

01177



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

13
2cf

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO PARA LA
REHABILITACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS
CON HIDROCARBUROS EN MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA (AMBIENTAL)

P R E S E N T A

IBQ. ISMAEL MADRIGAL MONÁRREZ



DIRECTORA: DRA. ROSARIO ITURBE ARGÜELLES



MÉXICO, D. F.

FEBRERO 1998

259030

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

Canek dijo:

Los hombres blancos no saben de la tierra ni del mar ni del viento de estos lugares.

¿Qué saben ellos si noviembre es bueno para quebrar los maizales?

¿Qué saben si los peces ovan en octubre y las tortugas en marzo?

¿Qué saben si en febrero hay que librar a los hijos y a las cosas buenas de los vientos del sur?

Ellos gozan, sin embargo, de todo lo que produce la tierra, el mar y el viento de estos lugares.

Ahora nos toca entender,

cómo y en qué tiempo debemos de liberarnos de este mal.

De Canek. Historia y Leyenda de un Héroe Maya.

Agradecimientos:

Un profundo agradecimiento a la Dra. Rosario Iturbe Argüelles por la dirección y asesoría de este trabajo, así mismo por su apoyo e interés en mi superación académica y profesional, pero sobre todo por su enorme calidad humana.

A los miembros del jurado; Dr. Pedro Martínez Pereda, Dra. Georgina Fernández Villagómez, M. en I. Ana Elisa Silva Martínez y al M. en C. Constantino Gutiérrez Palacios, por el tiempo dedicado para revisar, corregir y enriquecer el trabajo original.

Por el interés mostrado en mi superación y desarrollo profesional agradezco especialmente el apoyo del Dr. Pedro Martínez Pereda.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Instituto de Ingeniería por el apoyo económico que me otorgaron durante mis estudios y en la realización de este trabajo de tesis.

A todo el personal del Instituto de Ingeniería y de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería por su apoyo otorgado durante mis estudios de maestría.

A los compañeros de maestría y de forma especial a todos los compañeros de cubículo; los viejos, los nuevos y los que se han marchado.

A mi familia por haberme apoyado todo el tiempo, pero de forma especial a Margarita por todas las lágrimas y sonrisas compartidas.

A Elsa, Gloria, Germán y Rose por su gran apoyo y amistad, y por haber compartido juntos esta etapa de nuestras vidas.

A Mary Jane y Emilín por mantenerse en el viaje en las buenas y en las malas.

Dedicatoria

*La lágrima fue dicha.
Olvidemos el llanto y empecemos de nuevo,
con paciencia,
observando a las cosas
hasta hallar la menuda diferencia
que las separa
de su entidad de ayer
y que define
el transcurso del tiempo y su eficacia.*

*Habrá palabras nuevas para la nueva historia
y es preciso encontrarlas antes de que sea tarde.*

A Rosario, mi madre

ÍNDICE DEL CONTENIDO

	página	
Agradecimientos	iv	
Índice de tablas	viii	
Índice de figuras	x	
Nomenclatura	xi	
Dependencias del Gobierno de México	xiii	
CAPÍTULO I		
1.0	Introducción	1
1.1	Antecedentes	2
1.2	Justificación	3
1.3	Objetivo general	4
1.4	Objetivos específicos	4
1.5	Límites y alcances	4
1.6	Descripción de cada capítulo	5
CAPÍTULO II PROBLEMÁTICA DE LOS DERRAMES PETROLEROS		
2.1	Características del subsuelo	7
2.2	Contaminación del subsuelo	9
2.3	Contaminación del agua subterránea	10
2.4	Efectos toxicológicos y de salud de los hidrocarburos	12
2.5	Fuentes de contaminación por hidrocarburos a nivel internacional	17
2.6	Situación en México	20
2.6.1	Antecedentes de la industria petrolera	20
2.6.2	Creación de Petróleos Mexicanos	22
2.6.3	Actividades de la industria petrolera en México y sus efectos adversos al medio ambiente	24
2.6.4	Fuentes de contaminación de suelos y acuíferos por hidrocarburos en instalaciones petroleras en México	27
2.6.5	Actividades desarrolladas por Petróleos Mexicanos en materia de protección ambiental	28
2.6.6	Resumen de los trabajos de rehabilitación de sitios contaminados desarrollados por Ferrocarriles Nacionales	30
2.6.7	Resumen de los trabajos desarrollados por la Comisión Federal de Electricidad en materia de protección ambiental	32
CAPÍTULO III MARCO LEGAL		
3.1	Generalidades sobre la legislación ambiental mexicana y norteamericana	34
3.2	Legislación ambiental mexicana	35
3.2.1	Legislación mexicana sobre residuos peligrosos	36
3.2.2	Legislación mexicana sobre contaminación del suelo	37
3.3	Legislación ambiental norteamericana	41
3.3.1	Legislación norteamericana sobre residuos peligrosos	41
3.3.2	Legislación norteamericana sobre contaminación del suelo	45
3.4	Comparaciones y contrastes entre la ley ambiental mexicana y la ley ambiental norteamericana	46

CAPÍTULO IV METODOLOGÍA PARA LA PLANEACIÓN Y ESTABLECIMIENTO DE SISTEMAS DE REHABILITACIÓN

4.1	Actividades preliminares	47
4.2	Investigación sobre rehabilitación	50
4.3	Estudio de factibilidad	54
4.4	Diseño y desarrollo de las actividades de rehabilitación	57

CAPÍTULO V CRITERIOS DE LIMPIEZA PARA LA REHABILITACIÓN DE SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA

5.1	Revisión de los criterios utilizados para el establecimiento de los niveles de limpieza en la rehabilitación de sitios contaminados	58
5.2	Desarrollo y establecimiento de los criterios de limpieza para suelo y agua subterránea	60
5.3	Criterios de evaluación y limpieza para suelo y agua subterránea establecidos por Canadá	73
5.4	Situación en México	78

CAPÍTULO VI SINOPSIS DE TECNOLOGÍAS DE REHABILITACIÓN PARA SITIOS CONTAMINADOS

6.1	Clasificación de los procesos de tratamiento para contaminantes	82
6.2	Desarrollo de las tecnologías de rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados	83
6.3	Datos del suelo y del agua subterránea requeridos para la selección, diseño y operación de las tecnologías de rehabilitación.	87
6.4	Tecnologías de rehabilitación <i>en el sitio (in situ)</i> para suelos y acuíferos contaminados	93
6.4.1	Sistema de extracción por vapor	93
6.4.2	Lavado de suelo <i>en el sitio (in situ)</i>	107
6.4.3	Biorremediación	114
6.5	Tecnologías de rehabilitación <i>fuera del sitio (ex situ)</i> para suelos y acuíferos contaminados	123
6.5.1	Lavado de suelo <i>fuera del sitio (ex situ)</i>	123
6.5.2	Control hidráulico y sistemas de bombeo y tratamiento	137
6.5.3	Tratamiento térmico	151
6.5.4	Solidificación/Estabilización	165

CAPÍTULO VII METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN MÉXICO

7.1	Evaluación del sitio contaminado	180
7.1.1	caracterización del lugar	180
7.1.2	Visita de prospección	180
7.1.3	Muestreo	181
7.1.4	Diagnostico	182
7.2	Establecimiento de los objetivos de limpieza	182
7.3	Selección de la tecnología de rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados	183

CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1	Conclusiones	185
8.2	Recomendaciones	191

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÍNDICE DE TABLAS

		página
Tabla 2.1	Efectos a la salud debido a la exposición de hidrocarburos.	14
Tabla 2.2	Principales derrames accidentales (de al menos 10 millones de galones) de hidrocarburos a nivel internacional.	17
Tabla 2.3	Informes de actividades de PEMEX en materia de rehabilitación de sitios contaminados.	29
Tabla 2.4	Instalaciones de Ferrocarriles Nacionales de México en la República Mexicana.	31
Tabla 5.1	Criterios utilizados en el establecimiento de los niveles de limpieza en la rehabilitación de sitios contaminados.	59
Tabla 5.2	Clasificación de los niveles de limpieza utilizados en los Estados Unidos de Norteamérica.	66
Tabla 5.3	Criterios de evaluación para suelo y agua implementados por Canadá.	74
Tabla 5.4	Criterios de descontaminación para suelo implementados por Canadá.	75
Tabla 5.5.	Criterios de descontaminación para agua implementados por Canadá.	76
Tabla 5.6	Criterios de calidad necesarios para una fuente de agua potable, de acuerdo con la calidad requerida para uso o aprovechamiento del agua de la CNA.	80
Tabla 6.1	Propiedades físicas y químicas de algunos compuestos orgánicos encontrados en el agua subterránea.	91
Tabla 6.2	Variables en el Sistema de Extracción por Vapor.	101
Tabla 6.3	Efectividad del sistema SVE sobre un grupo general de contaminantes.	104
Tabla 6.4	Contaminantes compatibles con el sistema de lavado de suelo <i>ex situ</i> .	112
Tabla 6.5	Factores que deben ser considerados en la evaluación de la biorremediación <i>ex situ</i> como una alternativa de tratamiento para sitios contaminados.	11+
Tabla 6.6	Factores que deben ser considerados en la evaluación de la biorremediación <i>in situ</i> como una alternativa de tratamiento para sitios contaminados.	119
Tabla 6.7	Distribución de contaminantes entre partículas del suelo.	128
Tabla 6.8	Solventes utilizados en los procesos de extracción química en suelos contaminados.	131
Tabla 6.9	Compuestos factibles a ser tratados con el lavado de suelo <i>ex situ</i> y extracción química.	132
Tabla 6.10	Factores que deben ser considerados en la evaluación del sistema de lavado de suelo <i>ex situ</i> y extracción química.	133
Tabla 6.11	Factores que deben ser considerados en la evaluación de los sistemas de extracción y tratamiento de agua subterránea.	146
Tabla 6.12	Sitios del Programa Superfondo donde se han utilizado sistemas de control hidráulico y bombeo y tratamiento para las actividades de rehabilitación.	148
Tabla 6.13	Ventajas y limitaciones de los sistemas de intersección.	149
Tabla 6.14	Ventajas y limitaciones de los sistemas de extracción.	150
Tabla 6.15	Factores que deben ser considerados en la evaluación del sistema de venteo térmico de suelos a bajas temperaturas.	153
Tabla 6.16	Factores que deben ser considerados en la evaluación del sistema de tratamiento térmico a altas temperaturas.	155

ÍNDICE DE TABLAS

	página
Tabla 6.17 Efectividad de la incineración sobre un grupo general de contaminantes para suelo, sedimentos, lodos y líquidos.	161
Tabla 6.18 Efectividad del tratamiento térmico sobre contaminantes específicos.	162
Tabla 6.19 Panorama internacional : Procesos de incineración.	164
Tabla 6.20 Aplicación de las tecnologías de estabilización/solidificación.	174
Tabla 6.21 Compatibilidad de algunas clases de residuos con las diferentes técnicas de estabilización/solidificación	175

ÍNDICE DE FIGURAS

página

Figura 2.1	Zonas del subsuelo.	6
Figura 2.2	Distribución de los hidrocarburos en el subsuelo.	8
Figura 2.3	Rutas potenciales de migración de los hidrocarburos en el subsuelo.	9
Figura 4.1	Esquema conceptual para la toma de decisión de alternativas en la rehabilitación de un sitio contaminado.	38
Figura 4.2	Desarrollo de alternativas.	44
Figura 6.1	Acciones de rehabilitación en sitios del <i>Programa Superfondo</i> : decisiones de disposición vs decisiones de tratamiento.	72
Figura 6.2	Desarrollo de técnicas de tratamiento.	73
Figura 6.3	Resumen de las tecnologías de rehabilitación utilizadas en los sitios del <i>Programa Superfondo</i> durante 1994.	74
Figura 6.4	Sistema de Extracción por Vapor.	80
Figura 6.5	Pozo de extracción vertical.	81
Figura 6.6	Sistema de Lavado de Suelo <i>in situ</i> por medio de pozos verticales.	93
Figura 6.7	Sistema de Lavado de Suelo <i>in situ</i> por medio de sistemas de aspersión.	93
Figura 6.8	Esquema general del Sistema de Lavado de suelo <i>ex situ</i> y Extracción Química.	109
Figura 6.9	Selección de las tecnologías de lavado de suelo <i>ex situ</i> y extracción con solventes en sitios del <i>Programa Superfondo</i> .	121
Figura 6.10	Sistema dren colector.	123
Figura 6.11	(a) Vista aérea de una pluma de contaminación de LNAPLs y una trinchera de intersección (b) Corte seccional de una trinchera y bomba flotante utilizada para capturar productos flotantes y abatir el nivel freático.	125
Figura 6.12	Solubilidad de hidrocarburos en agua.	126
Figura 6.13	Pozo de recuperación.	129
Figura 6.14	Sistema de recuperación de bombeo doble y aspersión de aire para acuíferos contaminados con hidrocarburos flotantes y disueltos.	132
Figura 6.15	Proceso de incineración móvil/transportable.	142
Figura 6.16	Elementos genéricos de un típico proceso de solidificación/estabilización <i>ex situ</i> .	152
Figura 6.17	Elementos genéricos de un típico proceso de solidificación/estabilización <i>in situ</i> .	153

NOMENCLATURA

ASTM	Sociedad Americana para Prueba de Materiales
BOD	Demanda Bioquímica de Oxígeno
BTEX	Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno
CCMER	Consejo Canadiense de los Ministros del Ambiente
CERCLA	Ley Global de Responsabilidad, Compensación y Respuesta al Medio Ambiente
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CHEX	Extracción Química
CNA	Comisión Nacional del Agua
COD	Demanda Química de Oxígeno
CWA	Ley de Aguas Limpias
ρ_a	Densidad Aparente
ρ_r	Densidad Real
DNALP	Líquidos No Acuoso Mas Densos que el Agua
DOE	Departamento de Energía de los Estados Unidos
DOT	Departamento de Transporte de los Estados Unidos
EX SITU	Fuera del lugar
FNM	Ferrocarriles Nacionales de México
GAC	Unidades de Carbón Activado
HAP	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
HPNA	Hidrocarburos Polinucleoaromáticos
HSWA	Reforma de los Residuos Sólidos y Peligrosos
HITT	Tratamiento Térmico a Altas Temperaturas
HTP	Hidrocarburos Totales del Petróleo
IN SITU	En el lugar
K_{oc}	Coefficiente de Partición Suelo/Agua
K_{ow}	Coefficiente de Partición Octanol/Agua
KW	Kilowatts
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LNAPLs	Líquidos No Acuoso Menos Densos que el Agua
LTTS	Venteo Térmico de Suelos a Bajas Temperaturas
MENVIQ	Ministerio del Ambiente de Quebec
MW	Megawatts
η	Porosidad
NAPLs	Líquidos No Acuoso
NCP	Plan Nacional de Contingencias
NEPA	Ley Nacional de Políticas Ambientales
NOM	Norma Oficial Mexicana

NOMENCLATURA

NPL	Lista Nacional de Prioridades
OFF SITE	Fuera del Sitio
ON SITE	Sobre el Sitio
PAH	Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares
PCBs	Bifenilos Policlorados
PVC	Policloruro de Vinilo
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PPM	Partes por Millón
RCRA	Ley de Conservación y Recuperación de Recursos
RI/FS	Investigación de la rehabilitación y estudio de factibilidad
SEMARNAP	Secretaria del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca
SARA	Ley de Reautorización y Reformas al <i>Superfondo</i>
SF	Lavado de Suelo <i>in situ</i>
S/S	Solidificación/Estabilización
SVE	Sistema de Extracción por Vapor
SVOCs	Compuestos Orgánicos Semivolátiles
SW	Lavado de suelo <i>ex situ</i>
SWDA	Ley sobre Disposición de Residuos Sólidos
TCE	Tricloroetileno
TOC	Carbono Orgánico Total
US DoF	Departamento de Defensa de los Estados Unidos
USEPA	Agencia Norteamericana de Protección Ambiental
UST	Tanques de Almacenamiento Subterráneo
VOCs	Compuestos Orgánicos Volátiles

DEPENDENCIAS DEL GOBIERNO DE MÉXICO

- CFE** La Comisión Federal de Electricidad es una dependencia del gobierno de México encargada de organizar y dirigir un sistema nacional de generación, transmisión, y distribución de la energía eléctrica, basado en principios técnicos y económicos, sin propósitos de lucro.
- CNA** La Comisión Nacional del Agua es la instancia del gobierno federal que administra y conserva las aguas nacionales conforme a las condiciones sociales, económicas y políticas del país.
- FNM** Ferrocarriles Nacionales de México es un organismo público descentralizado con patrimonio y personalidad jurídica propios cuyo objeto es la administración y operación de los ferrocarriles mexicanos.
- PEMEX** Petróleos Mexicanos es la dependencia del gobierno de México encargada de la exploración, explotación, transformación industrial, transporte, almacenamiento, distribución y venta de primera mano del petróleo, gas natural, productos derivados y materias primas básicas de acuerdo con la Ley Reglamentaria del Artículo 37 Constitucional en el ramo del petróleo y sus reglamentos.
- SEMARNAP** La Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca es un organismo del gobierno mexicano encargado de la protección y conservación del ambiente.

CAPITULO I

1.0 INTRODUCCIÓN

El hombre vive cerca y depende del suelo en gran medida. Es uno de los recursos naturales más delgados y vulnerables y con respecto del cual, deliberada o inadvertidamente, el hombre ha provocado mayores impactos.¹

El medio ambiente ha estado sujeto a la presencia de hidrocarburos desde que la vida se originó hace más de 3 000 millones de años. Los hidrocarburos son parte del protoplasma de los seres vivos y lo que se conoce como petróleo, es el producto final de una serie de transformaciones físicas, químicas, biológicas y geológicas de la materia orgánica producida por la muerte de los seres vivos.²

La definición de petróleo - del latín *petra* (piedra) y *oleum* (aceite), aceite de piedra -,³ es la mezcla compleja de cientos de compuestos individuales. La composición del mismo varía de acuerdo con el origen, tanto geológico como geográfico. El petróleo, dependiendo de la fuente, varía en composición química, color, viscosidad, gravedad específica y otras propiedades fisico-químicas. Este concepto es utilizado como sinónimo de los términos: aceite mineral, aceite crudo, crudo o aceite, aunque existen otros tipos de aceites que no son de origen fósil y por ende son diferentes del petróleo.²

Durante décadas no se consideró que la industrialización, además de propiciar el bienestar de la población, producía también una degradación de los sistemas naturales. El impacto ambiental producido por los energéticos comprende los efectos de las fases de un ciclo energético como la exploración, la extracción, el refinamiento, el consumo y la producción de desechos. Cabe recordar que el carbón, el petróleo y el gas natural son los llamados combustibles de origen fósil, y que proveen el 90 por ciento de la energía mundial requerida; de éstos, el petróleo es el de mayor consumo.⁴

El desarrollo de tecnologías ambientales para el control de la contaminación ya permite en la actualidad atender derrames casi de inmediato, por lo que es posible detener el avance de los contaminantes, además de la posibilidad de recuperar el aceite perdido y retornarlo al proceso. En cambio derrames que ocurrieron en el subsuelo en el pasado son tan antiguos como la industria petrolera, y por el grado de intemperización que tiene se hace muy difícil su tratamiento.

Los derrames de petróleo presentan un impacto negativo al medio ambiente ya que entre sus componentes existen altas concentraciones de sustancias contaminantes. En la actualidad se han desarrollado diferentes tecnologías para el tratamiento del subsuelo y acuíferos. Los procesos más

comúnmente utilizados para la rehabilitación de los suelos contaminados son los procesos biológicos, fisico-químicos y térmicos.⁵

Para analizar las estrategias de desarrollo a seguir en cada país es necesaria la evaluación objetiva de los riesgos que presentan las fuentes de energía. En los últimos años ha comenzado a cobrar peso, el punto de vista de acuerdo con el cual el desarrollo económico debe satisfacer necesidades actuales sin comprometer por ello el futuro, únicamente un desarrollo de este tipo puede ser llamado sostenido en un sentido amplio.

En la actualidad, no existe fuente energética que no implique un costo ambiental. Los combustibles fósiles continúan siendo la principal fuente de energía utilizada en los procesos industriales. Es por tanto necesario tomar en cuenta el costo ambiental que la explotación de cada una de las fuentes de energía implica, al momento de diseñar una política de desarrollo sostenido. Es necesario recordar además, que el costo ambiental lleva implícito un costo sobre el bienestar humano.⁵

1.1 Antecedentes

El sistema energético mexicano depende en un 83.3 por ciento del petróleo crudo, derivados del petróleo y gas natural. El consumo de éstos se localiza mayoritariamente en el propio sector petrolero, en el sector eléctrico y en las grandes concentraciones urbanas, en particular en el transporte y la industria. Por lo anterior, es lógico pensar que las zonas de mayor riesgo de contaminación por hidrocarburos son las zonas cercanas a complejos petroquímicos y zonas industriales. Sin embargo, la producción nacional y la introducción al mercado de innumerables productos de uso muy extendido, tales como, desengrasantes, limpiadores, removedores de pinturas, solventes para ceras y grasas, pesticidas, etc., ha hecho que el problema se haya extendido hacia otras zonas de México.

En México existen diferentes fuentes generadoras de contaminación por hidrocarburos, para este trabajo de investigación se selecciono con base en el volumen total de hidrocarburos que manejan en sus diferentes actividades, a tres principales generadores: Petróleos Mexicanos (PEMEX), Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Ferrocarriles Nacionales de México (FNM), siendo PEMEX el principal generador.

Por mandato constitucional Petróleos Mexicanos produce y suministra en exclusiva estos productos. Está por lo tanto en manos de PEMEX una buena parte de la responsabilidad y de la posibilidad de atenuar esos impactos.

PEMEX es la empresa más grande de México y una de las diez más grandes del mundo, tanto en términos de activos como de ingresos. Con base en el nivel de reservas y su capacidad de extracción y refinación, México es hoy una potencia petrolera, PEMEX es una de las cinco corporaciones más grandes del mundo; sexto productor de petróleo crudo y noveno en gas natural.⁸

Petróleos Mexicanos, como industria petrolera dinámica, enfrenta muy diversos retos, presentes y futuros, en materia ambiental. A futuro no sólo tendrá que continuar satisfaciendo los requerimientos energéticos del país, cada vez mayores, sino que las constricciones de carácter ambiental, habrán de imponer mayores condicionantes sobre la calidad de los combustibles; sobre los procesos de producción y por ende sobre la tecnología a emplear; sobre los mecanismos de distribución y comercialización.⁹

1.2 Justificación

Las actividades de la industria petrolera, a nivel mundial, son consideradas como una de las más complejas debido a la diversidad de operaciones que implica su desarrollo. Esta situación la hace una de las industrias de más alto riesgo y potencialmente contaminadora. Petróleos Mexicanos (PEMEX), no ha escapado a esta situación. Es necesario mencionar que la protección del medio ambiente en esta industria mexicana ha sufrido un considerable rezago, ya que durante muchas décadas, desde la misma expropiación petrolera, se consideró al medio ambiente como algo que podía reestablecerse por sí sólo o bien que carecía de valor. Existía la mentalidad de que la producción era lo más importante para el país, dejando en segundo término la preservación de los recursos naturales.⁶

Por lo anterior, en la actualidad muchas de las actividades que realiza PEMEX en materia de protección ambiental, se dirigen no sólo a la prevención sino también a su corrección. Así también, hasta el momento no existen datos que revelen la realización de trabajos específicos de rehabilitación de sitios contaminados por PEMEX, ya que únicamente se tiene conocimiento de trabajos que este organismo ha desarrollado por medio de sus memorias de labores, los cuales presentan información muy general y limitada.

Por otra lado, actualmente en México existe poca experiencia para la atención de sitios contaminados, ocasionados por el manejo inadecuado, tanto de residuos, como de procesos industriales. Los lineamientos sobre procedimientos técnicos apropiados para la evaluación de riesgo de sitios potencialmente contaminados y las tecnologías para la descontaminación o el aislamiento de estos sitios se han iniciado hace muy poco tiempo. Además, las autoridades ambientales carecen de un sistema de información que sustente la toma de decisiones con respecto a la evaluación de riesgo ambiental y a la salud humana, el desarrollo de prioridades de planeación, control y monitoreo, así como para la reactivación económica de los sitios contaminados dentro de la planeación urbana.

Finalmente las autoridades ambientales requieren desarrollar, en el marco de un concepto integral de prevención y control de la contaminación, los instrumentos legales en materia de sitios contaminados.⁷

De lo anterior se considera indispensable que el país cuente con los recursos humanos y tecnológicos, tanto para prevenir como para rehabilitar los sitios contaminados por hidrocarburos.

1.3 Objetivo general

El objetivo general que persigue la elaboración de este trabajo es proporcionar una herramienta de consulta para la rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados por hidrocarburos, de acuerdo con las posibilidades técnicas y económicas de México.

1.4 Objetivos específicos

- Analizar la normatividad ambiental mexicana en materia de residuos peligrosos y contaminación de suelos.
- Examinar la normatividad ambiental norteamericana en materia de residuos peligrosos y contaminación de suelos.
- Presentar los trabajos realizados por PEMEX, CFE y FNM en materia de rehabilitación de sitios contaminados.
- Presentar una revisión de las tecnologías de rehabilitación más comúnmente utilizadas en los programas de limpieza de sitios contaminados en Estados Unidos, Canadá y Europa.

1.5 Límites y alcances

Este trabajo, presenta una revisión bibliográfica de varios aspectos relacionados con la contaminación de sitios por hidrocarburos y su rehabilitación. La decisión de la tecnología más adecuada para rehabilitar un suelo o un acuífero contaminado requiere del conocimiento previo de las características hidrogeológicas del sitio así como de las propiedades físicas y químicas de los compuestos que se desea remover. El objetivo del presente trabajo es, como se comentó anteriormente, servir como un elemento de consulta que permita tener un conocimiento más amplio de las tecnologías para la rehabilitación de sitios contaminados (suelos y acuíferos) y del marco legal que envuelve dichas actividades, a fin de que en cada caso se tenga la posibilidad de elegir la más adecuada.

1.6 Descripción de cada capítulo

Capítulo I

Se mencionan antecedentes sobre la importancia de las actividades de la industria petrolera en México, se señalan además los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este trabajo, sus alcances y por último se describe el contenido de cada capítulo.

Capítulo II

En este capítulo, se describen los principales mecanismos de transporte de contaminantes en el subsuelo y en el agua subterránea. Así mismo, se mencionan los antecedentes de la industria petrolera en México y sus efectos adversos al ambiente. Finalmente se presenta un resumen de los trabajos emprendidos por PEMEX, CFE y FNM en materia de rehabilitación de sitios contaminados.

Capítulo III

La intención de este capítulo es presentar los aspectos más relevantes de la legislación ambiental de México y de los Estados Unidos en materia de residuos peligrosos y contaminación de suelos. Se presenta además, una evaluación que incluye comparaciones y contrastes entre las legislaciones ambientales de ambos países a fin de señalar la habilidad que cada país tiene para superar o limitar la contaminación del suelo.

Capítulo IV

En este capítulo se describe la metodología utilizada por Estados Unidos para la toma de decisión más adecuada de las posibles alternativas de tratamiento y la evaluación de cada una de ellas desde el punto de vista técnico y económico.

Capítulo V

Se presentan aquí, los criterios de limpieza utilizados en la rehabilitación de sitios contaminados y las metodologías utilizadas para su establecimiento. Finalmente se presenta la situación actual en México en lo que se refiere al establecimiento de los criterios de limpieza.

Capítulo VI

En este capítulo se presenta una descripción de cada una de las tecnologías de rehabilitación seleccionadas, se señala su aplicabilidad, sus ventajas y limitaciones y finalmente su situación actual.

Capítulo VII

En este capítulo se presentan algunos lineamientos que deben seguirse tanto para la evaluación como para la rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados.

Capitulo VIII

La intención de este capítulo es presentar las metas alcanzadas en este trabajo de investigación, las ideas más importantes y el por qué es importante el hecho de emprender actividades de rehabilitación en México. Se proponen además algunas recomendaciones.

