.2 Propiedades físicas del suelo

El comportamiento mecánico o propiedades físicas de un suelo, determinan el uso que se le puede dar a éste.

- **Textura:** es un indicador de la proporción relativa de arena (A), limo (L) y arcilla (R) que constituyen un suelo, se considera que la textura es la propiedad física más importante porque influye en otras propiedades como la estructura, el color, la consistencia y la retención de humedad. La textura determina el tamaño de partículas de un suelo, lo cual afecta a la capacidad de retención y la aireación de éste. En la figura 2.2 se muestra el tamaño relativo de partículas.



Figura 2.2. Esquema del tamaño de las partículas que componen el suelo.

Fuente: FAO, 1999.

- **Amortiguación de la contaminación:** es la capacidad que poseen los suelos para autodepurarse, por lo que actúan como barreras protectoras de sistemas biológicos e hidrológicos.
- **Porosidad:** es el porcentaje total de huecos que existen entre las partículas sólidas del suelo, lo cual permite la circulación del aire y del agua. Los poros del suelo son muy irregulares en cuanto tamaño, forma y dirección (Fuster, 2014).



- **Permeabilidad:** es la facilidad con que el aire, el agua y las raíces de las plantas, se mueven en el suelo. En un suelo muy permeable, el agua se infiltra rápidamente y la aireación mantiene un buen nivel de oxígeno. La permeabilidad depende del número de poros del suelo pero se ve afectada más por el tamaño y continuidad de éstos (Palmer y Troeh, 1980).
- **Humedad:** el agua es esencial para todos los seres vivos porque participa en varias reacciones metabólicas celulares, actúa como solvente y portador de nutrientes desde el suelo hasta las plantas y dentro de ellas. El agua también ioniza los macro y micronutrientes de las plantas y permite que la materia orgánica sea degradada más fácilmente. El exceso de agua en un suelo favorece la lixiviación de algunos compuestos, por lo que el agua es un regulador importante de las actividades físicas, químicas y biológicas del suelo (IMP, 2006).
- **Profundidad:** es el espesor de la capa superficial suelo y del subsuelo favorable para el crecimiento y penetración de las raíces de las plantas. La profundidad del suelo puede estar limitada por barreras físicas o químicas, así como por los niveles elevados de los mantos freáticos, capas de grava o niveles tóxicos de algunas sustancias (Plaster, 1997).
- **Densidad aparente:** La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa de los sólidos y el volumen total que éstos ocupan, incluyendo el espacio poroso que existe entre las partículas sólidas. El valor de la densidad aparente puede variar desde 1.0 g/cm^3 en suelos arcillosos hasta 1.8 g/cm^3 en suelos arenosos compactados.
- **Densidad real:** es la relación entre la unidad de peso y la unidad de volumen de la fase sólida del suelo, la cual permite conocer los minerales que contiene un suelo y calcular el % de espacio ocupado por los poros de un suelo en particular. (Rubio, 2010).
- **Temperatura:** la temperatura del suelo, depende de las radiaciones a la superficie, intervienen factores como la topografía y el clima (Amorox, 2007).



2.1.3 Propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo son el resultado de la interacción entre los factores y procesos de evolución del suelo. Su conocimiento permite establecer criterios para su clasificación y especialmente para la interpretación de las relaciones suelo – planta.

- **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.
- **Materia orgánica:** la fracción orgánica de los suelos está constituida por desechos vegetales y animales, además de cantidades variables de materia orgánica amorfa llamada humus (Volke y Velasco, 2002). La fracción orgánica en un suelo puede ser muy variable: un suelo árido puede contener cerca de 0.5%, mientras que una turba puede tener alrededor de 95%; sin embargo, la mayoría de los suelos, en general, tiene un contenido de materia orgánica entre 0.5 y 5% (Volke y Velasco, 2007).

2.2 Definición de suelo de acuerdo a la legislación

De acuerdo a Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, define un suelo como:

Colección de cuerpos naturales formados por sólidos (minerales y orgánicos), líquidos y gases, sobre la superficie de los terrenos. Presenta, ya sea, horizontes o capas, que se diferencian del material de origen como resultado de adiciones, pérdidas, migraciones, y transformaciones de energía y materia; o por la habilidad de soportar raíces de plantas en un ambiente natural.



Por otro lado, la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004:

Material no consolidado, de origen natural, compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que incluye aquél alterado por actividades antropogénicas.

2.3 Contaminación del suelo en México

Un suelo se degrada cuando se disminuye su capacidad actual y potencial para producir bienes y servicios. La degradación del suelo es consecuencia directa de las actividades antropogénicas, directas como las agrícolas, ganaderas y forestales o indirectas, tales como actividades industriales, eliminación de residuos, transporte, etc.

Los daños ocasionados al suelo se clasifican en función de sus propiedades afectadas:

- Daños biológicos, cuando se disminuye la materia orgánica presente o se afecta a los seres vivos presente en él.
- Daños físicos, cuando se altera la estructura del suelo por compactación y se aumenta la densidad aparente, se disminuye la permeabilidad y se altera la capacidad de retención de agua o pérdida de suelo por erosión.
- Daños químicos, como la pérdida de elementos nutrientes, acidificación, salinización y el aumento de la toxicidad. Éstos últimos son los que se consideran como problemas de contaminación del suelo (Innovación y Cualificación, 2014).

La contaminación del suelo consiste en una degradación química que provoca la pérdida parcial o total de la productividad del suelo como consecuencia de la acumulación de sustancias tóxicas persistentes, productos químicos, sales, materiales radiactivos o agentes patógenos, que tienen efectos adversos en el desarrollo de las plantas y la salud de los animales. El suelo es un



medio receptor por excelencia, que actúa como un reactor y sirve como elemento protector de otros medios más sensibles a la contaminación como son el agua y el aire (Gómez y Estrada, 2005).

2.3.1 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, la contaminación del suelo en México es causada por contaminantes de diversa naturaleza (orgánicos e inorgánicos) (Volke y Velasco, 2002).

- La industria petroquímica: 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).
- Industria minera: 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, dedicándose principalmente a la producción de cobre, zinc, plata y plomo.
- Industria agroquímica: el uso excesivo de agroquímicos, así como el inadecuado manejo y disposición de sus envases, ha sido un problema generalizado en México (INE, 2002).
- 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 (Sánchez y Fernández, 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 (Volke y Velasco, 2005).



CAPÍTULO 3. LEGISLACIÓN

3.1 Legislación internacional sobre el suelo contaminado

En lo que se refiere a uno de los objetivos de este trabajo, es decir, la legislación referente al suelo, debe mencionarse que no se han llevado a cabo importantes avances en el ámbito internacional. No existe ningún instrumento a escala mundial, tampoco de naturaleza recomendatoria, que regule específicamente un marco jurídico mínimo de protección de la calidad ambiental del suelo (Bolaño, 2014).

Sin embargo, sí se encuentran referencias puntuales a la protección ambiental del suelo en diversos documentos internacionales que no regulan específicamente la protección ambiental del suelo. Algunos tratados han regulado la protección ambiental del suelo en un ámbito específico o contra un fenómeno de degradación del suelo concreto.

En la tabla 3.1 se muestran los principales eventos en materia internacional y en los cuales, México participó, ya sea de manera directa o indirecta y tuvo repercusión en materia de derecho ambiental.



Tabla 3.1. Política internacional en materia ambiental.

EVENTO	TEMÁTICA	PARTICIPACIÓN DE MÉXICO
Conferencia (Estocolmo, 1972)	<p>Asistieron 113 países y se debate por primera vez la problemática del medio ambiente, en la que atenta a la necesidad de un criterio y unos principios comunes que ofrezcan a los pueblos del mundo inspiración y guía para preservar y mejorar el medio humano</p> <p>Esta Declaración aumentó la conciencia política sobre la naturaleza global de muchas amenazas al medio ambiente. Es el inicio fundacional del Derecho Ecológico.</p>	Cabe señalar que en este principio la participación de México fue fundamental, debido que en ese momento la política exterior mexicana se centraba en el esquema de los principios de la Carta de Derechos y Deberes económicos de los Estados.
CNUMAD (Conferencia De Las Naciones Unidas Sobre Medio Ambiente Y Desarrollo (Brasil, 1992)	Tuvo como resultado la Declaración de Río que fue adoptada por los 166 gobiernos participantes, y el objetivo fue establecer una alianza mundial nueva y equitativa, mediante la creación de nuevos niveles de cooperación entre los Estados, procurar alcanzar acuerdos internacionales en los que se respetaran los intereses de todos y se protegiera la integridad del sistema ambiental y del desarrollo mundial.	En el principio 16 se establece la internalización de los costos ambientales y el uso de los instrumentos económicos, y es aquí que cobra vida el famoso principio: “el que contamina, paga”.

Fuente: elaboración propia.



Tabla 3.1. Política internacional en materia ambiental (continuación).

EVENTO	TEMÁTICA	PARTICIPACIÓN DE MÉXICO
<p>Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) (Junio, 1992)</p>	<p>Su objetivo era la conservación de la diversidad biológica, su uso sostenible y el acceso adecuado a los recursos.</p> <p>El gran logro de este convenio es el abordar de forma integral la diversidad biológica, especificando cada una de sus dimensiones: genes, ecosistemas y especies, a través de los esquemas de conservación <i>in situ</i> y <i>ex situ</i>.</p>	<p>México, atendiendo al Convenio, tuvo un cambio en sus políticas ambientales internas, al asumir los compromisos en el marco de la Cumbre de la Tierra. En 1992 se creó la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO), y poco después, el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN).</p>
<p>Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Junio, 1992)</p>	<p>En 1992, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se adoptó como base para una respuesta mundial al problema del cambio climático. Su objetivo es estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera situándolas en un nivel que impida interferencias humanas nocivas en el sistema climático.</p>	<p>México acordó proteger el sistema climático para beneficio de la humanidad sobre una base de equidad y de acuerdo con sus responsabilidades y capacidades.</p> <p>Actualmente se continúa profundizando los análisis y explorando los impactos del cambio climático en otras áreas (como la economía) y explora posibles opciones de mitigación y adaptación.</p>

Fuente: elaboración propia.



3.2 Legislación nacional sobre el suelo contaminado

3.2.1 Bases constitucionales

La formulación de cualquier disposición jurídica ambiental, debe necesariamente fundamentarse en las disposiciones que en la materia establece la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Con el propósito de ubicar la regulación de la prevención de la contaminación de suelos y su remediación, dentro de la legislación ambiental en nuestro país, es preciso repasar el marco constitucional ambiental, para identificar los alcances que podrá tener dicha regulación.

Es importante considerar que toda regulación que forme parte del sistema jurídico mexicano debe sustentarse en las prescripciones de nuestra Carta Fundamental. Es decir, mientras más completas sean las bases constitucionales del derecho ambiental en nuestro país, mejores herramientas jurídicas podrán desarrollarse para preservar el equilibrio ecológico y proteger el ambiente (Brañes, 2007).

Las disposiciones jurídicas que constituyen las bases constitucionales del derecho ambiental están contenidas en los artículos 4º, 25º, 27º y 73º.

ARTÍCULO 4º.- *Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.*

ARTÍCULO 25º.- *Bajo criterios de equidad social, productividad y sustentabilidad se apoyara e impulsara a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente.*

ARTÍCULO 27º.- *La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada[...]para preservar y restaurar el equilibrio ecológico.*

Las anteriores disposiciones fundamentan la expedición de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, como un ordenamiento



en el que se establecen los criterios, lineamientos y demás disposiciones jurídicas encaminadas a regular las conductas que inciden sobre el ambiente y los recursos naturales de México.

Artículo 73º.- *Para expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de protección al ambiente y de preservación y remediación del equilibrio ecológico.*

Considerando los retos que actualmente enfrenta México por la contaminación causada por el manejo inadecuado de los residuos generados, en materia de prevención y control de la contaminación de los suelos en México, la regulación recae en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA) y la Ley General para Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

En el caso de los sitios contaminados, éstos adquieren mayor relevancia en virtud que causan un problema socio-ambiental grave, pues repercuten en la salud humana y degrada el ambiente, por lo que se pretende dar un panorama de esta materia y darle claridad en la aplicación de los ordenamientos jurídicos, en aras de contribuir para contar una gestión integral que sea eficiente y eficaz para la remediación de estos sitios.

El objetivo de estos ordenamientos es garantizar el derecho de toda persona a un ambiente adecuado. En el caso de los sitios contaminados, el propósito es promover acciones para llevar a cabo su remediación hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente (SEMARNAT, 2012).



3.2.2 Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

En México, desde 1988 en que se emitió la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual se estableció de manera muy general la necesidad de prevenir la contaminación de suelos (particularmente como consecuencia de la disposición de los residuos o del uso de agroquímicos), así como de proceder a su remediación.

En el Artículo 3°, fracción XXXIII, restauración se define como el conjunto de actividades tendentes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales. En ese sentido la restauración implicaba realizar acciones tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones del suelo que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales.

XXXIII.- Residuos peligrosos: *Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.*

Lo que implicaba literalmente dejar limpio el suelo, de manera que no existiera presencia de contaminantes.

Cuando se inició la regulación de los residuos peligrosos con base a la LGEEPA, como se mencionó anteriormente, la definición de residuo cubrió prácticamente a todos los materiales generados en los distintos ámbitos productivos, procesos de tratamiento o actividades de consumo, a condición de que su calidad impidiera su empleo en los mismos procesos en los que se generaron (SEMARNAT, 2007). En dicha Ley, se definen los siguientes conceptos.

VI.- Contaminación: *la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico;*



VII.- Contaminante: *toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural;*

XXIII.- Material peligroso: *elementos, sustancias, compuestos, residuos o mezclas de ellos que, independientemente de su estado físico, represente un riesgo para el ambiente, la salud o los recursos naturales, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico infecciosas;*

En cuanto a la prevención y control de la contaminación del suelo para su protección, a continuación se presentan los artículos de esta Ley relacionados con la regulación de hidrocarburos, en tanto se consideran residuos peligrosos, así como aquellos involucrados en la contaminación del suelo.

Se establecen criterios en los que éstos deben sustentarse y ser tomados en consideración al emitir los actos de autoridad correspondientes a los que se hace mención en dichos artículos; que en el caso de las autoridades federales se relacionan con la gestión de los materiales y residuos peligrosos, y en el de las autoridades locales con la gestión de los residuos sólidos.

3.2.3 Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)

En octubre de 2003, con la publicación de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, se establecieron bases legales relativas a la prevención de la contaminación de sitios con materiales y residuos peligrosos, así como a su remediación.

La Ley en su primer artículo señala que uno de sus objetos es establecer bases, para entre otros, lograr fines relacionados con la generación de información confiable, armonizada y pertinente para orientar la toma de decisiones.

ARTÍCULO 1.- *La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se*



refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación;

En su artículo 5, en sus apartados correspondientes, se definen los siguientes conceptos:

XXVIII.- Remediación: *conjunto de medidas a las que se someten los sitios contaminados para eliminar o reducir los contaminantes hasta un nivel seguro para la salud y el ambiente o prevenir su dispersión en el ambiente sin modificarlos, de conformidad con lo que se establece en esta Ley;*

XL.- Sitio Contaminado: *lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua, instalación o cualquier combinación de éstos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y el aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas;*

XLI.- Tratamiento: *procedimientos físicos, químicos, biológicos o térmicos, mediante los cuales se cambian las características de los residuos y se reduce su volumen o peligrosidad;*

Es la LGPGIR el documento oficial que define por primera vez el concepto de remediación.

Un cambio significativo adicional introducido en la LGPGIR respecto a lo previsto en la LGEEPA, es el relativo a regular la prevención de la contaminación y la remediación de sitios contaminados con materiales o residuos peligrosos, razón por la cual se incluye en la definición de residuo peligroso la consideración a los suelos contaminados con ellos.

XXXII.- Residuos Peligrosos: *son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que*



hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio, de conformidad con lo que se establece en esta Ley;

La Ley dispone que los generadores están obligados a asegurarse de que los prestadores de servicios que contraten para el manejo de sus residuos peligrosos cuenten con autorizaciones vigentes (lo cual es un indicador de que operan conforme a la normatividad ambiental aplicable), como se indica a continuación.

ARTÍCULO 41.- *Los generadores de residuos peligrosos y los gestores de este tipo de residuos, deberán manejarlos de manera segura y ambientalmente adecuada conforme a los términos señalados en esta Ley.*

A los involucrados en el tratamiento de residuos peligrosos y prestación de servicios de manejo de tales residuos, la Ley les demanda la presentación de información para sustentar su autorización como se indica a continuación.

ARTÍCULO 58.- *Quienes realicen procesos de tratamiento físicos, químicos o biológicos de residuos peligrosos, deberán presentar a la Secretaría los procedimientos, métodos o técnicas mediante los cuales se realizarán, sustentados en la consideración de la liberación de sustancias tóxicas y en la propuesta de medidas para prevenirla o reducirla, de conformidad con las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan.*

Mientras que el artículo 69 precisa la obligación de llevar a cabo acciones de remediación de los sitios contaminados, conforme lo establece la propia Ley y su Reglamento, por la sola realización de las actividades relacionadas con la generación y el manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación.

ARTÍCULO 69.- *Las personas responsables de actividades relacionadas con la generación y manejo de materiales y residuos peligrosos que hayan ocasionado la contaminación de sitios con éstos, están obligadas a llevar a cabo las acciones de remediación conforme a lo dispuesto en la presente Ley y demás disposiciones aplicables.*



3.2.4 Ley Federal de Responsabilidad Ambiental (LFRA)

La responsabilidad ambiental que nace de los daños ocasionados al ambiente, así como su reparación y compensación cuando sea exigible a través de los procedimientos judiciales correspondientes, mecanismos alternativos de solución de controversias, procedimientos administrativos y aquellos que correspondan a la comisión de delitos contra el ambiente y la gestión ambiental.

Para efectos de este trabajo, se menciona lo siguiente:

ARTÍCULO 13.- *La reparación de los daños ocasionados al ambiente consistirá en restituir a su Estado Base los hábitat, los ecosistemas, los elementos y recursos naturales, sus condiciones químicas, físicas o biológicas y las relaciones de interacción que se dan entre estos, así como los servicios ambientales que proporcionan, mediante la restauración, restablecimiento, tratamiento, recuperación o remediación. La reparación deberá llevarse a cabo en el lugar en el que fue producido el daño. Los propietarios o poseedores de los inmuebles en los que se haya ocasionado un daño al ambiente, deberán permitir su reparación, de conformidad a esta Ley [...].*

VIII.- Estado base: *condición en la que se habrían hallado los hábitat, los ecosistemas, los elementos y recursos naturales, las relaciones de interacción y los servicios ambientales, en el momento previo inmediato al daño y de no haber sido éste producido;*

Por lo que, de acuerdo a lo anterior, esta ley obliga a remediar el daño ocasionado en los suelos contaminados y restituirlos a su estado base.



CAPÍTULO 4. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS.

4.1. Clasificación de las estrategias de remediación

Las estrategias de remediación pueden clasificarse de acuerdo a:

- Estrategia de remediación.
- Lugar en el que se realiza el proceso
- Tipo de tratamiento (Van Deuren, 1997; Sellers, 1999)

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 inmovilización del contaminante. Los contaminantes son estabilizados, solidificados o contenidos con el uso de métodos físicos o químicos.
- 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. 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).

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, utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.
- Tratamientos térmicos. Utilizan calor para incrementar la volatilización (separación), quemar, descomponer o fundir (inmovilización) los contaminantes en un suelo.