CAPITULO II

PROBLEMÁTICA DE LOS DERRAMES PETROLEROS

Los hidrocarburos, que se definen como un producto del petróleo crudo,¹⁰ son ampliamente utilizados como combustibles, solventes y materias primas en las industrias textiles, farmacéuticas y de plásticos. Representan una de las fracciones de los petroquímicos más comúnmente utilizados en el mundo industrializado.¹¹ Estos materiales son manejados en múltiples ocasiones desde los procesos de extracción, producción hasta su venta final. Durante cada uno de estos procesos existen numerosas oportunidades para la introducción de esos productos al medio ambiente por lo que *continuamente son liberados accidentalmente al suelo y al agua subterránea, lo que representa un seria amenaza a la calidad del ambiente.*^{12,13}

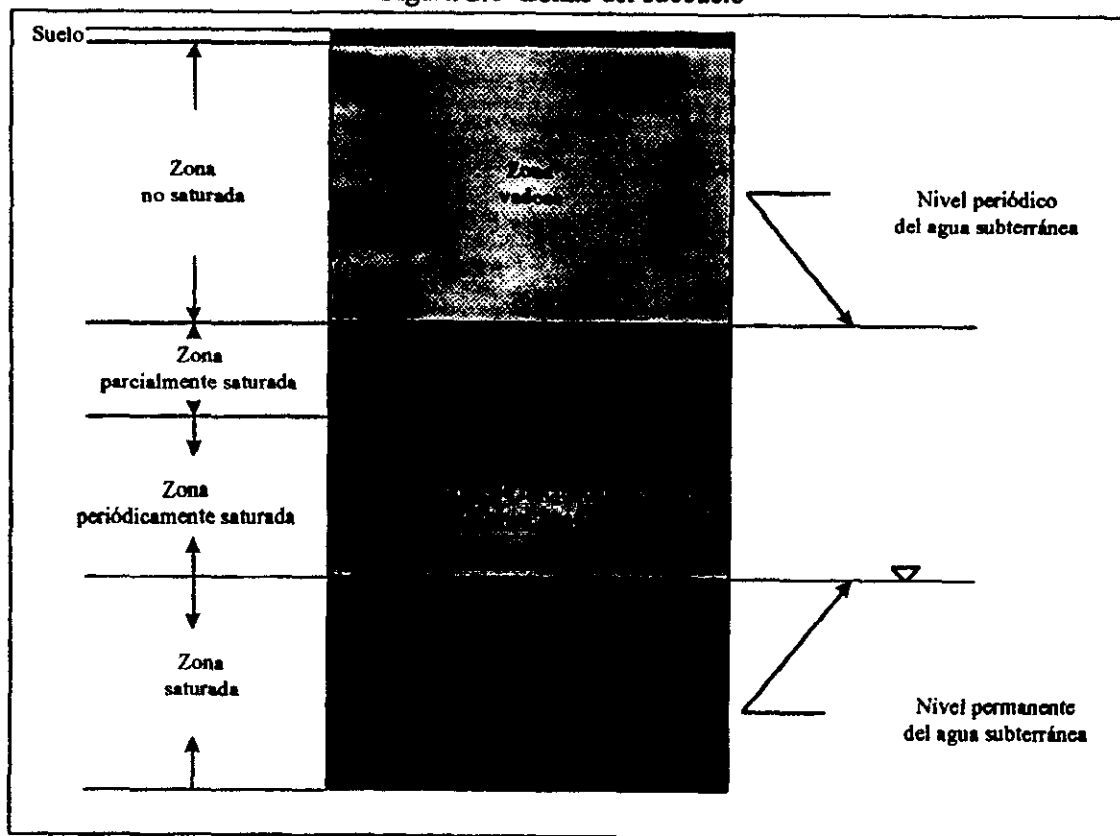
Las características fisicoquímicas de los hidrocarburos son muy variadas. Su peso molecular así como su punto de ebullición varia desde un valor muy bajo hasta uno muy alto; pueden ser viscosos o ligeros, muy volátiles o relativamente no volátiles, altamente solubles o insolubles. Muchos de los hidrocarburos y sus mezclas tienen también menor densidad que el agua. Esta variabilidad en las características fisicoquímicas causan que el comportamiento de los hidrocarburos individuales así como las mezclas de diferentes hidrocarburos en el subsuelo sea también muy variable.¹²

Este capítulo trata sobre la problemática de la contaminación del suelo y el agua subterránea por hidrocarburos, la dispersión de hidrocarburos en suelos y acuíferos, así como la situación actual en México en materia de rehabilitación de sitios contaminados.

2.1 Características del subsuelo

El comportamiento de los hidrocarburos en el subsuelo depende tanto de sus características fisicoquímicas como de las propias de cada estrato. Las diferentes zonas del subsuelo se presentan esquemáticamente en la Figura 2.1.

Figura 2.1 Zonas del subsuelo



Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹⁴

La capa superior que es el horizonte orgánico, es una capa delgada de espesor variable, por lo general entre 30 y 70 cm.

Inmediatamente por debajo de la zona orgánica, se encuentra la capa superior de suelo donde existe la zona no saturada o vadosa. Los espacios intersticiales en esta zona están parcialmente llenos de agua y de aire. Dependiendo del tipo de suelo, esta zona es moderadamente aireada y es rica en actividad microbiana.¹⁴

Por debajo de la zona vadosa, el suelo empieza a incrementar su grado de saturación y anaerobiosis. El grado de saturación aumenta hasta alcanzar un 100 por ciento. La zona capilar se considera parte de la zona vadosa aunque por lo general está completamente saturada; sin embargo, la saturación se debe a capilaridad y fluctuaciones con las variaciones del nivel freático. La tensión superficial actúa atrayendo una cantidad de agua por arriba de lo normal de los espacios intersticiales insaturados incrementando el grado de saturación del suelo arriba del nivel freático.¹⁴

La zona de fluctuación llega a estar parcialmente saturada cuando el agua subterránea se eleva durante los periodos de fuertes escurrimientos superficiales.

La zona inferior está permanentemente saturada y su frontera superior se denomina nivel freático, que se define como la línea en la cual se tiene la presión atmosférica.¹⁴

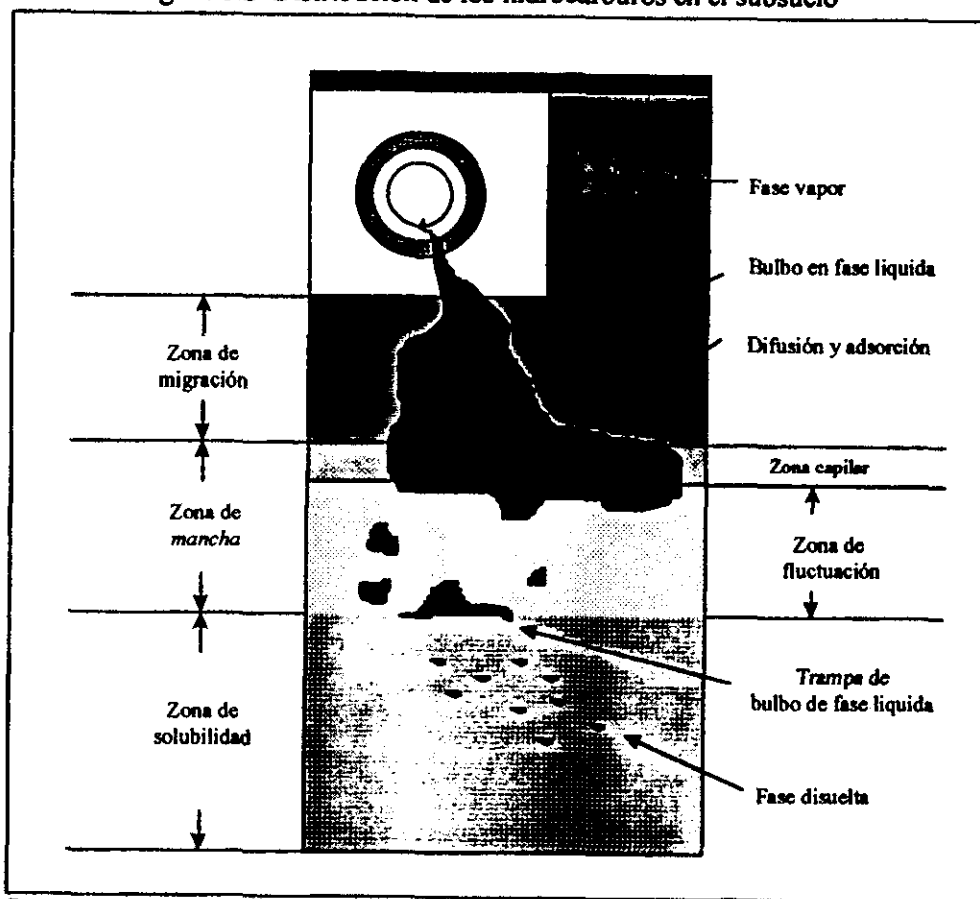
2.2 Contaminación del subsuelo

Una vez que los hidrocarburos empiezan a migrar a través del subsuelo se inicia la interacción con la matriz a través de la cual están migrando. Los hidrocarburos se pueden presentar en el subsuelo en cualquiera de las siguientes fases: (1) fase vapor, (2) fase de bulbo líquido, (3) fase adsorbida y (4) fase disuelta.⁹ Las interacciones y el grado en que ocurren son una función de las características fisicoquímicas de los propios hidrocarburos y de la matriz envolvente.¹⁴

De acuerdo con su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: aquellos cuya densidad es menor que la del agua se denominan ligeros (LNAPLs, por sus siglas en inglés) mientras que a los de una densidad mayor a la del agua se les conoce como densos (DNAPL, por sus siglas en inglés). Esta clasificación es importante ya que es lo que determina el comportamiento de los contaminantes en el acuífero.⁵

En la primera etapa de migración, el petróleo migra principalmente de forma descendente bajo la influencia de las fuerzas gravitacionales. Durante esta etapa, las fuerzas capilares producen alguna migración lateral.¹⁵ En la zona vadosa, los hidrocarburos altamente volátiles tienden a volatilizarse y llegan a ser parte del ambiente de la zona vadosa. Aquellos hidrocarburos que tienen una gran afinidad por la matriz sólida del suelo en la cual están migrando tienden a adsorberse. Los hidrocarburos que son muy solubles en agua, tienden a disolverse en la zona vadosa, cuyas partículas de suelo se cubren y migran en el interior de los poros, creando una fase residual. Si el volumen de hidrocarburos introducido al subsuelo excede la capacidad residual de la zona vadosa del suelo, éste continuará migrando verticalmente hasta alcanzar el nivel freático o alguna unidad de baja permeabilidad donde se acumulará y extenderá lateralmente. Esta fase separada de hidrocarburo junto a la fase que permanece adsorbida a la matriz del suelo constituye una fuente de contaminación al manto freático. Debido a que la fase separada de hidrocarburo descansa sobre la superficie del nivel freático o más correctamente sobre la superficie de la zona capilar, éste viajará verticalmente con las fluctuaciones estacionales del nivel freático. Estas fluctuaciones crean una zona de alta concentración de hidrocarburos continuamente referida como la "zona de mancha". Los hidrocarburos en los poros del suelo de esta zona están sumergidos y circundados por agua subterránea por al menos una parte del año. Debido a esto, los hidrocarburos están íntimamente asociados con el acuífero actuando como una fuente muy significativa de contaminación disuelta.¹⁴ La Figura 2.2 ilustra la distribución vertical y los grados de movilidad de los hidrocarburos en el subsuelo.

Figura 2.2 Distribución de los hidrocarburos en el subsuelo



Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹⁴

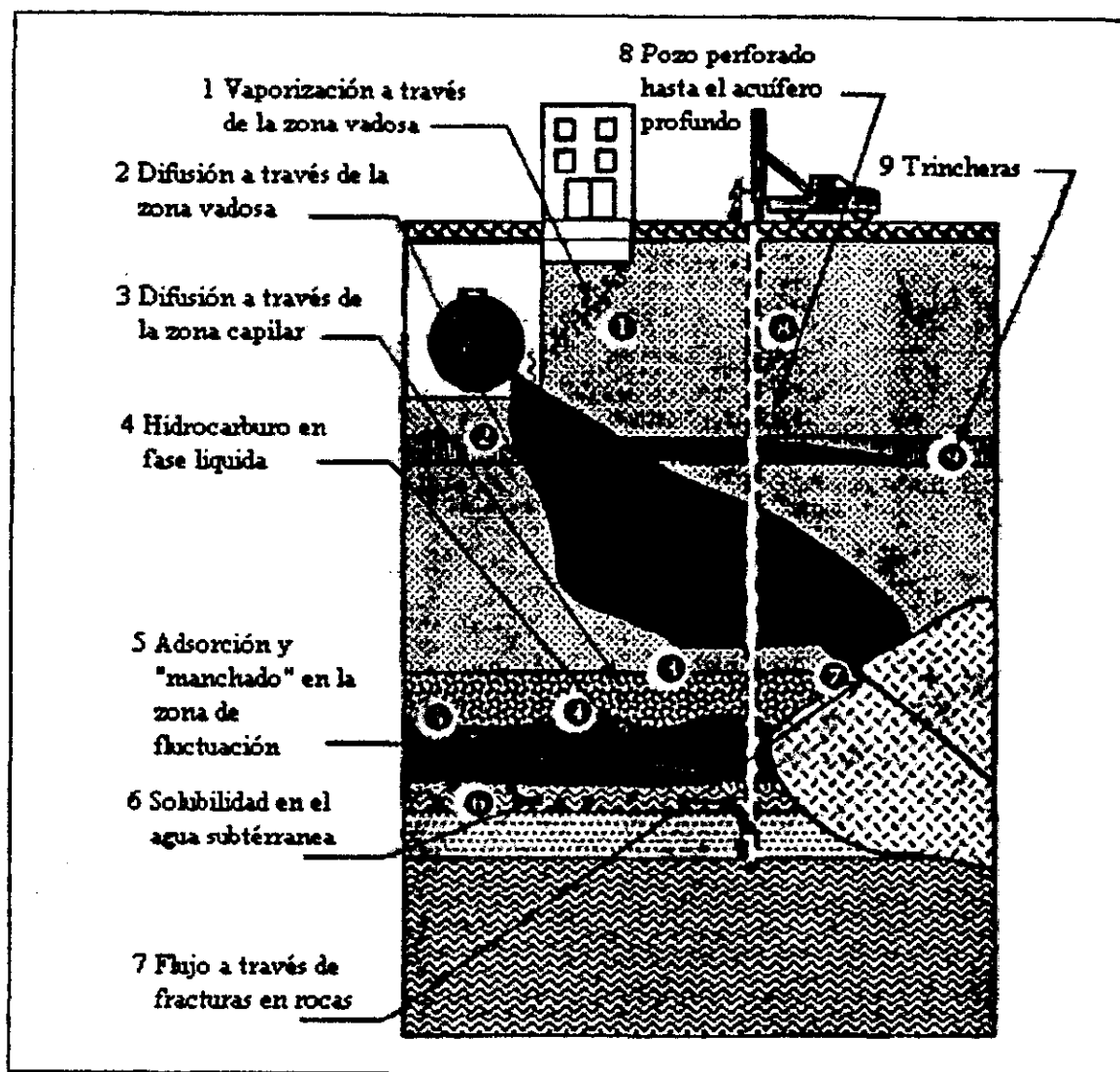
2.3 Contaminación del agua subterránea

Los hidrocarburos que alcanzan el agua subterránea crean una fase disuelta como resultado de su solubilización, la cual es función de la solubilidad de los compuestos que conformen el hidrocarburo. Los compuestos muy solubles son compuestos hidrofílicos, y se disuelven para crear fases disueltas con altas concentraciones. En contraste, los compuestos hidrofóbicos, de baja solubilidad, se disuelven escasamente en el agua subterránea. Si bien el grado con el cual un compuesto individual se disuelve en el agua subterránea es una función de la solubilidad de los compuestos acuosos, en el caso de una mezcla de hidrocarburos, la solubilidad es una función de la fracción molar de los compuestos en toda la mezcla.

Una vez disueltos, los hidrocarburos migran con el flujo del agua subterránea vía transporte dispersivo y advectivo. La velocidad con la cual migra el flujo de hidrocarburos es proporcional a su viscosidad y a la densidad de partícula y conductividad del suelo.¹⁴ Sin embargo, los hidrocarburos disueltos son transportados a una velocidad menor que la velocidad del agua subterránea. El grado

con que la velocidad de los hidrocarburos se retarda con respecto a la velocidad del agua, es una función de su interacción con la matriz del suelo a través del cual está migrando. Más específicamente, es una función de la interacción con la fracción orgánica presente en el suelo. Aquellos compuestos con una baja afinidad por la matriz del suelo migran a velocidades que son relativamente altas en comparación con aquellos compuestos que presentan una gran afinidad por la matriz. Esta variabilidad en el retardo, origina que el compuesto disuelto, en la pluma de contaminación se separe. Los compuestos hidrofílicos y oleofóbicos tienden a ser encontrados sobre el filo principal de la mancha de contaminación, mientras que los compuestos hidrofóbicos y oleofílicos tienden a ser encontrados cerca de la fuente de contaminación.^{12,14} La Figura 2.3 muestra esquemáticamente las rutas potenciales de migración de los hidrocarburos.

Figura 2.3 Rutas potenciales de migración de los hidrocarburos en el subsuelo



Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹⁴

2.4 Efectos toxicológicos y de salud de los hidrocarburos

Los hidrocarburos son peligrosos desde tres diferentes perspectivas: presentan riesgos de explosión e incendio, son tóxicos a la salud humana y dañinos al ambiente, especialmente al agua potable.

Riesgos de explosión e incendio. Solo la gasolina y los productos de *medio destilado* como el queroseno, y productos derivados, poseen riesgos de provocar incendios bajo las condiciones normales encontradas durante las actividades de rehabilitación. Estas actividades incluyen la remoción de tanques, excavaciones, muestreos, perforaciones, mantenimiento de equipo y monitoreo.

Los productos que tienen alta presión de vapor, como la gasolina, tienen el potencial para crear serios problemas en estructuras subterráneas como basamentos, letrinas y estructuras de estacionamientos.

Para los trabajadores rutinariamente expuestos a los vapores de hidrocarburos, la ruta más común de exposición es la inhalación. Las exposiciones a la gasolina por largos periodos han sido asociados con enfermedades del riñón y otros efectos.

Toxicidad. La toxicidad de los hidrocarburos pueden ser aguda o crónica. Una toxicidad aguda es definida como una exposición a altas concentraciones en un periodo corto de tiempo; la toxicidad crónica se define como una exposición a sustancias peligrosas de baja concentración por un periodo largo. Las manifestaciones a intoxicaciones agudas por la exposición a hidrocarburos se pueden presentar en minutos, horas o en pocos días. Los efectos crónicos toman años en aparecer y son frecuentemente muy difíciles de correlacionar con la exposición original.¹⁴

Los efectos y síntomas de la exposición a los hidrocarburos son difíciles de cuantificar sobre una base clínica. Primero, no existe una división clara entre los efectos agudos y crónicos. Los términos “periodo corto” y “periodo largo” son un tanto subjetivos. Segundo, la sensibilidad individual a los hidrocarburos varía enormemente. Tercero, resulta difícil distinguir los síntomas de la exposición a hidrocarburos con los síntomas no relacionados con esta exposición. Los efectos a la salud por hidrocarburos están resumidos en la Tabla 2.1. Muchos de los síntomas listados son poco diferenciables de los síntomas de tensión, gripe, tos y otras dolencias incluyendo resaca.

Los hidrocarburos ligeros, incluyendo benceno y los alquilbencenos son depresivos al Sistema Nervioso Central (CNS, por sus siglas en inglés) en concentraciones relativamente moderadas. Los síntomas generales de la depresión del CNS incluyen pérdida de la coordinación, somnolencia, vómito y mareo. Efectos más severos de exposiciones en periodos cortos incluyen pérdida del conocimiento, hemorragia del pulmón y órganos intestinales, y en casos raros muerte debido a falta de circulación. Algunos compuestos de las gasolinas, especialmente benceno, están asociados con problemas agudos y crónicos en periodos cortos de exposición.¹⁴

Los hidrocarburos son buenos solventes de grasas y sustancias no acuosas utilizadas como aditivos en productos comerciales, como desengrasantes. Desafortunadamente, las grasas y sustancias no acuosas también incluyen los lípidos que componen las células que forman parte a su vez, de las membranas de los tejidos. Las células de la piel están bien protegidas por una membrana impermeable de queratina, pero el tejido epitelial tal como el que compone la cubierta de la garganta y los pulmones son mucho más sensibles. Es por esto que la inhalación de vapor de hidrocarburos pueden causar daño a los tejidos del pulmón.¹⁴

La principal dificultad con el diagnóstico de problemas agudos de salud asociados con la exposición a hidrocarburos es que muchos de los síntomas son esencialmente los mismos de la tensión u otras dolencias relativamente menores: pérdida de la coordinación, mareo, náusea, vómito, diarrea, irritabilidad, pérdida de apetito; son síntomas regularmente comunes que pueden reflejar efectos a la salud sin estar relacionados con la exposición a hidrocarburos.

Compuestos aromáticos. El *Benceno* y sus relativos alquilbencenos son generalmente considerados los compuestos más tóxicos de la gasolina (excepto por el metanol, el cual no es un aditivo de los hidrocarburos). Estos compuestos que pueden llegar a representar más del 50% de peso de la gasolina Premium sin plomo, utilizada en los Estados Unidos, pueden provocar tanto efectos tóxicos como agudos en seres humanos.¹⁴

Los efectos tóxicos agudos incluyen los síntomas típicos de la depresión del CNS resultado de la inhalación de hidrocarburos: dolor de cabeza y náusea. Han sucedido muertes por una simple exposición de 5 a 10 minutos a vapores de benceno con concentraciones de 20,000 ppm. Concentraciones de 3,000 a 7,5000 ppm pueden provocar síntomas tóxicos en una hora. Exposiciones de 50 a 250 ppm de benceno pueden dar como resultado dolor de cabeza y mareo, la recuperación es rápida exponiéndose al aire fresco. Para exposiciones a concentraciones de 25 ppm no se tienen reportados los efectos. El contacto directo de elevadas concentraciones de benceno con la piel pueden causar inflamación y dermatitis.

Los efectos crónicos más importantes a la exposición de benceno por largos periodos son la destrucción de las células, la médula de los huesos y cáncer. Los primeros efectos crónicos son la leucemia reversible (decremento de los glóbulos blancos en la sangre) y la anemia (decremento de los glóbulos rojos).¹⁴

Tabla 2.1 Efectos a la salud debido a la exposición de hidrocarburos

Producto	Compuesto	TLV ¹	Efectos potenciales a la salud
Gasolina	Benceno	10	Nausea, vomito, es un conocido cancerígeno humano.
	Tolueno	100	Depresivo del Sistema Nervioso Central (CNS, por sus sigla en inglés), fatiga, debilidad, irritación de ojos.
	Xilenos	100	Depresivo del CNS, nausea, vomito, irritación de la piel.
	Etilbenceno	100	Depresivo del CNS, nausea, vomito, daños al hígado/riñón.
	n-Hexano	50	Nausea, mareo, vómito, parálisis severa pero reversible.
	Otros isómeros del hexano	500	Irritación de la piel y de la membrana mucosa.
	Octano	300	Debilidad, fatiga, dolor de cabeza, vomito, nausea, anorexia, diarrea.
Productos de Medio Destilado	PAHs		
	Naftaleno	10	Debilidad, temblor, mareo, vomito.
	Benzo(a)antraceno	0	Probable cancerígeno humano.
	Benzo(a)pireno	0	Probable cancerígeno humano.
	Cresoles y Fenoles	5	Irritación de piel, ojos y membrana mucosa.
	N,N-dimethylformamide	10	Irritación de piel, ojos y membrana mucosa.
	Compuestos del Manganeso ²	0.1	Efectos al CNS, no específicos.
Combustibles	PAHs		
	Benzo(a)antraceno	0 ³	Probable cancerígeno humano.
	Benzo(a)pireno	0	Probable cancerígeno humano.
	Crysene	0	Probable cancerígeno humano.

Fuente: Cole G. Mattney, (1994)¹⁴

- ¹ Valores limite; los valores son un promedio tiempo-peso presentados en ppm para vapores.
- ² Para el compuesto ciclopentadienil tricarbonil el cual ha sido usado como aditivo en gasolinas regulares.
- ³ Un valor de cero significa que no es un nivel aceptable de exposición.

PAHs Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos. También llamados Hidrocarburos Poliaromáticos.

El *Tolueno* representa aproximadamente del 4 al 7% de la gasolina. El principal riesgo asociado con la inhalación aguda de altos niveles de tolueno es la depresión del CNS. La exposición controlada de seres humanos sujetos a 200 ppm de tolueno por 8 horas produjo fatiga moderada, debilidad, confusión, lagrimeo y comezón en la piel. A 600 ppm se observaron efectos adicionales, incluyendo euforia, dolor de cabeza, mareo, pupilas dilatadas y nausea. A 800 ppm los síntomas fueron más severos y requirieron varios días para desaparecer. Se han observado efectos dañinos en humanos después de 20 minutos de exposición a 300 ppm y después de 7 horas a 200 ppm. La irritación de ojos es notable a vapores con concentraciones de 300 a 400 ppm.¹⁴

Los *Xilenos* componen cerca del 6 al 8% del peso de las gasolinas. Los principales efectos son similares a los efectos de exposición a otros alquilbencenos: depresión del CNS, pérdida de coordinación, náusea, vómito y dolor abdominal. Los *Xilenos* tienen efectos variables sobre el hígado y los riñones y un efecto de irritación sobre el tracto gastrointestinal. El líquido y el vapor son irritables a la piel y ojos.

Los efectos crónicos de la exposición al *Xileno* se asemejan a los efectos de una exposición aguda, pero son más severos. Han sido reportados dolor de cabeza, irritación, fatiga, desordenes digestivos y desordenes del sueño. La inhalación de altas concentraciones pueden causar temblores, debilitamiento de la memoria, mareo, vértigo, dolor de cabeza y anorexia.

El *Etilbenceno* irrita la piel, ojos y tracto respiratorio superior. La absorción sistemática causa depresión del CNS. Se tienen limitados datos sobre los niveles de exposición humana. A 200 ppm el vapor irrita los ojos; a 2000 ppm, la irritación de ojos y el lagrimeo son inmediatos.¹⁴

Alcanos. Los hidrocarburos alifáticos en general, y los alcanos en particular, tienen un efecto narcótico o depresivo sobre el sistema nervioso humano. La absorción puede ser a través de la piel o los pulmones, pero es mucho más rápido a través de los pulmones. Los síntomas a una intoxicación con hidrocarburos alifáticos son similares a los efectos de los compuestos aromáticos; mareo, náusea, y pérdida de la coordinación. Los síntomas son reversibles exponiéndose al aire fresco. Los alcanos son buenos solventes de lípidos y pueden disolver los lípidos de los tejidos y las células de las membranas si son aspirados por los pulmones.

El *n-Hexano* es el más tóxico de los alcanos. Comprende del 11 al 13% del peso de las gasolinas. La mayor parte de los datos de exposición a los seres humanos son derivados de la exposición de trabajadores a vapores del solvente en sus centros de labores y puede ser no directamente comparable con la exposición en suelo y agua contaminada.¹⁴

Las exposiciones agudas ocurren a través de la inhalación. Los principales síntomas de la exposición son vértigo, dolor de cabeza y náusea. En exposiciones a altas concentraciones tienen un efecto narcótico sobre el CNS. Los efectos pre-narcóticos ocurren en concentraciones de vapor de 1500 a 2500 ppm.

La exposición crónica a los vapores de *n-hexano* causan daño a los nervios musculares. La principal señal clínica de daño a los nervios es el entumecimiento en los dedos de las manos y los pies. Más exposiciones pueden provocar un aumento en el entumecimiento y pérdida de los reflejos musculares. Se desarrolla parálisis reversible con diferentes niveles de gravedad. La recuperación inicia de las 6 a las 12 semanas después de la exposición. Los casos más severos toman años de recuperación.¹⁴

El *Octano*, si se inhala dentro de los pulmones, puede causar rápidamente la muerte debido a un paro cardíaco, parálisis respiratoria y asfixia. El octano tiene un efecto narcótico similar al hexano. Una prolongada exposición a la piel causa quemaduras y ampollamiento de la misma.

El *Isopentano* es un depresivo del CNS. Los efectos de la toxicidad aguda son similares a los efectos de la intoxicación por alcohol: excitación, mareo, dolor de cabeza, náusea, confusión y pérdida de la coordinación. La exposición prolongada provoca pérdida del conocimiento.

Otros aditivos. El Plomo es agregado a algunas gasolinas para proporcionar octano en forma de compuestos: tetrametilplomo, TML, $(\text{CH}_3)_4\text{Pb}$ y tetraetilplomo, TEL, $(\text{CH}_3\text{CH}_2)_4\text{Pb}$. Dos compuestos mas, etilendicloro, EDC, $\text{C}_2\text{H}_4\text{Cl}_2$, y etilendibromo, EDB, $\text{C}_2\text{H}_4\text{Br}_2$, son agregados para prevenir incrustaciones en las válvulas y paredes de los cilindros del motor.¹⁴

El *TEL* es absorbido a través de la piel, inhalado como un vapor o ingerido. Los niveles de exposición de 100 mg/m^3 por 1 hora causa síntomas agudos. Bajos niveles de exposición requieren largo tiempo para producir síntomas. Los síntomas de exposición a *TEL* son vagos y difíciles de diagnosticar. Exposiciones medianas provocan debilidad, fatiga, dolor de cabeza, náusea, vomito y diarrea. Exposiciones prolongadas causan confusión, delirio, agitación maniática y catatónica. Pérdida del conocimiento seguido por la muerte.

El *EDB* ha sido identificado experimentalmente como un cancerígeno para los animales; el EDC tiene propiedades similares, si bien su potencia es mucho menor. Los síntomas de exposición aguda para el EDB incluyen vomito, diarrea, dolor abdominal y depresión del CNS.¹⁴

Productos de medio destilado. Los productos de medio destilado incluyen queroseno, combustibles para avión y diesel. Estos combustibles contienen parafinas (alcanos), cicloparafinas (cicloalcanos), aromáticos y oleofinas de aproximadamente C_9 a C_{20} . Compuestos aromáticos de interés incluyen alquilbencenos, tolueno, naftalenos y PAHs, queroseno y diesel.

Todos estos productos tienen rutas similares de exposición: ingestión, absorción e inhalación. La inhalación de hidrocarburos ligeros produce daños más severos. Altos niveles de vapor son irritantes para ojos, membranas mucosas y tejidos de los pulmones. Los efectos tóxicos agudos son similares a los efectos de exposiciones a hidrocarburos alifáticos: náusea, dolor de cabeza, confusión e irritación del sistema respiratorio. Los vapores son irritantes para los ojos, membranas mucosas y tejidos de los pulmones y pueden tener un efecto sobre la piel por el efecto del solvente.¹⁴

2.5 Fuentes de contaminación por hidrocarburos a nivel internacional.

Las fuentes de contaminación por petróleo son diversas, a nivel mundial se estima que anualmente entre 5 y 10 millones de toneladas de hidrocarburos entran al océano, de ellos casi un 45% ocurre por el manejo del petróleo en barcos (incluyendo accidentes), un 37% proviene de desagües industriales y residuos domiciliarios, y solo el 12% por actividades de explotación y producción.¹⁴⁹ La Tabla 2.2 presenta un listado de los principales derrames accidentales (de al menos 10 millones de galones) de hidrocarburos a nivel internacional.

Tabla 2.2 Principales derrames accidentales (de al menos 10 millones de galones) de hidrocarburos a nivel Internacional

No.	Ubicación	Volumen derramado	Fecha
1.	Terminales, buques petroleros, 8 fuentes totales; Instalaciones fuera de las costas del Golfo Pérsico en Kuwait y en Arabia Saudita.	240.0	Enero 26, 1991
2.	Pozo Ixtoc I. Golfo de México. Ciudad del Carmen. Campeche, México.	140.0	Junio 03, 1979
3.	Plataforma No. 3 en las costas del Golfo Pérsico en Irán.	80.0	Febrero 04, 1983
4.	Pozo Petrolero en Fergana Valley, Uzbekistan a 500 km de Namangan.	80.0	Marzo 02, 1992
5.	Buque petrolero Castillo de Bellver en Costas del Océano Atlántico en Sudáfrica a 110 km al noroeste de Ciudad del Cabo.	78.5	Agosto 06, 1983
6.	Buque petrolero Amoco Cádiz, costas del Atlántico en Porsall, Britania. Francia.	68.7	Marzo 16, 1978
7.	Buque petrolero Odyssey, Costas del Atlántico Norte en Canadá a 1175 km al noreste de St. Johns, Newfoundland.	43.1	Noviembre 10, 1988
8.	Buque petrolero Antantic Empress, Mar Caribe a 32 km al noreste de Trinidad y Tobago.	42.7	Julio 19, 1979
9.	Pozo de Producción D-103, a 800 km al sudeste de Trípoli, Libia.	42.0	Agosto 01, 1980
10.	Buque petrolero Antantic Empress, a 450 km al este de Barbados.	41.5	Agosto 02, 1979
11.	Buque petrolero Torrey Canyon, Escocia, Reino Unido.	38.2	Marzo 18, 1967
12.	Buque petrolero Sea Star, Omán, Golfo de Omán.	37.9	Diciembre 19, 1972
13.	Buque petrolero Irenes Serenade, Mar Mediterráneo en Grecia.	36.6	Febrero 23, 1980
14.	Buque petrolero Texaco Denmark, Mar del Norte en Bélgica.	31.5	Diciembre 07, 1971

No.	Ubicación	Volumen derramado	Fecha
15.	Buque petrolero Hawaiian Patriot, Océano Pacífico en E.U. a 593 km al oeste de las Islas de Kanauí, Hawai.	31.2	Febrero 23, 1977
16.	Tanques de almacenamiento en Shauaybah, Kuwait.	31.2	Agosto 20, 1981
17.	Líneas de conducción, en Usinsk, Rusia.	30.7	Octubre 25, 1994
18.	Buque petrolero Independentza, Estrecho de Bosphorus, Turkia, cerca de Estambul a 0.8 km del puerto de Hydarpassa.	28.9	Noviembre 15, 1979
19.	Buque petrolero Julius Schindler, Islas de Azores en Ponta Delgada, Portugal.	28.4	Febrero 11, 1969
20.	Buque petrolero Urquiola, Puerto de la Coruña, España.	28.1	Mayo 12, 1976
21.	Pozo y línea de conducción No. 126, Ahvazin, Irán.	28.0	Mayo 25, 1978
22.	Buque petrolero Braer, Islas Shetland, Garth Ness, Reino Unido.	25.0	Enero 05, 1993
23.	Buque petrolero Jakob Maersk, Porto de Leisoes, Oporto, Portugal.	24.3	Enero 29, 1975
24.	Tanque de almacenamiento No. 6, Forcados, Nigeria.	23.9	Julio 06, 1979
25.	Buque petrolero de doble cubierta Aegean Sea, Puerto de la Coruña, España.	21.9	Diciembre 03, 1992
26.	Buque petrolero Nova, Golfo Pérsico en Irán a 140 km al sur de la Isla de Kharg.	21.4	Diciembre 06, 1985
27.	Buque petrolero Sea Empress, Bahía Mill cerca de la entrada al puerto de Milford Haven, Reino Unido.	21.3	Febrero 15, 1996
28.	Buque petrolero Wafra, Océano Atlántico en Sudáfrica.	20.2	Febrero 27, 1971
29.	Tanque de almacenamiento, Salisbury, Zimbague.	20.0	Diciembre 11, 1978
30.	Buque petrolero Khark 5, Océano Atlántico a 185 km de las costas de Marruecos.	20.0	Diciembre 19, 1989
31.	Buque de carga Otello, Bahía Tralhavest al este de Vaxholm, Suecia.	18.0	Marzo 20, 1970
32.	Buque petrolero Epic Colocronis, Mar Caribe a 111 km al noroeste de Puerto Rico.	18.0	Mayo 13, 1975
33.	Buque petrolero Sinclair Petrolore, Brasil.	17.6	Diciembre 06, 1960
34.	Buque petrolero Katina P., Bahía de Maputo, Mozambique.	16.0	Abril 17, 1992
35.	Buque petrolero Assimi, Ras al Hadd, Golfo de Omán, Omán, a 93 km de Muscat.	15.8	Enero 07, 1978
36.	Buque petrolero Yuyo Maru No. 10, Isla Honshu en la Bahía de Tokio, Japón	15.8	Noviembre 09, 1974
37.	Tanques de almacenamiento, Sendai, Japón.	15.0	Junio 12, 1978
38.	Buque petrolero ABT Summer, Océano Atlántico, mar abierto a 1287 km de las costas de Angola.	15.0	Mayo 28, 1991

No.	Ubicación	Volumen derramado	Fecha
39.	Buque petrolero Heimvard, Isla Hokkaido, Océano Pacífico, Japón.	14.7	Mayo 22, 1965
40.	Buque petrolero Andros Patria, Bahía de Biscay fuera de Cabo Villano, España.	14.6	Diciembre 31, 1978
41.	Buque petrolero World Glory, Océano Índico, Sudáfrica, a 105 km al este de Durban.	14.2	Junio 13, 1968
42.	Buque petrolero British Ambassador, Océano Pacífico, Japón, A 333 km de la Isla Iwo Jima.	14.2	Enero 13 de 1975
43.	Buque petrolero Pericles GC, Golfo Pérsico, a 30 km al noreste de Doha, Qatar.	14.0	Diciembre 09, 1983
44.	Buque petrolero Metula, Estrecho de Magallanes, Chile.	13.9	Agosto 09, 1974
45.	Buque petrolero Ennerdale, Seychelles, Océano Índico.	13.8	Junio 01, 1978
46.	Buque petrolero Tadotsu, Estrecho de Malaca, cerca de Dumai, Indonesia.	13.2	Diciembre 07, 1978
47.	Buque petrolero Mandoil, Océano Pacífico, fuera del río Columbia y cerca de Warrenton, Oregon, E.U.	12.6	Febrero 29, 1968
48.	Tanque de almacenamiento, Refinería Mizushima, Kurashiki, prefectura de Okayama, Japón.	11.6	Diciembre 18, 1974
49.	Buque petrolero Napier, sudeste del Océano Pacífico al este de las costas de Chile.	11.3	Junio 10, 1973
50.	Buque petrolero Trader, Mar Mediterráneo, al este de las costas de Grecia.	11.0	Junio 11, 1972
51.	Buque petrolero Juan Antonio Lavallega, puerto de Arzew, Algeria.	11.0	Diciembre 29, 1980
52.	Buque petrolero Thanassis A. en aguas internacionales al sur del Mar de China, a 700 km fuera de las costas de Hong Kong.	10.9	Octubre 21, 1989
53.	Buque petrolero Exxon Valdez, Prince William Sound, Valdez Alaska, E.U.	10.8	Marzo 24, 1989
54.	Líneas de conducción, Mardin, Turkia.	10.7	Octubre 19, 1978
55.	Buque petrolero Barmah Agate, Bahía Galveston, Texas, E.U.	10.7	Noviembre 01, 1979
56.	Buque petrolero Athenian Venture, Océano Atlántico, a 563-644 km al sudeste de Cabo Race, Newfoundland, Canadá.	10.6	Abril 22, 1988
57.	Buque petrolero <i>desconocido</i> , Planta termoeléctrica Adolfo López Mateos Bahía de Campeche en el Golfo de México.	10.6	Marzo 07, 1996
58.	Tanque de almacenamiento, Benuelan, Puerto Rico.	10.5	Diciembre 14, 1978
59.	Buque petrolero Borag, Taiwan, Mar del este de China a 3 km al norte de Chilung.	10.4	Febrero 07, 1977
60.	Pozo de producción Abkatun 91, Bahía de Campeche, a 64 km al noroeste de Ciudad del Carmen. México.	10.4	Octubre 23, 1986

No.	Ubicación	Volumen derramado	Fecha
61.	Buque petrolero St. Peter, Océano Pacífico, a 56 km al oeste de Punta de Manglares, Colombia.	10.3	Febrero 06, 1976
62.	Tanque de almacenamiento, Bahía las Minas, Colón, Panamá.	10.1	Abril 27, 1986

Fuente: The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, (1997).^{15b}

Nota: El dato de volumen derramado se presenta en millones de galones.

2.6 Situación en México

2.6.1 Antecedentes de la industria petrolera en México

La industria petrolera en México es una de las más antiguas y, sin lugar a dudas, la que maneja los mayores recursos dentro del marco industrial mexicano y por ende de gran importancia dentro del modelo de desarrollo que existe en el país. Para comprender los alcances de su evolución, es necesario hacer mención de los antecedentes.

Al parecer el uso del chapopote fue común en gran parte de Mesoamérica. Etimológicamente, el vocablo nahualth "chapopotli" está formado por la combinación de dos palabras: tzouctli, pegamento o goma, y popochtli, perfume u olor.¹⁶ Existen testimonios que desde hace centurias existían chapopoteras en todo el país, en las que se podía obtener petróleo natural. Durante la época precortesiana, las tribus que habitaron el territorio mexicano utilizaron el petróleo como material de construcción, medicina, pegamento, impermeabilizante y como incienso en sus ritos religiosos.¹⁷

Sin embargo, los primeros intentos de explotación industrial de las chapopoteras mexicanas datan de 1863, pero no fue sino dos décadas más tarde cuando estas tentativas adquirieron un carácter más importante.

La primera empresa petrolera que se estableció en México, la Waters Pierce Oil Co., fundada en 1887, no tenía el propósito de explotar el combustible, sino de importarlo de Estados Unidos y refinarlo en el país para satisfacer la demanda local, principalmente de los ferrocarriles. Fue la empresa formada en 1901, por el norteamericano Doheny, la que inició la producción de petróleo en México.¹⁸ El gobierno del General Porfirio Díaz, vislumbró la importancia que tenía la explotación de hidrocarburos y la necesidad de regular las concesiones y explotación de petróleo a través de una ley. El 24 de diciembre de 1901, el Congreso de la Unión decretó la Ley del Petróleo de los Estados Unidos Mexicanos, en la que se autorizó al Ejecutivo Federal a conceder a los particulares o a compañías debidamente organizadas, permisos con duración de un año improrrogable, para llevar a cabo exploraciones en el subsuelo de terrenos baldíos nacionales y en los lagos y lagunas que fueran

de jurisdicción federal, con el objeto de descubrir las fuentes de petróleo o carburos gaseosos de hidrógeno que pudieran existir.¹⁷

El progreso fue rápido, en 1901 brotaba el primer pozo de valor comercial, en 1908 era fácil percibir los signos de un inminente auge.¹⁸ Al finalizar 1910, la cantidad de petróleo con la que México contaba era superior a la que exigía el consumo nacional, por lo que se pensó en exportar el excedente. La industria petrolera no alteró su ritmo de producción durante la Revolución, por el contrario su ascenso comenzó precisamente en 1911 con una producción de 12'548,000.26 barriles (1 barril = 42 galones = 158.9873 litros).¹⁹ Ya en 1921, llamada "la época de oro", la producción había alcanzado los 193'397,586 barriles al año, cifra por la que México ocupó el segundo lugar en la producción mundial.²⁰

Las primeras refinerías establecidas en México, fueron fundadas hacia finales del siglo pasado por la Pierce Oil Corporation. Una, construida en el puerto de Veracruz hacia 1871; la otra, erigida en Arbol Grande, sobre la margen izquierda del Río Pánuco, autorizada por decreto del gobierno del estado de Tamaulipas expedido el 20 de abril de 1896 era de refinación completa y la más antigua en su género en el país.¹⁶

La capacidad de refinación de la industria petrolera en México fue en aumento hasta 1926, después hubo un descenso que no se detuvo sino hasta 1933. En 1916 existían únicamente cuatro refinerías, en 1921 ya había catorce; tres años más tarde, diecinueve - dos de ellas se encontraban entre las mayores del mundo - y en 1926, veinte. Para 1929, la crisis en la producción había reducido el número a dieciséis y en 1933 a quince, pero con el descubrimiento de Poza Rica la capacidad de refinación volvió a ascender. Las primeras refinerías que se establecieron en México fueron plantas de destilación primaria en donde se obtenía gasolina, kerosén y petróleo combustible, este último empleado principalmente por los ferrocarriles. Bastantes años después aparecieron las plantas de destilación desintegrante junto a otras destinadas a aprovechar los gases y a producir asfalto.¹⁸

Hacia el año de 1935, operaban en México algo más de veinte compañías petroleras. Junto a este auge petrolero se daba el mal trato a los trabajadores de esta industria, quienes percibían míseros sueldos. Esta explotación de los trabajadores se dio en todas las compañías petroleras. En consecuencia, los trabajadores de esta industria formaron el Sindicato de Trabajadores Petroleros de la República Mexicana, quedando legítimamente constituido el 16 de agosto de 1935. El sindicato exigió de todas las compañías, un contrato colectivo de trabajo con el fin de que todas las empresas petroleras en México pagaran los mismos salarios a sus trabajadores y dieran las mismas prestaciones de carácter social. El conflicto fue resuelto mediante laudo emitido por la Junta Federal de Conciliación y Arbitraje el 18 de diciembre de 1937, en el que se obligó a las compañías petroleras a aumentar los salarios y prestaciones por un total de 26 millones de pesos. Ante este laudo, las empresas interpusieron el amparo, y el primero de marzo de 1938, la Suprema Corte de Justicia de la

Nación confirmó el laudo de la Autoridad de Trabajo. Las compañías se declararon en rebeldía, por lo que el presidente de la República, General Lázaro Cárdenas, el 18 de Marzo de ese mismo año expidió el decreto de expropiación de la industria petrolera mexicana, mediante el cual, por causa de utilidad pública y a favor de la Nación, expropiaba la maquinaria, instalaciones y todos los demás bienes muebles e inmuebles propiedad de las compañías petroleras existentes en ese entonces en nuestro país.^{17,21}

2.6.2 Creación de Petróleos Mexicanos

Al consumarse la expropiación petrolera, y con base en el decreto presidencial del 7 de junio de 1938, se creó la empresa denominada Petróleos Mexicanos (PEMEX), misma que debería funcionar como organismo público descentralizado del gobierno federal, de carácter técnico, industrial y comercial, con personalidad jurídica y patrimonios propios.²²

Los objetivos fundamentales de la nueva institución, PEMEX, fueron y han sido: la exploración, explotación, transformación industrial, transporte, almacenamiento, distribución y venta de primera mano del petróleo, gas natural, productos derivados y materias primas industriales básicas, de acuerdo con la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el ramo petrolero y sus reglamentos.²³

Con esta misma fecha, y también por carácter presidencial, fue creada la industria Distribuidora de Petróleos Mexicanos para manejar los aspectos de comercialización de la industria petrolera. El 8 de agosto de 1940, la Distribuidora de Petróleos Mexicanos y la Administración General del Petróleo Nacional fueron abolidas por el presidente Cárdenas y sus funciones pasaron a ser parte de PEMEX.²²

Es de suponerse que los primeros años de vida de PEMEX fueron muy difíciles ya que se enfrentó a un sin número de dificultades. No se podían conseguir refacciones para las instalaciones que dejaron las compañías extranjeras, ni materia prima para la industria; no había mercado para el petróleo mexicano. Pese a esta situación y gracias a la competencia, se pudieron conseguir nuevos clientes e ir recuperando un mercado que se había perdido. En el aspecto interno, el reto más grave al que se enfrentó el gobierno fue la administración de esta gigantesca industria. El país sólo contaba con industrias medianas administradas por un puñado de empresarios empíricos. No contaba con elementos capacitados para dirigir puestos de altas jerarquías, los que fueron ocupados por técnicos.

Por otra parte, el aparato burocrático apenas empezaba a manejar empresas de cierta importancia, por lo que las decisiones tomadas fueron orientadas hacia la organización de la industria para evitar un colapso, sin que se tomara en cuenta, en ningún momento, el daño que se ocasionaba al medio

ambiente. En ese entonces, al igual que en muchos países, no había una conciencia sobre la contaminación ambiental y mucho menos la causada por el petróleo.¹⁷

Al nacer PEMEX, el país contaba con seis refinерías con capacidad instalada de 102 mil barriles por día de destilación primaria y 12 mil barriles por día en desintegración térmica. Estas refinерías eran sencillas pero suficientes para elaborar los productos necesarios, pocas en número y de especificaciones moderadas. El sistema que se recibió de las compañías expropiadas comprendía únicamente redes pequeñas y heterogéneas de oleoductos de recolección y abastecimiento a las refinерías de entonces y un pequeño conjunto de carros y autotanques. A partir de 1946, se aprecia un notable crecimiento de la industria. El 20 de noviembre de ese mismo año se inaugura la refinерía “18 de Marzo” en Atzacapozalco, Distrito Federal, con una capacidad de proceso de 50,000 barriles diarios, y el oleoducto Poza Rica-Atzacapozalco, con una capacidad de transporte de 37 mil barriles diarios. El 30 de julio de 1950 se puso en servicio la refinерía de Salamanca, Guanajuato, con capacidad de destilación de 30 mil barriles diarios de petróleo crudo y el oleoducto Poza Rica-Salamanca, con capacidad para transportar 60 mil barriles diarios de crudo.²⁴

En 1952, se descubrió la prolongación de la faja de oro terrestre. El 12 de abril de 1955, entraron en función las ampliaciones a las plantas del campo de Poza Rica, Veracruz; el 19 de diciembre de 1955 se puso en servicio la planta de absorción de Reynosa, Tamaulipas, con capacidad de tratamiento de 300 millones de pies cúbicos de gas para obtener 8 mil barriles diarios de productos. El 22 de febrero de 1952 se inauguró la nueva refinерía de Minatitlán con capacidad de 50,000 barriles diarios, incluyendo la primera planta de desintegración catalítica, que se instalará en la República Mexicana.

En 1963, fue cuando finalmente se localizó producción comercial en la ya explorada por varios años “faja de oro marina”. El campo descubierto fue Isla de Lobos, que se desarrolló desde una isla artificial construida en un pequeño arrecife. La primera plataforma marina fija en la “faja de oro marina” se instaló en abril de 1967, en el campo Tiburón con capacidad para perforar hasta 12 pozos.²⁵

El 3 de marzo de 1968, se inauguró la planta de absorción de ciudad PEMEX, Tabasco, con capacidad de proceso de 300 millones de pies cúbicos de gas diarios.

Durante la década de los setentas, se descubrieron provincias con hidrocarburos en el norte del país (Tampico, Tamaulipas y Coahuila) y en el sur (Chiapas, Tabasco y Yucatán), en los que se encuentran las áreas más importantes del país y son las siguientes:

- 1) Area mezozoica de Chiapas, descubierta en 1972, con 7 mil kilómetros cuadrados de superficie que abarca el norte del estado de Chiapas y parte del estado de Tabasco, con una productividad de 6 mil 500 barriles diarios por pozo, siendo 157 pozos.²⁶

- 2) Sonda de Campeche, descubierta en 1976, tiene una extensión de 8 mil kilómetros cuadrados, ubicada en la porción occidental de la plataforma marina de Yucatán, con una producción de crudo de 2 millones 665 mil 540 barriles anuales.²⁷
- 3) Paleocañón de Chicontepec, localizado en la porción central este de la República Mexicana, en la parte sudoccidental de la provincia geológica Tampico-Misantla, con una superficie aproximada de 3,300 kilómetros cuadrados, cerca de ella están las ciudades de Papantla, Poza Rica, Tuxpan y Cerro Azul, Veracruz.
- 4) Cuenca de sabinas, se localiza en el norte de México, con una extensión de 80,000 kilómetros cuadrados, abarca parte de los estados de Coahuila y Nuevo León, fue descubierta en 1977.

La importancia de estos descubrimientos elevó las reservas petroleras de México a cifras sin precedentes, pues las reservas probadas en 1938 ascendían a 20 mil millones de barriles, las probables a 37 mil y las potenciales a 200 mil. Se originó así una política de crecimiento económico sustentada en una explotación intensiva de este recurso no renovable y la creación de una infraestructura industrial con una clara orientación exportadora. Se crearon gigantescos polos de crecimiento industrial y complejos portuarios industriales, sobre todo en el sureste mexicano y se puso en marcha un amplio programa de inversiones masivas que privilegió al litoral del sureste como área estratégica para la inserción del aparato productivo nacional al sistema económico mundial.¹⁷

2.6.3 Actividades de la industria petrolera en México y sus efectos adversos al ambiente

En las diferentes actividades industriales que efectúa Petróleos Mexicanos, existe un potencial de contaminación del ambiente por la emisión de humos, polvos, gases y descargas de aguas de desecho. Estas se generan durante la perforación de pozos petroleros, la extracción del líquido, su refinación y la producción de petroquímicos básicos. Además la transportación de petróleo crudo y productos refinados por buquetanques y tuberías, tiene implícita la posibilidad de derrames que pueden contaminar suelo y agua.

La industria petrolera está regulada por la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en el Ramo del Petróleo, promulgada el 27 de noviembre de 1958 (que abrogó la Ley 3 de mayo de 1941), y por su reglamento publicado en el Diario Oficial del 25 de agosto de 1959. La citada ley, en su artículo 30, refiere cuales son las actividades de la industria petrolera y dice: "la industria petrolera abarca:

- I. La exploración, la explotación, la refinación, el transporte, el almacenamiento, la distribución y las ventas de primera mano del petróleo, el gas y los productos que se obtengan de la refinación de estos,
- II. la elaboración, el almacenamiento, el transporte, la distribución y las ventas de primera mano de aquellos derivados del petróleo que sean susceptibles de servir como materias primas industriales básicas”

Con fundamento en los artículos de estos ordenamientos legales, PEMEX lleva a cabo una serie de actividades en gran parte de la República Mexicana. Ni una zona de importancia para el ecosistema ha permanecido al margen de este intenso y explosivo desarrollo de actividades petroleras. Dentro de las actividades desarrolladas por PEMEX, las que pueden tener efectos adversos al medio ambiente son: exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento y distribución.¹⁷

La etapa de exploración comprende: a) trabajos de reconocimiento, b) trabajos de detalle, y c) estudios de los resultados obtenidos para programar la perforación de nuevos pozos. En esta etapa producen daños al medio ambiente los estudios de geofísica superficial, reconocimiento y detalle que se realizan por medio de brigadas de campo. Su interacción con el medio ambiente no causan efecto permanente en el ecosistema, pero sí en el ambiente social de la región al contratar personal por periodos cortos. En los trabajos sismológicos la perforación para introducir los cartuchos de dinamita y la explosión, son los que producen daño, aunque éste se ha tratado de reducir con las técnicas desarrolladas que consisten en cubrir grandes áreas con un solo ensayo, lo que permite una relativa y rápida recuperación del ecosistema.²⁴

Los efectos más frecuentes se provocan en los pozos exploratorios y de producción, ya que el área que se afecta es la de una pera de perforación de 80 x 80 metros y una fosa de decantación de 70 x 70 x 2 metros de profundidad, en la cual se vierten lodos y material de perforación, así como el aceite usado en las máquinas generadoras de energía eléctrica. En general, puede decirse que las actividades que causan mayores daños al medio ambiente, son las perforaciones de pozos de exploración y la disposición de materiales.

En la etapa de explotación, como se ha mencionado, se producen fuertes daños en el medio ambiente, que pueden aumentar al concentrarse una gran cantidad de pozos por unidad de superficie o porque se llevan a cabo en zonas lacustres o en el mar. Además, es frecuente encontrar que las características físicas del equipo utilizado, no son muy satisfactorias, por lo que con frecuencia suspenden actividades por desperfectos, falta de refacciones, fallas de coordinación de entrega de materiales químicos (como lodos de perforación), todo esto alarga el tiempo de perforación y aumenta los daños al medio ambiente.

En la producción de gas - proceso que se desarrolla dentro de la etapa de explotación - se contamina al no poderse ocupar todo lo que se extrae del yacimiento y se tiene que quemar en la atmósfera, se desperdicia por la falta de un sistema de compresión y conducción hasta los centros de procesamiento y consumo.²⁸

El proceso de recuperación secundaria se lleva a cabo mediante cuatro técnicas: 1) inyección de gas, 2) inyección de agua, 3) bombeo mecánico y 4) bombeo neumático. De estos cuatro sistemas, el bombeo mecánico puede ser el que más modifique el medio ambiente por no tener centralizado sus servicios y operar continuamente, dañando el medio ambiente con derrames de aceites usados.

Una vez que se extrae el petróleo, pasa a las baterías en las que se efectúa la separación de los componentes líquidos (hidrocarburos, agua salada y los gaseosos); proceso que por ser una separación física y continua no debiera causar contaminación en el medio ambiente, pero cuando se presentan daños en el equipo y se tiene necesidad de parar por no contarse con sistemas o porque son insuficientes para seguir recibiendo crudo de los campos de extracción, se obliga en ciertos casos, a verter al medio ambiente petróleo crudo, gases y agua salada.

Los procesos de deshidratación y desalación son los más contaminantes por el gran volumen de aguas desechadas con hidrocarburos, sales y otros, que es vertida en suelos y ríos cercanos.¹⁷

El proceso de endulzamiento de líquidos consiste principalmente en eliminar el gas amargo disuelto en los hidrocarburos livianos obtenidos en las baterías de separación. Después, los líquidos endulzados pasan a la torre de estabilización donde se separa el carbono, que se quema en algunos casos por no contar con equipos de compresión.

Los líquidos se envían a la fraccionadora donde se separa el propano, el butano y las gasolinas naturales; el gas ácido se envía a las plantas de azufre que en su procesamiento emanan ácido sulfhídrico y dióxido de azufre, que va directamente a la atmósfera. Ahí, al contacto con materiales de hierro, óxido de manganeso, así como las radiaciones solares se convierte en anhídrido sulfúrico. Este, al reaccionar con el vapor de agua, resulta ácido sulfúrico, perjudicial para los organismos en general. Ataca no solo los pulmones del hombre, sino también los materiales ferrosos.

Dentro de todas estas actividades que desarrolla la industria petrolera en México - que van desde la extracción del crudo hasta su venta final -, las petroquímicas son las que tienen mayor grado de peligrosidad para el medio ambiente, esto en función de sus desechos que aumentan en variedad y toxicidad. En general los residuos petroquímicos al no ser biodegradables, representan un serio y constante peligro para los organismos y los ecosistemas.¹⁷

2.6.4 Fuentes de contaminación de suelos y acuíferos por hidrocarburos en instalaciones petroleras de México

Como producto de las actividades petroleras los suelos son alterados por la construcción de rutas de acceso, remoción de cubierta vegetal o edáfica para la instalación de campamentos y actitudes depredatorias sobre recursos bióticos por parte de los que realizan dichas actividades. Las vías de acceso se convierten en vectores de colonización espontánea y de asentamientos irregulares, sin importar los riesgos de fuga y explosión. Esto causa perturbación de los ecosistemas, desaparición de especies vegetales y desplazamiento de especies animales del lugar.⁵

La contaminación de suelos y acuíferos ocasionada por la industria petrolera se presenta durante las actividades de extracción, refinación, petroquímica, transporte, distribución, almacenamiento y comercialización. En las actividades de extracción se observan derrames y explosiones de hidrocarburos, acumulación de residuos de perforación y lodos aceitosos. En refinación y petroquímica se requieren grandes extensiones para la construcción de tanques de almacenamiento, así como de plantas industriales de transformación, sistemas para la generación y distribución de fluidos, vapores y de enfriamiento de agua. Se observa un alto consumo de agua, derrames, explosiones y descargas de residuos de industriales de alta toxicidad y no biodegradables. Durante el transporte se presentan riesgos por derrames de residuos peligrosos.⁵

Las redes de ductos de distribución están siempre sujetas a riesgos de accidentes de diversa índole como derrames, explosiones, incendios y fuga de gases. El almacenamiento en tanques es una situación similar.

Las tuberías, ductos y tanques de almacenamiento de combustibles, generalmente no se revisan con la frecuencia requerida, por lo que no se toman las medidas preventivas necesarias y los casos se atienden una vez que ocurre la ruptura de éstos. Además, las instalaciones petroleras están a la interperie y una gran parte se encuentran en zonas costeras, donde la corrosión acaba con todos los elementos metálicos presentes. Otros derrames de hidrocarburos que ocurren accidentalmente y son menos considerados se refieren a volcaduras de pipas y son parte de las actividades de transporte.

Los sitios de comercialización manejan menores volúmenes de hidrocarburos y derivados (gas doméstico, petróleo diáfano, diesel, gasolinas, grasas, aceites, solventes, resinas), pero generalmente estos lugares no cuentan con dispositivos adecuados para el control de emisiones y derrames al suelo, así como sistemas de recolección.⁵

Algunos problemas de contaminación que han sido producto de descargas de residuos se encuentran en zonas pantanosas, donde el nivel freático sube de manera sorprendente en la temporada de lluvias. En estas zonas se hace muy difícil el acceso aún para realizar actividades de prospección.