En la tabla 4.1 se presentan las tecnologías de remediación acorde al tipo de tecnología, principio, tratamiento y aplicación.



Tabla 4.1. Tecnologías de remediación de acuerdo a su clasificación.

TIPO DE TECNOLOGÍA	PRINCIPIO	TRATAMIENTO	APLICACIÓN
Destrucción o modificación	Fisicoquímico	Extracción	<i>In situ</i>
		Lavado	<i>Ex situ</i>
		Inundación (Flushing)	<i>In situ</i>
		Electrocínética	<i>In situ</i>
	Biológico	Bioventeo	<i>In situ</i>
		Bioaumentación	<i>Ex situ</i>
		Bioestimulación	<i>In situ</i>
		Biolabranza	<i>Ex situ</i>
		Biopilas	<i>Ex situ</i>
		Compostaje	<i>In situ</i>
		Barreras reactivas permeables	<i>In situ</i>
		Bioslurping	<i>In situ</i>
		Biolixivación	<i>In situ</i>
Fitorremediación	<i>In situ</i>		
Térmico	Incineración	<i>Ex situ</i>	
Extracción o separación	Fisicoquímica	Aireación	<i>In situ</i>
		Bombeo de agua	<i>In situ</i>
		Lavado de suelos	<i>Ex situ</i>
	Térmica	Extracción de vapores	<i>In situ</i>
		Desorción térmica	<i>Ex situ</i>
Aislamiento o inmovilización	Fisicoquímica	Estabilización fisicoquímica	<i>Ex situ</i>
		Estabilización/solidificación	<i>Ex situ/In situ</i>
		Inyección de solidificantes	<i>In situ</i>
	Térmica	Vitrificación	<i>Ex situ/In situ</i>

Fuente: tomado y adaptado de Millarium, Ingeniería Civil y Medio Ambiente, 2008.



4.2 Tratamientos biológicos

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, 1997).

El resultado final de un tratamiento de biorremediación depende en gran medida de la toxicidad y la concentración inicial de los contaminantes, su biodegradabilidad, las propiedades del suelo contaminado y el sistema de tratamiento seleccionado. Los contaminantes tratados generalmente por estos métodos son los compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles no halogenados y los derivados del petróleo.

Cuando los contaminantes se encuentran en por concentraciones altas de metales, compuestos orgánicos clorados o sales inorgánicas, la eficacia de la biorremediación se reduce a causa de la toxicidad microbiológica de estos compuestos.

4.2.1 *In-situ*

- **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 (figura 4.1), y mejorar así la biodegradación de contaminantes orgánicos o bien, la inmovilización de contaminantes inorgánicos *in situ* (Van Deuren, 1997).

Tiene el objetivo de degradar contaminantes orgánicos y convertirlos en productos inocuos. Puede realizarse bajo condiciones aerobias o anaerobias (USEPA, 1996)



por lo que se ha usado con éxito para remediar suelos contaminados con gasolinas y plaguicidas (Alexander, 1994).

Cuando la estructura del suelo no permite el contacto de los contaminantes con los microorganismos, no es posible limpiarlo. Hacer circular por el suelo soluciones base agua podría movilizar los contaminantes, lo que implica que el agua subterránea requerirá tratamiento. Los hidrocarburos de cadena larga tienen una alta probabilidad de envenenar los microorganismos, es necesario controlar la temperatura, porque a bajas temperaturas el proceso se vuelve lento (FRTR, 2014).

Deben existir condiciones de pH entre 6 y 8, de humedad entre 12-30% en peso, temperatura entre 0 y 40 °C (Maroto y Rogel, 2015).

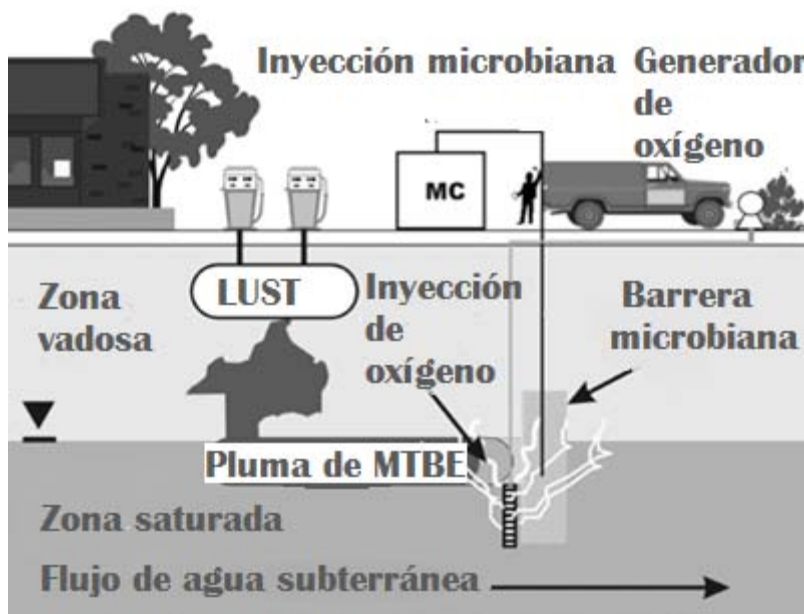


Figura 4.1. Proceso de bioestimulación.

Fuente: USEPA, 2001.

- **Bioventeo.** Es una tecnología relativamente nueva, cuyo objetivo es estimular la biodegradación natural de cualquier compuesto biodegradable en condiciones aerobias. Cuando se utilizan pozos de extracción para el bioventeo, el proceso es similar a la extracción de vapores del suelo (por sus siglas en inglés,



SVE). Sin embargo, mientras la técnica de SVE elimina constituyentes principalmente a través de la volatilización, los sistemas de bioventilación promueven la biodegradación de los componentes y reducen al mínimo la volatilización, generalmente mediante el uso de velocidades de flujo de aire más bajas que para el SVE (USEPA, 1994).

El bioventeo consiste en suministrar aire en el sitio contaminado, para estimular la biodegradación de los contaminantes en condiciones aerobias (figura 4.2). El aire se inyecta o se extrae, a bajas velocidades con el objetivo de proveer sólo el oxígeno necesario para mantener la actividad de los microorganismos degradadores (Van Deuren, 1997).

En particular, la bioventilación ha demostrado ser muy eficaz en la remediación de productos derivados del petróleo, incluyendo gasolina, combustibles de aviación, queroseno y diesel. Esta técnica es la más utilizada en sitios con productos derivados del petróleo de peso medio (es decir, el combustible diesel y combustible para aviones), ya que los productos más ligeros (la gasolina) tienden a volatilizarse fácilmente y pueden ser eliminados más rápidamente utilizando SVE. Productos más pesados (por ejemplo, los aceites lubricantes) generalmente tardan más tiempo en biodegradarse que los productos más ligeros (USEPA, 1994).

Algunos factores que limitan la efectividad del bioventeo son el tipo y la concentración de los contaminantes, la falta de nutrientes, el bajo contenido de humedad y la dificultad para alcanzar el flujo de aire adecuado (Volke y Velasco, 2002).

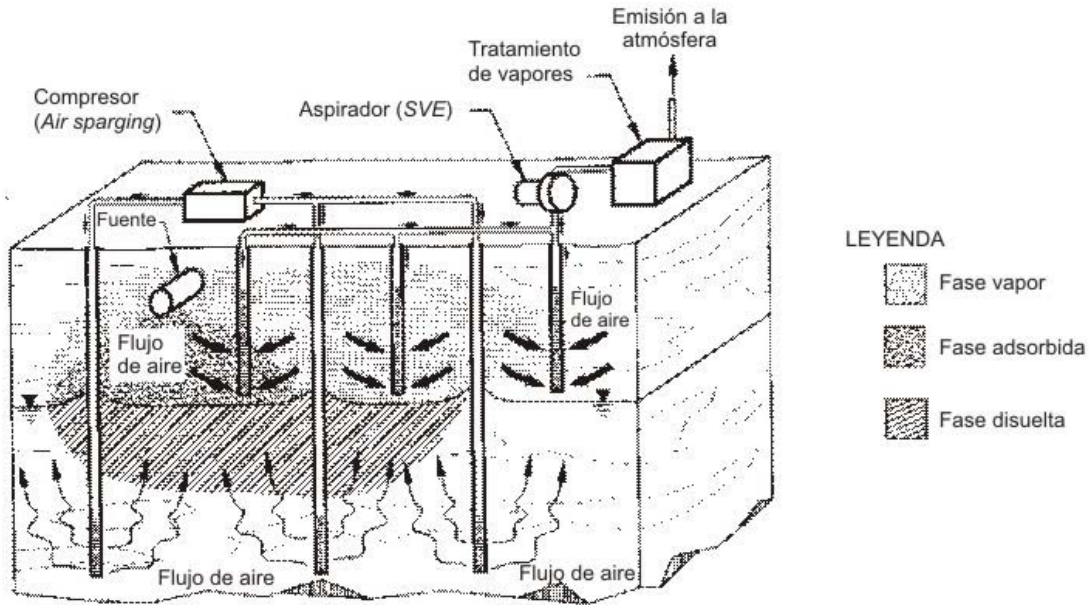


Figura 4.2. Bioventeo.

Fuente: Gestión sostenible del agua, 2013.

- **Barreras reactivas permeables.** Esta novedosa técnica desarrollada en la última década, se basa en la instalación *in situ* de una pantalla perpendicular al flujo de la pluma de contaminación a través de la cual pasa el agua subterránea contaminada y cuyo material de relleno puede adsorber, precipitar o degradar biótica o abióticamente los contaminantes, tal como se presenta en la figura 4.3.

Las barreras que con más éxito se han aplicado hasta el momento son las rellenas con elementos metálicos de valencia cero como el hierro para la degradación abiótica mediante procesos de oxidación-reducción de disolventes clorados como el tricloroetano o tetracloroetano, metales traza y radioactivos, contaminantes inorgánicos como nitratos y sulfatos.

Al ser una técnica de recuperación en vías de desarrollo, se requieren estudios que controlen a lo largo de un periodo de tiempo significativo la duración útil de estas pantallas y sus necesidades de mantenimiento (Ortiz y Sanz, 2006).

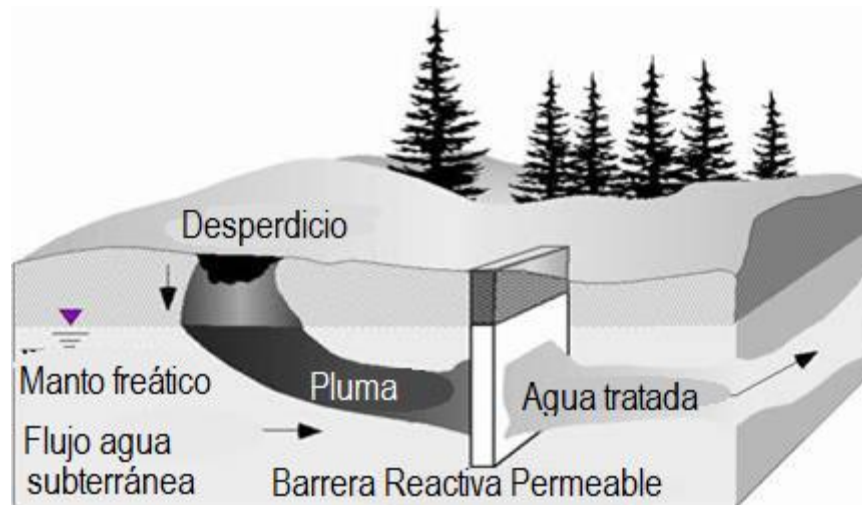


Figura 4.3. Barreras reactivas permeables.

Fuente: Universidad de New Castle, Australia, 2013.

- **Biolixiviación.** La biorremediación de suelos contaminados con metales por lixiviación microbiana o biolixiviación es una tecnología relativamente nueva, simple y efectiva, utilizada para la extracción de metales a partir de minerales y/o concentrados que los contienen. La recuperación a partir de minerales de azufre o de hierro, se basa en la actividad de bacterias quimiolitotróficas que oxidan hierro y azufre (hierro- y sulfa-oxidantes, respectivamente), *Thiobacillus ferrooxidans*, *T. thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*, las cuales convierten sulfuros metálicos insolubles (S₀) a sulfatos solubles y ácido sulfúrico. Esta disolución hace que los metales puedan recuperarse fácilmente de ambientes contaminados y suelos superficiales, usando estrategias de remediación de bombeo-tratamiento.

Otra opción factible para el tratamiento de sitios contaminados y recuperación de metales a partir de minerales que no contienen azufre (como carbonatos y silicatos metálicos), es la biolixiviación heterótrofa. En este caso, la extracción de metales se lleva a cabo, principalmente, por hongos en un proceso mediado por la producción de ácidos orgánicos y de compuestos quelantes y acomplejantes excretados al medio, que proveen una fuente de protones y aniones que



acomplejan metales. En el suelo, la biolixiviación heterótrofa de metales es más importante que la autótrofa (por bacterias)(Volke y Velasco, 2002).

- **Bioslurping.** El bioslurping es la adaptación de tecnologías de deshidratación potenciadas con vacío y estimula la biorremediación aeróbica de tierras contaminadas por hidrocarburos, y la recuperación de productos libres y extrae los líquidos livianos con fase no acuosa de la franja capilar y de la capa freática (USEPA, 1996).

El bioslurping combina elementos del bioventeo con la recuperación de productos libres, para recuperar en forma simultánea productos libres y producir la biorremediación de tierras en la zona vadosa.

El vacío generado incrementa el área de captación y la recuperación total de fluidos, disminuyendo el tiempo de duración en comparación con el bombeo convencional. El conjunto de ventajas posiciona al método como uno de los más efectivos a ser aplicados en sitios con las características analizadas (figura 4.4).

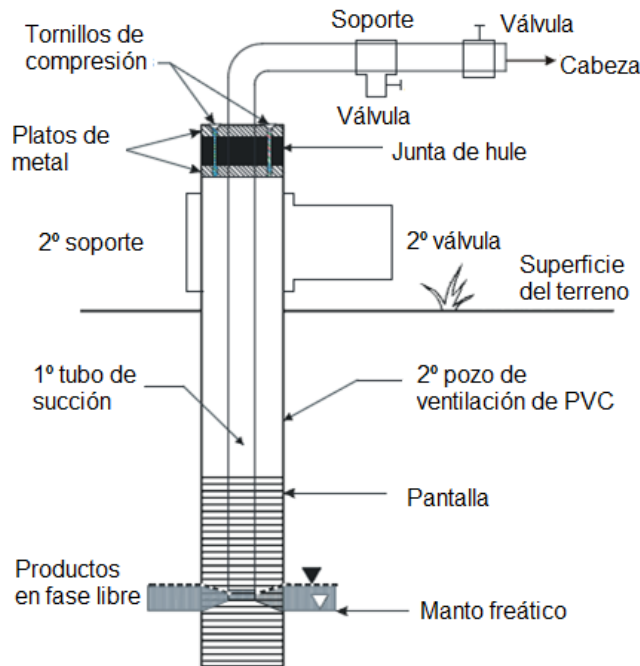


Figura 4.4. Sistema de bioslurping.

Fuente: Kittel, 1994.



- **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).

4.2.2 *Ex-situ*

- **Compostaje.** Es un proceso biológico que consiste nuevamente en estimular la actividad biodegradadora, aerobia y anaerobia, de microorganismos autóctonos bajo condiciones termofílicas (12-18 °C) que permita transformar compuestos orgánicos tóxicos en sustancias inocuas (USEPA, 1996).

Para ello, los suelos contaminados son excavados y mezclados con residuos animales y vegetales como abonos, estiércol, paja, trozos de madera, etc., que proporcionan una porosidad óptima y un balance adecuado de carbono y nitrógeno, como se muestra en la figura 4.5.

El calor generado metabólicamente con este proceso es atrapado dentro de la matriz del compost, lo que da lugar a la elevación de la temperatura característica del compostaje (Williams, 1992). Una vez que se ha realizado la descomposición microbiana, se produce un efecto de enfriamiento debido al descenso de la actividad microbiana cuando todo el carbono orgánico presente ha sido utilizado (Fogarty y Tuovinen, 1991). La eficacia del proceso biodegradador se consigue controlando parámetros como el contenido en oxígeno, humedad y temperatura.

El compostaje termofílico aerobio se ha visto que es eficaz para reducir la concentración de explosivos como TNT (trinitrotolueno), RDX



(ciclotrimetilentritramina) y HMX (ciclotetrametilentetranitramina), hidrocarburos aromáticos policíclicos, hidrocarburos del petróleo clorofenoles y plaguicidas (Michel, 1995).

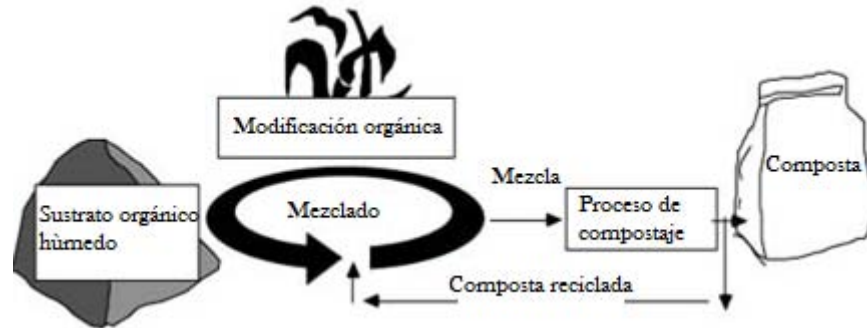


Figura 4.5. Diagrama del proceso de compostaje.

Fuente: Universidad de Ohio, EUA.

- **Fitorremediación.** La fitorrecuperación es una técnica que utiliza la capacidad de ciertas especies vegetales para sobrevivir en ambientes contaminados con metales pesados y sustancias orgánicas y extraer, acumular, inmovilizar o transformar estos contaminantes del suelo. Las plantas utilizadas presentan mecanismos de adaptación para tolerar o acumular una gran cantidad de metales en su rizósfera o en sus tejidos. La Fitorremediación se emplea para contener (fitoinmovilización o fitoestabilización) o eliminar (fitoextracción, fitodegradación, fitovolatilización y rizofiltración) contaminantes de suelos y aguas.

-Rizodegradación: este proceso se efectúa en el área de suelo que rodea inmediatamente a las raíces. Las sustancias naturales que liberan las raíces proveen de nutrientes a los microorganismos, lo que mejora la actividad microbiana; asimismo las raíces aflojan el suelo y posteriormente mueren, lo que abre caminos para el transporte de agua y aire.



-Fitoacumulación: en este proceso, los contaminantes, son captados por las raíces y posteriormente son transportados hacia tallos y hojas, lo que se conoce como fitoextracción.

-Fitodegradación: los contaminantes se metabolizan en los tejidos vegetales, debido a que las plantas producen enzimas que ayudan a catalizar la degradación.

-Fitoestabilización: en este proceso las plantas producen compuestos químicos que adsorben o forman complejos con los contaminantes, inmovilizándolos en la interfase raíces-suelo (Sellers, 1999). En la figura 4.6 se presenta el proceso de esta técnica.

Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación (Volke y Velasco, 2002):

- El tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar.
- Las altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas.
- Puede depender de la estación del año.
- No es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos.
- La toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden movilizarse o bioacumularse en animales.