Otro foco de contaminación de subsuelo en las industrias de refinación y petroquímica son las instalaciones antiguas que no fueron completamente desmanteladas y se han convertido en cementerios industriales. En estos sitios, la contaminación con hidrocarburos es mínima, los principales contaminantes son compuestos inorgánicos, muchos de ellos tóxicos, que se lavan fácilmente por efecto de las lluvias y así penetran al subsuelo.⁵

Por lo mencionado anteriormente, se puede apreciar que en menor o mayor grado la contaminación de suelos y acuíferos por hidrocarburos, se presenta durante las actividades de extracción, refinación, petroquímica, transporte, distribución, almacenamiento y comercialización; por lo que todas las empresas de PEMEX están involucradas, Refinación, Exploración y Producción, Gas y Petroquímica Básica, y Petroquímica.⁵

2.6.5 Actividades desarrolladas por Petróleos Mexicanos en materia de protección ambiental

El interés inicial del presente punto era presentar la información necesaria que permitiese tener una panorámica de los trabajos de saneamiento de sitios contaminados desarrollados en México. Por desgracia el análisis que se presenta es muy general debido a la ENORME hermeticidad con que las autoridades manejan la información de carácter ambiental, no se cuenta con los datos suficientes que pudieran ayudar a la ampliación de dicho tema.

Tomando en cuenta las memorias de labores de PEMEX en los últimos seis años, Tabla 2.3, se puede apreciar que la protección del medio ambiente es un aspecto relevante dentro de las actividades en los años recientes, poniéndose especial atención a la realización de auditorías de seguridad industrial.

Se puede observar en estos informes, que las cuatro empresas de PEMEX: Exploración y Producción, Refinación, Gas y Petroquímica Básica y Petroquímica; trabajan de forma independiente en el saneamiento de sitios contaminados. PEMEX Refinación es la que presenta una mayor actividad en este renglón, sin embargo, la información que presenta es demasiado general lo que no permite evaluar de forma más crítica el desarrollo de las actividades.

Por otro lado, la terminología empleada en cada una de las cuatro dependencias de PEMEX es diferente. Mientras que PEMEX Refinación utiliza el término rehabilitación, PEMEX Exploración y Producción maneja la palabra restauración. Esto hace aún más ambigua la información presentada en estos informes.

Tabla 2.3 Informes de actividades de PEMEX en materia de rehabilitación de sitios contaminados

Año	División	Actividades de rehabilitación de sitios
1996	Pemex Exploración y Producción	No menciona la realización de trabajos de rehabilitación.
	Pemex Refinación	Menciona la rehabilitación del terreno de la ex-refinería de Azcapotzalco, donde se realizaron sondeos al suelo hasta alcanzar cuatro metros de profundidad, quedando como testigo un pozo de monitoreo central, con lo que se comprobó que no existe peligro alguno para la ciudadanía. Se iniciaron en 1996 los estudios de evaluación de suelos afectados en las refinerías de Madero, Minatitlán, Salamanca y Tula, en la terminal marítima de Pajaritos, y en la terminal de almacenamiento y distribución de Mexicali. Con la información de los estudios, se procederá a iniciar los programas de saneamiento para rehabilitar las áreas afectadas. Se efectuaron los estudios de evaluación de 28 instalaciones y se inicio el saneamiento de las estaciones de bombeo de Linares y Montemorelos, N.L., las terminales de almacenamiento y distribución de Mérida, Yuc., San Rafael, N.L., Arriaga, Chis., Guadalajara, Jal., Poza Rica, Ver., Mexicali, B.C. y la terminal marítima de Pajaritos, Ver.
	Pemex Gas y Petroquímica Básica	No se menciona ningún tipo de actividad
	Pemex Petroquímica	No se menciona ningún tipo de actividad
1995	Pemex Exploración y Producción	Señala la "restauración" de 239 hectáreas de terreno afectadas por hidrocarburos, se realizó el saneamiento de 46 presas de desperdicios de perforación y la recuperación de 543 MB(miles de barriles) de fluido aceitoso, se corrigieron 175 fugas derivadas de instalaciones, lográndose levantar el 89% de los fluidos derramados.
	Pemex Refinación	Respecto a los programas de rehabilitación, se atendieron durante 1995 las estaciones de rebombeo de Linares y Montemorelos, N.L., y las terminales de almacenamiento y distribución de Mérida, Yuc., San Rafael N.L., Arriaga Chis. y Veracruz, Ver. Estas aún se encuentran en etapa de saneamiento, tanto en mantos freáticos, como en suelos. Estas actividades continuarán en 1996. Adicionalmente y derivado de la atención a las recomendaciones de las auditorías ambientales ya realizadas, en 1996 se iniciarán los estudios de evaluación de suelos afectados en las refinerías de Madero, Minatitlán, Salamanca y Tula, en la terminal marítima de Pajaritos y en la terminal de almacenamiento y distribución de Mexicali. Con la información de los estudios se procederá a iniciar los programas de saneamiento para remediar las áreas afectadas. Una actividad prioritaria que se iniciara en breve es la evaluación del suelo en el área norte de la ex-refinería de Azcapotzalco.
	Pemex Petroquímica	Se evaluó la contaminación en suelos, subsuelo y mantos freáticos de acuerdo con la Normatividad Ambiental de los Estados Unidos aceptada por la PROFEPA. De esta etapa se efectuaron los estudios de evaluación de los complejos Cosoleacaque, la Cangrejera y Pajaritos por compañías internacionales
1994	Pemex Exploración y Producción	No se menciona ningún tipo de actividad
	Pemex Refinación	No se menciona ningún tipo de actividad
	Pemex Gas y Petroquímica Básica	No se menciona ningún tipo de actividad
	Pemex Petroquímica	No se menciona ningún tipo de actividad
1993	Pemex Exploración y Producción	No se menciona ningún tipo de actividad
	Pemex Refinación	No se menciona ningún tipo de actividad
	Pemex Gas y Petroquímica Básica	No se menciona ningún tipo de actividad

Fuente: Adaptado de Petróleos Mexicanos. 29, 30, 31, 32, 19, 33

2.6.6 Resumen de los trabajos de rehabilitación de sitios contaminados desarrollados por Ferrocarriles Nacionales

En México, los inicios del sistema ferroviario datan del siglo pasado cuando el 22 de agosto de 1837, el gobierno del presidente Anastasio Bustamante otorgó la concesión a Don Francisco de Arrillaga, para construir un ferrocarril de Veracruz a la Ciudad de México.³⁴ El 6 de julio de 1907 fue expedido el decreto de constitución de los Ferrocarriles Nacionales de México. Consecuencia de ese decreto fue la escritura constitutiva de la citada compañía otorgada el 28 de marzo de 1908.³⁵

Los aspectos de protección ambiental no fueron considerados en Ferrocarriles Nacionales de México (FNM) de manera formal sino hasta el año de 1993 cuando se crea el Comité de Protección Ambiental. Paralelamente a la creación de este comité, se inicia un plan maestro a desarrollarse en el periodo 1993-1996. Este plan maestro contemplaba la realización de auditorias ambientales en las 56 instalaciones de FNM en el territorio nacional, Tabla 2.4.

Seis meses después del inicio de este plan, se inicia un programa de caracterización y análisis de áreas contaminadas. Estos estudios revelaron contaminaciones en un 90 por ciento debido a hidrocarburos, principalmente diesel y aceite, encontrándose además en pequeñas concentraciones: plomo, cromo y vanadio entre otros. Este programa de caracterización de sitios finalizó a principios del presente año, 1997. Para el año de 1995 y con base en los resultados de la fase de caracterización se pone en marcha el programa de rehabilitación de sitios contaminados a cubrirse en el periodo 1995-2001 con un presupuesto aproximado de 40 millones de dólares. Actualmente, este programa cubre la rehabilitación de cinco sitios, donde se presentaron índices de contaminación en suelo y mantos freáticos someros, siendo estos los siguientes: San Luis Potosí, S.L.P., Acámbaro, Gto., Matías Romero, Oax., Monterrey, N.L., y Mazatlán, Sin. La inversión en el saneamiento de estos sitios es de aproximadamente 4 millones de dólares.

Los trabajos de rehabilitación empleados en estos sitios, utilizan tecnologías tales como bombeo y tratamiento, sistemas de venteo, barreras hidráulicas, excavación y disposición, biorremediación

Tabla 2.4 Instalaciones de Ferrocarriles Nacionales de México en la República Mexicana

Ferrocarril	Ferrocarril Noroeste	Ferrocarril Pacífico Norte	Ferrocarril Terminal V de México	Ferrocarril Sureste
Chihuahua, CHP, Chih.	Cardenas, S.L.P.	Acámbaro, Gto.	Cuernavaca, Mor.	Apizaco, Tlax.
La Junta Chih.	Cd. Madero/Cecilia, Tamps.	Aguascalientes, Ags.	Pachuca, Hgo.	Campeche, Camp.
Los Mochis, Sin.	Jalapa, Ver (*)	Benjamin, Hill.	Pantaco, D.F.	Coatzacoalcos, Ver.
San Rafael, Chih.	L. Cárdenas, Mich.	Cd. Frontera, Coah.	Valle de México, Mex.	Jalapa, Ver (♣)
Sufragio, Sin.	Matamoros, Tamps.	Cd. Juárez, Chih.		Matias Romero, Oax.
	Monterrey, N.L.	Colima, Col.		Mérida, Yuc.
	Nvo Laredo, Tamps.	Chihuahua, NM, Chih.		Oaxaca, Oax.
	Oriental, Pue.	Sufragio, Sin.		Orizaba, Ver.
	Saltillo, Coah.	Empalme, Son.		Puebla, Pue.
	San Luis Potosi	F. Pescador, Zac.		Tapachucla, Chis.
	Toluca, E. Mex.	Guadalajara, D. Gua., Jal.		Tenosique, Tab.
	Uruapan, Mich.	Guadalajara, D. Sin., Jal.		Tierra Blanca, Ver.
	Venegas, S.L.P.	Irapuato, Gto.		Tonalá, Chis.
		Manzanillo, Col.		Veracruz, Ver.
		Mazatlan, Sin.		
		Mexicali, B.C.		
		Nogales, Son.		
		Piedras Negras, Coah.		
		Tepic, Nay.		
		Torreón, Coah.		

Fuente: Shilite Cuervo, Vocal Ejecutivo del Comité de Protección Ambiental de FNM, (Mayo de 1997).

Simbología:

- (*) Zona de abasto e inspección
- (♣) Taller

tanto en el sitio (*in situ*) como fuera del sitio (*ex situ*), siendo esta última la de mayor empleo, esto debido, entre otros factores, a que es considerada por FNM como una tecnología baja en costos, que no presenta impactos adversos al medio ambiente y es la que mejor se ajusta a sus operaciones.

Para el establecimiento de los objetivos de limpieza en la rehabilitación de sitios contaminados, FNM, como un organismo perteneciente a la Asociación Americana de Ferrocarriles utiliza el *Standard Guide for E1739-95e1 Risk Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*; elaborado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales.

Con base en esta metodología y a través del Instituto Nacional de Ecología (INE), se determinó rehabilitar en forma pasiva, 15 sitios contaminados ya que se determinó que el grado de contaminación no presentaba un riesgo a la salud para el personal expuesto.

Para el futuro, FNM está desarrollando medidas de prevención ya que con base en sus propias estadísticas, por cada peso invertido en medidas de prevención se tienen un ahorro de 50 pesos en las actividades de rehabilitación.³⁶

2.6.7 Resumen de los trabajos desarrollados por la Comisión Federal de Electricidad en materia de protección ambiental

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) se creó en 1937. Sus primeros proyectos se emprendieron en Teloloapan, Guerrero; Pátzcuaro, Michoacán; Suchiate y Xía en Oaxaca, y Ures y Altar en Sinaloa.

En 1938, la CFE emprendió su primer proyecto de gran envergadura, en Ixtapantongo. Para ese año, la empresa ya tenía una capacidad de 64 Kilowatts (KW), y para 1942 llegaba a los 837 KW. Para 1946 La CFE tenía una capacidad instalada de 45,594 KW e importantes perspectivas de crecimiento.³⁷

La empresa quedó constituida como un organismo descentralizado con personalidad jurídica y patrimonios propios en 1949, lo que permitió actuar en áreas como planeación y ejecución de obras, adquisición de instalaciones, organización de cooperativas de consumidores y electrificación, entre otras.

Para 1950, la CFE tenía una capacidad instalada de 167,126 KW, el 13% del total del país. Al terminar 1994, La Comisión Federal de Electricidad contaba con una capacidad productiva de más de 31,600 megawatts (MW) de los cuales el 28.8% estaba en centrales hidroeléctricas, el 6% en carboeléctricas, el 2.38% en geotermoeléctricas, el 54.02% en termoeléctricas que consumen

hidrocarburos, 6.64% en la central dual, 2.13% en la nucleoelectrica y 0.01% en la central eoloelectrica.³⁷

En materia de proteccion ambiental, el 01 de octubre de 1993 se crea la Gerencia de Proteccion Ambiental con el objetivo de atender lo relativo al medio ambiente en todas las etapas de cada proyecto electrico: estudios de campo, seleccion de sitios, estudios de factibilidad, diseno, construccion y operacion.³⁸

En 1995, se llevaron a cabo 34 inspecciones a instalaciones electricas de todo tipo y se realizaron las primeras seis auditorias a centrales termoelectricas. Tambien se participo con las autoridades en la revision del marco juridico y en la elaboracion de nuevas normas. Se realizaron ademais, 112 gestiones de obras y proyectos con el Instituto Nacional de Ecologia.

Finalmente, tambien se han adoptado medidas en el caso de desocupacion de un proyecto dado y para el desecho de residuos potencialmente peligrosos. En el primer caso, se busca restaurar las condiciones de equilibrio natural, y en el segundo ubicar los desechos en sitios y condiciones que garanticen su seguridad e inocuidad durante un plazo tan largo como sea necesario.³⁷

Con respecto al tema de la rehabilitacion de sitios contaminados, no existe ningun documento de acceso publico que demuestre la realizacion de trabajos.

CAPITULO III MARCO LEGAL

Legislación sobre la contaminación del suelo

Este capítulo presenta información relativa a las políticas establecidas por México y los Estados Unidos de Norteamérica para desarrollar sistemas que permitan la identificación, caracterización, determinación de niveles de contaminación y criterios de restauración de sitios contaminados con hidrocarburos. Incluye además, comparaciones y contrastes para señalar la capacidad que cada país tiene para limitar la contaminación del suelo.

3.1 Generalidades sobre la legislación ambiental mexicana y norteamericana

Los sistemas de legislación ambiental (conjunto de leyes por las cuales se gobierna un Estado en cuestiones de su medio ambiente) de México y los Estados Unidos de Norteamérica difieren en tres aspectos fundamentales,³⁹

- a) El enfoque del sistema de legislación
- b) El alcance del sistema legislativo
- c) El grado de integración de las herramientas para legislar

Con respecto al primer aspecto, el enfoque del sistema de legislación norteamericano tiene su base en la ley común y en precedentes, es decir, los ciudadanos que demuestren lesiones o daños ambientales pueden presentar su caso al tribunal para que se ejerza justicia contra la industria o el gobierno, por los perjuicios ocasionados o por no implantar adecuadamente una ley, respectivamente. Por el contrario, el sistema mexicano tiene sus bases en la ley civil, la cual recae sobre fuerzas administrativas, es decir, la autoridad ambiental puede imponer multas directamente, sin necesidad de solicitarlas a los tribunales, puede clausurar parcial o totalmente las plantas industriales que no cumplan con las acciones correctivas descritas en los reglamentos y nunca puede ser demandada ante el tribunal por no implantar adecuadamente una ley. Por otro lado, debido a que el sistema de México no está basado en la facultad judicial (no se presentan demandas contra daños ambientales), la petición ciudadana está limitada; es decir, la autoridad ambiental requiere investigar y adjudicarse el caso ella misma hasta que la queja se documente.³⁹

Con relación al segundo aspecto, el alcance del sistema legislativo norteamericano es más amplio y detallado que el mexicano. El sistema de legislación norteamericano dirige muchas áreas de preocupación ambiental con las que el sistema mexicano aún no empieza a tratar, por ejemplo,

programas para proteger el deterioro del suelo en áreas que actualmente no están contaminadas y programas para controlar el uso de sustancias peligrosas. Además, la infraestructura ambiental norteamericana permite a la entidad ambiental, Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), delegar muchas de sus responsabilidades en las oficinas estatales y municipales ya que están claramente definidas. Aunque la estructura mexicana permite delegar, los estados mexicanos no han desarrollado sus propias normas ambientales.³⁹

Finalmente, con respecto al grado de integración de las herramientas o normas para legislar, en los Estados Unidos están separadas en cada aspecto ambiental; es decir, los requerimientos de control que afectan las emisiones al aire, las descargas de contaminantes al agua y la generación de residuos están desarrolladas independientemente sin considerar la transferencia de contaminantes a un aspecto ambiental con controles menos estrictos. (La única excepción de este enfoque es la legislación en las plantas de papel, donde se desarrolla una estrategia para el control de las emisiones y descargas hacia el agua, aire y suelo). En contraste, el sistema de legislación ambiental mexicano relaciona directamente todos los recursos naturales. Este criterio se deriva del Artículo 27º de la Constitución Mexicana y guía al desarrollo de la Ley General de Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual proporciona una visión integral del problema de contaminación ambiental. Sin embargo, las herramientas para regular la contaminación dirigida a cada aspecto ambiental no están desarrolladas totalmente.³⁹

3.2 Legislación ambiental mexicana

En materia de legislación ambiental, el 28 de enero de 1988 se promulgó la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) con base en los artículos 27 y 73 Fracción XXIX-G Constitucionales.⁴⁰ Establece el marco de referencia para la interacción entre el Gobierno Federal y los gobiernos estatales y municipales; se define la política ecológica generada y regula los instrumentos para su aplicación. Señala disposiciones en materia de orden ecológico, evaluación de impacto y riesgo ambiental; protección de la flora y fauna silvestre y acuática, aprovechamiento sustentable de los recursos naturales; prevención y restauración ecológica en materia de aire, agua y suelo, participación social, educación ecológica, medidas de control y seguridad, así como sanciones.⁴¹

Esta ley -que sienta las bases para reglamentar los principios constitucionales en la materia, está compuesta por 194 artículos, divididos en seis títulos principales:⁴²

- I. *Disposiciones generales*: establece las disposiciones generales en cuanto a políticas, instrumentos y criterios ambientales; la jurisdicción y facultades de los gobiernos estatales y federal; así como la evaluación de impacto ambiental.

- II. *Áreas naturales protegidas*: establece los procedimientos para el desarrollo y gestión de las áreas naturales y presenta las políticas generales que rigen la flora y fauna en peligro de extinción.
- III. *Aprovechamiento racional de los elementos naturales*: rige el uso racional de los elementos naturales y estipula las disposiciones ambientales de carácter general que regulan el desarrollo económico del agua, suelo y recursos no renovables.
- IV. *Protección al ambiente*: denominado Protección al Ambiente, establece las normas generales que rigen siete áreas específicas: aire, agua, suelo, actividades extremadamente peligrosas, materiales y residuos peligrosos, energía nuclear, así como el ruido, vibraciones, energía térmica y lumínica, olores y contaminación visual.
- V. *Participación social*: crea las políticas para promover la participación social.
- VI. *Medidas de control y seguridad; y sanciones*: establece los procedimientos, la observancia de la Ley, aplicación de sanciones, delitos ambientales y un sistema para la denuncia popular.

El título IV, capítulo III lleva por nombre *Prevención y Control de la Contaminación del Suelo*, consta de 11 artículos, del 134 al 144 inclusive, pero en su redacción existe poca precisión. Menciona que los residuos sólidos son la principal fuente de contaminación del suelo, siendo que son uno de los tantos ejemplos de contaminación. La LGEEPA parece no considerar otros contaminantes que se derraman como parte de las actividades industriales, como los residuos del procesamiento del petróleo, incluyendo combustibles y petroquímicos, aceites gastados y metales, los cuales se consideran residuos peligrosos.⁵

Debido a que el manejo de residuos peligrosos está íntimamente relacionado con la prevención de la contaminación del suelo se hace necesario realizar una revisión de la legislación ambiental en materia de residuos peligrosos, la cual se presenta a continuación.

3.2.1 Legislación mexicana sobre residuos peligrosos

El marco jurídico que define las regulaciones en materia de residuos peligrosos está señalado en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). En el siguiente orden jerárquico de la legislación se encuentra el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos publicado en el Diario Oficial de la Federación en noviembre de 1988.⁴³

A diferencia de otras disposiciones ambientales que confieren una autoridad concurrente a los gobiernos estatales y federal sobre la regulación y administración de leyes ambientales, los residuos peligrosos son competencia exclusivamente federal. La dependencia administrativa federal con facultades de supervisión en cuanto a las leyes sobre residuos peligrosos es la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP). Las dependencias estatales y locales cuentan

con poderes limitados para actuar en calidad de auxiliares de la SEMARNAP en aspectos de residuos peligrosos.⁴⁴

La LGEEPA marca las siguientes disposiciones en materia de residuos peligrosos:⁴⁵

- Artículo 1 La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.
- Artículo 5 Son asuntos de alcance general en la nación o de interés de la Federación:
XIX La regulación de las actividades relacionadas con materiales o residuos peligrosos
- Artículo 8 Corresponde a la Secretaría:
VIII Formular los criterios ecológicos que deberán observarse en la aplicación de la política general de ecología: la protección de la flora y fauna silvestre; el aprovechamiento de los recursos naturales; el ordenamiento ecológico general del territorio; y la prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo; con la participación que en su caso corresponda a otras dependencias.

Para la aplicación de la Ley, existen Reglamentos y Normas Oficiales Mexicanas. El Reglamento de la LGEEPA en Materia de Residuos Peligrosos se refiere a la contaminación del suelo en los siguientes terminos:⁴⁶

- Capítulo III Manejo de residuos peligrosos
Artículo 42 Cuando por cualquier causa se produzcan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de residuos peligrosos, durante cualquier operación que comprende su manejo, el generador y, en su caso, la empresa, que preste el servicio, deberá dar aviso inmediatamente de los hechos a la Secretaría, aviso que deberá ser ratificado por escrito dentro de los tres días siguientes al día en que ocurren los hechos, para que dicha dependencia esté en posibilidad de dictar o en su caso promover ante las autoridades competentes, la aplicación de las medidas de seguridad que procedan sin perjuicio de las medidas que las mismas autoridades apliquen en el ámbito de sus competencias.

Gran parte de los contaminantes del suelo y el subsuelo se generan en instalaciones que cuentan con tanques de almacenamiento de combustibles,⁵ sin embargo, en ninguna parte de la legislación mexicana se mencionan lo relacionado a derrames de productos derivados de la industria petrolera. La industria petrolera es mencionada en la LGEEPA en el Título IV, donde el capítulo IV establece

la regulación de manera reforzada de las llamadas actividades peligrosas. Entre éstas destacan además, las acciones de la industria petroquímicas, metalúrgicas y las de procesamiento de minerales radiactivos.⁴⁷

Hasta la fecha, en ningún reglamento ni Norma Oficial Mexicana se mencionan criterios para la evaluación de suelos contaminados. Los únicos parámetros que existen publicados se refieren a la definición de residuo peligroso y en este caso no son aplicables dado que los suelos contaminados no pueden ser considerados como residuos. La LGEEPA en su Título Primero, Capítulo I Artículo 3, fracción XXVI define los residuos de la siguiente manera:

Residuo: Cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.

3.2.2 Legislación mexicana sobre contaminación del suelo

El suelo es parte del patrimonio nacional, independientemente de su valor y de su uso, razón por la que su cuidado es corresponsabilidad de todos los mexicanos. El artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que: “la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro del territorio nacional corresponden originalmente a la Nación por lo que se dictarán medidas necesarias para preservar y restaurar el equilibrio ecológico... y para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que pueda sufrir en perjuicio la sociedad”.⁴⁸

Por otro lado, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente es el instrumento fundamental de referencia que sirve como base para todas aquellas acciones relativas a nuestros recursos naturales. El título IV, capítulo III lleva por nombre Prevención y Control de la Contaminación del Suelo, consta de 11 artículos, del 134 al 144.

Dentro del Título IV, los artículos que hacen mención al tema de la prevención de la contaminación y la rehabilitación de sitios contaminados están los siguientes:

Artículo 134 Para la preservación y control de la contaminación del suelo, se consideran los siguientes criterios:

- I. Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;
- II. Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos;

- III. Es necesario racionalizar la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; e incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje; y
- IV. La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas.

Artículo 135 Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se consideran, en los siguientes casos:

- I. La ordenación y regulación del desarrollo urbano;
- II. La operación de los sistemas de limpia y disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;
- III. La autorización para la instalación y operación de confinamientos o depósitos de residuos; y
- IV. El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

Artículo 136 Los residuos que se acumulen o puedan acumularse y se depositen o infiltren en los suelos deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir o evitar:

- I. La contaminación del suelo;
- II. Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;
- III. Las alteraciones en el suelo que modifiquen su aprovechamiento, uso o explotación.
- IV. Riesgo y problemas de salud.

A pesar que durante los años de 1995 y 1996 se llevó a cabo un proceso exhaustivo de revisión de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente con miras a establecer importantes reformas a este cuerpo legal, hasta la fecha nuestro país no cuenta con una legislación clara en materia de suelo y subsuelo.^{49,50} El capítulo III Prevención y control de la contaminación del suelo únicamente analiza la generación y disposición de residuos sólidos y peligrosos como único causante de la contaminación del suelo, mientras que las instalaciones subterráneas que merecen mayor importancia dentro de la materia, se relegan a un segundo plano. Tampoco se considera que en los tanques subterráneos o sobre tierra pueden albergar combustibles o solventes que son empleados como materia primas, por lo que no corresponden a residuos, aunque pueden tener el mismo grado de peligrosidad.⁵

Por otro lado, la LGEEPA no ha instrumentado o especificado a través de Reglamentos o Normas Oficiales Mexicanas (NOM) los criterios para la evaluación de los suelos y aguas subterráneas contaminadas, mucho menos se cuenta con los niveles de limpieza para suelos y aguas subterráneas. Debido a esto las autoridades ambientales mexicanas han establecido procedimientos y límites de limpieza a partir de información extranjera, principalmente de los Estados Unidos de América, pero sin un criterio objetivo y uniforme para seleccionar la más adecuada a nuestro medio.⁵

En aspectos relacionados con programas de financiamiento, México no cuenta con un programa central para el financiamiento gubernamental de reparación de sitios contaminados. La SEMARNAP ha creado un programa para solicitar contribuciones voluntarias de industrias para la limpieza de sitios abandonados con residuos peligrosos. Este programa establece que la SEMARNAP tendrá un papel de supervisión administrativa en acciones de limpieza, mientras que las industrias serán responsables de los contratistas y de llevar a cabo las actividades de reparación que fueran necesarias.⁴⁴

Como producto de estos vacíos en la legislación, no se le ha dado al suelo su valor como un recurso natural y no se ha enfatizado la necesidad de limpiar las zonas dañadas.

En el renglón del control de la contaminación de los recursos hidráulicos tanto superficiales como subterráneos, el marco legal vigente que las rige se estipula en dos leyes: la LGEEPA y la Ley de Aguas Nacionales publicada el 1º de diciembre de 1992, que tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable.⁵¹ El título Séptimo relativo a la prevención y control de la contaminación de aguas que tiene por objetivo la protección de aguas superficiales y subterráneas sin distingo alguno, menciona.⁵²

Artículo 85: Es de interés público la promoción y ejecución de las medidas y acciones necesarias para proteger la calidad del agua, en los términos de ley.

Artículo 86: “La Comisión” tendrá a su cargo:

- I. Promover y, en su caso, ejecutar y operar la infraestructura federal y los servicios necesarios para la preservación, conservación, y mejoramiento de la calidad del agua en las cuencas hidrológicas y acuíferos, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas respectivamente y las condiciones particulares de descarga, en los términos de ley;

- VI. Promover o realizar las medidas necesarias para evitar que basura, desechos, materiales y sustancias tóxicas, y lodos productos de los tratamientos de aguas residuales, contaminen las aguas superficiales o del subsuelo y los bienes que señala el artículo 113.

Así mismo el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales publicado el 12 de enero de 1994 se refiere a la contaminación del suelo en los siguientes términos:⁵³

Título Séptimo: Prevención y control de la contaminación de las aguas.

Artículo 150: “La Comisión”, en el ámbito de su competencia, promoverá las medidas preventivas y de control para evitar la contaminación de las aguas superficiales o las del subsuelo por materiales y residuos peligrosos. En el caso de que el vertido o infiltración de dichos materiales y residuos peligrosos contaminen las aguas nacionales superficiales o del subsuelo, o los bienes nacionales a que se refiere la “Ley”, “La Comisión” determinará las medidas correctivas que deban llevar a cabo las personas físicas o morales responsables o las que, con cargo a éstas, efectuara “La Comisión”.

Además de las disposiciones de control de la contaminación, la Ley de Aguas Nacionales señala los sistemas para el monitoreo y planeación de la calidad y cantidad de las aguas del subsuelo. Como parte del Plan Nacional de Aguas, la Comisión Nacional del Agua debe elaborar un programa integral de protección de las aguas del subsuelo con base en la relación entre el uso de la tierra y la cantidad y calidad de dichas aguas.

En lo que se refiere a la contaminación de las aguas, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología publicó en el Diario Oficial de la Federación del 13 de diciembre de 1989, el acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89.

Este acuerdo establece los criterios para calificar los cuerpos de agua como aptos para utilizarlos como:

- a) Fuentes de agua potable
- b) En actividades recreativas con contacto primario
- c) Para riego agrícola
- d) Para usos pecuarios
- e) Para la protección de la vida acuática en agua dulce y agua marina

3.3 Legislación ambiental norteamericana

Estados Unidos de América no cuenta con una ley de marco ambiental global. La Ley Nacional de Políticas Ambientales de 1969 (NEPA, por sus siglas en inglés), contiene disposiciones que se acercan en su concepto a una política nacional ambiental. El Congreso declaró en la NEPA que “ésta es una política permanente del gobierno federal, en cooperación con el estado y los gobiernos locales y con otras organizaciones públicas y privadas interesadas; que es necesario utilizar todos los medios y medidas viables, incluyendo la asistencia financiera y técnica, calculada de tal forma que aliente y promueva el bienestar general, creando y manteniendo condiciones bajo las cuales el hombre y las naturaleza puedan existir en armonía productiva, y se puedan satisfacer los requisitos sociales, económicos y otros requerimientos de las generaciones actuales y futuras de los norteamericanos”. El gobierno federal tiene la responsabilidad permanente de “usar todos los medio viables, consistentes con otra políticas nacionales, para mejorar y coordinar los planes, funciones, programas y recursos federales con el fin de que la nación pueda: (1) cumplir sus responsabilidades de cada generación como depositario del ambiente para las generaciones venideras; (2) garantizar a los norteamericanos un medio ambiente seguro, sano, productivo, estético y culturalmente placentero; (3) lograr el más amplio intervalo de usos benéficos del ambiente sin que esto provoque degradación, riesgo para la salud o la seguridad, u otras consecuencias indeseables y no previstas; (4) preservar los aspectos históricos, culturales y naturales de nuestro patrimonio cultural y mantener, siempre que sea posible, un ambiente que apoye la diversidad y variedad de la elección individual; (5) lograr el equilibrio entre la población y el uso de los recursos que permitirá niveles de vida más elevados y compartir ampliamente las comodidades de la vida; y (6) mejorar la calidad de los recursos renovables y lograr el máximo reciclamiento posible de los recursos agotables”. Esta declaración de políticas nacionales no influye substancialmente en el desarrollo o la instrumentación de las leyes ambientales.⁴⁴

3.3.1 Legislación norteamericana sobre residuos peligrosos

En la legislación norteamericana existe desde 1965 la Ley sobre Disposición de Residuos Sólidos (SWDA, por sus siglas en inglés) y desde 1970 la Ley de Recuperación de Recursos, las cuales se fusionaron en 1976 para formar la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés),⁴⁴ la cual tiene por objetivos:⁵⁴

- a) La protección de la salud humana y el ambiente.
- b) Reducir la generación de residuos y conservar las fuentes de energía y los recursos naturales.
- c) Reducir o eliminar la generación de los residuos peligrosos tan rápidamente como sea posible.

Esta política envuelve cuatro elementos básicos:^{55,56}

- a) Identificación del generador y tipo de residuos que produce.
- b) Transporte de residuos mediante un manifiesto de informe, describiendo el residuo, su cantidad, el generador y receptor, y como es transportado.
- c) Restricciones y controles sobre las instalaciones de residuos peligrosos. Se deberá seguir las regulaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en materia de disposición, tratamiento y almacenamiento de residuos peligrosos.
- d) Cumplimientos y sanciones a generadores, transportadores e instalaciones con el objetivo de hacer cumplir las regulaciones.

Los principales programas del RCRA incluyen el programa de residuos sólidos, incluido dentro del subtítulo D mediante el cual se fomenta en los estados de la Unión Americana el desarrollo de planes racionales de administración del residuo sólido no peligroso, por ejemplo la basura domiciliaria. Y el programa de residuos peligrosos cubierto en el subtítulo C, que establece un sistema de administración del residuo peligrosos desde la generación hasta la disposición y limpieza denominado “de la cuna a la tumba”. Este programa es administrado a través de programas estatales autorizados. Los Estados de la Unión Americana pueden y, a menudo tienen controles más estrictos que los programas federales.⁵⁷

El 8 de noviembre de 1984 la RCRA es ratificada por el Congreso de los Estados Unidos de América y transformada en la Reforma de los Residuos Sólidos y Peligrosos (HSWA, por sus siglas en inglés), incorporando importantes reformas y programas, entre otros programas, el Programa de Tanques de Almacenamiento Subterráneo (UST, por sus siglas en inglés) como subtítulo I del RCRA.

Este programa establece normas de funcionamiento para nuevos sistemas de tanques de almacenamiento subterráneo, y exige acciones preventivas y correctivas de detección de fugas en los lugares en donde existan tanques subterráneos.⁵⁴

El programa se aplica a todos los tanques que estén bajo el suelo por lo menos en un 10% y que tengan capacidades mayores a 1100 galones, los cuales sean usados para almacenar productos derivados del petróleo, incluyendo gasolinas y petróleo crudo y cualquier sustancia definida como peligrosa bajo la Ley Global de Responsabilidad, Compensación y Respuesta al Medio Ambiente (CERCLA, por sus siglas en inglés).⁵⁷ No se incluye a ciertas categorías de tanques en esta

disposición, por ejemplo, los tanques con residuos peligrosos, los cuales se rigen por el Subtítulo C de la RCRA; los tanques de tratamiento de aguas residuales regulados por la Ley de Aguas Limpias (CWA, por sus siglas en inglés), los tanques localizados en granjas o casas habitación de menos de 1100 galones de capacidad de combustible para motores; los tanques usados para almacenar petróleo para calefacción de consumo interno; los sistemas de recolección de aguas pluviales o residuales, así como las fosas sépticas.⁴⁴

La RCRA contiene un gran número de definiciones que son esencialmente las mismas que se encuentran en el CERCLA. La Ley de Conservación y Recuperación de Recursos define como “sustancia peligrosa” a cualquier sustancia que tenga características definidas en la RCRA y la Ley de Disposición de Residuos Sólidos (SWDA, por sus siglas en inglés) como peligrosa. La definición de sustancia peligrosa dentro del RCRA contiene una notable exclusión para el petróleo y sus productos derivados, esta exclusión es conocida como “la exclusión del petróleo”:

“El termino residuos peligrosos no incluye el petróleo, incluyendo petróleo crudo o cualquier fracción de la cual no esté listado o designada como sustancia peligrosa bajo otra definición en esta Ley, además el término no incluye gas natural, gas natural licuado o gas sintético usado como combustible (o mezcla de gas natural y gas sintético)”.

En algunos estados de los Estados Unidos de América esta exclusión no se aplica a suelos contaminados con benceno o algunos otros desechos del petróleo. La USEPA, ha propuesto una reglamentación para excluir permanentemente a los suelos contaminados con gasolinas como un residuo peligroso. Sin embargo los estados pueden tener regulaciones más estrictas que las regulaciones federales.

Si bien los productos derivados del petróleo están cubiertos bajo el subtítulo I del RCRA, aquellos productos fabricados a base de petróleo que contengan características de material peligroso (Subtítulo C del RCRA), y no sean usados como combustibles u otro producto típico del petróleo, deben ser tratados como material peligroso, no como producto del petróleo. Esto es, productos hechos de sustancias derivadas del petróleo pero manufacturados dentro de productos no petroleros, no están autorizados para ser protegidos bajo “la exclusión del petróleo”. Por ejemplo, los anticongelantes contienen etilenglicol, un material listado como peligroso derivado del petróleo. Otros ejemplos de productos comerciales o industriales derivados del petróleo que son peligrosos incluyen: cloruro de vinilo, todos los clorofluorocarbonos, bifenilos policlorados, etc.¹⁴

3.3.2 Legislación norteamericana sobre contaminación del suelo

En 1980 se emitió la Ley Global de Responsabilidad, Compensación y Respuesta al Medio Ambiente (CERCLA, por sus siglas en inglés), que viene a llenar los espacios vacíos que deja la RCRA para cubrir sitios inactivos y prácticas pasadas de disposición.³⁹

La CERCLA establece un fondo gigantesco procedente de impuestos y donaciones conocido como *Superfondo*, inicialmente de 1600 millones de dólares para que la USEPA desarrolle la política y los procedimientos para contener y remover derrames de sustancias peligrosas y limpie sitios contaminados. Posteriormente, en 1986, La CERCLA es reformada en la Ley de Restauración y Reforma al *Superfondo* (SARA, por sus siglas en inglés) que proporciona fondos federales por 9000 millones de dólares para atender sitios donde no es posible identificar al contaminador o éste no tiene la capacidad económica y técnica para limpiar el sitio.

La CERCLA establece por otra parte, el esquema de notificaciones por derrames y por actividades de disposición previas. Asimismo, establece la Lista Nacional de Prioridades (NPL, por sus siglas en inglés), la cual incluye los sitios más seriamente contaminados que sean candidatos para su limpieza y el Plan Nacional de Contingencias (NCP, por sus siglas en inglés), que establece los procedimientos de cómo limpiar un sitio de la NPL y cualquier otro lugar contaminado.³⁹

La RCRA y CERCLA son leyes que fueron desarrolladas para proteger la salud y el ambiente; sin embargo, entre ellas existen diferencias. CERCLA es un programa orientado a dar a la USEPA la autoridad para llevar a cabo limpiezas o para obligar a las partes potencialmente responsables para rehabilitar los sitios de la NPL. Por otro lado, la RCRA es una ley orientada al proceso, la cual obliga a los dueños a manejar sus instalaciones de una manera especificada.

La USEPA regula que cualquiera de las siguientes cuatro condiciones se apliquen antes de que una instalación RCRA se pueda transferir al programa de limpieza del Superfondo:

- a) El dueño u operador de una instalación RCRA se declare en bancarrota y las cortes protejan los activos de la instalación.
- b) Una instalación RCRA pierda su autorización para operar.
- c) Una instalación RCRA sea negligente al someter o ejecutar un plan de cierre aceptable.
- d) Una instalación RCRA viole otras directrices de la RCRA.

Dentro de la legislación ambiental de Estados Unidos existen además, otros programas de financiamiento destinados a combatir la contaminación ambiental, entre ellos el Fideicomiso para Derrames de Tanques de Almacenamiento Subterráneo, el Fideicomiso para la Responsabilidad por Derrames de Petróleo, así como una gran cantidad de fondos estatales.⁴⁴

3.4 Comparaciones y contrastes entre la ley ambiental mexicana y la ley ambiental norteamericana

Estados Unidos cuenta con una legislación bien establecida en materia de prevención y control de la contaminación de suelo y subsuelo. La Ley federal directamente exige la limpieza del sitio contaminado con petróleo, a través de la Ley de Recuperación y Conservación de Recursos, RCRA. Otras leyes rigen durante la rehabilitación del sitio, como la Ley Global de Responsabilidad, Compensación y Respuesta al Medio Ambiente mejor conocida como *Superfondo* y la Ley de Restauración y Reforma al Superfondo (SARA), así como la Ley de Seguridad de Agua Potable (SDWA) y la Ley de Aguas Limpias (CWA). El organismo encargado de que estas leyes se cumplan es la Agencia de Protección Ambiental.

La USEPA tiene varias estrategias para obligar a la limpieza de sitios, una de ellas se refiere a la obligación de reportar derrames o "liberaciones al ambiente", hay enormes multas y hasta encarcelamiento para aquellos que no lo hagan. Cuando un derrame ocurre, a través de la RCRA se obtiene la licencia para aislar el sitio por considerar que en el lugar hay materiales peligrosos, su limpieza se obliga por una resolución que se toma en la corte y los estándares impuestos para la limpieza son substancialmente más estrictos y caros. Esto hace más atractivo limpiar un derrame por voluntad propia en lugar de llevar el asunto a juicio.

Por lo que respecta a México hay varios aspectos que es necesario abordar de manera urgente, los cuales se citan a continuación:

- La creación de un Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación del Suelo y Subsuelo que responda a la Legislación Ambiental;
- La generación de los instrumentos regulatorios (Normas Oficiales Mexicanas) fundamentales para las acciones de rehabilitación de suelos, como son los límites permisibles de contaminantes que se convertirán en los niveles de limpieza para sitios contaminados y la metodología oficial para el seguimiento de las actividades de rehabilitación;
- La creación de programas de financiamiento destinados específicamente a prevenir y controlar la contaminación de suelo y subsuelo.

El compromiso que adquirió México ante la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos de Norteamérica y Canadá, es un reto de competitividad ante estas dos grandes potencias en el terreno comercial, pero también ambiental a través de los Acuerdos de Cooperación Ambiental y Laboral. El hecho de no contar con una legislación clara en materia de suelo y subsuelo, es una desventaja, por lo que se hace prioritaria una modificación razonable.

CAPITULO IV

METODOLOGIA PARA LA PLANEACION Y ESTABLECIMIENTO DE SISTEMAS DE REHABILITACION

El tratamiento de suelos y aguas subterráneas contaminadas tiene el objetivo fundamental de mitigar los impactos adversos a los seres humanos y al medio ambiente.⁵⁸ Su aplicación representa un campo relativamente nuevo y su diseño está muy relacionado con el tratamiento de aguas residuales; sin embargo, sus requerimientos específicos son únicos. Actualmente la planeación, diseño y operación de los sistemas de rehabilitación están basados únicamente en información teórica y experimental a escala piloto, debido principalmente a que aún no se cuenta con la suficiente experiencia en la operación de estos sistemas que proporcione especificaciones de diseño más exactas.^{59,60}

El objetivo de este capítulo es presentar la metodología para la planeación y el establecimiento de los sistemas de rehabilitación utilizados en los programas de limpieza de sitios contaminados en Estados Unidos.

4.1 Actividades preliminares

Para la toma de decisión de la tecnología de rehabilitación más adecuada, es necesario desarrollar una estrategia de investigación y trabajo que permita seleccionar la opción de tratamiento óptima de acuerdo con una serie de factores de decisión, impacto ambiental y análisis de costo-eficiencia. En este aspecto, la Agencia Norteamericana para la Protección al Ambiente ha desarrollado los siguientes lineamientos:⁶¹

- a) EPA (October 1988) *Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under CERCLA*, OSWER Directive 9335.3-01. Interim Final.
- b) EPA (March 1989) *Risk Assessment Guidance for Superfund-Environmental Evaluation Manual*, OSWER Directive 9285.7-01. Interim Final.
- c) EPA (September 1989) *Risk Assessment for Superfund. Volume I: Human Health Evaluation Manual*, OSWER Directive 9285.7070. Interim Final.

Los pasos básicos de esta metodología incluyen:

- Actividades preliminares
- Investigación de rehabilitación
- Estudio de factibilidad
- Diseño de la rehabilitación
- Acción de la rehabilitación

La Figura 4.1 ilustra esquemáticamente el tipo de secuencia y flujo del proceso. En esta figura, así como en el presente capítulo se pretende ilustrar los componentes técnicos generales de esta metodología. Las actividades técnicas específicas solo pueden ser determinadas de acuerdo con las características propias de cada proyecto.⁵⁸

Las actividades preliminares comprenden la selección de un grupo multidisciplinario de trabajo, la recopilación, evaluación y análisis de la información existente y disponible, la definición y caracterización del problema, la formulación y la planeación del proyecto de rehabilitación del sitio.

El proceso de recopilación de información incluye la localización de todos los registros y bases de datos que puedan existir y estar disponibles; dichas fuentes de información pueden contener:

- Información relacionada con las actividades antropogénicas desarrolladas en el lugar de estudio.
- Detalles técnicos, incluyendo información de carácter ambiental, fenómenos naturales, etc.
- Información respecto al historial de orden legal del sitio y lugares circunvecinos.

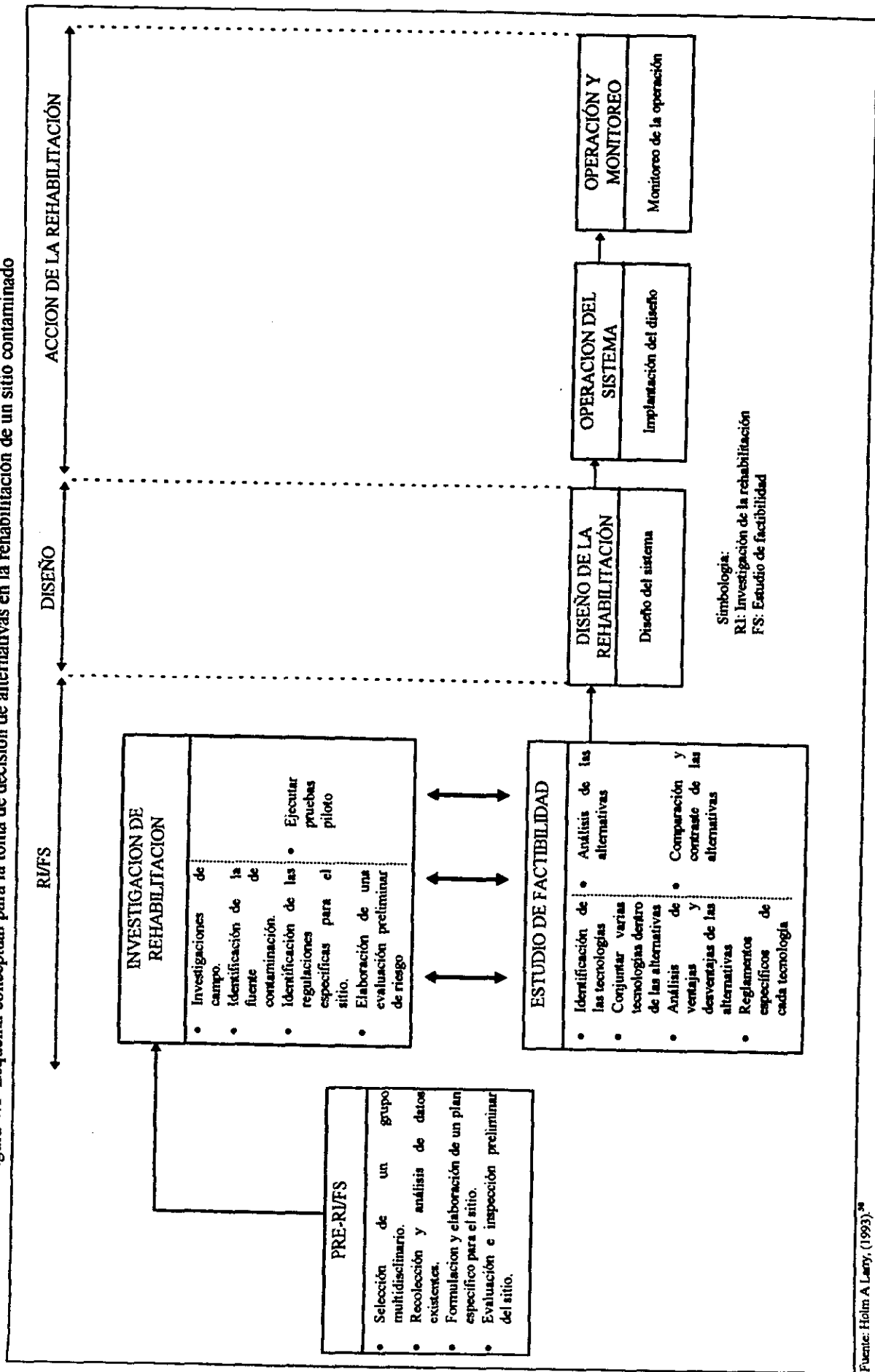
a). Actividades antropogénicas:

La información de las actividades desarrolladas previamente por el hombre en la zona de contaminación, tienen una notable influencia e incluye: 1) tipos de usos de suelo, 2) registros de eventos catastróficos, y 3) actividades desarrolladas previamente en el sitio de estudio.

b). Información técnica:

La investigación preliminar debe incluir la búsqueda de información técnica, a pesar de que ésta, en muchas ocasiones es cuestionable y en otras inexistente. La información requerida incluye:

Figura 4.1 Esquema conceptual para la toma de decisión de alternativas en la rehabilitación de un sitio contaminado



1) estudios geológicos, 2) datos de calidad del agua superficial y subterránea, 3) datos hidrológicos de cuerpos de agua superficial y subterránea, 4) información cartográfica y otros.

c). Aspectos legales:

Las bases de información pueden proporcionar información importante como: 1) permisos de construcción, 2) infracciones en materia de salud, ambiente y riesgo, 3) zonificación y cambios en el uso del suelo y otros.⁶²

Otro aspecto importante dentro de las actividades preliminares es la definición y caracterización del problema, que se define en dos términos: 1) problemas anticipados, que por lo general surgen de aquellas actividades altamente contaminantes y que amenazan a los suministros de agua subterránea. 2) problemas existentes donde una instalación o actividad con potencial amenazante es ya un hecho. Posteriormente a la identificación del problema se debe conocer las características del problema relacionado con la fuente, la cual puede ser puntual, de área, lineal o regional. El factor primordial ante un problema existente de contaminación es la urgencia de dar una solución inmediata a dicho problema, dependiendo de las características y duración de la contaminación. Si el sitio contaminado representa una fuente de abastecimiento de agua potable, o el problema fue descubierto debido a una respuesta adversa de la salud pública, deberá ser necesaria tal solución inmediata.

Las actividades preliminares rara vez permiten definir con detalle las fuentes de contaminación y las vías de propagación y receptores, pero permite tener una comprensión de la situación general del sitio, por lo que es posible formular un plan de trabajo y conocer el requerimiento de acción inmediata de tratamiento, las cuales están limitadas al cierre de la fuente de contaminación, control de las vías de exposición mediante el control de acceso al sitio o la instalación de fuentes temporales de agua potable, entre otros.

El establecimiento de un sistema para el control de calidad en la recopilación, manejo y análisis de la información proporciona, entre otras cosas, una mayor seguridad en la formulación de restricciones de acceso al sitio, y en el desarrollo de medidas de protección para el personal que realizará las visitas de prospección y actividades de investigación de campo.⁶³

4.2 Investigaciones sobre rehabilitación

La investigación de la rehabilitación (RI, por sus siglas en inglés) permite tener una mejor definición de las características particulares del problema y las posibles tecnologías de rehabilitación a desarrollar mediante la recopilación e interpretación de los datos de la exploración de campo, las pruebas de laboratorio, y la realización de un análisis de riesgo para estimar las condiciones del sitio.⁶⁴

El detalle y duración de la investigación de rehabilitación se determina en función de la urgencia del problema y de los recursos disponibles debido a que la mejor tecnología de tratamiento depende no solo de las características fisicoquímicas del contaminante sino también de las características hidrogeológicas del sitio, los aspectos legales, económicos y otros. Debido a esto, un aspecto importante que debe ser considerado antes de realizar cualquier estudio a detalle, es el correspondiente al financiamiento. Una vez que las posibilidades de financiamiento han sido establecidas, los alcances del análisis pueden ser adecuadamente delineados.

A continuación se mencionan las áreas de información de interés, su presentación no tiene un orden en particular, aunque algunos casos sean dependientes unas de otras.⁶⁵

- **Suelo y agua subterránea:** Este concepto incluye la caracterización del subsuelo en el área de estudio con dos propósitos principales. El primero es obtener una descripción de las características hidrogeológicas del lugar. El segundo, consiste en la identificación y el diseño de las estrategias potenciales de rehabilitación de un acuífero, a través del conocimiento de la hidrogeología.

Algunos áreas de información necesarias incluyen los siguientes conceptos:

Textura	Disponibilidad de nutrientes
pH	Fuentes de carbono
Porosidad	Velocidad de recarga
Permeabilidad	Escurrimientos potenciales
Densidad	Profundidad del nivel freático
Contenido de materia orgánica/carbono orgánico	Profundidad de la contaminación
Capacidad de intercambio catiónico	Contenido de arcilla
Oxígeno disuelto	Presencia de metales: Mg, Cu, Ni, Fe, Mn
Potencial redox	Alcalinidad
Humedad del suelo	Población microbiana

- **Caracterización del lugar:** Una descripción de las características generales del lugar, es también importante porque permite conocer los atributos de la superficie del sitio que afectaran directa o indirectamente al ambiente del subsuelo, los atributos que necesitan ser conocidos son los siguientes:

Precipitación	Evapotranspiración
Temperatura	Características topográficas
Presión atmosférica	Geología superficial

Velocidad del viento
Accesibilidad
Tamaño de la zona

Proximidad a cuerpos superficiales de agua
Proximidad a centros de población

-
- **Caracterización fisicoquímica de los contaminantes:** Permite determinar el tratamiento tecnológico que se requerirá para remover el daño de una determinada área y también puede dar información de las posibilidades de recuperación del acuífero, desde el punto de vista técnico y económico.

Propiedades físicas y químicas:

Distribución en el ambiente

Peso molecular

Suelo/agua

Difusividad

Suelo/aire

Presión de vapor

Aire/agua

Punto de ebullición

Velocidad de degradación

Punto de fusión

Biótica

Solubilidad

Abiótica

Densidad

Grado de toxicidad

-
- **Uso de agua y sus requerimientos:** La determinación del uso del agua subterránea así como sus futuros requerimientos en el área de estudio de estudio ayudarán a determinar la necesidad crítica de tratamiento o la contaminación de la fuentes de agua subterránea. Las categorías de información que es necesario conocer son las siguientes:

Uso actual

Niveles de calidad del agua:

Para uso actual de las fuentes de agua

Para uso futuro de las fuentes de agua

Uso futuro

Costos

-
- **Evaluación de riesgo y costos a la salud:** Habiendo identificado la toxicidad y riesgos a la salud de un contaminante durante la etapa de definición de la pluma de contaminación, es necesario desarrollar una evaluación de riesgo para dar por hecho el potencial actual de los impactos en la salud humana. Este esquema es esencial en la evaluación de las alternativas de tratamiento de un sitio contaminado. La información que es necesaria conocer se presenta a continuación:
 - **Problemas potenciales de salud:** La información sobre los problemas de salud debidos al contaminante considerado, deben obtenerse a partir de la delineación de pluma de contaminación. Específicamente, la información necesaria consiste en conocer las características de toxicidad carcinogénica o de amenaza a la salud por inhalación, ingestión o contacto.

- Evaluación de riesgo: Es recomendable llevar a cabo una evaluación de riesgo con el objetivo principal de identificar y evitar los riesgos a la salud humana. Obviamente, si los niveles de cualquier contaminante sobrepasan los niveles de riesgo a la salud humana, el riesgo es alto.
- Uso del suelo y modelos de crecimiento: El objetivo de la información bajo estos conceptos, es el de asegurar que las estrategias de rehabilitación no lleguen a ser inútiles en la práctica. Específicamente, no sería prudente gastar millones de pesos en la rehabilitación de un sitio en particular que solo es uno de muchos contaminados o potencialmente contaminados en la actualidad. La información de utilidad bajo estas consideraciones incluye el uso presente y futuro del suelo.
- Regulaciones institucionales: Un paso importante en cualquier estrategia de rehabilitación es la identificación dentro de las primeras etapas del proyecto, de las regulaciones institucionales que envuelven las actividades de tratamiento, así como los programas de rehabilitación ya establecidos.
- Financiamiento: Probablemente, el mayor obstáculo que se presenta en los programas de rehabilitación, es el aspecto del financiamiento económico. En términos simples, el tratamiento de un sitio contaminado puede ser una empresa muy costosa, debido no solo a que las tecnologías son caras en instalación y operación, sino que también presentan un alto grado de dificultad en el diseño. Una evaluación preliminar de la disponibilidad de recursos económicos debe realizarse inmediatamente después de la identificación del problema. Basado en la viabilidad de fondos, podrá ser determinado el alcance del proyecto. Si no se cuenta con suficientes recursos, el diseño y los análisis a detalle deberán ser reemplazados por estudios y análisis a menor escala.⁶¹

Mientras que muchas de las técnicas para la investigación de rehabilitación y su aplicación, particularmente en exploraciones superficiales, son tradicionales en la Ingeniería Geológica, las aplicaciones de la investigación consideran lo siguiente:

- Salud y seguridad del personal de campo.
- Descontaminación del equipo; antes, durante y después de su uso.
- Manejo de muestras y cadena de custodia
- Contaminación cruzada del medio
- Disposición de los residuos derivados de la exploración

4.3 Estudio de factibilidad

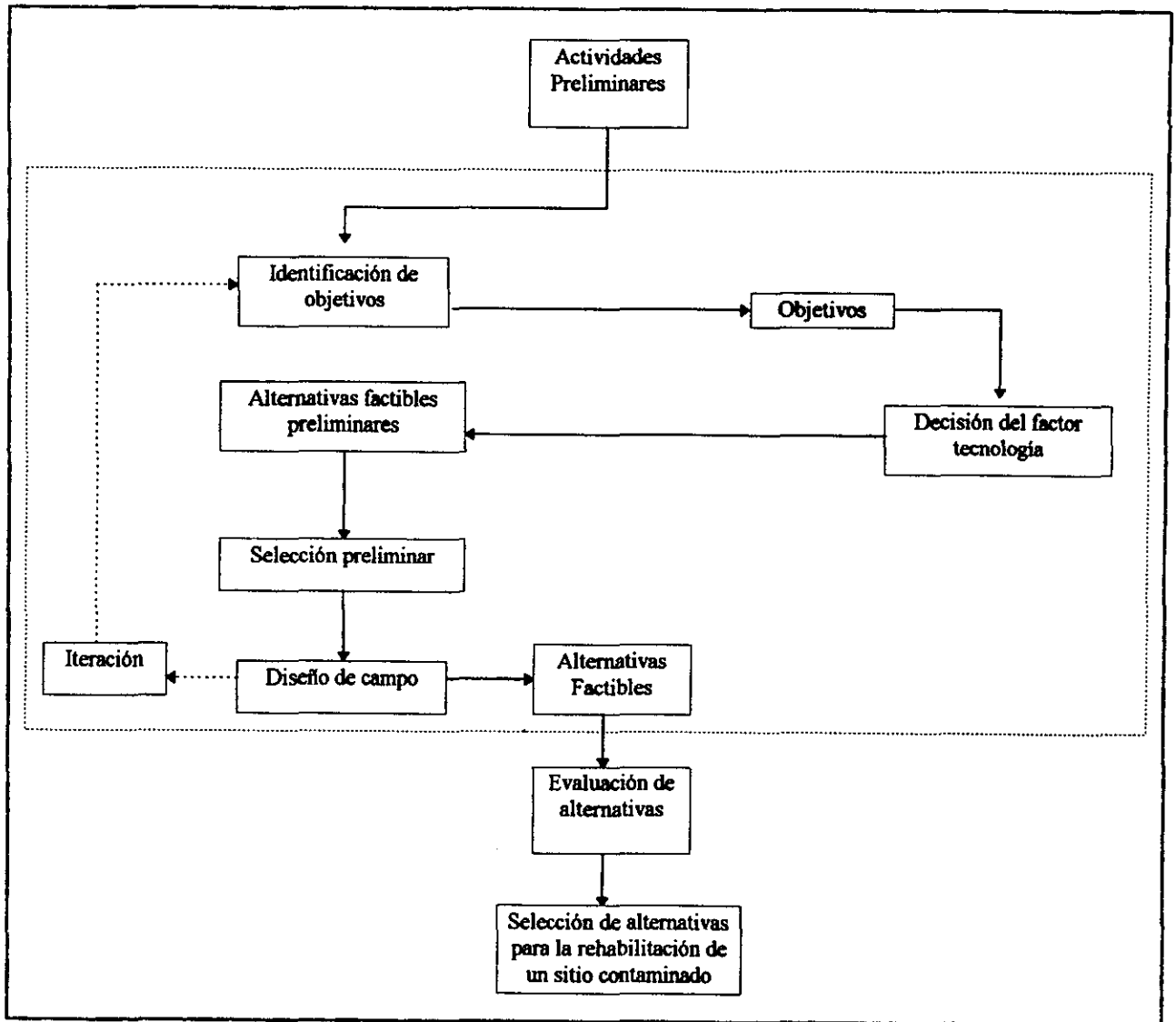
El estudio de factibilidad (FS, por sus siglas en inglés) tiene el objetivo de desarrollar y evaluar un conjunto de alternativas de tratamiento para seleccionar la más adecuada a las condiciones específicas del sitio sujeto a estudio. Como se muestra en la figura 4.1, el estudio de factibilidad interactúa y retroalimenta a la investigación de rehabilitación con respecto a la información necesaria de tecnologías de rehabilitación especiales. Los estudios de factibilidad y de rehabilitación son independientes y normalmente se conducen en forma simultánea. Esta interacción es esencial para evitar la obtención de datos, que si bien pueden ser importantes para la definición del sitio, pueden ser muy poco o nada específicos con relación a la acción potencial de rehabilitación.⁶⁶

El primer paso para el estudio de factibilidad es la formulación de objetivos de rehabilitación, los cuales incluyen amplios requerimientos de protección a la salud humana y al medio ambiente. Los objetivos específicos están basados en la identificación preliminar de los criterios regulatorios y de riesgo. Mientras que esto puede ser deseable para comprender firmemente los objetivos, esto rara vez pueden ser definidos en las evaluaciones costo-efectividad de los estudios de factibilidad. Existen tres métodos para el establecimiento de objetivos.⁶⁷

- a) Objetivos basados en requerimientos regulatorios
- b) Objetivos basados en análisis de riesgo
- c) Objetivos basados en experiencia operativas

Una vez establecido el objetivo preliminar para una necesidad debidamente identificada, el siguiente paso es desarrollar un proceso de selección de alternativas para la rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados, ver Figura 4.2.