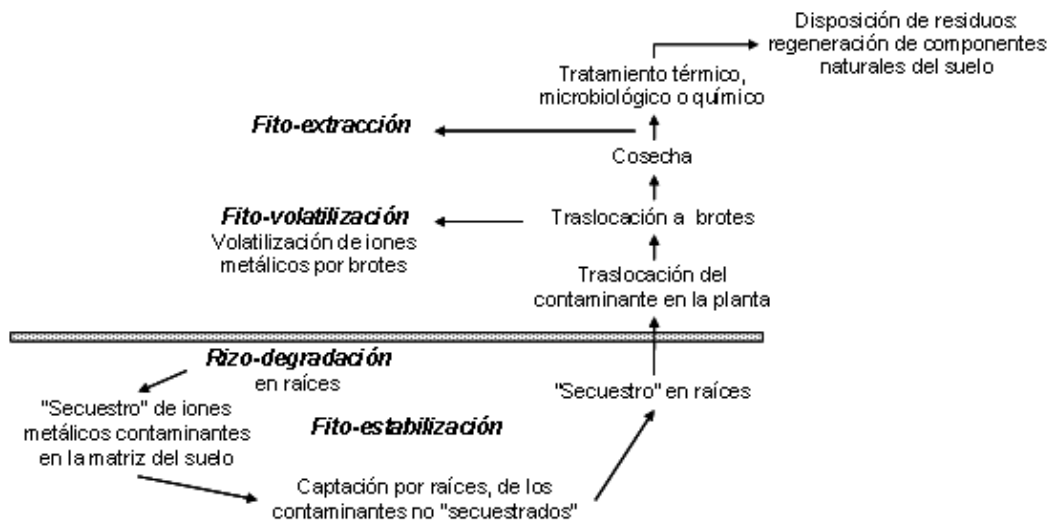


Figura 4.6. Esquema para el proceso de fitorremediación.

Fuente: Chaney, 1997.



- **Biolabranza.** Durante el proceso de biolabranza (figura 4.7) la superficie del suelo contaminado es tratada en el mismo sitio por medio del arado. 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 y Roberts 1998).

La técnica de biolabranza consiste en airear el suelo almacenado en montones y ahí mismo agregar agua y fertilizantes. En este caso, la aireación se realiza con equipos mecánicos como tractores o retroexcavadoras. Las bacterias que viven en el suelo contaminado ya están adaptadas al contaminante, por lo que resisten y no mueren. Al recibir oxígeno, a través del aire, agua y fertilizantes en las cantidades necesarias, además estar en un ambiente adecuado de temperatura, dichas bacterias van a crecer, multiplicarse para a “comer” el contaminante, transformen dióxido de carbono y agua, de manera que la contaminación va a ir disminuyendo.

Los contaminantes tratados con éxito por biolabranza, incluyen diesel, gasolinas, lodos aceitosos, fenciclidina (conocida por sus siglas en inglés como PCP) creosota y coque, además de algunos plaguicidas (Alexander, 1994). 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.

La efectividad de esta metodología depende de innumerables factores tales como tipo y concentración de contaminante, nutrientes, aireación, condiciones ambientales, presencia de inhibidores, concentración de microorganismos, etc. (Universidad de Murcia, 2010).

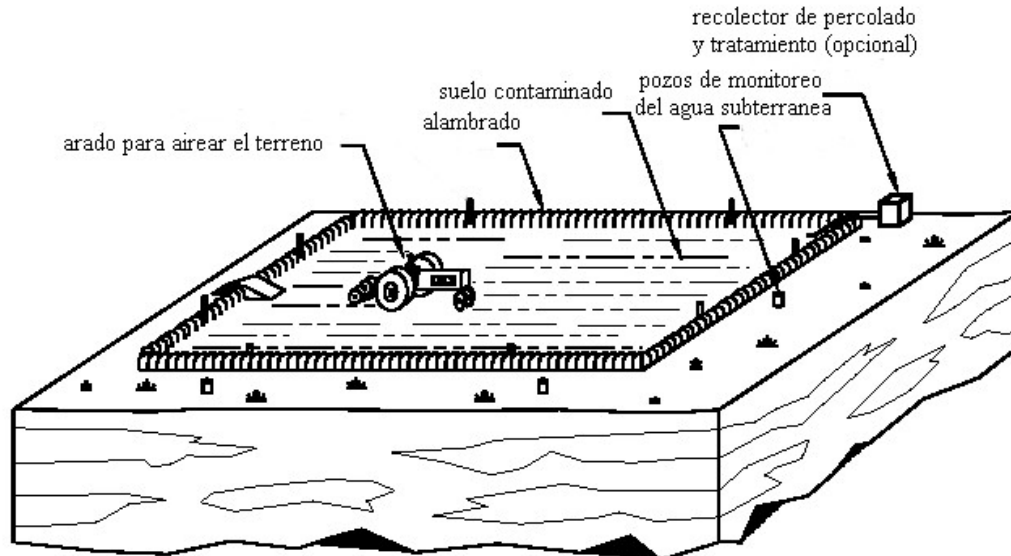


Figura 4.7. Diagrama para el proceso de compostaje.

Fuente: USEPA, 1994.

- **Biopilas.** Este tratamiento se utiliza especialmente para biodegradar compuestos del petróleo. Para ello, los suelos contaminados con estos compuestos orgánicos son apilados en montones o pilas sucesivas para estimular la actividad microbiana aerobia mediante aireación la adición de nutrientes, de minerales y agua, obteniendo la degradación a través de la respiración microbiana.

Las biopilas son similares al sistema de “landfarming” (figura 4.8) pero en este caso, la aireación del material no se consigue arando el terreno sino forzando la circulación de aire mediante su inyección o extracción a través de conductos perforados emplazados dentro de la pila de material. Estas pilas se suelen cubrir para prevenir la escorrentía, la evaporación y la volatilización y para promover el calentamiento por el sol.

El periodo de tratamiento de esta tecnología biológica es corto, puede durar desde unas pocas semanas a unos pocos meses, además de tratar compuestos del petróleo, también se puede utilizar para compuestos orgánicos volátiles



halogenados y no halogenados, compuestos orgánicos semivolátiles y plaguicidas (FRTR, 1999; Mohn, 2001; Li, 2004; Plaza, 2005).

Como en otros tratamientos, la aplicación adecuada de esta técnica está controlada por las propiedades físicas de los suelos contaminados, de forma que los suelos más permeables permitirán una mejor circulación del aire, el agua y los nutrientes (Ortiz y Sanz, 2006).

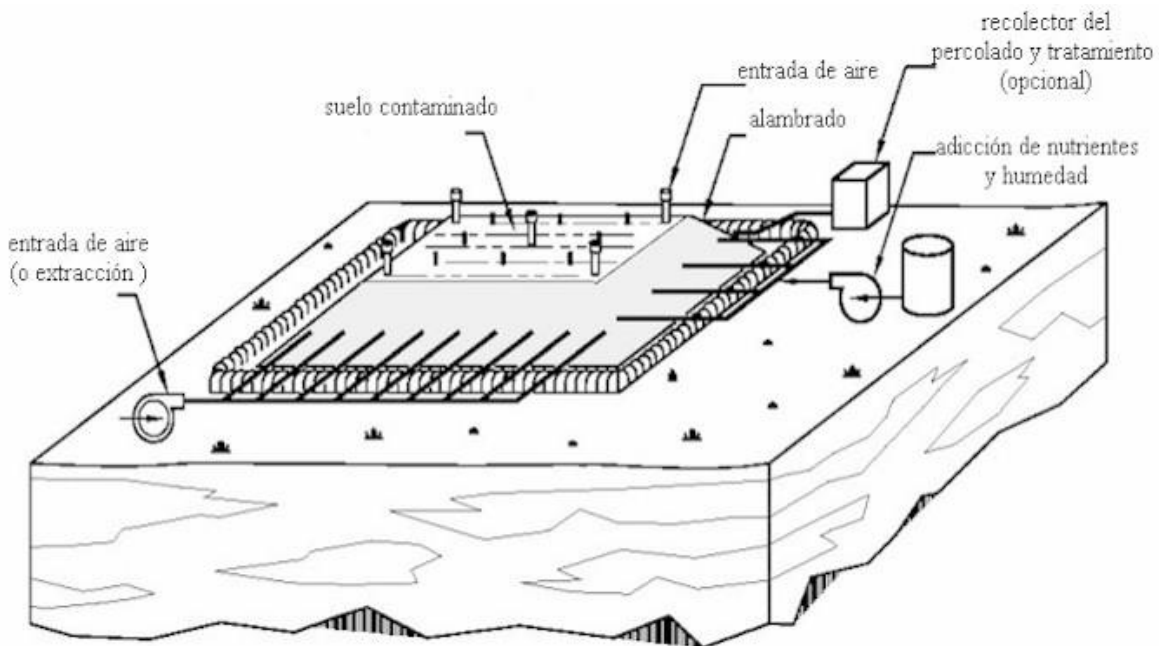


Figura 4.8 Diagrama para el proceso de biopilas.

Fuente: USEPA, 1994.

4.3 Tratamientos fisicoquímicos

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 (Volke y Velasco, 2002).

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).

4.3.1 Destrucción

- **Extracción.** Es una técnica típicamente aplicada *in situ* que tienen como objetivo separar los contaminantes del suelo para su posterior tratamiento depurador. Son tratamientos sencillos que requieren que los suelos sean permeables y que las sustancias contaminantes tengan suficiente movilidad y no estén altamente adsorbidas en el suelo.

Según con qué elementos se realice la extracción, se habla de:

- Extracción de aire. Se emplea para extraer los contaminantes adsorbidos en las partículas de suelos no saturados mediante su volatilización o evaporación a través de pozos de extracción verticales y/u horizontales que conducen el aire con los contaminantes a la superficie. Allí, pueden ser tratados en plantas especializadas (generalmente adsorbidos a carbono) o ser degradados en la atmósfera de forma natural. La volatilización de los contaminantes también se puede ver favorecida por prácticas como el arado, y el riego puede contribuir a la solubilización y desorción de contaminantes que consiguen ser arrastrados a la superficie por evaporación.

Esta técnica está indicada para suelos contaminados con sustancias volátiles y semivolátiles como hidrocarburos ligeros derivados del petróleo, algunos disolventes no clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos ligeros y



compuestos organoclorados volátiles. Sin embargo, no se recomienda para hidrocarburos pesados derivados del petróleo, PCB (policlorobifenilo), dioxinas o metales (Grasso, 1993; Fischer, 1996; Khan, 2004). A veces se puede aumentar el rendimiento de este tratamiento estimulando la extracción de aire con temperatura, generalmente mediante la inyección de aire caliente.

- **Inundación.** La inundación (figura 4.9) es un tratamiento *in situ* que consiste en anegar los suelos contaminados con una solución que movilice los contaminantes a una zona determinada donde puedan ser eliminados. Los contaminantes son extraídos del suelo, haciendo circular agua u otras soluciones a través del suelo, mediante un sistema de inyección o infiltración. Este tratamiento se aplica a todo tipo de contaminantes, particularmente a compuestos inorgánicos y se acostumbra combinarlo con otros tratamientos como los de biorremediación (Saucedo, 2010).

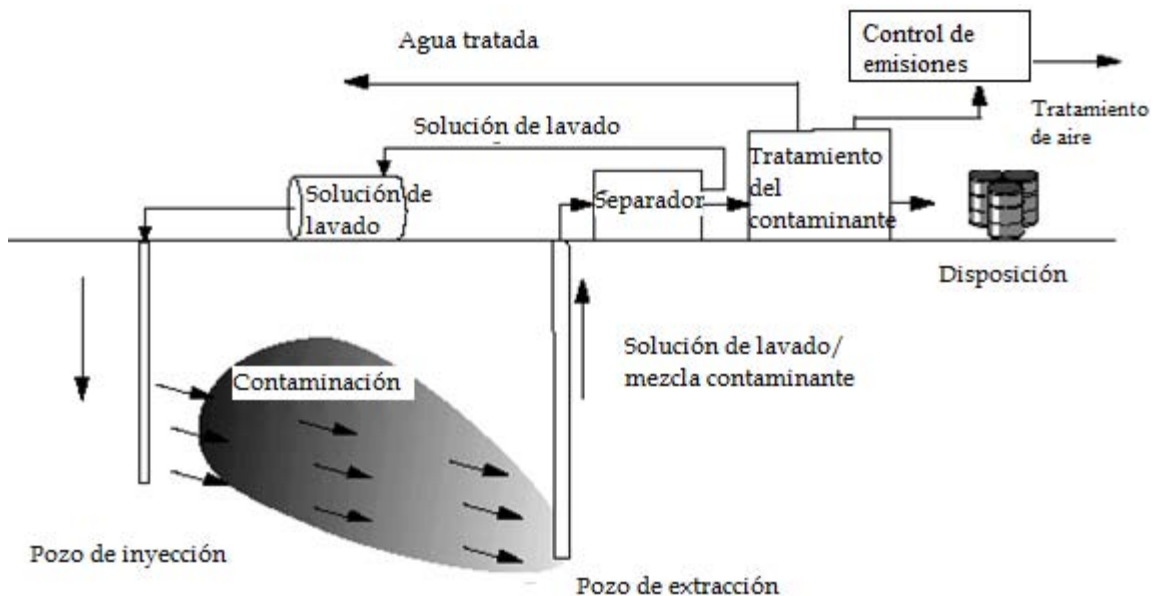


Figura 4.9. Proceso de inundación.

Fuente: USEPA, 1996.



- **Electrocínética.** Esta técnica consiste en aplicar una corriente eléctrica de baja intensidad entre electrodos introducidos *in situ* en el suelo contaminado que permite movilizar el agua, iones y partículas pequeñas cargadas. Los aniones se mueven hacia el electrodo positivo y los cationes hacia el electrodo negativo. La oxidación del agua en el ánodo genera protones H^+ , que se mueven hacia el cátodo creando un ambiente ácido. Esto favorece la desorción de los cationes del suelo y fuerza la puesta en disolución de contaminantes precipitados como carbonatos, hidróxidos, etc. Los iones OH^- , generados en el cátodo provocan la precipitación de metales, tal como lo representa la figura 4.10 (Volke y Veslasco, 2002). Esta técnica es recomendable para suelos con baja permeabilidad, los cuales están contaminados con metales solubles o acomplejados en forma de óxidos, hidróxidos o carbonatos.

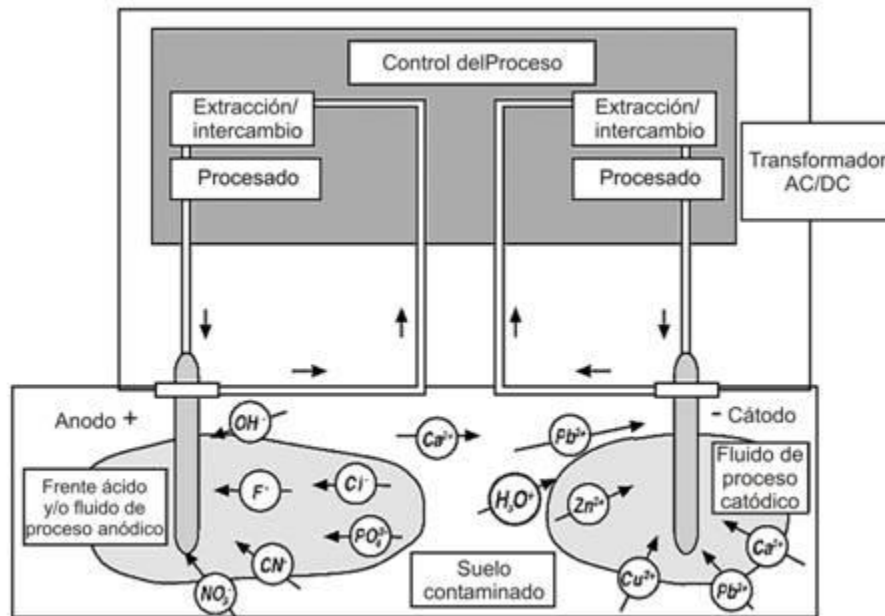


Figura 4.10. Proceso de electroremediación.

Fuente: De la Rosa, Teutli y Martínez, 2007.



4.3.2 Separación

- **Lavado de suelos.** Es una tecnología *ex situ*, en la cual el suelo contaminado se excava y se lava con agua o soluciones de extracción en una unidad de lavado con el fin de disolver, suspender o precipitar el contaminante, lográndose así su transferencia a la fase acuosa (figura 4.11). El lavado de suelos, a diferencia de la inundación, puede concentrar los contaminantes en un volumen menor de suelo, debido a la separación entre partículas finas y gruesas, reduciendo así el volumen del material contaminado (partículas finas) (Freeman, 1998).

Se usan ácidos y bases, los cuales movilizan, neutralizan o transforman el contaminante. Las soluciones ácidas se aplican principalmente para incrementar la solubilidad de muchos metales, mientras que las alcalinas se usan para remover fenoles y metales ligados a la fracción orgánica del suelo.

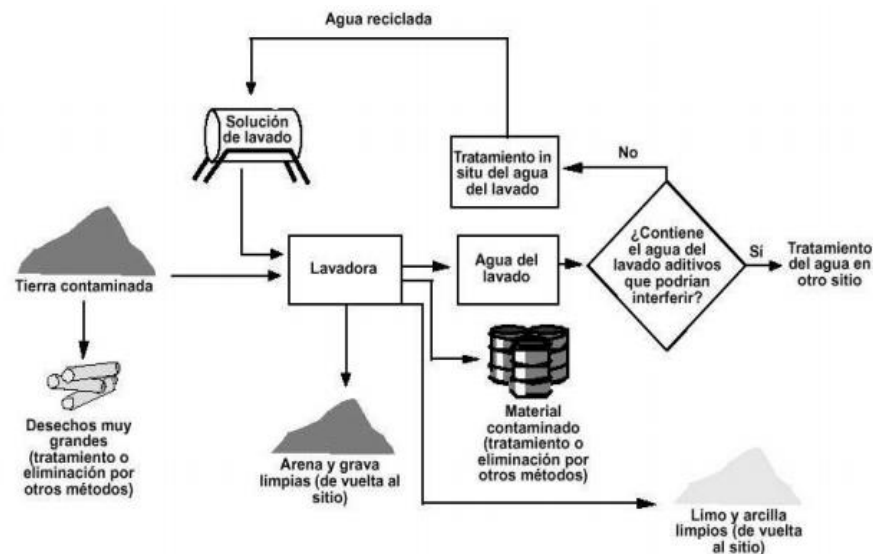


Figura 4.11. El proceso de lavado de suelo.

Fuente: USEPA, 1996.

- **Bombeo de agua.** Es una técnica empleada principalmente para acuíferos contaminados que consiste en extraer el agua contaminada del suelo y del subsuelo, tanto de la zona saturada como de la zona no saturada. Cuando se trata



la zona saturada, el agua es bombeada a la superficie para su posterior tratamiento, conocido con el término de “Pump&Treat” (Bear y Sun, 1998; Illangasekare y Reible, 2001).

Cuando se busca actuar sobre la zona no saturada, normalmente se hace una inyección previa de agua, por gravedad o a presión, que arrastre y lave los elementos contaminantes del suelo y que los almacene en la zona saturada para ser posteriormente bombeada a la superficie. Esta inyección de agua se puede ver reforzada con la adición de disolventes o compuestos químicos que puedan favorecer la desorción de los contaminantes del suelo como tensoactivos, para eliminar compuestos orgánicos de baja solubilidad.

De esta forma, el tipo de suelo, su pH, la capacidad de intercambio catiónico, el tamaño de partícula, la permeabilidad, etc., son parámetros que determinan la eficacia de la desorción.