Figura 4.2 Desarrollo de alternativas



Fuente: Canter L.W. and Knox R.C., (1990).⁶¹

Este proceso incluye cuatro objetivos diferentes: prevención, abatimiento, limpieza y restauración. Prevención como su nombre lo indica, son medidas que no permiten que la contaminación ocurra. El contexto prevención será tomar las medidas de “no permitir que los contaminantes alcancen el agua subterránea”. El abatimiento de la contaminación en el agua subterránea incluirá la suspensión de contaminantes móviles en el agua, y la obstrucción del movimiento del contaminante habiendo ya alcanzado el agua subterránea. La limpieza se refiere a la eliminación del contaminante, como la extracción y el tratamiento del agua o la inmovilización en el sitio. La restauración incluirá aquellas medidas que prueben que el acuífero puede regresar a su estado “original”, o al nivel requerido según el uso del sitio. Dichas medidas incluyen estratégicamente una limpieza, más la recarga de agua

fresca o tratada, de aquí el hecho de que las alternativas no son independientes, más específicamente, una limpieza efectiva puede también incluir los pasos de prevención y abatimiento.

Teniendo desarrollada una lista de tecnologías factibles (alternativas) es recomendable realizar un proceso de selección preliminar. A continuación se presentan algunos factores que pueden ser considerados para tal efecto:

- a) **Técnica factible:** Se debe considerar la factibilidad técnica de todas las alternativas. Algunas tecnologías han sido ampliamente usadas y sus éxitos documentados; otras están todavía en etapa de desarrollo, o al menos su aplicación al control de la contaminación del agua subterránea ha sido limitado. Otra consideración será la capacidad técnica de las personas que operan la tecnología propuesta. En algunas tecnologías su diseño es complejo y requiere monitoreo y mantenimiento extensivo para la operación exitosa. Si el personal no estuviera adiestrado para manejar tales responsabilidades, es recomendable considerar otro sistema.
- b) **Aceptación pública:** Un aspecto importante para un proyecto de restauración de acuíferos es que debe ser aceptado por el público. Si la solución presentara una superficie mal vista para el público o una operación de altos requerimientos técnicos, podrá considerarse indeseable.
- c) **Restricciones físicas:** Algunas de las alternativas potenciales podrían ser eliminadas por restricciones físicas obvias, por ejemplo, la fijación de barreras impermeables podrían no ser factibles en un área densamente poblada.

Con la selección preliminar y los datos del costo del diseño de campo, sería apropiado una iteración a través del procedimiento bosquejado anteriormente. Tal vez, los datos generados podrían indicar que todas las alternativas posibles exceden los recursos disponibles. En este caso podría ser necesario redefinir los objetivos de la estrategia del manejo de las aguas subterráneas, e intentar desarrollar nuevas tecnologías posibles para alcanzar nuevos objetivos modificados. El propósito de la iteración es, además, restringir la lista de alternativas potenciales a las económicamente y técnicamente factibles.

Por último, la evaluación y selección de las alternativas y estrategias de rehabilitación factibles, deberá provenir de la consideración equilibrada de factores técnicos, económicos y ambientales. Un criterio frecuente y gradualmente citado "la acción más económica que reduce riesgos a un nivel aceptable" puede considerarse como la más efectiva.⁶¹

4.4 Diseño y desarrollo de las actividades de rehabilitación

Una vez que la alternativa o el conjunto de alternativas de rehabilitación ha sido seleccionado, puede iniciarse un diseño a detalle de un sistema de rehabilitación, éste incluye principalmente un diseño preliminar y varias etapas complementarias con diferentes grados de análisis hasta llegar al diseño final. Este proceso es muy similar al diseño de Ingeniería tradicional; sin embargo, varios aspectos justifican la presencia de consideraciones especiales en el diseño de un sistema de rehabilitación.

El sistema de rehabilitación debe incluir el diseño, construcción, operación y mantenimiento del mismo, así como el monitoreo con respecto al tiempo.

CAPITULO V

CRITERIOS DE LIMPIEZA PARA LA REHABILITACION DE SUELO Y AGUA SUBTERRÁNEA

Un problema crítico y controversial en la rehabilitación de sitios contaminados, ha sido siempre la evaluación significativa de la contaminación y el establecimiento del grado de limpieza requerido. En este último aspecto, varios criterios han sido desarrollados; sin embargo, hasta este momento el debate continua sobre cuál o cuáles son los más apropiados.

5.1 Revisión de los criterios utilizados para el establecimiento de los niveles de limpieza en la rehabilitación de sitios contaminados.

A continuación se presentan algunos criterios para el establecimiento del nivel de limpieza requerido en la rehabilitación de sitios contaminados que varían ampliamente entre y dentro de los países. Ver Tabla 5.1.⁶⁸

En pocos casos existe un marco legal de carácter nacional, que sea claro y explícito. La evaluación de los sitios contaminados y el establecimiento de los objetivos de limpieza se llevan a cabo con procedimientos no sistemáticos los cuales se ven afectados por diferentes factores como: 1) el tipo de sitio y de contaminación, 2) los criterios y niveles de limpieza existentes y aplicables, 3) el marco legal y 4) la percepción y aceptación pública.

Tabla 5.1 Criterios utilizados en el establecimiento de los niveles de limpieza en la rehabilitación de sitios contaminados.

País	Criterios
Estados Unidos	Para los sitios dentro de la Lista de Prioridad Nacional(NPL, por sus siglas en ingles) se realizan evaluaciones de riesgo específicas para cada sitio. Para aquellos sitios que se encuentren fuera de esta lista, los procedimientos varían ampliamente por estado e incluyen múltiples criterios genéricos así como evaluaciones de riesgos específicas a cada sitio.
Canadá	Solo Quebec ha formalizado los criterios de limpieza. Para el establecimiento inicial de estos criterios, se utilizó una combinación entre una amplia lista de criterios genéricos adaptados de la "Dutch list" y el desarrollo de evaluaciones de riesgo.
Inglaterra	No cuenta con ningún sistema nacional para el establecimiento de criterios de limpieza. La agencia nacional de protección ambiental desarrolló una lista de los contaminantes más comúnmente encontrados en sitios de uso industrial.
Holanda	Cuenta con una política nacional para el mantenimiento de la calidad del suelo denominado "suelo multifuncional". Se promulgaron en 1983 los criterios genéricos (niveles A-B-C) para la evaluación de la contaminación (continuamente referida como "Dutch List"). Posteriormente en 1987 se promulgaron valores de referencia para una buena calidad del suelo (nuevo nivel A).
Alemania	No se cuenta con lineamientos nacionales al respecto; para tal efecto utiliza la "Dutch List" con consideraciones de acuerdo a las condiciones del sitio.
Francia	No existe un marco legal bien definido respecto al establecimiento de criterios de limpieza. Se utilizan evaluaciones de riesgo cualitativas.
Dinamarca	No cuenta con lineamiento nacionales. Utiliza como criterios genéricos la "Dutch List" y los pocos criterios existentes en el país. La decisión final para la rehabilitación de un sitio en particular se basa en consideraciones específicas del sitio.
Suecia	No existe lineamiento nacionales. Por lo general tiene un uso genérico la "Dutch List", pero para la decisión final el sitio intervienen diferentes factores principalmente técnicos, políticos y económicos.
Finlandia	Tiene una experiencia muy limitada en la rehabilitación de sitios contaminados, por lo que no se cuenta con lineamientos nacionales para el establecimiento de los niveles de limpieza. Utiliza la "Dutch List".
Noruega	La decisión final para el establecimiento de criterios de limpieza se basa fundamentalmente en la factibilidad técnica, la factibilidad económica y en el uso futuro que se desea dar al sitio.

Fuente: Siegrist L. Robert, (1990).⁴⁸

5.2 Desarrollo y establecimiento de los criterios de limpieza para suelo y agua subterránea

Una vez que se ha diagnosticado el estado de contaminación del suelo y del subsuelo, se deben plantear alternativas de tratamiento y establecer los objetivos de limpieza. Es decir, el límite máximo de contaminantes que se aceptará en un suelo después de haber sido sometido a un tratamiento de rehabilitación.⁵

Existen dos escuelas principales para la selección de criterios de limpieza dependiendo de:⁶⁹

- El enfoque *por criterios*, que recomienda el uso de criterios preestablecidos definidos en función de diferentes parámetros.
- El enfoque *caso por caso*, que consiste en la evaluación de cada sitio mediante el análisis de los riesgos específicos.

En países que no cuenten con lineamientos que establezcan estos niveles de limpieza se puede seguir uno de estos caminos, o bien la combinación de ellos. Otra alternativa aplicada por países, que como México carecen de una normatividad clara en este renglón, es tomar como referencia normas extranjeras.⁶⁹

La concentración de contaminantes se expresa a través de un parámetro indicador, que corresponde al contaminante que está en mayor proporción o que es el más peligroso. Debido a que tampoco se cuenta con métodos analíticos oficiales para determinar la concentración de contaminantes en México, se acostumbra recurrir a los establecidos por otras instituciones oficiales extranjeras. Lo más común son los métodos USEPA y los de la Sociedad Americana para Prueba de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés), los cuales son identificados por una clave formada por dos números, el primero es progresivo y el segundo indica el año de publicación que en ciertos casos corresponde a una modificación del procedimientos.⁵

La concentración de los contaminantes se puede evaluar de manera global como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), o bien se elige el más tóxico de sus componentes. En el caso de las gasolinas se cuantifican los hidrocarburos monoaromáticos totales como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) o cada uno por separado, algunos eligen solamente el benceno por ser el más tóxico. Para gasolinas y diesel también se cuantifican los HTP, para el caso del diesel se pueden cuantificar algunos de sus hidrocarburos polinucleoaromáticos (HPNA) como naftaleno, antraceno o fenantreno que son también muy tóxicos. Existen varios métodos para cuantificar un mismo parámetro, pero algunos son específicos para muestras de agua y otros para muestras de suelo.⁵

- **Enfoque por criterios.**

Entre los países que han adoptado este tipo de enfoque, los Países Bajos fueron de los primeros en definir un modelo, del cual se inspiraron diferentes países europeos, Canadá, Australia y Nueva Zelanda.

La literatura indica criterios para la calidad ambiental de los suelos, sin embargo.⁶⁹

- la lógica o la argumentación que sirvió de base para estos criterios en general no está disponible,
- los enfoques para establecer los criterios varía de un organismo normativo a otro. En los Estados Unidos, por ejemplo, los criterios pueden variar considerablemente de un estado a otro, lo que dificulta la gestión de los suelos y aguas contaminadas,
- los criterios en general se establecieron de manera subjetiva y no están basados en un enfoque científico riguroso.

Para ilustrar esta situación se presenta a continuación una descripción de los enfoques adoptados en diferentes países, así como los factores que fueron utilizados más comúnmente en el establecimiento de estos criterios.

La manera de utilizar los criterios y el significado de éstos varía como el número de instituciones que los han establecido. Sin embargo, es posible agrupar esos enfoques para ciertos tipos de situaciones. Un modo de generalizar las formas de utilizar los criterios es tomar en cuenta el número de criterios definidos para cada contaminante. Este estudio bibliográfico muestra que las instituciones que definieron criterios establecieron entre uno y cuatro criterios numéricos para cada contaminante. Según el caso, la interpretación de los criterios son diferentes. Se mencionan los siguientes casos:⁶⁹

- **Instituciones que han establecido un criterio numérico por contaminante:** En este caso, el criterio representa el umbral para activar una investigación del sitio. Si las concentraciones de contaminantes son mayores a esos umbrales, se debe caracterizar completamente la contaminación del suelo y, en función de los resultados obtenidos, se define si es necesario descontaminar el sitio. Cuando las concentraciones son inferiores al criterio, no es necesario efectuar una limpieza del sitio. Este enfoque fue adoptado en Alberta, New Jersey y Australia. El método no toma en cuenta las condiciones específicas de un sitio.⁶⁹
- **Instituciones que han establecido dos criterios numéricos por contaminante:** El primer criterio, que corresponde al valor inferior, es equivalente al umbral de investigación descritos en el párrafo anterior; el segundo criterio que corresponde al valor superior, indica, en caso de ser excedido, que se requiere descontaminar el sitio o que se debe modificar el uso del suelo. Para

concentraciones de descontaminantes comprendidas entre estos dos criterios, se debe efectuar un estudio del sitio para evaluar si se debe descontaminar o no. Ciertos países definen criterios dobles para diferentes usos de suelo del terreno. El Reino Unido estableció este tipo de criterios.⁶⁹

- Instituciones que han establecido tres criterios numéricos por contaminante: Son las instituciones o países que usan el formato ABC. Aunque el origen de estos criterios sea común, las diversas instituciones los utilizan de forma diferente. Existen dos enfoques principales:

- A: Valor de referencia, abajo del cual el suelo es de buena calidad
- B: Valor que indica una cierta contaminación y efectos potenciales sobre la salud. Arriba de este valor se debe realizar un estudio más completo del suelo.
- C: Valor que cuando se rebasa, indica que se deben implantar acciones de restauración del sitio.

Este enfoque es utilizado por los Países Bajos. El otro enfoque relaciona los valores ABC con el uso del suelo.

Para terreno de uso agrícola, recreativo o residencial:

- A: Valor que corresponde al umbral para requerir un estudio más detallado del sitio.
- B: Valor arriba del cual se deben implantar acciones de restauración del sitio

Para terreno de uso comercial y/o industrial:

- A: Valor que corresponde al umbral para requerir un estudio más detallado del sitio.
- B: Valor arriba del cual se deben implantar acciones de restauración del sitio

Este enfoque está aplicado por el Ministerio del Ambiente de Quebec (MENVIQ), la Columbia Británica y el Consejo Canadiense de los Ministros del Ambiente (CCMER). Ver Tabla 5.3 a 5.5.

- Instituciones que han establecido cuatro criterios numéricos por contaminante: Cada valor representa un umbral de acción. El valor más bajo corresponde al umbral de anomalía es decir al límite superior para la concentración de sustancias que se encuentran en el ambiente. Los otros tres valores corresponden al umbral de investigación, umbral de tratamiento y umbral de emergencia. Francia es uno de los países que utiliza este enfoque.⁶⁹

En los estudios más recientes para la definición de los criterios de calidad ambiental, las instituciones incluyen varios factores y utilizan técnicas como modelización matemática, análisis de las vías de exposición y evaluación de riesgo. En general existen ocho factores fundamentales utilizados para el establecimiento y la recomendación de criterios:

- Ruido de fondo o concentración ambiental de las sustancias
- Movilidad ambiental de las sustancias
- Relación entre la calidad del agua y el suelo
- Bienestar de los animales y las plantas terrestres
- Consideraciones relativas a la salud pública
- Estética
- Límites de detección analítica
- Uso programado del sitio

Ciertas instituciones incluyen otros factores como el ataque a los materiales de construcción por sustancias corrosivas, el fuego y la explosión de contaminantes como metano, azufre y polvo de carbón, la salud de las plantas y animales acuáticos.

- **Ruido de fondo:** Las concentraciones químicas encontradas naturalmente en el ambiente corresponde al ruido de fondo y son uno de los factores más comúnmente utilizados para establecer criterios. En general, se consideran los ruidos de fondo como representativo del "ruido ambiental" y por ende como las condiciones aceptables. El ruido de fondo representa la meta final a alcanzar en un proceso de descontaminación. Para ciertas sustancias, como el mercurio y el cobalto, el ruido de fondo no varía mucho; en otros casos, como para el cobre y el selenio, el ruido de fondo es muy variable y su interpretación es más difícil. En el caso de compuestos relacionados con las actividades humanas, la información sobre los ruidos de fondo es de poca utilidad dado que su valor natural es equivalente a cero. Países como los Estados Unidos, Canadá, Alemania, Australia, Países Bajos y el Reino Unido han publicado datos relacionados con el ruido de fondo de ciertos contaminantes. En México no existen a la fecha un estudio publicado de los ruidos de fondo de contaminantes.⁶⁹
- **Movilidad Ambiental:** La movilidad ambiental se refiere a la habilidad y/o al modo por el cual una sustancia logra desplazarse en el ambiente. Las sustancias relativamente móviles incluyen las que son solubles en agua o volátiles. La movilidad depende de las condiciones ambientales del sitio tales como las propiedades hidrogeológicas del suelo, así como de las características fisico-químicas del contaminante. Las sustancias móviles tendrán tendencias a migrar fuera del sitio y a entrar en contacto con diversos receptores. En la definición de los criterios de calidad ambiental, ciertas instituciones toman en cuenta parámetros como textura del suelo, contenido en arcilla y materia orgánica.
- **Relación entre el suelo y la calidad del agua:** Existe una relación directa entre las condiciones del suelo y del agua subterránea adyacente. En muchos casos los criterios para las aguas subterráneas son derivados de los criterios existentes para el agua potable. Otras instituciones no definen criterios específicos para las aguas subterráneas porque su contaminación se debe en general a la

presencia de sustancias contenidas en el suelo y al mejorar la condición del suelo se mejora normalmente las condiciones del agua subterránea.

- **Salud de la plantas y animales terrestres:** Ciertas instituciones han utilizado la información disponible con relación a la salud de las plantas terrestres para establecer los criterios de descontaminación sobre todo para evitar los efectos fitotóxicos u otros efectos nocivos en los animales que pastan. La mayoría de los datos disponibles se refieren a los cultivos agrícolas y contaminantes como boro, cobre, níquel y zinc, dado sus efectos fitotoxicológicos conocidos. Casi no existe información de este tipo para los compuestos orgánicos.
- **Estética:** Los contaminantes presentes en el ambiente pueden ser fuentes de olores, formar películas o espumas superficiales en aguas, dar un sabor desagradable al agua o mal aspecto al suelo. Los criterios basados en el factor estético tienen como meta evitar estos efectos. Aunque los tipos de contaminantes que pueden generar daños estéticos son bien conocidos, no existe mucha información respecto a las concentraciones en el suelo para las cuales esos efectos se presentan. Por esta razón pocas instituciones toman en cuenta el factor estético en el desarrollo de sus criterios.
- **Capacidad analítica:** Varias instituciones utilizaron los límites de detección analítica para el desarrollo de sus criterios de descontaminación principalmente cuando no existe información sobre las sustancias. Para las sustancias relacionadas con las actividades humanas, se supone cualquier concentración que pueda ser medida es inaceptable en los sitios cuyo uso propuesto es residencial o agrícola. En caso de uso comercial o industrial, la concentración máxima aceptable es en general, definida como un múltiplo del límite de detección. Sin embargo, el uso del límite de detección analítica y su papel en el desarrollo de los criterios disminuye a medida que otros factores se vuelven más importantes. En efecto, aunque una sustancia pueda ser detectada, no se producirán necesariamente efectos nocivos. También cabe mencionar que a lo largo de los últimos años los límites de detección fueron mejorados, modificando así las metas a alcanzar. Para diversas sustancias naturalmente presentes en el suelo en concentraciones superiores a los límites de detección, la capacidad analítica no puede ser utilizada como factor.
- **Uso del suelo:** El uso del suelo es un factor utilizado con frecuencia en el desarrollo de los criterios. Por lo general los usos del suelo son clasificados en residencial, agrícola, industrial y otros usos y/o actividades específicas como: no-utilización, recreación, parques, sitios para uso comercial, terrenos públicos, áreas pavimentadas o cubiertas de concreto y jardines domésticos. Globalmente éstos pueden ser agrupados en tres categorías: sitios comerciales/industriales, agrícola y los demás. Las instituciones que diferencian los usos de suelo manejan criterios inferiores para los usos agrícolas y residencial/recreativo con relación al uso comercial/industrial. Se considera que los usos comercial/industrial ofrecen menos oportunidades de exposición de los

usuarios a los contaminantes, no incluyen niños y los usuarios permanecen menos tiempo en esos sitios que en los sitios agrícolas y residencial/recreativo. También los sitios comercial/industrial están en general cubiertos en gran parte por concreto lo que tiende a reducir o inhibir la movilidad ambiental.

El enfoque por criterios está más adaptado para las empresas que deben realizar una gestión de varios centros contaminados. En el caso de adoptar el criterio caso por caso se requiere realizar un estudio de los riesgos asociados con las condiciones específicas de cada sitio.⁶⁹

- Tomando como referencia normas extranjeras

El ejemplo clásico es tomar como referencia los estándares establecidos por la EPA en los Estados Unidos. Estos criterios, fueron definidos en función de diferentes parámetros, mismos que fueron presentados en párrafos anteriores. Este enfoque es utilizado en parte de los Estados Unidos, Europa y Canadá. Sin embargo, en las agencias reguladoras de los Estados Unidos existe todavía mucha confusión respecto a los estándares de limpieza, esto debido en gran parte a que todavía no está bien definido el concepto "qué tan limpio es limpio". Mientras que algunos autores sugieren el establecimiento de criterios preestablecidos,⁷⁰ otros autores consideran que el uso de criterios preestablecidos puede tener una aplicación solo sobre un determinado número de contaminantes bajo ciertas condiciones y vías de exposición específicas, por lo que resultaría peligroso considerar los mismos niveles de limpieza para todos los problemas de contaminación.⁷¹

Los Estados Unidos de Norteamérica no cuentan con un listado de normas único, los gobiernos estatales han establecido sus propios límites permisibles. La Tabla 5.2 presenta la terminología utilizada por los estados de la Unión América, en la definición de los niveles de limpieza dentro de los procesos de rehabilitación de sitios contaminados. Esta terminología puede ser agrupada en cuatro categorías dependiendo de su aplicación:⁷²

- a) CS: Estándar para limpieza de suelos, son niveles fijados por la ley como una regla y son normalmente específicos para compuestos.
- b) CAL: Nivel de acción correctiva, son utilizadas en los procesos de rehabilitación de sitios y son las concentraciones específicas finales para cada compuesto a las que se deben de llegar.
- c) GL: Guía o nivel de acción, son fijados por las agencias reguladoras y sirva para orientar al grupo responsable de llevar a cabo las actividades de rehabilitación.
- d) RG: Objetivo de rehabilitación, es una concentración final aceptable, la cual debe ser determinada caso por caso.