En cualquier caso, una vez tratada, el agua extraída puede ser parcialmente reinfiltrada en el suelo para contrarrestar efectos negativos de la extracción como la elevada bajada del nivel freático, el posible asentamiento del suelo, ecosistemas dañados por pérdida de humedad, etc. Este tratamiento es muy común pero no es el más eficiente puesto que no es aplicable en terrenos fracturados o suelos arcillosos, el agua no se descontamina totalmente para su consumo humano y presenta limitaciones como su elevado coste y tiempo de ejecución. La figura 4.12 ilustra esta técnica (Illangasekare y Reible, 2001; Ortiz y Sanz, 2006).

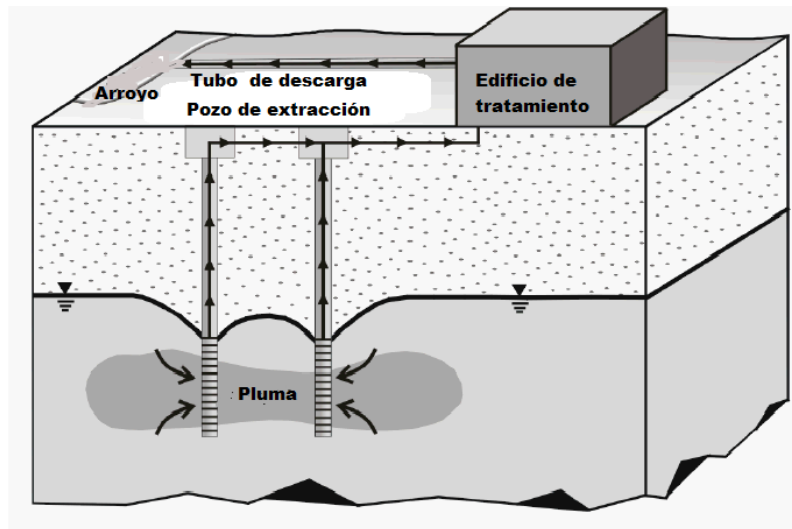


Figura 4.12. Proceso de bombeo de agua.

Fuente: Petroleum World, 2013.

- **Aireación.** Este método se emplea para la remoción de Compuestos Orgánicos Volátiles (por sus siglas en inglés, VOC) tanto de la zona vadosa del suelo (adsorbido), como en la fase líquida (disuelto). Las características del contaminante que favorecen este método son: alta volatilidad, baja solubilidad y bajo coeficiente de adsorción.

Con estas características el contaminante tenderá situarse en la fase gaseosa durante la aplicación de este método de remediación. El mecanismo de remoción es un proceso físico químico de desorción de los contaminantes de la fase disuelta y/o adsorbida, logrado gracias a la circulación de aire forzado dentro de la matriz del suelo.

Los contaminantes volátiles son arrastrados por el aire inyectado, los que son recogidos mediante la extracción de vapores del suelo. Con la aspersión, se crea un desorbedor de aire en la zona saturada, donde el suelo actúa como empaque.

Es útil para zonas localizadas de contaminación. La aireación *in situ* se limita por: 1) canalizaciones del aire; 2) zonas de baja permeabilidad sobre la masa



contaminante que impiden el paso del aire a la zona vadosa, y su captura por el SVE y que de hecho puede hacer difundir a los contaminantes (Ordoñez, 2015).

Suele combinarse con otras técnicas para aumentar su eficacia, como se muestra en la siguiente figura (4.13).

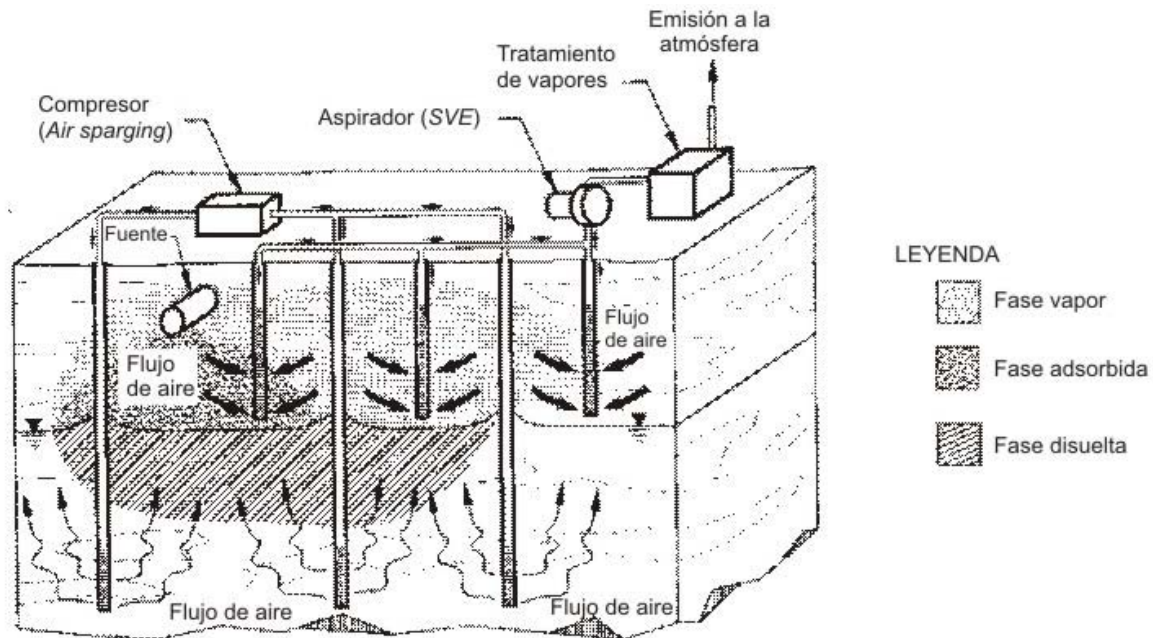


Figura 4.13. Combinación de las técnicas de extracción de vapor del suelo y aireación del suelo.

Fuente: USEPA, 1994.

4.3.3 Inmovilización

- **Estabilización físico-química.** Es una técnica *ex situ* que se aplica para reducir la movilidad de los contaminantes, fundamentalmente inorgánicos como los metales pesados, mediante reacciones químicas que reducen su solubilidad en el suelo y su lixiviado. El suelo contaminado se suele pretratar para eliminar la fracción gruesa y luego se mezcla en tanques con agua (Smith, 1995) y una serie de aditivos o agentes estabilizantes como cementos y fosfatos o álcalis, que



aumentan el pH y favorecen la precipitación e inmovilización de determinados metales pesados. En función del éxito de cada tratamiento, el suelo tratado puede ser devuelto a su localización para ser reutilizado o puede acabar en un vertedero controlado. Esta técnica está indicada para tratar compuestos inorgánicos, incluidos elementos radioactivos, pero tiene limitada su eficacia para sustancias orgánicas y plaguicidas (FRTR, 1999).

- **Inyección de solidificantes** Es una técnica semejante a la anterior, en la que los agentes estabilizantes, inorgánicos como el cemento u orgánicos como las sustancias bituminosas, el polietileno o las parafinas, son inyectados *in situ* en el suelo contaminado a través de pozos similares a los utilizados en el sellado profundo (Mulligan, 2001) o mezclados con el suelo (Khan, 2004), encapsulando físicamente a los contaminantes en una matriz estable impermeable al agua. Se trata de una técnica apropiada para suelos contaminados con sustancias inorgánicas, con limitada eficacia para compuestos orgánicos semivolátiles o plaguicidas. En la figura 4.14 se observa un ejemplo de esta técnica.



Figura 4.14. Inyección de solidificantes.

Fuente: Millenarium, 2014.



4.4 Tratamientos térmicos

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.

La mayoría de las tecnologías térmicas pueden también aplicarse *in situ* y *ex situ* (Volke y Velasco, 2002).

- **Extracción de vapores.** Esta tecnología implica la inyección de vapor para facilitar la volatilización del TCE (tricloroetileno) y PCE (percloroetileno). El proceso se facilita mediante mezcla mecánica del terreno hasta profundidades de unos 7 metros con ayuda de barrenas. El vapor se inyecta a 150 °C hasta que el suelo se calienta a unos 60 °C. Los gases emitidos recogidos en un envoltorio de la columna de la barrena. La vida media de la biotransformación del TCE, se redujo en más de un orden de magnitud tras inundación con vapor. Se han citado reducciones de concentraciones de TCE tras 24 meses de tratamiento, desde 45 000 µg/l hasta 500 µg/l a profundidades de 18 a 27 metros.
- **Desorción térmica.** Se trata de otro tratamiento térmico *ex situ* en el que se somete al suelo a unas temperaturas más bajas (90-320°C, desorción térmica de baja temperatura; 320-560°C, desorción térmica de alta temperatura) para



conseguir la desorción en vez de la destrucción de los contaminantes que persigue la incineración (figura 4.14)

Las temperaturas empleadas están elegidas para volatilizar contaminantes orgánicos pero no para oxidarlos. En concreto, durante la desorción térmica de baja temperatura, el suelo retiene sus propiedades físicas y sus componentes orgánicos, lo que hace posible que pueda conservar su capacidad para soportar futura actividad biológica.

Mediante la desorción térmica de baja temperatura se pueden recuperar suelos contaminados con compuestos orgánicos volátiles no halogenados, combustibles y en algunos casos compuestos orgánicos semivolátiles.

Mediante la desorción térmica de alta temperatura se pueden tratar las sustancias anteriores además de hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCB (policlorobifenilos), plaguicidas y metales pesados volátiles como el mercurio y el plomo (USEPA, 1994; Ortiz y Sanz, 2006; Chang y Yen, 2006).

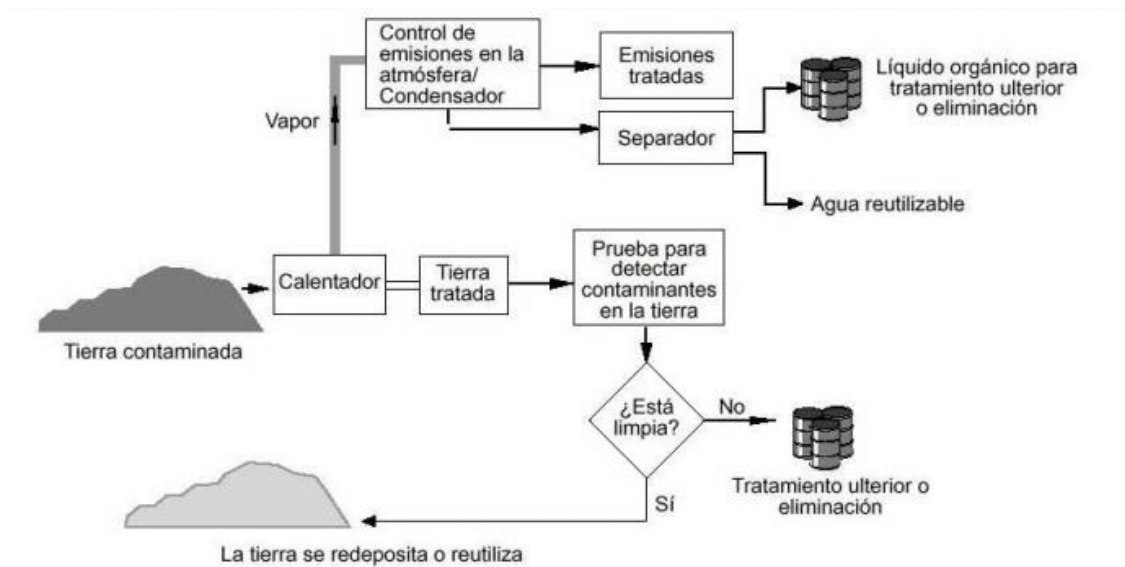


Figura 4.15. Proceso de desorción térmica.

Fuente: USEPA, 1996.



- **Incineración.** Se trata de un tratamiento *ex situ* en el que los contaminantes son destruidos mediante el suministro de calor (figura 4.15). El suelo se somete a elevadas temperaturas, alrededor de los 1000 °C, con el fin de oxidar y volatilizar los compuestos orgánicos contaminantes. Este proceso genera gases y cenizas residuales, orgánicos (hidrocarburos aromáticos policíclicos y sulfurados, compuestos oxigenados, compuestos aromáticos nitrogenados, etc.) e inorgánicos (metales pesados volátiles, CO₂, NO_x, SO_x) (Ross, 2002) que deben ser depurados. Los hornos de combustión más utilizados emplean aire a alta velocidad (Circulating Bed Combustors y Fluidized Bed Combustors), infrarrojos (Infrared Combustors) y sistemas rotativos (Rotary kilns) (USEPA, 1998). Está indicado para recuperar suelos contaminados con explosivos y residuos peligrosos, particularmente hidrocarburos clorados, PCB y dioxinas (Silcox, 1995), aunque su reutilización es muy limitada porque este tratamiento destruye la estructura del suelo.

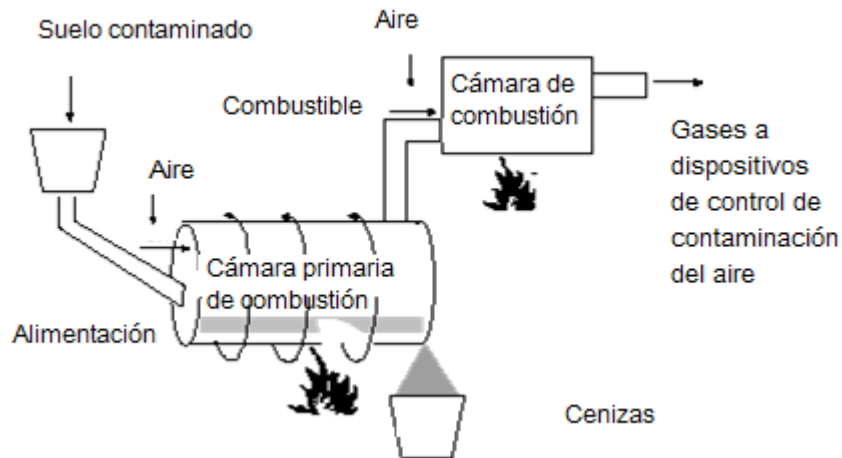


Figura 4.16. Procesos de incineración.

Fuente: USEPA, 1998.

- **Vitrificación.** Esta técnica se basa en el calentamiento del suelo contaminado a alta temperatura hasta lograr su fusión y transformarlo en un material vítreo estable, reduciendo de esta forma la movilidad de los



contaminantes inorgánicos como el Hg, Pb, Cd, As, Ba, Cr y cianuros, así como la destrucción de contaminantes orgánicos por reacciones de oxidación compuestos orgánicos. Para lograr la máxima eficacia en la aplicación de esta técnica, es necesario que el suelo contenga una gran cantidad de sílice para la formación de la masa vítrea y óxidos alcalinos (Li, Na, K). Cuando se aplica esta técnica *ex situ*, primero se separan la fracción gruesa del suelo contaminado y el calentamiento se realiza a través de una corriente eléctrica aplicada en hornos semejantes a los usados en la fabricación del vidrio (Suthersan, 1997). La vitrificación origina gases tóxicos que se recogen y deben ser tratados antes de emitirlos a la atmósfera.

Esta técnica se usa para tratar contaminaciones poco profundas. Su costo muy alto y su durabilidad dudosa. Sólo la vitrificación *in situ* es aplicable a los etilenos clorados. El calor, 1600 ° C a 2000 ° C, generado al paso de la electricidad por unos electrodos, funde el terreno (hasta 7 m de profundidad), y al enfriar se forma un monolito vítreo (figura 4.16). Por su costo energético solo se utiliza en contaminantes difíciles de tratar por otros medios (Ordoñez, 2001).

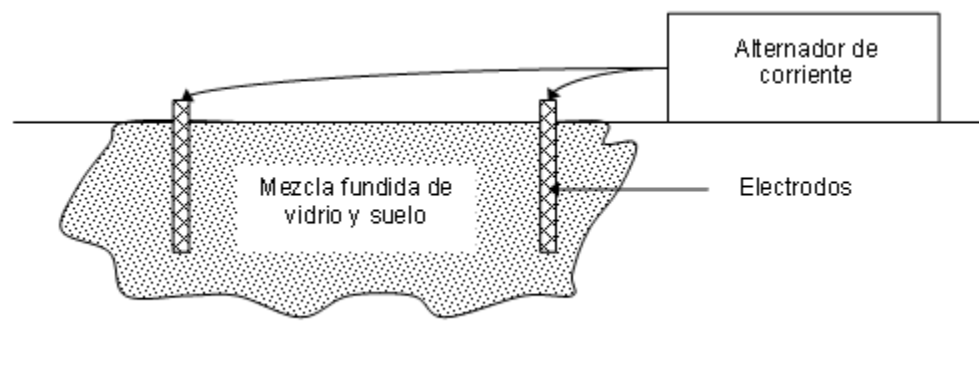


Figura 4.17. Proceso de vitrificación en campo

Fuente: Pojasek, 1982.



CAPÍTULO 5. TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN PRESENTADAS EN EUROSOIL

El Eurosoil es un congreso de origen europeo que se presentó por primera vez en Reading, Gran Bretaña, en el año 2000 con ciclos de cuatro años a partir de esa fecha.

Más de 1,100 trabajadores científicos del suelo y profesionales de cerca de 65 países se reúnen, donde hay más de 1000 contribuciones de presentaciones orales y carteles. El programa de la conferencia consiste en 25 simposios en promedio, organizado por convocantes y co-convocantes, con sesiones de carteles guiados por coordinadores y pláticas entre los participantes.

El Congreso Eurosoil 2012, llevado a cabo en Bari, Italia, se centró en desarrollar los diversos aspectos de la ciencia del suelo, tecnología, los métodos de campo, las implicaciones sociales, económicas y políticas en relación con las necesidades presentes y futuras y las emergencias de la humanidad y el medio ambiente.

Celebrado del 2 al 6 de julio del año mencionado, el Congreso 2012 se enfocó principalmente a la función fundamental del suelo como un ecosistema central y los recursos instrumentales, pero limitado y razonable para un correcto desarrollo, sostenible, armonizado, su beneficio y el bienestar.

La estructura del Congreso se basa en un marco temático muy general, en los que diversos simposios, talleres, cursos, reuniones de negocios, debates públicos, mesas redondas, reuniones técnicas especializadas y / o demostraciones, en las que se incluyen en las propuestas recibidas, la evaluación y aprobación. (ISM, 2012).

Contó con la participación de los siguientes países:



Tabla 5.1. Países participantes en el Eurosoil 2012.

EUROPA	AMÉRICA	ASIA	ÁFRICA	OCEANÍA
Alemania Bulgaria Croacia Eslovenia España Francia Holanda Hungría Italia Letonia Portugal Reino Unido República Checa Rumanía	Brasil Canadá Colombia Estados Unidos México Venezuela	China Irán Japón	Nigeria Uganda	Australia

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.

A continuación se presentan las cinco principales técnicas de remediación y el resumen de la investigación correspondiente de los países con mayores contribuciones: Italia, Alemania, España, Francia y Reino Unido.

Un total de 25 técnicas han sido seleccionadas, las cuales 22 de ellas corresponden a estrategias de remediación con posible aplicación en México y tres corresponden a políticas ambientales, las cuales se analizarán en el siguiente capítulo.



Tabla 5.2 y Tabla 5.3. Técnicas de remediación presentadas por Alemania.

RED EUROPEA SOBRE LA CONCIENCIA DEL SUELO	<i>PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN EN COLUMNA EN SUELOS QUE CONTENGAN CONTAMINANTES ORGÁNICOS MENOS INVESTIGADOS.</i>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>Broll Gabriele del departamento de Geociencia de la Universidad de Osnabrueck, Alemania.</u>• Resumen: en 2009 se estableció una red europea cuya meta es reunir a científicos del suelo con no científicos que trabajan en los suelos en Europa para agrandar el grupo de personas interesadas en la sensibilización de los suelos. Este grupo incluye administradores, consultores y colegas que trabajan en la educación, o para organizaciones no gubernamentales interesadas en trabajar en actividades de extensión y/o educación sobre suelos y en el intercambio de sus conocimientos con colegas dentro de Europa.• La Red de Sensibilización sobre el Suelo en Europa (ENSA, por sus siglas en inglés) ayudará a ampliar nuestros medios para llegar al público. La Red Europea no quiere competir con las actividades nacionales, sino quisiera ayudar en aquellos países en los que todavía no existen actividades nacionales de sensibilización sobre el suelo. A nivel nacional e internacional, se busca cómo promover la protección de los suelos en Europa a través de la sensibilización sobre el suelo. Se busca una fuerte cooperación.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>Kalbe Ute, Berger Wolfgang y Krüger Oliver de la División 4.3 del departamento de Tratamiento de Residuos e Ingeniería Remedial del Instituto Federal para la Investigación y Pruebas de Materiales de BAM. Berlín, Alemania.</u>• Resumen: las pruebas de lixiviación son herramientas fundamentales para la evaluación del impacto del agua subterránea por suelos contaminados. En comparación con las pruebas por lotes, las pruebas de columna permiten la caracterización básica del comportamiento de lixiviación de los suelos y proporcionan un patrón de liberación similar a las condiciones de campo. Con la modificación de la Ordenanza Alemana sobre Protección de Suelos y Sitios Contaminados se establecerá un nuevo procedimiento estandarizado de ensayos en columnas (DIN 19528) como herramienta para la determinación de la duración de la fuente y posterior pronóstico de infiltración. Actualmente esta norma sólo está validada, en el caso de contaminantes orgánicos, para HAP (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos).• Los resultados de las pruebas de columna basadas en suelos contaminados con hidrocarburos totales de petróleo (TPH, por sus siglas en inglés), PFT (Surfactantes Perfluorados) y el biocida tebuconazol se demostrarán.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.4 y Tabla 5.5. Técnicas de remediación presentadas por Alemania (continuación).

<p><i>UN CONCEPTO COMBINADO DE REMEDICACIÓN FÍSICA Y MICROBIOLÓGICA PARA CONTAMINANTES DE HIDROCARBUROS CLORADOS</i></p>	<p><i>IMPACTO DE LAS ENMIENDAS SOBRE LAS FUNCIONES BIOLÓGICAS DE LOS SUELOS CONTAMINADOS DE PAH TRATADOS POR OXIDACIÓN QUÍMICA.</i></p>
<p>• Presentado por: <u>Markgraf Wibke y Rainer Horn del Instituto de Nutrición Vegetal y Ciencias del Suelo en Kiel, Alemania.</u></p> <p>• Resumen: teniendo en cuenta el suelo como un medio poroso, un nuevo enfoque se ha hecho últimamente mediante la realización de experimentos de lixiviación no saturados en muestras de suelo estructurado no perturbado de un reductosol en condiciones de laboratorio. Los contaminantes orgánicos investigados incluyen derivados de etileno (DNAPL), en detalle Tetracloroetileno (Per), Tricloroetileno (Tri), cis-1,2-dicloroetileno (Cis) y cloruro de vinilo (VC) o cloroetileno. Los datos obtenidos se utilizan para modelar conceptos de remediación alternativa, enfocando los aspectos físicos del suelo. Se supone que las muestras de suelo estructuralmente verticales conducen a un mayor volumen de eluatos, lo que se correlaciona con mayores concentraciones de hidrocarburos clorados.</p> <p>• El volumen de poro intercambiable depende de la textura, la distribución del tamaño del poro y la densidad aparente. La actividad microbiológica, que es más alta en condiciones anaeróbicas y metanogénicas, está principalmente influenciada por las soluciones nutritivas y sus propiedades fisicoquímicas (tensión superficial, viscosidad).</p>	<p>• Presentado por: <u>Fabien Laurent, Julie Ducros, Christophe Schwartz y Corinne Leyvall del Laboratorio de Interacciones Microbianas en Alemania.</u></p> <p>• Resumen: se realizaron experimentos con diferentes suelos tratados mediante oxidación química y enmendados con mezclas adaptadas de materiales tecnogénicos. El experimento se estableció durante 5 meses en una cámara de crecimiento con un suelo marcado con HAP y un suelo industrial contaminado con HAP, ambos tratados con la reacción de Fenton. Además del destino de los contaminantes, se monitorearon los siguientes parámetros: densidad microbiana, diversidad y actividad, fertilidad del suelo, ecotoxicidad y germinación y crecimiento de las plantas.</p> <p>• Parámetros como el pH, la densidad del microorganismo, la actividad enzimática, el carbono orgánico, el fósforo disponible se vieron afectados, y se observó toxicidad de los lixiviados. La fuerte disminución del pH del suelo con puntas conduce a condiciones desfavorables para la actividad biológica. Tras la adición de las modificaciones post-químicas de tratamiento, se restableció la capacidad de las plantas para crecer en los suelos tratados y se produjo un aumento sistemático de la actividad biológica.</p>

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.6. Técnica de remediación presentadas por Alemania.

BIOCARBÓN COMO ESTABILIZADOR DE COBRE EN LOS VIÑEDOS

• **Presentado por:** Torsten Müller, Ellen Kandeler y Kathleen Mackie de la Universidad de Hohenheim del departamento de Biología del Suelo en Alemania.

• **Resumen:** el cobre se ha utilizado durante mucho tiempo para combatir las enfermedades de hongos en los viñedos. Como un metal pesado, el cobre se acumula en el suelo o se lixivia en el agua subterránea. Se ha demostrado que su uso afecta el medio ambiente y los organismos alrededor de las viñas.

• Aquí se investigó un método llamado fitoestabilización utilizando biocarbón. Se dice que el biocarbón es un estabilizador de cobre y un secuestrador de carbono dentro de la capa superficial del suelo. Un diseño de bloques in situ fue creado en 2010 por el Instituto Delinat (Wallis, Suiza) con cuatro tratamientos: biocarbón, composta, biocarbón y composta, y ninguna enmienda.

• Se analizarán los efectos de las enmiendas sobre la abundancia de cobre biodisponible en el suelo, el cobre total en el suelo y la biomasa vegetal, la abundancia y función de los microorganismos del suelo y los parámetros químicos del suelo. Se espera que el biocarbón proporcione un sitio de unión para el cobre biodisponible, reduciendo su abundancia, al tiempo que aumenta los niveles de carbono y cambia la abundancia y la función del microorganismo del suelo.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.7 y Tabla 5.8. Técnicas de remediación presentadas por España.

<p><i>FITORREMEDIACIÓN DE OLIGOELEMENTOS (AS, CD, CU Y ZN) EN UNA MINA DE ARSENOPIRITA DE DERELICT (CENTRO DE ESPAÑA): MÚLTIPLES ENFOQUES</i></p>	<p><i>ESTUDIO PRELIMINAR SOBRE LA DESORCIÓN TÉRMICA DEL MERCURIO EN LOS SUELOS DEL ÁREA DEL DISTRITO DE ALMADÉN.</i></p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>Rebeca Manzano, Ramón Carpena, Elvira Esteban, Teresa Fresno y Jesús Peñalosa del departamento de Agrícola Química de la Universidad Autónoma de Madrid, España.</u>• Resumen: con el fin de establecer un sólido plan de acción en una antigua mina en Madrid, se estudió la contaminación en el campo y la transferencia de contaminantes a las plantas nativas que allí crecen naturalmente.• Se encontraron altos niveles de As y Zn en los suelos, pero la transferencia de As a las plantas fue baja. El estudio de campo mostró cómo la atenuación natural ocurre para As, mientras que Cd y Zn se están acumulando efectivamente en algunos brotes de plantas, y que hay puntos calientes de contaminación vinculados a los relaves de la mina. Se modeló el riesgo ambiental de transferencia a organismos.• Como consecuencia, se llevaron a cabo experimentos en macetas y lotes para seleccionar la mejor combinación de plantas modificadoras para administrar el sitio.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>María José Sierra, Alonso Rodríguez, Rocío Millán del departamento de Suelos y Remediación del CIEMAT en Almería, España</u>• Resumen: objetivo de este trabajo es evaluar el potencial de desorción térmica del mercurio mediante energía solar. Se estudiaron dos suelos diferentes del antiguo distrito minero de mercurio de Almadén (España). Uno de los suelos fue muestreado de una "dehesa", donde la vegetación natural mediterránea se combina con actividades agrosilvopastorales y, la otra, se recogió de una zona donde se llevaron a cabo procesos metalúrgicos en siglos pasados.• El trabajo experimental se llevó a cabo en un horno solar a diferentes temperaturas. La desorción térmica del mercurio se evaluó a temperatura baja, mediana y alta en ambos suelos. Como resultado, se obtuvo que más del 80% del mercurio de la muestra original fue liberado una vez alcanzado los 280°C.• Además, estos datos podrían utilizarse para evaluar la temperatura óptima a la cual un suelo contaminado con mercurio podría considerarse remediado.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.9 y Tabla 5.10. Técnicas de remediación presentadas por España.

<p><i>RECICLAJE DE DRENAJE URBANO PARA MEJORAR EL ESTABLECIMIENTO DE VEGETACIÓN EN UN SUELO DE MINAS ÁCIDAS.</i></p>	<p><i>TRANSPORTE DE CU, CD Y NI EN LOS SUELOS DE MINAS MODIFICADAS CON RESIDUOS DE CONCHA DE MEJILLÓN.</i></p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>Aranzazú Peña y Dolores Mignorance del departamento de Geoquímica, Petrogénesis y Procesos Minerales del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra en España.</u>• Resumen: las actividades mineras producen vastas áreas que contienen grandes cantidades de desechos del procesamiento de minerales. Para tratar ecológicamente estos suelos degradados, se debe adoptar un enfoque integrado considerando aspectos físicos, químicos y biológicos. El establecimiento de una cobertura vegetal debe ser dirigido para mitigar la erosión y aumentar la productividad del suelo como un ecosistema autosostenible.• Se ensayó la adición de lodos de aguas residuales urbanas como una estrategia económica y respetuosa con el medio ambiente para mejorar la calidad del suelo de un residuo minero. Se añadió el suelo, calado con residuos de remolacha azucarera (Carbocal), con varias dosis de lodos de depuradora estabilizados y compostados y compost de lodos de depuradora más residuos de poda. Se realizó una evaluación periódica de los parámetros biológicos y físico-químicos del suelo y se caracterizó la composición química orgánica e inorgánica de la solución del suelo.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>Marcos Paradelo, Alexandra Ramírez, Manul Arias y Juan Carlos Nóvoa del departamento de Biología Vegetal de la Universidad de Vigo, España.</u>• Resumen: se estudió el uso de residuo de concha de mejillón (CM) de la industria de mariscos como enmienda en suelos mineros en cuanto a su capacidad para retener metales. Se realizó un conjunto de experimentos de transporte en columnas de 60 mm de longitud x 10 mm de diámetro interno empacadas con mezclas de suelo de mina y CM (0, 12 y 48 g/kg). Un pulso de 8 horas de 2,5 mM de Cu, Cd o Ni como su sal de nitrato se aplicó hacia arriba con un caudal de 2 ml/h.• La retención de metales fue pobre en el suelo de la mina sin CM (39% de Cu, 28% de Cd y 11% de Ni). El pH medido en las fracciones de salida aumentó con la dosis de CM de 3,5 a 7,5, lo que indica que los procesos de precipitación podrían gobernar la retención de los metales en las columnas con la dosis de CM más alta. Además, los perfiles de retención de metal para 48 g/kg exhibieron mayores cantidades de metal en los primeros centímetros, lo que sugiere la alta eficiencia del proceso. Estos resultados revelaron la idoneidad de los residuos de concha de mejillón en la inmovilización de metales y podrían ser un material candidato para la remediación de suelos contaminados.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.11. Técnica de remediación presentadas por España.

EFEECTO DE ÁCIDOS HUMICOS SOLUBLES EN LA TOMA DE METALES PESADOS POR VETIVERIA ZIZANIOIDES EN SUELOS DE MINAS CONTAMINADOS.

• **Presentado por:** Ana Moliner, María José Fernández y Alberto Masaguer del departamento de Ciencias del Suelo de la Universidad Politécnica de Madrid, España.

• **Resumen:** la fitorremediación, el uso de plantas para extraer contaminantes, es una solución atractiva ya que no implica una costosa tecnología y sólo requiere prácticas agrícolas comunes. La única desventaja es la lenta tasa de crecimiento y la baja producción de biomasa. Los metales en suelos minados abandonados se estabilizan con el tiempo, estando fuertemente unidos a los sólidos del suelo. Con el fin de aumentar la biodisponibilidad de los metales en los suelos, se utilizaron ácidos húmicos extraídos de la leonardita.

• Los investigadores han sugerido que una planta utilizada para la fitorremediación debe ser de rápido crecimiento, de raíces profundas, se propaga fácilmente y tiene una alta producción de biomasa. Vetiveria zizanioides ha demostrado ser tolerante a la alta concentración de metales y tiene raíces muy profundas. Los resultados mostraron que cada dosis de ácidos húmicos era adecuada para liberar diferentes metales de la matriz del suelo y hacerlos disponibles para la planta.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.12 y Tabla 5.13. Técnicas de remediación presentadas por Francia.

<p>ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES MEZCLADOS DEL SUELO CON ESPUMAS REUTILIZADAS PARA LA REMEDIACIÓN IN SITU.</p>	<p>DESCONTAMINACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO DE BIFENILOS POLICLORADOS POR BIOAUMENTACIÓN ASISTIDA POR FITORREMEDIACIÓN.</p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: Mahmoud Mohamed y Nicolas Fatin-Rouge del departamento de Química de Besancon en la UTINAM, Francia.• Resumen: la eliminación de contaminación por radionucleidos metálicos y compuestos orgánicos, como Pb, Zn, As, HAP y BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) en la zona de Hunedoara (Rumania) es una necesidad crítica. La entrega a base de agua eliminará fácilmente los contaminantes altamente móviles contaminando así el acuífero subyacente.• La espuma tiene propiedades de transporte únicas en el vadoso que permiten la mitigación en la movilización de contaminantes móviles y mejorar el barrido sobre sistemas heterogéneos. La espuma tiene muchas ventajas sobre las soluciones; i) este es un fluido no newtoniano que consigue un barrido de alta velocidad de los medios porosos; ii) con una densidad baja, esto es menos sujeto a la gravedad a diferencia del líquido.• Esto reduce el riesgo de extensión hacia abajo y ayuda a la extracción de líquidos de fase no acuosa (DNAPL) densos; iii) El alto porcentaje de aire (30 a 99%) permite, después de la desestabilización de la espuma, reducir significativamente la cantidad de agua residual que se está tratando.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: Camille Secher, Marc Lollie y Karine Jezequel de la Universidad de Alta Alsacia en Colmar, Francia• Resumen: aunque han estado prohibidos durante más de 30 años, varios entornos en contacto con bifenilos policlorados (BPC) siguen contaminados. Los procesos biológicos de bajo costo como la biorremediación pueden ser implementados <i>in situ</i> y permitir el mantenimiento de las propiedades fisicoquímicas y biológicas de los suelos a ser limpiados.• Sin embargo, esta técnica debe ser mejorada y controlada con precisión. La asociación de la bioaumentación del suelo por una bacteria degradante de PCB con plantas utilizadas como proveedores de exudados se supone que es relevante para estabilizar la actividad degradante <i>in situ</i>. Se busca evaluar la eficacia de la bioaumentación asistida por fitorremediación en un suelo altamente contaminado con BPC (100 mg/kg).• La proteobacteria <i>Burkholderia xenovorans</i> (LB400) sin inductor mostró la mejor eficacia, es decir, el 97% de todos los PCB's se eliminaron en tres semanas frente al 55% para el control no inoculado (disipación). Entre otras especies de plantas (<i>Medicago sativa</i>, <i>Brassica napus</i>, <i>Trifolium pratense</i>, <i>Lolium perenne</i>), <i>Festuca arundinacea</i> fueron seleccionadas en base a su desarrollo de raíces.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.14 y Tabla 5.15. Técnicas de remediación presentadas por Francia.

<p><i>EL PROYECTO SOFIA: INCLUYENDO LOS SERVICIOS DE BIODIVERSIDAD DEL SUELO EN LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE AGROECOSISTEMAS.</i></p>	<p><i>¿CÓMO RECICLAR RESIDUOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SUELOS EN ZONAS URBANAS?</i></p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>colaboración del INRA, UMR CNRS-Univ Rennes ECOBIO, AgroParisTech en Francia.</u>• Resumen: el proyecto SOFIA se centra en la evaluación de los efectos de las prácticas agrícolas sobre la diversidad taxonómica y funcional de los conjuntos bióticos de suelos y sobre varios servicios que apoyan: la regulación, el suministro (nutrientes para el cultivo) y el mantenimiento de la biodiversidad de la fauna y la flora del suelo. El proyecto se lleva a cabo en la plataforma experimental SOERE de Estrées-Mons (Norte de Francia).• Este experimento, iniciado en 2010, se caracteriza por una serie de tratamientos que comprenden diferentes rotaciones de cultivos (rotaciones anuales, perennes y basadas en energía), la tasa de fertilización nitrogenada, la labranza profunda y reducida.• Los resultados contribuirán a probar y mejorar los indicadores del suelo que podrían guiar mejor la elección de los agricultores, especialmente durante las fases de transición generadas por los cambios en las prácticas de cultivo. El proyecto está en curso.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>Sarah Rokia, Christophe Schwartz y Geoffroy Séré del laboratorio de Suelos y Medio Ambiente de la Universidad de Lorraine en Vandoeuvre-lès-Nancy, Francia.</u>• Resumen: para preservar los recursos naturales del suelo, se propone una estrategia para el uso de residuos y subproductos como materiales de sustitución de suelos durante la ingeniería del suelo Hemos seleccionado 10 materiales contrastados i) representativos de los residuos europeos y ii) con características fisicoquímicas adaptadas para la construcción fértil del suelo.• Los desechos se caracterizan por su almacenamiento potencial de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Al, Mg), almacenamiento de agua y características físicas (densidad aparente). Entre los 10 materiales investigados, los orgánicos (por ejemplo, compost, lodos de papel, residuos verdes) tienen características contrastadas - contenido de materia orgánica entre 28,1 y 69,5 (p/p) y alto contenido de agua. Estas características son complementarias a las de los minerales (por ejemplo, escombros, ladrillos, balastos de vía).• Se hipotetizó que la mezcla de ambos puede producir un sustrato fértil. Las mezclas de desechos se determinan con un sistema de soporte de decisión para construir Technosols optimizados para el crecimiento de la planta.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.16. Técnica de remediación presentadas por Francia.

LAVADO DE SUELOS CON FLUIDOS REUTILIZADOS PARA LA REMEDIACIÓN IN SITU Y ON SITE.