Podrá observarse que el parámetro HTP, es ampliamente utilizado en los Estados Unidos como una evaluación global de la contaminación, 42 agencias estatales lo emplean dentro de intervalos que van

Tabla 5.2 Clasificación de los niveles de limpieza utilizados en los Estados Unidos de Norteamérica

Estado	Parámetro analizado	Método analítico	Tiempo	Límite permisible	Información adicional
Alaska	HTP*	EPA 418.1*	GL	100 ppm para diesel	No se requieren acciones de rehabilitación si la concentración de HTP <= 100 ppm y el manto freático se encuentra a más de 5 pies de profundidad.
	BTEX*	EPA 8020 EPA 5030 EPA 8240 EPA 8015 EPA 9071*	RG	BTEX total <= 10 ppm	
	HCID*				
	HTP*		CAL	100 ppm HTP	
	BTEX*	Método estándar 503† EPA 5030 EPA 3810 EPA 8020 EPA 8240 EPA 239.2 EPA 418.1			
Arkansas	Plomo				Los objetivos de rehabilitación son determinados caso por caso basado en consideraciones de calidad del agua.
	HTP		RG	Ninguno	
Arizona	BTEX	EPA 8020			Los objetivos de rehabilitación se determinan en base a los niveles necesarios para proteger y minimizar los impactos adversos al ambiente y a la salud humana.
	HTP	EPA 8015 modificado para gasolina EPA 418.1 modificado para diesel	GL	100 ppm HTP	
	BTEX	EPA 8020 EPA 8015 modificado		130 ppm benceno 200 ppm tolueno 68 ppm etilbenceno 44 ppm xileno	
California	HTP	EPA 8015 modificado EPA 5020 para gasolina EPA 5030 para diesel EPA 418.1 para diesel EPA 8020 EPA 8010	RG	10-1000 ppm HTP para gas 10-10,000 ppm HTP para diesel	
	TRPH*			0.3-1.0 ppm benceno	
	BTEX			0.3-50 ppm tolueno	
	HVO*			1-50 ppm xileno	
				1-50 ppm xileno	
Colorado	HTP	EPA 418.1	RG	Ninguno	Los objetivos específicos de rehabilitación se determinan en base a los niveles necesarios para proteger y minimizar los impactos adversos al ambiente y a la salud humana.
	BTEX	EPA 8015 modificado EPA 8020			

continúa...

continuación de Tabla 5.2

Estado	Parámetro indicador	Método analítico	Término	Límite permisible	Información adicional
Connecticut	BTEX	EPA 8020	GL	50 ppm HTP para gasolina	
	HVOs	EPA 8010			
Delaware	HTP	EPA 418.1	RG	100 ppm HTP para gasolina	
	BTEX	EPA 8020		10 ppm BTEX para gasolina	
Florida	No requerido		GL	500 ppm HTP	
Georgia	HTP	EPA 418.1	CS	100-500 ppm HTP total	Suelos con concentraciones entre 10-500 ppm HTP pueden requerir acciones de rehabilitación dependiendo las condiciones específicas del sitio. Suelos con concentraciones mayores de 100 ppm HTP ó 20 ppm BTEX total deben ser rehabilitados cuando se encuentren a una distancia igual o menor a 3 millas de pozos públicos de agua ó 0.5 millas de pozos privados de agua.
Hawaii	BTEX	EPA 602	RG	20-100 ppm BTEX	
	HTP	EPA 3550 para diesel		50 ppm HTP	Un objetivo de rehabilitación de 50 ppm HTP puede ser solo aplicado en sitios que presenten contaminación de suelo. La agencia utiliza los niveles de calidad del agua para evaluar el sitio y los riesgos a la salud a fin de determinar los requerimientos de limpieza.
Iowa	HTP	EPA 5030 EPA 8045 EPA 8020 para gas EPA 418.1	RG	100 ppm HTP	Suelos con contenido superior a 100 ppm de volátiles totales o hidrocarburos extractables totales (dependiendo de la naturaleza del contaminante) son considerados como contaminados y deben ser rehabilitados. Los objetivos de rehabilitación se establecen caso por caso.
Idaho	HTP	EPA 8250 EPA 8020 EPA 8240 EPA 8015 modificado	RG	100 ppm HTP para gasolina 1000 ppm para diesel 1.0 ppm BTEX	Objetivos de rehabilitación mas estrictos pueden ser establecidos cuando las fuentes de agua subterránea corra el riesgo de ser impactada.
	BTEX	EPA 503.1 EPA 602 EPA 624 EPA 8020 EPA 8010 EPA 5030			
Illinois	EDB ¹ BTEX	EPA 8240 EPA 418.1 EPA SW846	CAL	0.025 ppm benceno	Los objetivos de limpieza solo pueden ser aplicados en sitios donde el agua subterránea no será impactada.
Indiana	HTP		GL	BTEX total <= 16.025 ppm 100 ppm HTP	Los niveles de limpieza son determinados sitio por sitio.
Kansas	HTP BTEX EDC		CAL	100 ppm HTP 1.4 ppm benceno 0.8 ppm EDC	

continúa...

continuación de Tabla 5.2

Estado	Parámetro analizado	Método analítico	Uso	Límite permisible	Información adicional
Kentucky	HTP	EPA 9070	RG	Niveles de fondo	La agencia normalmente requiere la rehabilitación del sitio hasta alcanzar concentraciones no detectables.
	BTEX	EPA 9071			
	PAHs	EPA 8020 para gasolina EPA 8100 para diesel			
	BTEX	EPA 8020 para gasolina EPA 8015 modificado	RG	Ninguno	Los objetivos de rehabilitación son determinados caso por caso.
	TOVS	Método estándar 5030/E	RG	100 ppm volátiles totales	Suelos contaminados con gasolina que presenten concentraciones mayores a 1800 ppm TOVs son considerados como residuos peligrosos.
Massachusetts		EPA 418.1			
	HTP	EPA 418.1 modificado	RG	100 ppm HTP	La fase libre de producto debe ser renovado hasta niveles no detectables.
	BTEX ^a	EPA 601		Ninguno	
		EPA 602			
		EPA 624			
Maine	HTP	Métodos para investigación de campo	RG	20-50 ppm HTP	Los objetivos de rehabilitación son determinados caso por caso; sin embargo, el intervalo de 20-50 ppm HTP es frecuentemente considerado como aceptable.
	BTEX	EPA 602			Cualquier de las tres opciones puede ser utilizada.
	PAHs	EPA 8020	CAL	Nivel de fondo Nivel de detección Valores basados en riesgos	
	HTP	EPA 8270			
		EPA 8230			
Michigan	HTP	Método estándar 503B			
	BTEX	Método estándar 503D			
		EPA 8015	RG	50 ppm HTP	Niveles de rehabilitación adicionales de 10 ppm HTP para gasolina pueden ser utilizadas en investigaciones de campo en sitios donde el suelo es excavado.
	HTP	EPA 8020			
		EPA 418.1			
Minnesota	Plomo	Método de prueba EPA			
	VOA ^a	EPA 8020	GL	10 ppm HTP 10 ppm BTEX total	
	HTP	EPA 8240			
	BTEX	EPA 418.1 modificado	RG	100 ppm BTEX para gasolina	Niveles de limpieza aplicados solo en sitios donde no existen pozos de agua o áreas de recarga.
		Método de prueba EPA			Concentraciones superiores de contaminantes pueden dar lugar a investigaciones de evaluación de riesgo.
Missouri	HTP	Método estándar 503			
	BTEX	EPA 8020 para gasolina	GL	10 ppm HTP para diesel 10 ppm BTEX total	
	HTP	EPA 8015			
		EPA 418.1			

continúa...

continuación de Tabla 5.2

Estado	Parámetro indicador	Método analítico	Termin	Límite permisible	Información adicional
North Carolina	VOs	EPA 5030 modificado	CAL		La rehabilitación de un sitio no es requerida si la concentración de HTP es menor de 10 ppm.
	SVOs	EPA 5030 modificado		10 ppm HTP	
	HTP	EPA 3550 modificado		Ninguno	
	No requerido				
North Dakota	VOA	EPA 624	RG	Ninguno	Los análisis de muestras de suelo no son normalmente requeridos a menos que se realicen excavaciones para remover la contaminación. Los objetivos de rehabilitación son determinados caso por caso.
	TRPH	EPA 601			
		EPA 602			
		EPA 418.1			
New Hampshire	BTEX	EPA 3540	RG	1 ppm BTEX	Objetivos de limpieza mas rigurosos pueden ser establecidos dependiendo de factores específicos del sitio.
	HTP	EPA 8015 modificado			
New Jersey	HTP	EPA 148.1 para diesel	GL	10 ppm HTP para gas	Suelos contaminados con gasolina o hidrocarburos ligeros requieren rehabilitación si las concentraciones de benceno exceden las 10 ppm, o bien si los compuestos aromáticos rebasan una concentración de 50 ppm. En el caso de suelos con contaminación por diesel e hidrocarburos pesados con niveles de HTP superior a las 100 ppm será necesario aplicarn acciones de rehabilitación.
	VOs*	Método SW846		1 ppm VO's	
	SVOs*			10 ppm SVOs	
New Mexico	HTP	EPA 8240	GL	10 ppm HTP	Las excavaciones de suelos contaminados que presenten concentraciones de HTP superiores a 100 ppm pueden requerir rehabilitación dependiendo de las condiciones específicas del sitio incluyendo la profundidad del nivel freático, usos del suelo y tipo de hidrocarburo
	VOs			10 ppm benceno	
Nevada	HTP			50 ppm aromáticos	Los contaminantes deben ser removidos hasta alcanzar una concentración similar a la del nivel de fondo o el límite de concentraciones detectables.
	HTP	EPA 8015 Modificado	GL	100 ppm HTP	
New York	VOs	EPA 8020	GL	Compuestos específicos	Todos los contaminantes deben ser removidos hasta alcanzar una concentración similar a la del nivel de fondo o el límite de concentraciones detectables.
	SVOs	EPA 8270			
	VOs	EPA 8020	RG	Nivel de fondo	
Ohio	SVOs	EPA 8270			
	HTP	EPA 418.1			
Oklahoma	BTEX	Método EPA apropiado	GL	10 ppm BTEX total	
	HTP	Método SW846		50 ppm HTP	

continúa...

continuación de Tabla 5.2

Estado	Parámetro indicador	Método analítico	Uso	Límite permisible	Información adicional
Oregon	BTEX	EPA 5030	CS		Niveles de limpieza derivados de una evaluación de parámetros como: profundidad del nivel freático, precipitación media anual, tipo de suelo, receptores potenciales, etc.
Pennsylvania	HTP	EPA 8020 EPA 418.1		40-130 ppm HTP gasolina 10-100 ppm diesel	Los objetivos de limpieza se establecen específicamente para el sitio en base a modelación matemática y análisis de riesgo.
	BTEX	Método SW846		Ninguno	
Rhode Island	HTP VOCs	Método SW846	GL	500 ppm HTP	Los objetivos de saneamiento son determinados específicamente para el sitio en base a la naturaleza del contaminante y tipo de uso de suelo. Los objetivos de rehabilitación son determinados caso por caso.
South Carolina	BTEX	EPA 602 EPA 8020 EPA 418.1		Ninguno	
South Dakota	HTP VOs	EPA 8200	RG	100 HTP	Las regulaciones ambientales exigen la remoción de todos los contaminantes visibles del suelo.
	SVOs	EPA 602 para gas EPA 8100 EPA 610 para diesel Método SW846			
Tennessee	BTX HTP	EPA 418.1 Modificado	CS	10-50 ppm BTX total 100-100 ppm HTP	
Texas	BTEX	EPA 8020 EPA 602 EPA 418.1	GL	30 ppm BTEX total 100 ppm HTP	
	HTP	ASTM D3328-78B			
Utah	BTEX	EPA 8020 EPA 602	GL		Los objetivos de limpieza son establecidos caso por caso.
Virginia	HTP HTP	EPA 8015 Modificado EPA 418.1 Modificado	GL	50 ppm HTP 100 ppm HTP	Los sitios que presentan concentraciones superiores a 100 ppm HTP requieren la realización de muestros a fin de evaluar mas específicamente el grado de contaminación. Los objetivos finales de rehabilitación son establecidos caso por caso. Los suelos tratados que presentan concentraciones menores de 100 ppm de volátiles pueden ser dispuestos en un relleno sanitario.
	HTP	EPA 418.1 Modificado	GL	20 ppm Volátiles	
Washington	BTEX	EPA 8020	RG	0.1 ppm benceno 4.0 ppm tolueno 3.0 ppm etilbenceno 2.0 ppm xileno	
	HTP	EPA 418.1	GL	100 ppm HTP para gas 200 ppm HTP para diesel	

continúa...

continuación de Tabla 5.2

Estado	Parámetro analizado	Método analítico	Cena	Límite permisible	Información adicional
Wisconsin	VOCs	Método SW846			Los suelos con concentraciones superiores a 10 ppm HTP requieren la realización de análisis BTEX para caracterizar el grado y extensión de la contaminación.
West Virginia	HTP	EPA 418.1 Modificado	CAL	10 ppm HTP	
	BTEX	Método SW846	GL	100 ppm BTEX	
Wyoming	HTP	EPA 418.1 Modificado		100 ppm HTP	En los sitios contaminados que representen un riesgo potencial de contaminación al agua subterránea, los objetivos de remoción son establecidos caso por caso
	BTEX	Método EPA apropiado	RG		
	HTP			10-100 ppm HTP	El suelo es considerado como limpio cuando presenta concentraciones por debajo de 10 ppm HTP y la profundidad del manto freático es menor de 50 pies. En el caso de un sitio con concentraciones de HTP menores a 100 ppm puede ser considerado como limpio siempre y cuando la profundidad del nivel freático sea mayor de 50 pies.

Fuente: Bell E. Charles, Kostocki T., Paul and Calabrese J., Edward, (1991)⁷

Simbología:

- a Hidrocarburos Totales del Petróleo
- b Método EPA 418.1 DEL Manual de Métodos para análisis químicos de agua y residuos. "Modificado" se refiere a el uso de un procedimiento extraído del manual
- c Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno
- d Identificación cualitativa de hidrocarburos por un método cromatográfico
- e Método EPA para la evaluación fisicoquímica de residuos sólidos SW846
- f Método EPA para la evaluación fisicoquímica de residuos sólidos SW846
- g Método estándar para el análisis de agua y aguas residuales
- h Hidrocarburos Totales Recuperables del Petróleo
- i Orgánicos Volátiles Halogenados incluyendo 1,2 dibromoetano y 1,2 dicloroetano
- j 1,2 dibromoetano
- k 1,2 dicloroetano
- l Hidrocarburos Aromáticos Polinucleares
- m Volátiles Orgánicos Totales
- n Metil Butil Ether Terciario
- o Orgánicos Aromáticos Volátiles
- p Orgánicos Volátiles
- q Orgánicos Semivolátiles
- r Sociedad Americana para Pruebas y Materiales

de 10 a 10,000 ppm. Los niveles de limpieza para el benceno van de 0.3 a 130 ppm; estos intervalos de limpieza tan amplios utilizados en los Estados Unidos reflejan una gran incertidumbre respecto a qué sustancias y en qué niveles deben ser considerados como peligrosos para los humanos y el medio ambiente.⁷³

- Enfoque caso por caso

Se refiere a los valores deducidos después de una evaluación específica *caso por caso* de los riesgos del lugar de estudio. Estas evaluaciones pueden ser de diferentes niveles de detalle y tienen el objetivo de estimar la probabilidad de un efecto adverso sobre humanos, animales domésticos, vida salvaje o sistemas ecológicos por la exposición a un agente químico o físico.⁷⁴

Los estudios de evaluación de riesgo son el resultado de estudios de análisis de peligrosidad, de exposición y de riesgo. Con el análisis de peligrosidad se determina la toxicidad de los contaminantes en el sitio, mientras que con el de exposición se evalúan los medios por los cuales un ser humano encuentra los contaminantes que se generan en un sitio. En el análisis de riesgo, los niveles de exposición humana para un compuesto químico y la toxicidad resultante de tal exposición se compara con un valor de toxicidad crítica para ese compuesto. El valor de toxicidad crítica generalmente representa un nivel de exposición aceptable para el compuesto. Si el valor de toxicidad crítica se excede, las acciones de rehabilitación de un sitio son inminentes.⁵

De manera sencilla, se puede describir el enfoque global de los análisis de riesgo como el relacionar informaciones toxicológicas sobre un contaminante con las exposiciones humanas a este mismo contaminante, con el fin de estimar los riesgos para la salud asociados a esta exposición. De manera más explícita esta metodología incluye cuatro etapas principales:

1. La caracterización toxicológica de los contaminantes, consiste en identificar los efectos tóxicos asociados al contaminante estudiado y las dosis para las cuales pueden presentarse dichos efectos.
2. La estimación de la exposición a los contaminantes, que consiste en estimar la dosis a las cuales las personas son expuestas, en razón de la contaminación presente en los diversos medios, (agua, aire, suelo, etc) por los contaminantes estudiados.
3. La estimación del potencial de riesgo, es decir la apreciación cualitativa o cuantitativa de la posibilidad que la exposición estimada produzca una respuesta tóxica en el seno de la población estudiada.
4. La evaluación del riesgo, que consiste en emitir un juicio de valor sobre la aceptabilidad

del riesgo cuantitativamente estimado. Esta etapa constituye el enlace con la siguiente fase de trabajo que consiste en la gestión del riesgo que agrupa el conjunto de medidas que serán definidas como consecuencia del análisis de riesgo.

A menudo, el análisis de riesgo se percibe como un trabajo fastidioso, que implica cálculos numerosos, complicados y que requiere mucha información. Esta percepción ha limitado en muchos casos el alcance de un análisis de riesgo a algunos contaminantes identificados, de manera más o menos intuitiva, como los que presentan un potencial de riesgo significativo. Por esta razón es conveniente llevar a cabo los estudios de riesgos mínimo en dos etapas, el análisis preliminar y el análisis detallado. Estos pasos son complementarios y pueden ser resumidos como sigue:

- El análisis preliminar tiene por objeto verificar la presencia o la ausencia de un potencial de riesgo significativo para una situación dada.
- El análisis detallado tiene como meta caracterizar con la mayor precisión posible y el máximo de certidumbre el riesgo real. Este análisis detallado se realiza sobre los contaminantes y/o condiciones de exposición que fueron identificados como potencialmente riesgosos en el análisis preliminar.

En ciertos casos, en vez de realizar un análisis detallado de riesgo cuyo costo es elevado, se pueden establecer directamente medidas de mitigación para los riesgos que fueron identificadas en el análisis preliminar, cuando estas medidas tienen costos que se juzgan aceptables o cuando se estima que el estudio detallado de riesgo no modificaría substancialmente las conclusiones del análisis preliminar.¹

Existen varias metodologías para realizar análisis de riesgo, las metodologías más interesantes son aquellas que consideran situaciones reales, como la presencia de mezclas de contaminantes tal como el petróleo y sus derivados, además de medios múltiples de exposición (suelo, agua, alimentos de origen vegetal y animal). La única que considera estos dos aspectos es la Guía para la Evaluación de Riesgos del *Superfondo* desarrollada por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos en la cual la evaluación de la salud pública involucra el establecimiento de objetivos y la estimación del riesgo para alternativas de rehabilitación.⁵

5.3 Criterios de evaluación y limpieza para suelo y agua subterránea establecidos por Canadá

En el año de 1991 los Ministerios del Ambiente de Canadá intentaron uniformizar los criterios utilizados en las diferentes provincias por lo que realizaron un estudio detallado de los criterios utilizados tanto en Canadá como en otros países. En las siguientes páginas se presentan los resultados del estudio sobre los criterios de evaluación de los suelos y del agua.⁷⁵

Tabla 5.3 Criterios de evaluación para suelo y agua implementados por Canadá

	Suelo ($\mu\text{g/g}$)	Agua($\mu\text{g/l}$)
Parámetros inorgánicos		
1. arsénico	5.0	5.0
2. cadmio	0.5	1.0
3. cromo +6	2.5	—
4. cromo total	20.0	15.0
5. cobre	30.0	25.0
6. plomo	25.0	10.0
7. mercurio	0.1	0.1
8. molibdeno	2.0	5.0
9. níquel	20.0	10.0
10. selenio	1.0	1.0
11. plata	2.0	5.0
12. vanadio	25.0	—
13. zinc	60.0	50
Hidrocarburos aromáticos monocíclicos		
14. benceno	0.05	0.5
15. etilbenceno	0.1	0.5
16. tolueno	0.1	0.5
17. clorobenceno	0.1	0.1
18. dicloro 1,2 benceno	0.1	0.2
19. dicloro 1,3 benceno	0.1	0.2
20. dicloro 1,4 benceno	0.1	0.2
21. estireno	0.1	0.5
22. xileno	0.1	0.5
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)		
23. benzo(a)antraceno	0.1	0.01
24. benzo(a)pireno	0.1	0.01
25. benzo(a)flouranteno	0.1	0.01
26. benzo(b)flouranteno	0.1	0.01
27. dibenzo(a,h) antraceno	0.1	0.01
28. indeno(1,2,3 cd) pireno	0.1	0.1
29. naftaleno	0.1	0.2
30. fenanteno	0.1	0.2
31. pireno	0.1	0.2

Tabla 5.4 Criterios de descontaminación para suelo implementados por Canadá

	Agrícola	Residencial Recreativo	Comercial Industrial
Parámetros inorgánicos			
1. arsénico	20.0	30.0	50.0
2. cadmio	3.0	5.0	20.0
3. cromo +6	8.0	8.0	—
4. cromo total	750.0	250.0	800.0
5. cobre	150.0	100.0	500.0
6. plomo	375.0	500.0	1000.0
7. mercurio	0.8	2.0	10.0
8. molibdeno	5.0	10.0	40.0
9. níquel	150.0	100.0	500.0
10. selenio	2.0	3.0	10.0
11. plata	20.0	20.0	40.0
12. vanadio	200.0	200.0	—
13. zinc	600.0	500.0	1500.0
Hidrocarburos aromáticos monocíclicos			
14. benceno	0.05	0.5	5.0
15. etilbenceno	0.1	5.0	50.0
16. tolueno	0.1	3.0	30.0
17. clorobenceno	0.1	1.0	10.0
18. dicloro 1,2 benceno	0.1	1.0	10.0
19. dicloro 1,3 benceno	0.1	1.0	10.0
20. dicloro 1,4 benceno	0.1	1.0	10.0
21. estireno	0.1	5.0	50.0
22. xileno	0.1	5.0	50.0
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)			
23. benzo(a)antraceno	0.1	1.0	10.0
24. benzo(a)pireno	0.01	1.0	10.0
25. benzo(a)flouranteno	0.1	1.0	10.0
26. benzo(b)flouranteno	0.1	1.0	10.0
27. dibenzo(a,h) antraceno	0.1	1.0	10.0
28. indeno(1,2,3 cd) pireno	0.1	1.0	10.0
29. naftaleno	0.1	5.0	50.0
30. fenanteno	0.1	5.0	50.0
31. pireno	0.1	10.0	100.0

Nota: unidades de µg/g

Tabla 5.5 Criterios de descontaminación para agua implementados por Canadá

	Vía acuática	Riego	Agua para ganado	Agua potable
Parámetros inorgánicos				
1. arsénico	50.0	100.0	500 - 5000	25.0
2. cadmio	0.2 - 1.8	10.0	20.0	5.0
3. cromo +6	—	—	—	—
4. cromo total	2 - 20	100.0	1000.0	50.0
5. cobre	2 - 4	200 - 1000	500 - 5000	<1000
6. plomo	1 - 7	200.0	100.0	50.0
7. mercurio	0.1	—	3.0	1.0
8. molibdeno	—	10 - 50	500.0	—
9. níquel	25 - 150	200	100.0	—
10. selenio	1.0	20 - 50	50.0	10.0
11. plata	0.1	—	—	—
12. vanadio	—	100.0	100.0	—
13. zinc	30	1000 - 5000	50000	<5000
Hidrocarburos aromáticos monocíclicos				
14. benceno	300	—	—	5.0
15. etilbenceno	700	—	—	<2.4
16. tolueno	300	—	—	<2.4
17. clorobenceno	15.0	—	—	—
18. dicloro 1,2 benceno	2.5	—	—	200.0
19. dicloro 1,3 benceno	2.5	—	—	—
20. dicloro 1,4 benceno	4.0	—	—	5.0
21. estireno	—	—	—	—
22. xileno	—	—	—	<300
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)				
23. benzo(a)antraceno	—	—	—	—
24. benzo(a)pireno	—	—	—	0.01
25. benzo(a)flouranteno	—	—	—	—
26. benzo(b)flouranteno	—	—	—	—
27. dibenzo(a,h) antraceno	—	—	—	—
28. indeno(1,2,3 cd) pireno	—	—	—	—
29. naftaleno	—	—	—	—
30. fenanteno	—	—	—	—
31. pireno	—	—	—	—

Nota: unidades de µg/g

Para complementar estos criterios es interesante mencionar los siguientes criterios adoptados por el Ministerio del Ambiente de Quebec para las aguas subterráneas de los sitios contaminados con productos petroleros:

	Agrícola	Residencial Recreativo	Comercial Industrial
Parámetros inorgánicos			
1. arsénico	5.0	50.0	50.0
2. cadmio	1.0	5.0	20.0
3. cobre	25.0	500.0	500.0
4. plomo	10.0	50.0	1000.0
5. níquel	10.0	250.0	500.0
6. zinc	50.0	1000.0	1500.0
Hidrocarburos aromáticos monocíclicos			
7. benceno	<0.5	1.0	5.0
8. etilbenceno	<0.5	50.0	150.0
9. tolueno	<0.5	50.0	100.0
10. xileno	<0.5	20.0	60.0
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)			
11. benzo(a)antraceno	<0.1	0.5	2.0
12. benzo(a)pireno	<0.1	0.2	1.0
13. benzo(a)flouranteno	<0.1	0.2	1.0
14. benzo(b)flouranteno	<0.1	0.2	1.0
15. dibenzo(a,h) antraceno	<0.1	0.2	1.0
16. indeno(1,2,3 cd) pireno	<0.1	1.0	5.0
17. naftaleno	<0.2	10.0	30.0
18. fenantreno	<0.1	1.0	5.0
19. pireno	<0.2	7.0	30.0

Nota: unidades de µg/g

5.4 Situación en México

Dentro de la normatividad ambiental de México no existen normas oficiales (NOM) que establezcan los criterios para la evaluación de suelos y acuíferos contaminados. Así también, esta normatividad tampoco señala los límites máximos permisibles de contaminantes que se aceptarán en suelos y acuíferos una vez que estos han sido sometidos a un proceso de saneamiento.

En lo que se refiere a la contaminación de las aguas, la anterior Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología publicó en el Diario Oficial de la Federación del 13 de diciembre de 1989, el acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua CE-CCA-001/89. En este listado se precisan los niveles de los parámetros y de las sustancias que se encuentran en el agua, o sus efectos como son color, olor o sabor a fin de poder calificar los cuerpos de agua como aptos para ser utilizados como fuentes de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario, para uso en acuicultura, o bien, para el desarrollo y la conservación de la vida acuática. Dichos parámetros constituyen la calidad mínima requerida para el uso o aprovechamiento del agua en los casos mencionados.⁷⁷ La Tabla 5.6 presenta las concentraciones máximas permisibles en las fuentes de abastecimiento de agua potable en México dentro de los parámetros de calidad requeridos para uso o aprovechamiento del agua.

Posteriormente en el año de 1996, el Instituto Nacional de Ecología emitió dentro del marco normativo para la rehabilitación de suelos, la propuesta de anteproyecto de Norma Mexicana denominada "Restauración de suelos contaminados: metodología para la determinación de criterios de limpieza en base a riesgos". Esta Norma Mexicana fue elaborada con el propósito de establecer una metodología para identificar el marco de referencia que apoye el desarrollo de criterios generales para la determinación de los niveles de rehabilitación o limpieza de sitios contaminados por materiales o residuos peligrosos o no peligrosos los cuales representen un impacto negativo a la salud o al medio ambiente.⁷⁶

Para el desarrollo de este anteproyecto de Norma se siguieron los lineamientos de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos presentados en la Guía para la Evaluación de Riesgos del *Superfondo* (Risk Assessment Guidance for Superfund) y el Acta 451 del Estado de Michigan los cuales, contienen los avances más recientes en materia de Evaluación de Riesgo con algunas modificaciones para poder considerar su aplicación en México.⁷⁶ Sin embargo, las principales reservas a esta metodología para establecer el riesgo y niveles de limpieza, están relacionadas a que represente razonablemente los efectos en la salud de la población mexicana y a establecer cómo incorporar con certidumbre los efectos a largo plazo. Por ello, la conveniencia de revisar tanto las deficiencias nutricionales como el estado de salud de la población para establecer cómo expresarlos, si ello es factible, en la estimación de los valores toxicológicos reportados en la literatura internacional; adicionalmente, será idóneo contar con valores estandarizados, para todos los estudios

que se realicen en México, para variables como la esperanza de vida del mexicano, peso corporal para niños y adultos, dosis de ingestión diaria y de absorción y fracción ingerida, que permitan homogeneizar resultados y que a la vez faciliten la comunicación pública del riesgo.¹⁵¹

Hasta la fecha ha sido común consultar los niveles de limpieza recomendados en referencias internacionales. Sin embargo, es necesario establecer criterios bajo los cuales dichos datos sean considerados como guías, y no necesariamente metas, para el saneamiento en sitios contaminados. Cabe recordar que el tipo de geología en México, no es el común denominador con la de los países que desarrollan las tecnologías de restauración; con frecuencia los acuíferos se encuentran a pocos metros de profundidad en esos lugares. Por otra parte, existen diferencias en salud y sanidad pública, entre otras desigualdades a considerar.¹⁵¹

Tabla 5.6 Parámetros de calidad necesarios para una fuente de abastecimiento de agua potable, de acuerdo con la calidad requerida para uso o aprovechamiento del agua de la CNA.

PARÁMETROS ORGÁNICOS	CONCENTRACIÓN (mg/l)	PARÁMETROS ORGÁNICOS	CONCENTRACIÓN (mg/l)
Acenafteno	0.02	2,4 Diclorofenol	0.03
Acido 2,4 Diclorofenoliacético	0.1	1,2 Dicloropropileno	0.09
Acrilonitrilo	0.0006	Dieldrín	0.0000007
Acroleína	0.3	Dietilftalato	350
Aldrín	0.00003	1,2 Difenilhidracina	0.0004
Benceno	0.01	2,4 Dimetil fenol	0.4
Bencidina	0.000001	Dimetil ftalato	313
Bifenilos policlorados	0.0000008	2,4 Dinitrofenol	0.07
BHC (Lindano)	0.003	Dinitro-o-cresol	0.01
Bis (2-cloroetil) eter	0.0003	2,4 Dinitrotolueno	0.001
Bis (2 cloroisopropil) eter	0.03	Endosulfano (a y b)	0.07
Bis (2-etilhexil) ftalato	32	Endrín	0.001
Bromoformo	0.002	Etilbenceno	1.4
Bromuro de metilo	0.002	Fenol	0.3
C orgánico extractable en alcohol	1.5	Fluoranteno	0.04
C orgánico extractable en cloroformo	3.0	Halometanos	0.002
Clordano	0.003	Heptacloro	0.0001
Clorobenceno	0.02	Hexaclorobenceno	0.00001
2 Clorofenol	0.03	Hexaclorobutadieno	0.004
Cloroformo	0.03	Hexaclorociclopentadieno	0.001
Cloruro de metileno	0.002	Hexacloroetano	0.02
Cloruro de metilo	0.002	Hidrocarburos aromáticos polinucleares	0.00003
Cloruro de vinilo	0.02	Isoforona	5.2
DDD (◇)	0.0000002	Metoxicloro	0.03
DDT (◊)	0.001	Nitrobenceno	20
Diclorobencenos	0.4	2 Nitrofenó y 4 Nitrofenol	0.07
1,2 Dicloro etano	0.005	N-Nitrosodifenilamina	0.05
1,1 Dicloroetileno	0.0003	N-Nitrosodimetilamina	0.00001
1,2 Dicloroetileno	0.0003	Paratión	0.00003

continua...