• **Presentado por:** Mahmoud Mohamed y Nicolas Fatin-Rouge del departamento de Química de Besancon en la UTINAM, Francia

• **Resumen:** el lavado es una de las pocas alternativas sistemáticas para eliminar los contaminantes de los suelos, especialmente en el caso de metales, que no son degradables ya menudo tienen altas temperaturas de vaporización. Además, tiene las ventajas de ayudar a la separación física de contaminantes macroscópicos en operaciones in situ y la eliminación de todos los micro-contaminantes

• Las espumas pueden reemplazar ventajosamente las soluciones debido a sus propiedades excepcionales que se adaptan mejor a los tratamientos in situ, su gran orientación de contaminantes hidrofóbicos y la gran reducción del volumen de aguas residuales para tratar después de su desestabilización. Dichas tecnologías desarrolladas son utilizadas para reutilizar soluciones acuosas de ligandos y espumas para movilizar metales pesados y una amplia gama de compuestos VOC y SVOC a partir de suelos contaminados.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.17 y Tabla 5.18. Técnicas de remediación presentadas por Italia.

<p><i>ATLAS DEL SUELO DE AMÉRICA LATINA: UNA HERRAMIENTA INNOVADORA PARA EL DESARROLLO DE POLÍTICAS Y SENSIBILIZACIÓN.</i></p>	<p><i>INMOVILIZACIÓN MECANOQUÍMICA DEL COBRE POR ESMECTITAS DIOCTAÉDRICAS Y TRIOCTAÉDRICAS.</i></p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>colaboración de grupos de trabajo de México, Venezuela, Bolivia, Brasil, Colombia e Italia en el Instituto de Medio Ambiente y Sostenibilidad en Italia.</u>• Resumen: los recursos de suelo en América Latina son cruciales para satisfacer las demandas de alimentos, fibra y combustible de una población en rápido crecimiento. Un pronóstico publicado en 2009 por la FAO y la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) indica que el área actual de tierras de cultivo podría ser más que duplicado agregando 1,6 mil millones de hectáreas, principalmente en América Latina y África. El conocimiento sobre los suelos y sus funciones en la región es fundamental.• Mejorar la comunicación con la sociedad civil y concienciar sobre la importancia del suelo son tareas importantes para la ciencia. Hoy en día, los suelos han sido nuevamente reconocidos como el recurso clave, tratando temas globales como la inseguridad alimentaria y el cambio climático.• El Atlas incluirá la distribución geográfica de los principales tipos de suelos en América Latina y el Caribe utilizando el sistema de Base de Referencia Mundial, destacando los principales procesos de formación de suelos y llamando la atención sobre sus amenazas potenciales, y la gestión sostenible.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: <u>Giuseppe Zaccaria y María Pizzigallo del departamento de Biología, Agroforestería y Química Ambiental de la Universidad de Bari "Aldo Moro", en Italia.</u>• Resumen: los minerales de arcilla han revelado un alto potencial en la remediación del suelo debido a su bajo costo, disponibilidad y baja toxicidad. Los procesos mecanoquímicos permiten activar reacciones químicas induciendo diferentes tipos de esfuerzos mecánicos y sin ningún otro suministro de energía• Este estudio investigó el efecto de la molienda en seco sobre la capacidad de las esmectitas dioctaédricas y trioctaédricas para inmovilizar cationes de metales pesados. Para ello, se trituraron una esmectita dioctaédrica <i>bentolita L</i> y una <i>laponita RD</i> trioctaédrica con diferentes cantidades de cloruro de cobre (II) en condiciones secas en un molino de bolas planetario de zirconia (tratamiento mecanoquímico).• Los tratamientos mecanoquímicos, dependiendo del tiempo y la relación de masa diferente, indujeron el aumento de la eficiencia de retención

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.19 y Tabla 5.20. Técnicas de remediación presentadas por Italia.

<p>BIORREMEDIACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO DE PCP UTILIZANDO HONGOS Y COMPOSTA.</p>	<p>EL BIOCARBÓN REDUCE LA LIXIVIACIÓN DE NITRÓGENO EN UN HUERTO DE MANZANA.</p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: Lucio Bosso, Antonino Testa y Gennaro Cristinzio del departamento de Arboricultura y Botánica de la Universidad de Nápoles Federico II., en Italia.• Resumen: se puede realizar la biorremediación de sitios contaminados introduciendo directamente en un sistema contaminado microorganismos capaces de consumir selectivamente el compuesto objetivo (bioaumentación) o aumentar la población indígena microbiana por adicción de nutrientes en forma de fertilizantes orgánicos y/ o inorgánico.• El objetivo principal del presente estudio fue una evaluación a largo plazo, bajo condiciones controladas, de la capacidad de remediación de ambos microorganismos naturalmente seleccionados y adición de nutrientes. Se utilizaron hongos indígenas, <i>Byssochlamys nivea</i> y <i>Scopulariopsis brumptii</i>, y un compost de desechos urbanos para biorremediar un suelo PCP (pentaclorofenol) artificialmente contaminado.• Después de 0, 7, 14 y 28 días se evaluó PCP extraíble. El PCP (extraíble disminuyó durante el tiempo de incubación de todas las muestras, en particular cuando ambos hongos estaban presentes en suelos enmendados, lo que indica que la bioaumentación y la bioestimulación ocurrieron de manera eficiente.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: Maurizio Ventura y Giustino Tonon de la Universidad Libre de Bozen; Giovanbattista Sorrenti y Pietro Panzacchi de la Universidad de Bologna, Italia.• Resumen: la lixiviación de nitrógeno en las tierras de cultivo es un problema mundial con implicaciones tanto para la salud humana como para la contaminación ambiental. Deben hacerse esfuerzos para aumentar la eficiencia del uso de nutrientes y minimizar las pérdidas de N de los ecosistemas terrestres a los de agua. Se ha reportado que el biocarbón aplicado en el suelo aumenta la fertilidad del suelo, mejora la retención de nutrientes y disminuye la lixiviación de nutrientes en suelos tropicales.• El objetivo del presente experimento fue evaluar el efecto de la adición de biocarbón en el suelo sobre la lixiviación de N en un huerto de manzanas maduras (<i>Malus domestica Borkh.</i>) Localizado en el Valle del Po (Italia). La lixiviación acumulada de nitratos no fue afectada por el biocarbón 4 meses después de la aplicación, mientras que una reducción significativa de la lixiviación de nitratos se observó durante el año siguiente en el suelo tratado con biocarbón. Por el contrario, la lixiviación de amonio fue muy baja y no se vio afectada por el tratamiento. Se especuló que la mayor eficacia de biocarbón observado en el segundo año del experimento podría ser debido a un cambio en las propiedades del biocarbón con el tiempo.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.21. Técnica de remediación presentadas por Italia.

USO DEL PGPB PARA MEJORAR LA DIVERSIDAD FUNCIONAL Y GENÉTICA MICROBIANA EN LOS SUELOS MINEROS: UN ESTUDIO PRELIMINAR EN EL PROYECTO UMBRELLA.

• **Presentado por:** Laura Emili de la Universidad de Sapienza del Centro Interuniversitario de Investigaciones Sostenibles en Roma, Italia.

• **Resumen:** la bioaumentación, que corresponde a la inoculación de bacterias apropiadas en el suelo, puede mejorar los procesos de fitorremediación en áreas contaminadas.

• Los mejores candidatos para la bioaumentación son las Bacterias Promotoras del Crecimiento de las Plantas (PGPB por sus siglas en inglés) que favorecen el crecimiento de las plantas y son resistentes a las concentraciones de metales en el medio ambiente. Este estudio se realizó bajo el proyecto Paraguas y tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la bioaumentación para potenciar el potencial de fitorremediación, a través de la ampliación de la diversidad microbiana funcional y genética en un suelo contaminado con metales pesados.

• Se obtuvo mediante electroforesis en Gel de Gradiente Desnaturalizante (DGGE, por sus siglas en inglés) un evidente aumento de la diversidad genética. En conclusión, la bioaumentación produjo un efecto positivo en la diversidad microbiana funcional y genética, lo que puede conducir a la mejora de un proceso de fitorremediación.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.22 y Tabla 5.23. Técnicas de remediación presentadas por Reino Unido.

<p>ZEOLITA MODIFICADA PARA LA TECNOLOGÍA DE BARRERAS REACTIVAS PERMEABLES.</p>	<p>EFFECTOS DE LA SILVICULTURA DE CICLO CORTO EN EL DESARROLLO DE LA COMUNIDAD FAUNAL DEL SUELO.</p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: grupo de Investigación geotécnica del departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge en Reino Unido.• Resumen: debido al uso industrial de la tierra y las actividades urbanas, una amplia gama de contaminantes se presentan en las aguas subterráneas. La remediación de las aguas subterráneas contaminadas se ha convertido en un tema controvertido.• Como un tratamiento permeable <i>in situ</i>, las barreras reactivas permeables (BRP) se está considerando la tecnología más eficaz y económica; uno de los desafíos en esta tecnología que se necesita abordar es seleccionar materiales efectivos para la eliminación de contaminantes.• Este póster presentó una innovadora zeolita modificada con materiales. El trabajo experimental se concentró en la validación del tratamiento de ensayos de campo, pruebas simuladas en laboratorio y comparación de los resultados de las pruebas por lotes con ensayos de columnas. Los resultados de esta investigación serán útiles para otras aplicaciones de BRP, control de contaminación ambiental y tratamiento de aguas.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: Rajapaksha Senevirathna y Kevin Richard de la Universidad Central de Lancashire; Andy Moffat y Elena Vanguelova del Centro de Bosques y Cambio Climático en Reino Unido.• Resumen: recientemente se introdujo en el Reino Unido la silvicultura de rotación corta (SRF, por sus siglas en inglés) como un método para aumentar la producción de biomasa. Sin embargo, las especies SRF especificadas han planteado preocupaciones acerca de posibles impactos al medio ambiente. Un aspecto vital, pero en gran parte no identificado de SRF es la calidad y la cantidad de basura, y su impacto en la fauna del suelo, de la cual la comunidad de lombrices de tierra es un componente importante.• El principal objetivo de este estudio fue determinar los efectos de las especies SRF sobre la diversidad de lombrices y la población.• Los resultados globales del estudio sugieren que las especies de SRF pueden afectar la fauna del suelo dependiendo del tipo de suelo, el clima y la historia del uso de la tierra aumentó la densidad de lombrices en comparación con el <i>Eucalyptus gunnii</i> y el control.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.24 y Tabla 5.25. Técnicas de remediación presentadas por Reino Unido.

<p>RESPUESTAS DE LA RAÍZ Y LA RIZÓSFERA A LA ADICIÓN DE BIOCARBÓN.</p>	<p>EL PAPEL DEL BIOCARBÓN EN LA FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES/ METALOIDES.</p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: Centro de Investigación del Biocarbón del Reino Unido de la Universidad de Edimburgo.• Resumen: el biocarbón se ha propuesto como una opción de mitigación del cambio climático, sin embargo, el potencial y los riesgos cuando se aplican a los suelos templados deben ser evaluados. El biocarbón se crea a través de la conversión térmica de materia orgánica a través de un proceso conocido como pirólisis: el residuo sólido de carbón es altamente recalcitrante, y por lo tanto tiene el potencial de almacenamiento de carbono a largo plazo.• Además, el biocarbón usado como una enmienda del suelo podría ayudar a reducir el impacto ambiental de la agricultura mediante la localización de los procesos del suelo dentro de la zona de las raíces, proporcionando así un enfoque de "gestión de la rizósfera" para manejar los suelos agrícolas• La investigación indicó un efecto de localización del nitrógeno en la rizósfera cuando se aplicó nitrato a los suelos modificados con biocarbón. Se presentan respuestas adicionales a la rizósfera después de la aplicación de caracteres frescos y manipulados.	<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: Luke Beesley del Instituto James Hutton en Reino Unido• Resumen: el biocarbón ha sido evaluado por su papel en la mejora de la calidad del suelo y el secuestro de carbono, con mucho menos atención a la limpieza del suelo y la remediación. En la investigación, un biocarbón de madera dura y un compost de desechos verdes solo y en combinación se mezclaron con dos suelos contaminados (As, Cd, Cu, Pb y Zn) de antiguos sitios industriales y, después de la exposición ambiental, se recogió agua de poro y ryegrass (<i>L. Perenne L. var. Cadix</i>)• El biocarbón fue más eficiente en la reducción de Cd y Zn en el agua de poro, disminuyendo la fitotoxicidad de ryegrass, pero movilizó pequeñas concentraciones de As. El cobre en agua porosa también se redujo por una disminución en el carbono orgánico disuelto (COD) y la co-movilidad.• El compost de estiércol vegetal fue más eficiente para inmovilizar el Pb que el biocarbón solo, pero la combinación del compost de desechos verdes y el biocarbón proporcionaron las mejores condiciones para el crecimiento y rendimiento del ryegrass debido a la inmovilización de metales y la entrada de N y P a partir del compost.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



Tabla 5.26. Técnica de remediación presentadas por Reino Unido.

<p>EL PROYECTO DE GROENLANDIA: REMEDIACIÓN DE BAJO IMPACTO PARA SUELOS CONTAMINADOS POR OLIGOELEMENTOS.</p>
<ul style="list-style-type: none">• Presentado por: Andrew Cundy de la Escuela de Medio Ambiente y Tecnología de la <u>Universidad de Brighton, Reino Unido.</u>• Resumen: las opciones de remediación de bajo impacto (GRO, por sus siglas en inglés) incluyen varios y en general enfoques basados en plantas para remediar los suelos contaminados con elementos traza a bajo costo y sin efectos negativos significativos para el medio ambiente. Aunque los GRO comprenden tecnologías muy innovadoras y eficientes, todavía no se utilizan ampliamente como solución de sitio práctica debido a varias razones de estorbo.• La contaminación de los suelos con oligoelementos sigue siendo en todo el mundo uno de los principales problemas ambientales. Las tecnologías convencionales para la remediación del suelo suelen ser muy caras y pueden afectar negativamente o destruir la estructura y las funciones del suelo. Sin embargo, las opciones de remediación de bajo impacto incluyen tecnologías ecológicas que tienen poco o ningún impacto negativo en el suelo. Las principales tecnologías son la fitoextracción, la inmovilización <i>in situ</i> y la fitostabilización asistida. Aunque se han logrado grandes progresos en la escala de laboratorio, las historias de éxito obtenidas en el campo son todavía limitadas, en particular para la fitoextracción. Además, hasta ahora no se ha abordado suficientemente la cuestión de la valorización de la biomasa vegetal potencialmente contaminada.• Además, es necesario seguir desarrollando la determinación adecuada de los puntos finales de las GRO. Por último, la aplicación de las GRO como solución práctica del sitio puede verse obstaculizada por marcos legales y por un conocimiento insuficiente de los responsables de la toma de decisiones.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012.



CAPÍTULO 6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS PRESENTADOS EN EUROSOIL.

De acuerdo a las técnicas presentadas en el capítulo anterior, clasificaremos en el cuadro 6.1 las estrategias seleccionadas de acuerdo al tipo de tecnología, principio, tratamiento, aplicación y contaminante tratable.

Se observa la preferencia del tratamiento de fitorremediación en el Eurosoil como técnica de innovación, abarcando el 35% de investigación sobre el resto de las estrategias presentadas. La figura 6.1 resume las estadísticas.

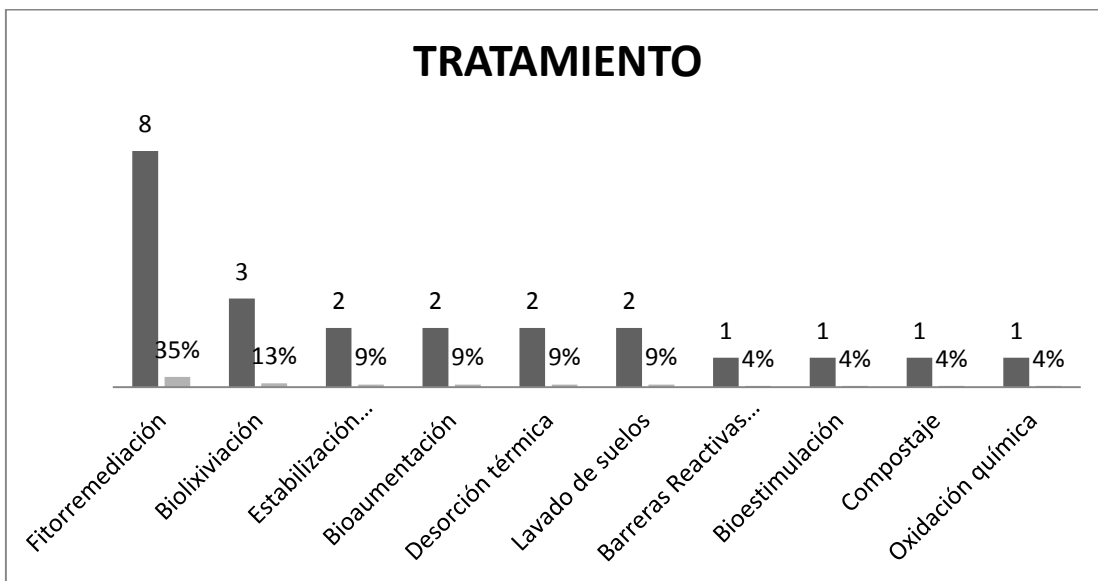


Figura 6.1. Estrategias de remediación presentadas en Eurosoil 2012.

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.1. Clasificación de las técnicas de remediación presentadas en Eurosoil 2012.

PAÍS	CONFERENCIA	TIPO DE TECNOLOGÍA	PRINCIPIO	TRATAMIENTO	APLICACIÓN	CONTAMINANTES TRATABLES
España	Transporte de Cu, Cd y Ni en los suelos de minas modificadas con residuos de concha de mejillón.	Aislamiento o inmovilización	Fisicoquímico	Estabilización fisicoquímica	<i>In situ</i>	Metales pesados (Cu, Cd, Zn)
Italia	Inmovilización mecanoquímica del cobre por esmectitas dioctaédricas y trioctaédricas.				<i>Ex situ</i>	Metales pesados (Cu)
Francia	¿Cómo reciclar residuos para la construcción de suelos en zonas urbanas?	Destrucción o modificación	Biológico	Compostaje	<i>In situ</i>	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH), hidrocarburos del petróleo clorofenoles.
Italia	Biorremediación de un suelo contaminado de PCP utilizando hongos y composta.			Bioestimulación	<i>In situ</i>	Pentaclorofenol (PCP)
Francia	Descontaminación de un suelo contaminado de bifenilos policlorados por bioaumentación asistida por fitorremediación.			Bioaumentación	<i>Ex situ</i>	Policlorobifenilos (PCB)
Italia	Uso del PGPB para mejorar la diversidad funcional y genética microbiana en los suelos mineros: un estudio preliminar en el Proyecto Umbrella.			Bioaumentación /Fitorremediación	<i>In situ/Ex situ</i>	Metales pesados (Cu, Cd, Zn)

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.1. Clasificación de las técnicas de remediación presentadas en Eurosoil 2012 (continuación).

PAÍS	CONFERENCIA	TIPO DE TECNOLOGÍA	PRINCIPIO	TRATAMIENTO	APLICACIÓN	CONTAMINANTES TRATABLES
Alemania	Pruebas de lixiviación en columna en suelos que contengan contaminantes orgánicos menos investigados.	Destrucción o modificación	Biológico	Biolixiviación	<i>In situ</i>	Hidrocarburos totales del petróleo, fluorosurfactantes y tebuconazol
Alemania	Un concepto combinado de remediación física y microbiológica para contaminantes de hidrocarburos clorados					Hidrocarburos clorados (tetracloroetileno, tricloroetileno, 1,2-Dicloroetileno, cloruro de vinilo y cloroetileno)
Italia	El biocarbón reduce la lixiviación de nitrógeno en un huerto de manzana.					Nitrógeno (N)
Alemania	Biocarbón como estabilizador de cobre en los viñedos.			Fitorremediación	<i>In situ</i>	Metales pesados (Cu)
España	Efecto de ácidos húmicos solubles en la toma de metales pesados por <i>vetiveria zizanioides</i> en suelos de minas contaminados.					Metales pesados (Cd, Cu, Mn y Zn)
Reino Unido	Efectos de la silvicultura de ciclo corto en el desarrollo de la comunidad faunal del suelo.					Metales, disolventes, explosivos, hidrocarburos del petróleo, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.1. Clasificación de las técnicas de remediación presentadas en Eurosoil 2012 (continuación).

PAÍS	CONFERENCIA	TIPO DE TECNOLOGÍA	PRINCIPIO	TRATAMIENTO	APLICACIÓN	CONTAMINANTES TRATABLES
Reino Unido	El papel del biocarbón en la fitorremediación de suelos contaminados por metales/ metaloides.	Destrucción o modificación	Biológico	Fitorremediación	<i>In situ</i>	Metales y metaloides.
Reino Unido	El proyecto de Groenlandia: remediación de bajo impacto en suelos contaminados por oligoelementos.					Metales pesados (Cu, Zn, As, Pb, Ni, Cr) y PAH
España	Reciclaje de drenaje urbano para mejorar el establecimiento de vegetación en un suelo de minas ácidas.					Metales pesados (Cu, Cd, Zinc)
Reino Unido	Respuestas de la raíz y la rizósfera a la adición de biocarbón.					Metales, disolventes, explosivos, hidrocarburos del petróleo, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)
Reino Unido	Zeolita modificada para la tecnología de barreras reactivas permeables.			Barreras Reactivas Permeables.		Elementos contaminantes en el agua (Metales, halocarbonos, hidrocarburos derivados del petróleo, y otros compuestos orgánicos)

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.1. Clasificación de las técnicas de remediación presentadas en Eurosoil 2012 (continuación).

PAÍS	CONFERENCIA	TIPO DE TECNOLOGÍA	PRINCIPIO	TRATAMIENTO	APLICACIÓN	CONTAMINANTES TRATABLES
España	Estudio preliminar sobre la desorción térmica del mercurio en los suelos del área del distrito de Almadén.	Extracción o separación	Térmico	Desorción térmica	<i>Ex situ</i>	Metales pesados (Hg)
España	Fitorremediación de oligoelementos (As, Cd, Cu y Zn) en una mina de arsenopirita de Derelict (centro de España): enfoques múltiples.					Metales pesados (Cd, Cu, As y Zn)
Alemania	Impacto de las enmiendas sobre las funciones biológicas de los suelos contaminados de PAH tratados por oxidación química.			Oxidación química	<i>In situ</i>	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)
Francia	Lavado de suelos con fluidos reutilizados para la remediación <i>in situ</i> y <i>on site</i> .		Fisicoquímico	Lavado de suelos	<i>Ex situ</i>	Metales pesados, compuestos orgánicos volátiles (COV) y semivolátiles (COSV)
Francia	Eliminación de contaminantes mezclados del suelo con espumas reutilizadas para la remediación <i>in situ</i> .				<i>In situ</i>	Metales pesados (As, Zn, Pb), Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP),

Fuente: elaboración propia.



En el mercado ambiental de México, actualmente existe una cantidad considerable de empresas nacionales e internacionales que ofrecen diferentes tipos de tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Asimismo, con el propósito de establecer un control acerca de las tecnologías que se ofrecen y conocer sus posibilidades reales de éxito, se inició en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México el 18 de agosto de 1997. La aplicación obligatoria de la Licencia Ambiental Única (LAU), para todas aquellas empresas que realizan trabajos de remediación de suelos. Ello de conformidad con el acuerdo sectorial publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) del 11 de abril de 1997.

De las tecnologías que ofrecen las empresas que cuentan con permisos para remediar suelos contaminados, todas están enfocadas exclusivamente a la remediación de sitios contaminados por compuestos orgánicos. Dentro de los contaminantes tratados con mayor frecuencia, se encuentran los HTP y los HAP, lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación. De un total de 57 empresas autorizadas, ninguna ofrece servicios para la restauración de suelos contaminados por metales (SEMARNAT, 2002).

De acuerdo con datos proporcionados por 40 empresas autorizadas para remediar suelos contaminados por diferentes tipos de contaminantes, dentro de las tecnologías más comúnmente empleadas se encuentran las biológicas (biorremediación, con 48%), siendo las más utilizadas el composteo y la biolabranza, tal como se muestra en la figura 6.2.

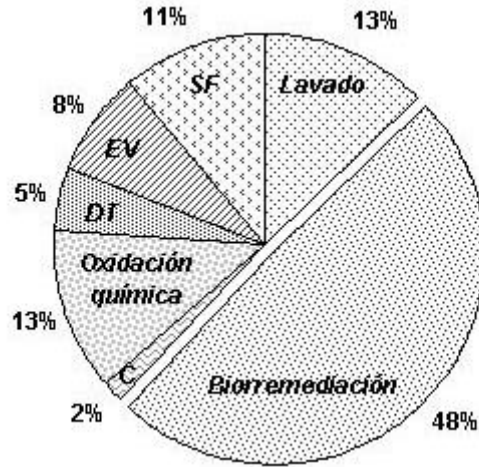


Figura 6.2. Tecnologías de remediación para suelos utilizadas en México por empresas autorizadas. SF: separación física; EV: extracción de vapores; DT: desorción térmica; C: centrifugación.

Fuente: SEMARNAT, 2002.

Estas estadísticas presentadas por la SEMARNAT se aproximan a los datos seleccionados para las técnicas de remediación presentadas en el Eurosoil 2012 (figura 6.3).

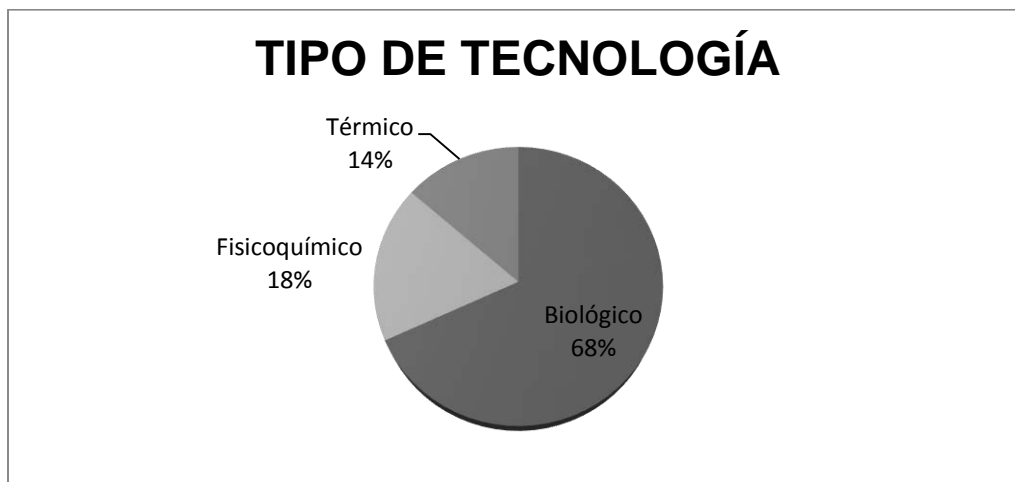


Figura 6.3. Tecnologías de remediación para suelos presentadas en Eurosoil 2012 de acuerdo al tipo de tecnología.

Fuente: elaboración propia



Tabla 6.2. Ventajas y desventajas de los tratamientos de remediación.

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

Fuente: Tomado y adaptado de Volke y Velasco, 2002



Observamos que hay mayor disponibilidad de estrategias de remediación biológica y empresas autorizadas en nuestro país para llevar a cabo la remediación de suelos contaminados. Sin embargo, como observaremos más adelante, no hay una técnica claramente superior, sino que depende de varios factores.

En cuanto al lugar de realización del proceso de remediación, observamos en la figura 6.4 que las tecnologías *In situ* predominan. En la tabla 6.3 se exponen las ventajas y desventajas de cada tipo de aplicación.



Figura 6.4. Tecnologías de remediación para suelos presentadas en Eurosoil 2012 de acuerdo a su aplicación.

Fuente: elaboración propia



Tabla 6.3. Ventajas y desventajas de los tratamientos de remediación de acuerdo a su aplicación.

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

Fuente: Tomado y adaptado de Volke y Velasco, 2002.



De acuerdo a la USEPA, se han definido nueve criterios que deben usarse en la evaluación de las alternativas de remediación, para la selección más adecuada, estos criterios son (USEPA, 9355.0-27FS, 1990, HWSRM, 1994):

1. Protección global de la salud humana y el ambiente. Consiste en definir si la técnica de restauración proporciona una protección adecuada y en describir cómo se eliminan, reducen o controlan los riesgos presentes en cada ruta de exposición (suponiendo un máximo de exposición razonable) con el tratamiento y los controles de ingeniería e institucionales.
2. Cumplimiento de los criterios de limpieza. Se refiere a establecer si la técnica de restauración cumplirá con todos los valores de concentración máximos permisibles para cada contaminante.
3. Efectividad y permanencia a largo plazo. Consiste en evaluar la capacidad de la técnica de remediación para mantener una protección confiable de la salud humana y el medio ambiente durante todo el tiempo.
4. Reducción de la toxicidad, movilidad o volumen de los contaminantes. Se debe plantear en qué medida se logra esto a través de la aplicación de la tecnología.
5. Efectividad a largo plazo. Consiste en establecer el periodo de tiempo necesario para lograr la protección a cualquier impacto adverso sobre la salud humana y el ambiente.
6. Factibilidad. Consiste en la factibilidad técnica y administrativa de la tecnología de restauración, incluyendo la disponibilidad de materiales y servicios necesarios para implementar una determinada opción.
7. Costo. Incluye el capital estimado, los costos de operación y mantenimiento y los costos a valor presente neto. Este aspecto es importante para decidir entre dos tecnologías que son parecidas en cuanto a los otros criterios o que presentan resultados similares.
8. Aceptación del estado. Se refiere a los comentarios y aceptación que manifiesta la autoridad ambiental, ya sea federal o estatal.
9. Aceptación de la comunidad. Se refiere a la respuesta general que presente al público esta tecnología de remediación propuesta.



En cuanto a la posible aplicación de la selección de técnicas de remediación presentadas en Eurosoil 2012, en la tabla 6.4 se llevó a cabo un análisis de los estados del país en el que se podría emplear, de acuerdo al tipo contaminante presente o por su origen antropogénico; la figura 6.5 resume las áreas de aplicación y su clasificación.

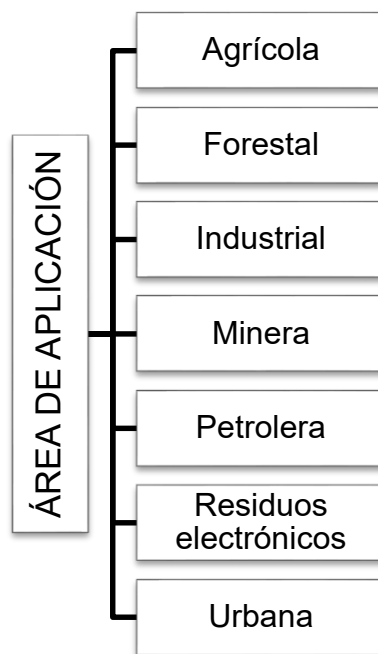


Figura 6.5. Área de aplicación de las técnicas de remediación de Eurosoil que podrían emplearse en México.

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.4. Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo a la zona de aplicación.

PAÍS	CONFERENCIA	ZONA DE APLICACIÓN	ENFOQUE PRINCIPAL	LUGAR DE APLICACIÓN EN MÉXICO
Alemania	Biocarbón como estabilizador de cobre en los viñedos.	Agrícola	Aplicación en viñedos	Baja California, Coahuila, Querétaro, Aguascalientes, Sonora, Zacatecas y también Durango.
Italia	El biocarbón reduce el la lixiviación del nitrógeno en un huerto de manzana.		Zonas de cultivo de manzana	Chihuahua, Durango, Coahuila y Puebla.
Reino Unido	Respuestas de la raíz y la rizósfera a la adición de biocarbón.		Uso de biocarbón para remediación	No es una técnica nueva, pero no es empleada en México. Como beneficios en el suelo destaca la capacidad de reducir la emisión de gases con efecto invernadero y lixiviación de nutrientes.
Italia	Biorremediación de un suelo contaminado de PCP utilizando hongos y composta.	Forestal	Lugares donde se utiliza el PCP	Zonas urbanas, forestales e industriales donde se usa el PCP como preservador de madera.
Reino Unido	Efectos de la silvicultura de ciclo corto en el desarrollo de la comunidad faunal del suelo.		Bosques, selvas y matorrales.	Zonas forestales de Durango, Chihuahua, Michoacán, Oaxaca, Jalisco, Campeche, Quintana Roo, Tabasco y Chiapas, San Luis Potosí, Sonora y Baja California

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.4. Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo a la zona de aplicación (continuación).

PAÍS	CONFERENCIA	ZONA DE APLICACIÓN	ENFOQUE PRINCIPAL	LUGAR DE APLICACIÓN EN MÉXICO
Reino Unido	El proyecto de Groenlandia: remediación de bajo impacto de suelos contaminados por oligoelementos.	Industrial	Aplicación de remediación de bajo impacto	Estrategia no empleada en México, sin embargo, tiene potencial aplicación en zonas industriales, y agrícolas contaminadas por Zn, Cd y Pb.
Reino Unido	El papel del biocarbón en la fitorremediación de suelos contaminados por metales/ metaloides.		Zonas industriales	Residuos de As, Cd, Cu, Pb y Zn de zonas industriales.
Alemania	Impacto de las enmiendas sobre las funciones biológicas de los suelos contaminados de PAH tratados por oxidación química.		Contaminación por Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	Derrame de residuos, provenientes de quema de madera y combustibles fósiles.
España	Efecto de ácidos húmicos solubles en la toma de metales pesados por <i>vetiveria zizanioides</i> en suelos de minas contaminados.	Minera	Metales pesados	Sonora, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato, Chihuahua, Coahuila y Durango.
Francia	Eliminación de contaminantes mezclados del suelo con espumas reutilizadas para la remediación <i>in situ</i> .		Minas de carbón	Coahuila, Oaxaca, Sonora, Colima, Chihuahua, Chiapas, Durango, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, San Luis Potosí, Guerrero, Veracruz.

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.4. Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo a la zona de aplicación (continuación).

PAÍS	CONFERENCIA	ZONA DE APLICACIÓN	ENFOQUE PRINCIPAL	LUGAR DE APLICACIÓN EN MÉXICO
España	Estudio preliminar sobre la desorción térmica del mercurio en los suelos del área del distrito de Almadén.	Minera	Minas de mercurio.	Chihuahua, Durango, Estado de México, Guanajuato, Guerrero, Querétaro, San Luis Potosí y Zacatecas.
España	Fitorremediación de oligoelementos (As, Cd, Cu y Zn) en una mina de arsenopirita de Derelict (centro de España): enfoques múltiples.		Minas de arsenopirita.	Zacatecas, Durango y Michoacán
Italia	Inmovilización mecanoquímica del cobre por esmectitas dioctaédricas y trioctaédricas.		Minas de cobre.	Sonora, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato y Chihuahua.
Francia	Lavado de suelos con fluidos reutilizados para la remediación <i>in situ</i> y on-site.		Minas de hierro	Colima, Coahuila, Michoacán, Chihuahua, Durango, Sinaloa y Sonora.
España	Reciclaje de drenaje urbano para mejorar el establecimiento de vegetación en un suelo de minas ácidas.		Mina de pirita	Baja California, Durango, Jalisco, Michoacán, Sonora, Chihuahua

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.4. Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo a la zona de aplicación (continuación).

PAÍS	CONFERENCIA	ZONA DE APLICACIÓN	ENFOQUE PRINCIPAL	LUGAR DE APLICACIÓN EN MÉXICO
España	Transporte de Cu, Cd y Ni en los suelos de minas modificadas con residuos de concha de mejillón.	Minera	Minas de cobre / Uso de conchas de mejillón.	Sonora, Zacatecas, San Luis Potosí, Guanajuato y Chihuahua. Desperdicios de conchas de mejillón en Baja California.
Italia	Uso del PGPB para mejorar la diversidad funcional y genética microbiana en los suelos mineros: un estudio preliminar en el Proyecto Umbrella.		Minas de Uranio	Chihuahua, Nuevo León, Sonora, Durango, Oaxaca, Baja California Sur.
Alemania	Pruebas de lixiviación en columna en suelos que contengan contaminantes orgánicos menos investigados.	Petrolera	Contaminación de suelos por tebuconazol, compuestos del petróleo crudo, Fluorosurfactantes.	Industria petrolera, derrame de residuos peligrosos y zonas agrícolas.
Alemania	Un concepto combinado de remediación física y microbiológica para contaminantes de hidrocarburos clorados		Suelos contaminados por hidrocarburos clorados	Industria petrolera. Derrames y residuos de la industria textil.
Francia	Descontaminación de un suelo contaminado de bifenilos policlorados por bioaumentación asistida por fitorremediación.	Residuos electrónicos	Zonas de procesamiento de residuos electrónicos.	Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Coahuila, CDMX, Jalisco, Morelos, Nuevo León, Tamaulipas, Querétaro.

Fuente: elaboración propia.



Tabla 6.4. Clasificación de las técnicas de remediación de acuerdo a la zona de aplicación (continuación).

PAÍS	CONFERENCIA	ZONA DE APLICACIÓN	ENFOQUE PRINCIPAL	LUGAR DE APLICACIÓN EN MÉXICO
Francia	¿Cómo reciclar residuos para la construcción de suelos en zonas urbanas?	Urbana	Grandes zonas urbanas y metropolitanas	Zonas metropolitanas de la CDMX, Estado de México, Nuevo León, Guadalajara, Chihuahua, Baja California, Coahuila, Aguascalientes, Michoacán, Tabasco, Tampico, Chiapas y Yucatán.
Reino Unido	Zeolita modificada para la tecnología de barreras reactivas permeables.		Grandes zonas urbanas y metropolitanas	Zonas metropolitanas de la CDMX, Estado de México, Nuevo León, Guadalajara, Chihuahua, Baja California, Coahuila, Aguascalientes, Michoacán, Tabasco, Tampico, Chiapas y Yucatán.

Fuente: elaboración propia.



A continuación, se presentan las técnicas con mayor futuro en nuestro país, debido a los recursos con los que contamos y las tecnologías existentes:

Biocarbón.

Un factor común en las técnicas presentadas en el Eurosoil, es el aumento en el uso del biocarbón como material para la remediación de suelos. A la fecha, no hay investigaciones o iniciativas en desarrollo que se enfoquen en la aplicación del biocarbón en México (Universidad de Edimburgo, 2013), Sin embargo, existe un gran potencial de recursos biomásicos para producir este recurso, así como biocombustibles líquidos, biocombustibles sólidos y biogás, por lo que en un futuro podrían aplicarse técnicas más amigables con el medio ambiente.

Conchas de Mejillón.

De acuerdo con las estadísticas de la FAO (2012), en 2010 los moluscos representaron el 23.6% de la producción pesquera mundial. La producción de moluscos bivalvos por pesca y acuicultura se ha incrementado en los últimos 50 años de casi 1 millón de toneladas en 1950 a cerca de 13.1 millones de toneladas en 2010. Los principales componentes de la producción de moluscos en 2010 fueron las almejas, las ostras, los mejillones y los pectínidos. Entre los principales productores de moluscos por acuicultura se encuentra México.

En México, la producción por cultivo y captura de moluscos bivalvos está representada con una producción de ostras del género *Crassostrea* que alcanza unas 40,000 toneladas (Buesa, 1997; FAO, 2012; CONAPESCA, 2009). Estas estadísticas tan significativas nos hablan del futuro potencial que presentan los residuos de conchas de mejillón.

Vetiver.

El Vetiver es una planta herbácea de desarrollo muy rápido, extremadamente resistente a la sequía, a la contaminación y la salinidad. Adaptable a todo tipo de condiciones de cultivo.



De tamaño medio, hasta dos metros, es estéril y no invasiva. Con un sistema radicular vertical y muy poderoso, las plantas de vetiver, adecuadamente dispuestas forman barreras vivas extremadamente versátiles y resistentes; controlando la escorrentía superficial de agua y sirviendo como un filtro alto, denso y muy eficaz que retiene el sustrato y sedimentos.

Su costo relativamente barato la convierte en una opción altamente recomendable para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados (Ecoclimático, 2008).

Remediación de bajo impacto.

Las alternativas de remediación de bajo impacto son estrategias o técnicas de gestión de riesgos para lugares contaminados que generan una ganancia neta (o al menos no una pérdida importante) en la funcionalidad del suelo además del control del riesgo. Estas estrategias y técnicas han sido aplicadas con éxito en lugares que tienen una variedad de contaminantes orgánicos, inorgánicos y/o radiactivos.

Las técnicas de remediación de bajo impacto tienen potencial para proporcionar una serie de beneficios añadidos, de carácter económico (producción de biomasa), social (ocio y recreo) y medioambiental (secuestro de CO₂, gestión de drenaje y filtración de agua, restauración de comunidades vegetales, microbianas y animales, que se incluyen en el término genérico "servicios de ecosistema", además del control del riesgo. Casos de éxito en Europa podrían aplicarse en México (Greenland Project, 2014).

Sin embargo, toda técnica, estudio, tratamiento o proceso debe estar alineado con las políticas existentes, así como la naturaleza específica de cada contexto de los beneficios, los hallazgos deben ser el resultado de una estrategia sostenible de gestión integrada de recursos, con la cual se atienden objetivos de políticas ambientales, sociales y económicas.



Tabla 6.5. Políticas ambientales presentadas en Eurosoil 2012.

PAÍS	CONFERENCIA
Italia	Atlas del suelo de América Latina: una herramienta innovadora para el desarrollo de políticas y sensibilización
Alemania	Red Europea sobre la conciencia del suelo
Francia	El proyecto Sofía: incluyendo los servicios de biodiversidad del suelo en los sistemas de gestión de agroecosistemas.

Fuente: Eurosoil 2012 Scientific Session Planning, 2012

La tabla 6.5 muestra las principales conferencias en cuanto a políticas ambientales, en el que se puso de manifiesto la importancia que tiene la sensibilización y concientización del suelo, proponiendo que la información sobre contaminación de suelos y sus técnicas de remediación sean más accesibles al público en general, además de fomentar una fuerte cooperación entre los gobiernos a nivel mundial.

El conocimiento sobre los suelos y sus funciones en la región es fundamental. La mejora de la comunicación con la sociedad civil y la sensibilización sobre la importancia del suelo son tareas importantes para la ciencia. Hoy en día, los suelos han sido reconocidos de nuevo como el recurso clave.



CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis comparativo de las técnicas y estrategias de remediación de suelos contaminados disponibles en México con la información presentada por el Congreso Eurosoil 2012, en el cual se destacaron aquellas tecnologías novedosas con gran potencial de aplicación en nuestro país con recursos existentes pero que no han sido ampliamente investigados y/o desarrollados.

Se destacó el valor que posee el suelo para garantizar el crecimiento continuo de la vegetación natural, ya que nos proporciona alimentos, productos y otros servicios ecosistémicos, como la regulación del clima y la producción de oxígeno; además de ser el soporte de viviendas y estructuras.

Se mostró que las principales fuentes de contaminación de suelos en México provienen de la industria petroquímica, de la minera, de la agroquímica, de la ferrocarrilera, de las estaciones de servicio y de la disposición de residuos peligrosos.

Se llevó a cabo la recopilación de técnicas de remediación de suelos contaminados considerando su clasificación de estrategias en diversos medios impresos y electrónicos provenientes de fuentes nacionales e internacionales.

Se presentaron las técnicas, tecnologías y políticas más novedosas para la remediación de suelos contaminados del último Congreso de Eurosoil 2012 de acuerdo al origen geográfico de los principales expositores, mostrando que las tecnologías de remediación biológica e *in situ* son las que han sido mayoritariamente aplicadas e investigadas.

Se mostró la participación de México en políticas ambientales a nivel internacional y su adopción; destacando que toda acción, técnica de remediación y disposición de residuos debe estar respaldada a nivel constitucional.



REFERENCIAS

- Alexander, M. *Introducción a la microbiología del suelo*. AGT Editor, S.A, México, 1980.
- American Petroleum Institute. *A Guide to the Assessment and Remediation of Unferground Petroleum Releases*. Third Edition, API Publication 1628, Washigton, DC, 1996.
- Amorox, Javier. *Temperatura del suelo*. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Edafología. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Madrid, 2007.
- <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente/contenidos/tema-4/TEMPERATURA-DEL-SUELO.pdf>. Visitado por última vez: 06 junio 16.
- Bear, J.; Sun, Y. *Optimization of pump-treat-injection (PTI) design for the remediation of a contaminated aquifer: multi-stage design with chance constraints*. Journal of Contaminant Hydrology, 29: 225-244. 1998.
- Bolaño, Carmen. *Concepto ambiental de suelo y normativa reguladora*.
- <http://www.eitelkartea.com/dokumentuak/IEZ12-BOLA%C3%91O.pdf>. Visitado por última vez: 01 agosto 2016
- Brañes, Raúl. *Manual de derecho ambiental mexicano*. Sección de obras de política y derecho. Fundación Mexicana para la Educación Ambiental, Universidad de Texas, EU, Texas, 2007.
- Castillo, Francisco. *Bioteología ambiental*. Editorial Tebar, Madrid, España, 2005.
- Chang, T. C.; Yen, J. H. *On-site mercury-contaminated soils remediation by using termal desorption technology*. Journal of Hazardous Materials, 128, EU, 2006.
- Comercialización de biocarbón en México.
- http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Comercializacion_de_Biochar_en_Mexico.pdf. Visitado por última vez: 20 nov 2016.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). *La Diversidad Biológica de México*. Estudio de País. México, D.F., 2008.
- http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/estrategia_nacional/doctos/INICIO.PDF. Visitado por última vez: 25 mayo 2016.
- Cortinas, Cristina. *Colección técnica y estadística, regulación de los residuos peligrosos en México. SEMARNAT 2007*.
- http://siscop.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/regulacion_de_rp_en_mexico_2007.pdf. Visitado por última vez: 9 julio 2016.
- De la Rosa-Pérez, D.A.; Teutli-León, M.M.M.; Ramírez-Islas, M.E. *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 23, 129-138. México, 2007.
- <http://www.journals.unam.mx/index.php/rica/article/view/21640>. Visitado por última vez: 30 abril 2016.
- Diario Oficial de la Federación. *2009 NOM-021-RECNAT-2000*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales,
- <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>. Visitado por última vez: 09 julio 2016
- Diario Oficial de la Federación. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. 5 de febrero de 1917. Última reforma DOF 29 de enero del 2016.



- <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Constitucion/cn16.pdf>. Visitado por última vez: 9 abril 2016.
- Diario Oficial de la Federación. *Ley General Del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*.
- http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_130516.pdf. Visitado por última vez: 30 junio 2016.
- Diario Oficial de la Federación. *Ley General Para La Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. México, 2003.
- http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_220515.pdf
- Diario Oficial de la Federación. *NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, D.F., 2004.
- Eurosoil 2012. *Memorias del 4° Congreso Internacional*. Bary, Italia.
- Eweis, J.B.; Ergas, S.J. *Bioremediation Principles*. McGraw-Hill International Editions, 1998.
- Federal Remediation Technologies Roundtable. *Technology Optimization In-Situ Treatment*.
- <https://frtr.gov/> Visitado por última vez: 27 mayo 2016.
- Fernández, Carlos; Gabriel, Norma. *Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados*. Instituto Mexicano del Petróleo, México, D.F., 2006.
- <http://www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/509.pdf>. Visitado por última vez: 30 julio 2016
- Fischer, U., Schulin, R., Keller, M. *Environmental and numerical investigation of soil vapor extraction*. Water Resources Research, 32: 3413–3427. EU, 1996.
- Flores, N. *Utilización de lodos residuales en la restauración de suelos contaminados con hidrocarburos*. VI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, Pachuca; México, 2001.
- Fogarty, A. M.; Tuovinen, O. H. *Microbial degradation of pesticides in yard waste composting*. Microbiological Reviews, EU, 1991.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (versión en español). *Los suelos constituyen la base de la vegetación*. 2015.
- http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/soils-2015/docs/Fact_sheets/Es_IYS_Veg_Print.pdf. Visitado por última vez: 07 mayo 2016.
- Freeman, M. H. *Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal*. Second edition. McGraw-Hill. EU, 1998.
- Fuster, Miguel. *Producción de plantas y tepes en vivero*. Bubok, 2014.
- Gestión sostenible del agua, 2013.
- <http://gidahatari.com/ih-es/procesos-remediacion-aguas-subterraneeas-ambientes-baja-permeabilidad>. Visitado por última vez: 05 nov 2016
- Gómez Palacios, José; Estrada de Luis Inés. *Índices de calidad de suelos y compost desde la perspectiva agro-ecológica. II Congreso sobre Residuos Biodegradables y Compost - El reto de fomentar el consumo de los productos finales*. 20 y 21 octubre, Sevilla, España, 2005.
- Grasso, D. Hazardous. *Waste Site Remediation, Source Control*. Lewis Publisher, Inc. Connecticut, EU, 1993.
- Greenland Project, Europa, 2014.
- http://www.greenland-project.eu/downloads/Greenland_best-practice_guide_Castellano.pdf. Visitado por última vez: 13 nov 16.



- Illangasekare, T. H; Reible, D. D. *Pump-and-Treat for remediation and plume containment: applications, limitations, and relevant processes*. Manuals and Reports on Engineering Practice. American Society of Civil Engineers, vol. 100. EU, 2001.
- INEGI. *Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, escala 1: 250 000, Serie II (Continuo Nacional)*. México, D.F., 2007.
- Innovación y Cualificación, S.L., Target Asesores, S. L. *Experto en gestión medioambiental*. Publicado por IC Editorial, España, 2014.
- Instituto Nacional de Ecología. *Fuentes de contaminación en México*. Mexico, 2002.
- <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/372/fuentes.html>. Visitado por última vez: 5 junio 2016.
- IUSS, Grupo de Trabajo WRB. *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO. Italia, Roma, 2007.
- Jaramillo, Daniel. *Introducción a la ciencia del suelo*. Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Colombia, Medellín, 2001.
- Khan, F. I; Husain, T. *An overview and analysis of site remediation technologies*. Journal of Environmental Management, 71: 95–122. 2004.
- Kittel, J.A.; R.E. Hinchee, R. *Bioslurping – vacuum enhanced free product recovery coupled with bioventing: A case study*. Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals, 1994.
- Leahy, J.; R.R. Colwell. *Microbial degradation of hydrocarbons in the environment*. 1990.
- Li, L., Cunningham; C. J., Pas. *Field trial of a new aeration system for enhancing biodegradation in a biopile*. Waste Management, 24 (2), EU, 2004.
- Manual de Buenas Prácticas de Manejo para el Cultivo de Moluscos Bivalvos. OSPESCA. http://www.isamx.org/sitio/pdfs/Manual%20de_BPde_M_Version%20Digital_011014155613.pdf. Visitado por última vez: 22 nov 16.
- Maroto, Esther; Rogel Juan. *Aplicación de sistemas de biorremediación de suelos y aguas contaminadas por hidrocarburos*. GEOCISA. División de Protección Ambiental de Suelos. 2015.
- <http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfib15/028.pdf>. Visitado por última vez: 30 julio 2016.
- Mendoza, Manuel, Plascencia, Héctor. *Análisis de la aptitud territorial. Una perspectiva biofísica*. Instituto Nacional de Ecología, Mexico, D.F., 2010.
- Michel Jr., F. C; Reddy, C. A. *Microbial degradation and humification of the lawncare pesticide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid during composting of yard trimmings*. Applied and Environmental Microbiology, 61, EU, 1995.
- Millenarium. *Técnicas de remediación de suelos contaminados*. Ingeniería Civil y medio ambiente.
- <http://www.miliarium.com/Prontuario/TratamientoSuelos/Welcome.asp>. Visitado por última vez: 30 julio 2016
- Miller, Tyler. *Ecología y medio ambiente*. Grupo Editorial Iberoamérica. México, D.F, 1994.
- Mohn, W. W.; Radziminski, C. Z. *On site bioremediation of hydrocarbon-contaminated Arctic tundra soils in inoculated biopiles*. Applied Microbiology and Biotechnology, EU, 2001.
- Mulligan, C. N. *An overview of in situ bioremediation processes*. Proceedings of the 29th Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering. Victoria, BC, May 30-June 2. Montreal, Canadian Society of Civil Engineering. Canadá, 2001.
- Navarro, Simón; Navarro, Ginés. *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Editorial Mundi-Prensa Libros, España, 2003.



Newell, C., Acree, S. *Light nonaqueous phase liquids*. EPA, Office of Research and Development, EPA/540/S-95/500, EU, 1995.

Ordoñez, José. *Procesos y tecnologías emergentes de remediación de aguas subterráneas contaminadas con disolventes clorados*. Oficina de Proyectos de Sevilla, España, Sevilla, 2015.

Ortiz, Irene; Sáenz, Juana. *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. Universidad de Alcalá, España, 2006.

<http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001700.pdf>. Visitado por última vez: 4 junio 2016.

Palmer, Robert. *Introducción a la Ciencia del Suelo. Manual de laboratorio*. 2ª ed. Editorial Editor, S.A. México, D.F., 1980.

Plaster, Edward. *La ciencia del suelo y su manejo*. Editorial Paraninfo, España, Madrid, 1997.

Plaza, G., Ulfig, K., Worsztynowicz, A. *Respirometry for assessing the biodegradation of petroleum hydrocarbons*. Environmental Technology, 26 (2). 2005.

Pojasek, B.R. *Solidification as an ultimate disposal option of hazardous waste*. Energy Resources Co., Ann Arbor Science Publishers, Inc. Vol. 1, 2 y 3, Cambridge, Massachusetts. 1982.

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación, México. 2002.

<http://www.profepa.gob.mx/> Visitado por última vez: 27 julio 2016.

Quadri, Gabriel. *Industria y política ambiental*. El Nacional. Sábado 18 de Junio, México, 1994.

Riser-Roberts, E. *Biodiation of petroleum contaminated soils*. Lewis Publishers. 1998.

Robert M. Cohen; James W. Mercer. *Ground Water Issue – Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems*. U.S. EPA/540/S-97/504. Solid Waste and Emergency Response, September 1997.

Ross, A. B.; Jones, J. M. *Measurement and prediction of the emission of pollutants from the combustion of coal and biomass in a fixed bed furnace*. Fuel, 81. 2002.

Rubio, Ana María. *La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los arcornocales*. Universidad de Sevilla, Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, 2010

<http://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf> Visitado por última vez: 01 agosto 2016.

Sánchez, Efraín; Fernández, Georgina. *Prácticas apropiadas para disminuir los riesgos ambientales por el manejo de gasolina en estaciones de servicio*. CENAPRED, México, 2001.

Saucedo, Maria. *Remediación de suelo contaminado con grasa de agua residual de la industria quesera en la comunidad quesera en la comunidad menonita de Nuevo Ideal, Durango*. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango, México, 2010.

Scientific Session Planning, Italia, 2012.

http://www.scienzadelsuolo.org/_docs/Atti_Eurosoil_2012.pdf. Visitado por última vez: 14 nov 16.

Sellers, K. *Fundamentals of hazardous waste site remediation*. Lewis Publishers, EU, 1999.

SEMARNAT. *Informe de la situación del medio ambiente en Mexico, compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y desempeño ambiental*. Capítulo 3, suelos. México, 2012.

http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap3_suelos.pdf. Visitado por última vez: 30 abril 2016.



SEMARNAT. La remediación de sitios contaminados. México, 2012.

<http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD001404.pdf>. Visitado por última vez: 13 mayo 2016.

Silcox, G. D.; Larsen, F. S.,. *Kinetics of hydrocarbon and pesticide removal from clay soils during thermal treatment in a pilot-scale rotary kiln*. WasteManagement, 15 (5-6), EU, 1995.

Smith, L.A.; Mearis; A. *Remedial options for metal contaminated sites*. Lewis, Publishers. Boca Raton, Florida, 1995.

Soil Survey Staff. *Keys to soil taxonomy*. Second edition, USDA. Natural Resources Conservation Service. US Government Printing Office.

Sposito, Garrison. *The chemistry of Soils*. Oxford University Press. Inglaterra, Oxford, 1989.

Suthersan, S. S. *Remediation Engineering: Design Concepts*. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, 1997.

USEPA. *A citizen's Guide to In Situ Soil Flushin 1996*. <http://infohouse.p2ric.org/ref/07/06188/>. Visitado por última vez 31 oct 2016.

USEPA. *Guía del ciudadano: medidas biocorrectivas*. Ficha tecnológica. EPA-542-F-96-023. 1996.

USEPA. *Office of Solid Waste and Emergency Response Use of Monitored Natural Attenuation at Superfund, RCRA Corrective Action, and Underground Storage Tank Sites*. Directive 9200.4-17P. Washington. DC., 1999.

USEPA. *Office of Solid Waste and Emergency Response, 2001. Treatment Technologies for Site Cleanup: Annual Status Report*. 10th Edition.

USEPA. *Off-Gas Treatment Technologies for Soil Vapor Extraction Systems: State of the Practice*. EPA-542-R-05-028. 2006

Universidad de Murcia. *Remediación de suelos contaminados*. España, 2010.

www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/128510/TIRA.pdf?sequence=1. Visitado por última vez: 05 mayo 2016.

Universidad de New Castle. *Schematic of a permeable reactive barrier (PRB)*. New Castle, Australia, 2013.

<https://www.newcastle.edu.au/research-and-innovation/centre/cgmm/research/georemediation>. Visitado por última vez: 09 julio 2016.

Van Deuren, J.; Wang, Z. *Remediation technologies screening matrix and reference Guide*. 3ª Ed. Technology Innovation Office, EPA, 1997.

Volke Sepúlveda, T.; Velasco, Antonio. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. Publicaciones INEEC, México, D.F., 2002.

Volke, Tania; Velasco, Antonio. *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su restauración*. Publicaciones INEEC, México, D.F., 2005.

Volke, Tania; Velasco, Antonio. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. INE-SERMANAT. Publicaciones INEEC, México, D.F., 2002.

Volke, Tania; Velasco, Antonio. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. INE-SERMANAT, 10. Publicaciones INEEC, México, D.F., 2002.

Volke, Tania; Velasco, Antonio. *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. INE-SERMANAT, 12, 15. Publicaciones INEEC, México, D.F., 2002.

Williams, R. T.; Ziegenfuss, P. S. *Composting of explosives and propellant contaminated soils under thermophilic and mesophilic conditions*. Journal of Industrial Microbiology. 1992.