Continuación de Tabla 5.6:

PARÁMETROS ORGÁNICOS	CONCENTRACIÓN (mg/l)	PARÁMETROS ORGÁNICOS	CONCENTRACIÓN (mg/l)
Pentaclorofenol	0.03	Tolueno	0.000007
SAAM (⋄)	0.5	Toxafeno	18.4
2,3,7,8 Tetraclorodibenzo-P-Dioxina	0.000000001	1,1,1 Tricloroetano	0.006
1,1,2,2 Tetracloroetano	0.002	1,1,2 Tricloroetano	0.03
Tetracloroetileno	0.008	Tricloroetileno	0.01
Tetracloruro de carbono	0.004	2,4,6 Triclorofenol	
PARÁMETROS INORGÁNICOS	CONCENTRACIÓN (mg/l)	PARÁMETROS INORGÁNICOS	CONCENTRACIÓN (mg/l)
Alcalinidad	400	O.D. (γ) (valor mínimo)	4
Aluminio	0.02	Plata	0.05
Antimonio	0.1	Plomo	0.05
Arsénico	0.05	Selenio (como selenato)	0.01
Asbestos (Fibras/L)	3000	Sulfatos	500
Bario	1	Sulfuros (como H ₂ S)	0.2
Berilio	0.00007	Talio	0.01
Boro	1	Zinc	5
Cadmio	0.01	PARÁMETROS FÍSICOS	CONCENTRACIÓN (mg/l)
Cianuro (como CN ⁻)	0.02	Color	75 (★)
Cloro residual	-	Grasas y aceites	ausentes
Cloruros (Cl ⁻)	250	Olor	ausente
Cobre	1	pH	5.9 (†)
Cromo VI	0.05	Sabor	característico
Hierro	0.3	Sólidos disueltos	500
Fluoruros (F ⁻)	1.5	Sólidos suspendidos	500
Fosfatos (PO ₄ ⁻³)	0.1	Sólidos totales	1000
Manganeso	0.1	Temperatura (°C)	Condiciones naturales+2.5
Mercurio	0.001	RADIOLÓGICOS	CONCENTRACIÓN (Bq/l)(‡)
Niquel	0.01	Radioactividad alfa total	0.01
N-Nitratos	5	Radioactividad beta total	1.0
N-Nitritos	0.05	MICROBIOLÓGICOS	NMP/100 MI (★)
N-Amoniacal	-	Coliformes fecales	1000

Fuente: Secretaria de Desarrollo Social, (1989).⁷⁷

- ⋄ Diclороfenildicloroetano
- 1,1 -di (clorofenil) -2,2,2 -tricloroetano
- ⋄ Sustancias activas al azul de metileno
- γ Oxígeno disuelto

- ★ Unidades de escala Pt-Co
- † Parámetro adimensional
- ‡ Becquer por litro
- ★ Número más probable por cada 100 megalitros

CAPITULO VI

SINOPSIS DE TECNOLOGIAS DE REHABILITACION PARA SITIOS CONTAMINADOS

El subsuelo y el agua subterránea tienen un cierto potencial de restauración natural. Este potencial llega a ser evidente durante el tiempo en que los contaminantes que ingresan y permanecen en la zona vadosa o en la zona saturada, se degradan o transforman en compuestos no peligrosos. Sin embargo, esta capacidad de autorestauración es limitada y cuando ha sido sobrepasada, es necesario la aplicación de técnicas de rehabilitación.⁷⁸

Existen diferentes herramientas de evaluación para determinar la necesidad de sanear un sitio contaminado. Cuando es requerida, la selección de la estrategia y la tecnología de rehabilitación depende de las condiciones del sitio, del tipo de contaminantes, de las medidas de control para la fuente de contaminación y de los impactos potenciales de las posibles alternativas de tratamiento.⁷⁹

No existe una fórmula definitiva para la selección de la tecnología de limpieza adecuada, y ninguna en particular resulta conveniente para todos los sitios. Las tecnologías de rehabilitación pueden ser utilizadas por separado o en conjunto a fin de alcanzar los niveles deseados de limpieza de un sitio. Cada sitio es diferente, y la combinación y el empleo de las tecnologías y sus modificaciones para la condiciones del sitio son específicas para cada caso.⁸⁰

El objetivo de este capítulo es presentar una revisión de las tecnologías de rehabilitación comúnmente utilizados en los programas de limpieza de sitios contaminados en Estados Unidos, Canadá y Europa.

6.1 Clasificación de los procesos de tratamiento para contaminantes

Las tecnologías de tratamiento de contaminantes más ampliamente utilizadas pueden ser clasificados de forma general como: físicas, químicas, biológicas y térmicas.⁷⁹

- **Tratamiento físico:** algunos constituyentes químicos presentes en sitios contaminados pueden ser tratados a través de procesos de separación y purificación, como filtración, centrifugación, flotación, destilación, evaporación, extracción por solventes, ósmosis inversa, intercambio iónico, adsorción por carbón activado, decantación e inmovilización de constituyentes por solidificación. Este tipo de técnicas generalmente no alteran la composición química de los contaminantes. Los procesos físicos son ocasionalmente utilizados como única opción de tratamiento final para cualquier material contaminado. En general, los objetivos de la mayor parte de los tratamientos físicos son separar los materiales peligrosos de los que son considerados como menos peligrosos.⁷⁹

- **Tratamiento químico:** ciertos tipos de productos químicos o materiales contaminados pueden ser separados o hacerse menos peligrosos a través de procesos de tratamiento químico. Por ejemplo, ciertos solventes pueden ser usados para remover átomos de cloro de materiales peligrosos clorados, teniendo como resultado que los compuestos tóxicos son convertidos en compuestos menos tóxicos, más compuestos solubles en agua. Los productos de las reacciones químicas comúnmente presentan un menor grado de dificultad para ser removidos del suelo y son más fácilmente tratados.⁷⁹
- **Tratamiento biológico:** el tratamiento biológico ha llegado a ser desde el punto de vista costo-beneficio, una alternativa tecnológica viable para tratar una amplia variedad de contaminantes orgánicos. Los procesos biológicos pueden transformar un material peligroso en elementos no tóxicos como agua, dióxido de carbono, y otros productos inocuos mediante el uso de microorganismos. El tratamiento biológico es una alternativa muy sensible a los cambios en la composición y concentración orgánica de los contaminantes a ser tratados. Por otro lado, el tratamiento microbiológico no tiene efecto en disolver sustancias inorgánicas, inclusive niveles significativos de compuestos orgánicos e inorgánicos pueden inhibir la actividad biológica o aún eliminar los microorganismos.⁷⁹
- **Tratamiento térmico:** Las tecnologías de tratamiento térmico emplean calor para destruir o transformar los contaminantes de interés. Los procesos de destrucción térmica controlan la temperatura y el oxígeno disponible, y transforman los materiales peligrosos en dióxido de carbono y otros productos de combustión. La degradación térmica es aplicable a materiales contaminados que contienen concentraciones significativas de compuestos orgánicos y que pueden ser utilizados a través de los diferentes tipos de incineración.⁷⁹

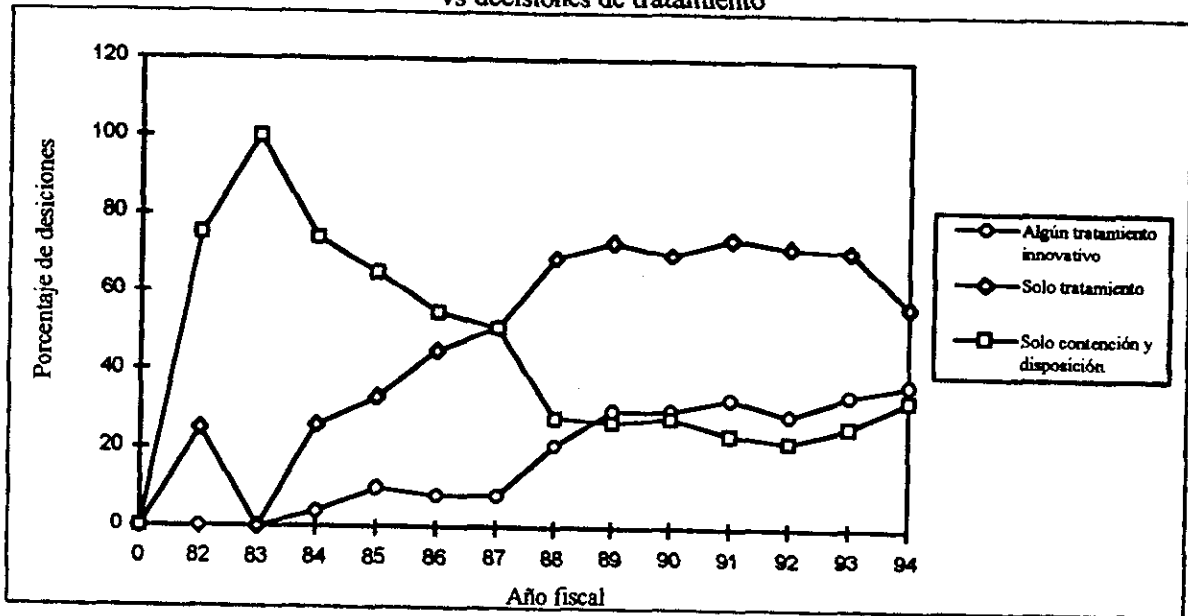
6.2 Desarrollo de las tecnologías de rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados

Las técnicas de tratamiento destruyen contaminantes o los modifican a fin de que dejen de ser peligrosos o, por lo menos, para que sean menos peligrosos. Pueden reducir la cantidad de material contaminante presente en un lugar, retirar el componente de los residuos que los hace peligrosos o inmovilizar el contaminante en los residuos.⁸¹

El tratamiento de sitios contaminados es un campo de la tecnología que se ha desarrollado y crecido en Estados Unidos, Canadá y Europa desde 1980, año en que el Congreso de los Estados Unidos aprobó la *Ley del Superfondo* (Superfund Act) para la limpieza de sitios contaminados. Uno de los métodos iniciales para eliminar un residuo peligroso de un sitio determinado era trasladarlo a otro lugar o cubrirlo. Estos métodos utilizan confinamientos para solucionar el problema. Con el número creciente de procedimientos de limpieza iniciados y la aprobación de las enmiendas a la *Ley del*

Superfondo en 1986 que dan preferencia al tratamiento, se planteó la necesidad de otros métodos, que no fuesen el uso de confinamientos, para solucionar de forma permanente y menos costosa el problema de los materiales contaminados. En consecuencia, y como se puede apreciar en la Figura 6.1 se ha avanzado en el desarrollo de técnicas de tratamiento más apropiadas.^{81,82}

Figura 6.1 Acciones de rehabilitación en sitios del *Programa Superfondo*: decisiones de disposición vs decisiones de tratamiento



Fuente: W. W. Kovalick, Jr & John Kingscott, (1996).⁸³

El desarrollo y perfeccionamiento de técnicas de tratamiento es un proceso permanente, como se indica en la Figura 6.2 El proceso comienza con un concepto, una idea de cómo tratar un residuo peligroso en particular. El concepto generalmente pasa por un proceso de investigación y evaluación para comprobar su factibilidad. Si se llega a la conclusión de que el concepto es útil, el paso siguiente consiste a menudo en pruebas de la técnica en pequeña escala en un laboratorio. Durante esta etapa, la técnica es aún incipiente. Si da resultado en las pruebas de laboratorio, se ensaya en pequeña escala sobre el terreno. Si en esas condiciones también da resultado, con frecuencia la técnica pasa a usarse en gran escala en lugares contaminados, y se mejora continuamente a medida que se va usando y evaluando en distintos sitios.

Figura 6.2 Desarrollo de técnicas de tratamiento

Concepto	Técnica incipiente	Técnica innovadora	Técnica establecida
<ul style="list-style-type: none"> • Idea • Investigación • Pruebas preliminares de laboratorio 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudios de laboratorio en pequeña escala 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudio piloto o demostración sobre el terreno • Selección para la limpieza • Uso limitado a gran escala 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso común en gran escala

U.S. Environmental Protection Agency, Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office, (1997).⁸³

Sólo después de que una técnica se ha usado en muchos tipos de lugares y de que se han documentado plenamente los resultados, se considera que es una técnica establecida. La mayoría de las técnicas usadas en la actualidad están clasificadas como innovadoras y carecen de una larga trayectoria de uso en gran escala y no se dispone de la extensa documentación necesaria para convertirla en una opción corriente en los ámbitos técnicos y científicos. Sin embargo, en sitios contaminados de los Estados Unidos, Canadá y Europa se han usado muchas técnicas innovadoras con buen resultado, a pesar de que se había realizado solo una verificación incompleta de su utilidad. Algunas de estas técnicas se idearon para abordar problemas de residuos peligrosos, otras han sido adaptadas de otros usos industriales.⁸¹

Ciertas técnicas establecidas, como la incineración y la solidificación/estabilización, son las que más se han usado para operaciones de limpieza con recursos del *Superfondo*. Sin embargo, para 1990, 40% de las técnicas de tratamiento que se estaban usando eran innovadoras. En 1991 de las 498 tecnologías que se utilizaron en los sitios del *Superfondo*, 210 eran técnicas innovadoras lo que representa un 42%.^{83,84} En 1994 esa cifra llegó casi al 43%.⁸⁵ como se ilustra en la Figura 6.3.

Las técnicas de tratamiento innovadoras de uso más frecuente son el sistema de extracción por vapor, aspersión de aire, medidas biocorrectivas, desorción térmica, lavado de suelo *en el sitio (in situ)* y *fuera del sitio (ex situ)*, deshalogenación química.⁸¹

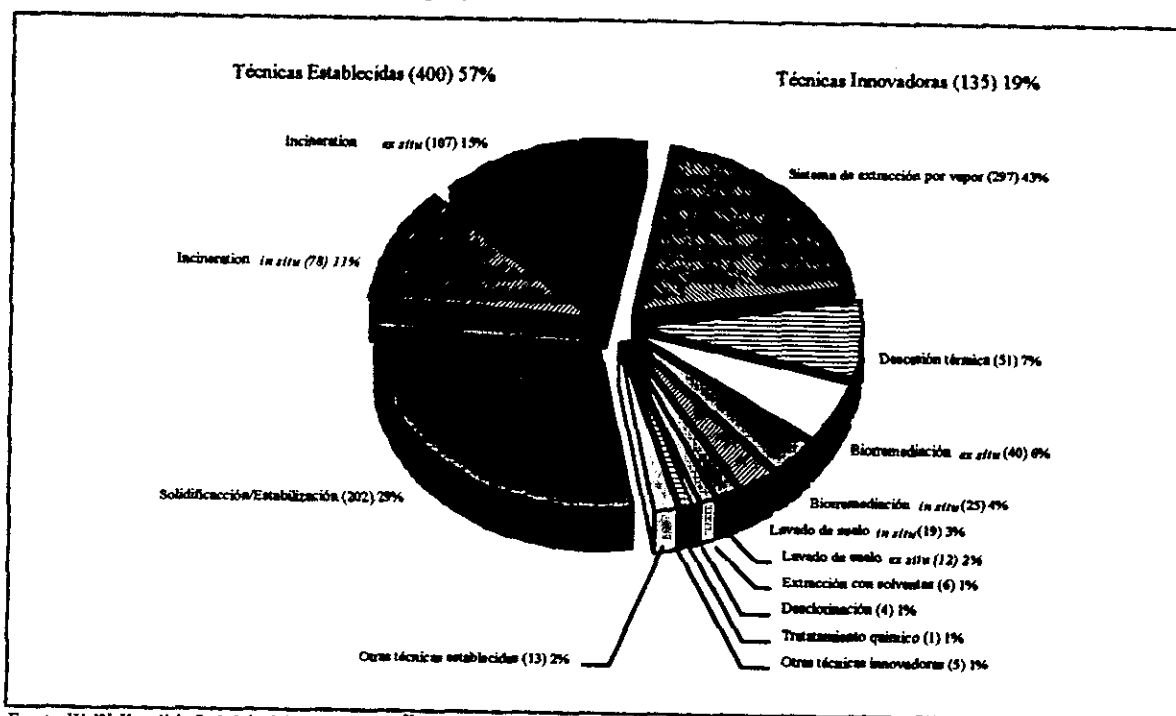
Cuando se está considerando usar una técnica de tratamiento para la limpieza de un sitio determinado, o después de seleccionarla, es necesario realizar un estudio de tratabilidad para determinar las posibilidades de su éxito y obtener información adicional sobre su acción y su eficacia. Este estudio se lleva a cabo con materiales contaminados extraídos del sitio contaminado.

Hay tres niveles de estudios de tratabilidad. El nivel que se seleccione dependerá de la información disponible sobre el sitio, la tecnología y el tipo de información que se necesite. El estudio de tratabilidad más rápido y económico es una prueba preliminar de laboratorio, que se hace con el propósito de obtener más información sobre las características de los residuos y determinar si podrían

tratarse con una técnica determinada. Una prueba preliminar de laboratorio se puede hacer en cuestión de días y generalmente cuesta entre US \$ 10,000 (\$^M/_N 80,00) y US \$ 50,000 (\$^M/_N 400,000). Si se obtienen buenos resultados, se podrían realizar estudios de tratabilidad más avanzados.⁸¹

El nivel siguiente en los estudios de tratabilidad es la prueba de laboratorio en pequeña escala, que consiste en simular un proceso de tratamiento con una cantidad muy pequeña de residuos y proporcionar más información sobre la eficiencia (y, en algunos casos sobre el costo) de una técnica. El objetivo de las pruebas de este tipo es determinar si con la técnica se podrán cumplir los objetivos de limpieza establecidos para un sitio específico. El costo de estas pruebas generalmente se sitúa entre US \$ 50,000 (\$^M/_N 400,000) y US \$ 250,000 (\$^M/_N 2,000,000).⁸¹

Figura 6.3 Resumen de las tecnologías de rehabilitación utilizadas en los sitios del Programa Superfondo durante el año de 1994



Fuente: W. W. Kovalick, Jr & John Kingscott, (1996).⁸²

El nivel más alto es el estudio de tratabilidad, generalmente se hace sobre el terreno o en el laboratorio y requiere la instalación de equipo de tratamiento. Este estudio se usa para establecer objetivos de efectividad, costos y concepción para la técnica de tratamiento. Debido a su costo, que generalmente supera los US \$ 250,000 (\$^M/_N 2,000,000) se usa casi exclusivamente para perfeccionar la concepción de la técnica después de otros estudios de tratabilidad.⁸¹

6.3 Datos del suelo y del agua subterránea requeridos para la selección, diseño y operación de las tecnologías de rehabilitación

Las características del sitio condicionan la selección de un proceso de tratamiento. Las características que limitan el proceso como el pH o el contenido de humedad pueden en algunos casos ser ajustados. En otros casos, una tecnología de tratamiento puede ser eliminada con base en una clasificación de las características específicas del sitio; por ejemplo, la distribución del tamaño de partícula.⁸⁶

Los suelos son inherentemente variables en sus características físicas y químicas. Por lo general, esta variabilidad es mayor en la forma vertical que en la forma horizontal, debido a las variaciones en los procesos que originaron la formación de los suelos. Esta variabilidad en las características de los suelos, origina cambios en la distribución del agua y los contaminantes y en la facilidad con la cual estos últimos puedan transportarse y removerse de la matriz del suelo en un sitio específico.

Muchos datos son relativamente fáciles de obtener y en algunos casos existe más de una alternativa de tratamiento que pueda ser utilizada. Los procedimientos de campo son desarrollados para recolectar muestras de suelo y almacenar datos con el objetivo de determinar la clasificación, contenido de humedad y la permeabilidad de los suelos en un sitio específico. Las síntesis geográficas que describan la variabilidad del suelo pueden disminuir la necesidad de un gran número de muestras y determinaciones requeridas para describir las características del sitio.

La distribución del tamaño de partícula en el suelo, es un factor importante en muchas tecnologías de tratamiento. En general, materiales gruesos y no consolidados, como arena y grava fina son más fáciles de rehabilitar. En suelos compuestos por grandes porcentajes de limo y arcilla el lavado de suelo *fuera del sitio (ex situ)* puede no ser efectivo debido a la dificultad de separar los contaminantes adsorbidos a las partículas finas y al líquido de lavado. En los procesos térmicos, las partículas finas también pueden originar como resultado de la turbulencia, una alta carga de partículas en el gas de escape de los hornos rotatorios. Las heterogeneidades en el suelo y la composición de los residuos pueden producir un flujo de alimentación no uniforme para muchos procesos de tratamiento lo que resulta en niveles de remoción inconsistentes. Las partículas finas pueden además, demorar el tiempo requerido para la rehabilitación de un sitio y pueden provocar ligaduras débiles en los procesos de estabilización/solidificación. Las arcillas provocan un pobre desarrollo de la tecnología de desorción térmica como un resultado del apelmazamiento del suelo. Un alto contenido de limo y arcilla puede causar suelos maleables y baja permeabilidad durante la extracción por vapor, disminuyendo la eficiencia del proceso.⁸⁶

La homogeneidad del suelo puede obstruir tecnologías *in situ* que son dependientes de un flujo subsuperficial de fluidos como lavado de suelo *en el sitio (in situ)*, extracción por vapor y biodegradación *in situ*. Pueden formarse canales indeseables en capas alternadas de arcilla y arena

teniendo como resultado un tratamiento inconsistente. Grandes partículas como grava gruesa son indeseables para la aplicación de los procesos de vitrificación, extracción química y estabilización/solidificación.

La densidad aparente del suelo (ρ_a) es la relación que existe entre la masa y el volumen de las partículas de suelo incluyendo los espacios porosos.⁸⁷ Este parámetro es usado en los cálculos de conversión de peso a volumen y puede ayudar en la determinación de mezclas apropiadas de materiales.⁸⁶ Los métodos más comunes para calcular la densidad aparente son el del cilindro, el del pozo, y el del terrón o parafina.⁸⁷

En estos términos, la definición de porosidad (η) es:

$$\eta = \frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_s}$$

donde:

ρ_a : densidad aparente del suelo

ρ_s : densidad real del suelo

La densidad de partícula o densidad real (ρ_s) se expresa como la relación de la masa total de las partículas sólidas con respecto a su volumen total excluyendo los espacios porosos.⁸⁷ Las diferencias en la densidad de partícula son importantes en los procesos de separación de minerales/metales pesados (separación media pesada). La densidad de partícula es también importante en la determinación de la velocidad de sedimentación de las partículas suspendidas de suelo en los procesos de lavado de suelo *ex situ* y en los procesos de floculación y sedimentación.⁸⁶

La permeabilidad del suelo es uno de los factores que controlan las tecnologías de tratamiento *en el sitio* (*in situ*). Una baja permeabilidad del suelo (10^{-3} a 10^{-5} cm/s) o una variación en la permeabilidad de sus diferentes estratos puede reducir la habilidad de los fluidos utilizados en el lavado de suelo *in situ* (ejemplo: agua, vapor, solventes, etc.) para atrapar y remover los contaminantes del subsuelo. Bajas permeabilidades también obstruyen el movimiento de vapores a través de la matriz del suelo, pudiendo disminuir la volatilización de compuestos orgánicos volátiles (VOCs, por sus siglas en inglés) en el proceso de extracción por vapor. De forma similar, las soluciones de nutrientes utilizadas para acelerar la biorremediación *in situ*, pueden no ser capaces de penetrar en un tiempo razonable en suelos de baja permeabilidad. Las bajas permeabilidades pueden también limitar la efectividad de los procesos de vitrificación por la liberación de vapores.

Un alto contenido de humedad puede obstruir el movimiento del aire a través del suelo cuando el sistema de extracción por vapor es aplicado y puede causar problemas en el proceso de excavación y transporte de materiales. Altos contenidos de humedad en el suelo pueden afectar la aplicación y provocar un incremento en los costos de los procesos de vitrificación y otros tratamientos térmicos

debido a un aumento en los requerimientos energéticos. Por otro lado, un aumento en el contenido de humedad del suelo favorece el tratamiento biológico *in situ*.⁸⁶

El pH de los residuos a ser tratados puede afectar muchas tecnologías de tratamiento. La solubilidad de los contaminantes inorgánicos es afectada por el pH; un alto pH en suelos normalmente reduce la movilidad de los compuestos inorgánicos a través de ellos. La efectividad de los procesos de intercambio catiónico y floculación pueden ser afectados negativamente por valores de pH demasiados altos o bajos. La diversidad microbiología y las actividades en los procesos de biorremediación también son afectados por valores extremos de pH.

E_h es el potencial de oxidación-reducción (redox) del material a ser considerado cuando están involucradas reacciones químicas tipo óxido-reducción. Ejemplo de este tipo de reacciones incluyen la cloración alcalina de cianidas, reducción de cromo hexavalente con sulfito bajo condiciones ácidas, oxidación aeróbica de compuestos en CO_2 y H_2O o la descomposición anaeróbica de compuestos orgánicos en CO_2 y CH_4 . Manteniendo un bajo E_h en la fase líquida aumenta la descomposición biológica anaeróbica de ciertos compuestos orgánicos halogenados.⁸⁶

K_{ow} (coeficiente de partición octanol/agua) se define como la razón de la concentración química en la fase octanol con su concentración en la fase acuosa de un sistema de doble fase octanol/agua. K_{ow} es un parámetro clave en la descripción de la degradación de un compuesto químico orgánico en sistemas ambientales. Se ha encontrado que el coeficiente de partición octanol/agua está relacionado con la solubilidad del compuesto en el agua, con el coeficiente de adsorción sedimento/suelo y con pequeños factores de bioconcentración para la vida acuática. El significado físico del K_{ow} es la tendencia de un compuesto químico a dividirse en una fase orgánica [ejemplo: hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs, por sus siglas en inglés) en un solvente] y en una fase acuosa. Los compuestos químicos que tengan un bajo valor de K_{ow} (<10) pueden ser considerados como relativamente hidrofílicos y que tienden a tener una alta solubilidad en agua, pequeños coeficientes de adsorción suelo/sedimento y pequeños factores de bioconcentración para la vida acuática. Comúnmente un compuesto químico con un valor grande de K_{ow} ($>10^4$) se considera hidrofóbico y tiende a acumularse en superficies orgánicas, tales como suelos húmicos y especies acuáticas.

El contenido húmico (fracción orgánica) es la parte en descomposición del material orgánico presente de forma natural en el suelo. Contenidos húmicos altos actúan como ligaduras del suelo, disminuyendo la movilidad de compuestos orgánicos y reduciendo la amenaza de contaminación del agua subterránea; sin embargo, altos contenidos húmicos pueden inhibir varios procesos de tratamiento como el sistema de extracción por vapor, el lavado de suelo *in situ* y *ex situ*, como resultado de la fuerte adsorción del contaminante al material orgánico. Los tiempos de reacción para los procesos químicos de deshalogenación de compuestos pueden incrementarse por la presencia de

grandes cantidades de materiales húmicos. Alto contenido orgánico puede también ejercer una excesiva demanda de oxígeno afectando adversamente la biorremediación y la oxidación química.⁸⁶

El Carbono Orgánico Total (TOC, por sus sigla en inglés) proporciona una indicación del total de material orgánico presente. El TOC es continuamente utilizado como un indicador (no una medida) de la cantidad de residuo disponible para biodegradación. El carbono orgánico total incluye el carbono presente de forma natural en el material orgánico y en los contaminantes químicos orgánicos.

Las mediciones de hidrocarburos volátiles, oxígeno y dióxido de carbono en sitios que contengan contaminantes biodegradables como hidrocarburos o sitios con altos contenidos de TOC son útiles en la delineación y confirmación de las áreas contaminadas así como en la identificación de un fuerte potencial de rehabilitación por venteo.

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (BOD, por sus siglas en inglés) proporciona un estimado de la descomposición biológica aeróbica de suelos orgánicos que pueden ser total o eventualmente biodegradados mediante la determinación del consumo de oxígeno del material orgánico. **La Demanda Química de Oxígeno (COD, por sus siglas en inglés)** es una medida del oxígeno equivalente del contenido orgánico en una muestra que puede ser oxidada por un oxidante químico fuerte como dicromato de permanganato. Algunas veces la COD y la BOD pueden ser relacionados y la relación COD/BOD puede dar otra indicación de la tratabilidad biológica o tratabilidad por oxidación química.

Uno de los factores que mejor determinan la degradación de contaminantes biodegradables es la disposición de suficientes aceptores de electrones para sustentar la biodegradación (ejemplo: oxígeno, nitrato, fierro, manganeso, etc.). Trazadores internos como trimetilo y tetrametilbenceno, son constituyentes normales de combustibles que son significativamente menos biodegradables que el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), aun teniendo características de transporte muy similares. Así, estos "trazadores internos" pueden ser detectados gradientes abajo del área de rehabilitación, demostrando que los pozos de monitoreo están colocados correctamente y que la ausencia de BTEX es un resultado de la biodegradación. Las concentraciones de esos trazadores pueden también proporcionar información para corregir la atribución de la dilución en la atenuación del contaminante.

Las grasas y aceites, cuando están presentes en el suelo, tenderán a cubrir las partículas del suelo. Esta cobertura debilita la ligadura entre el suelo y el cemento en los procesos de solidificación por cemento. Similarmente, las grasas y aceites pueden también interferir en el contacto del compuesto químico-residuo en las reacciones químicas de oxido-reducción, reduciendo la efectividad de esas reacciones.⁸⁶ La Tabla 6.1 presenta información relativa a las propiedades físicas y químicas de algunos compuestos orgánicos encontrados en aguas subterráneas.

Tabla 6.1 Propiedades físicas y químicas de algunos compuestos orgánicos encontrados en el agua subterránea (a 25 °C excepto 20 °C para todas las densidades).

Nombre Común	Punto de fusión (°C)	Densidad a 20 °C (g/ml)	Solubilidad en agua (moles/m ³)	Presión de vapor (atm)	Constante de Ley de Henry (atm·m ³ /moles)
Hidrocarburos saturados					
Metano	-182.5	0.424	1.50	270	---
Etano	-183.3	0.546	1.97	39	---
Propano	-189.7	0.501	1.41	9.3	---
Butano	-138.4	0.579	1.06	2.4	0.95
Pentano	-129.7	0.626	0.534	0.68	1.2
Hexano	-95	0.659	0.11	0.20	1.7
Heptano	-90.6	0.684	0.029	0.060	2.3
Octano	-56.2	0.703	0.0058	0.019	2.9
Nonano	-51	0.718	0.0017	0.0056	4.9
Decano	-29.7	0.730	0.00035	0.0017	6.9
Hidrocarburos Aromáticos					
Benceno	5.5	0.879	22.8	0.13	5.4 x 10 ⁻³
Tolueno	-95	0.866	5.59	0.038	6.6 x 10 ⁻³
<i>orto</i> -Xileno	-25.2	0.897	1.61	0.0087	4.9 x 10 ⁻³
<i>meta</i> -Xileno	-47.9	0.881	1.37	0.011	6.9 x 10 ⁻³
<i>para</i> -Xileno	13.2	0.854	1.47	0.12	7.0 x 10 ⁻³
Etilbenceno	-95	0.870	1.52	0.013	7.9 x 10 ⁻³
<i>n</i> -Propilbenceno	-101.6	0.862	0.46	0.0044	6.9 x 10 ⁻³
Naftaleno	80.2	1.145	0.25	2.0 x 10 ⁻¹⁰	4.2 x 10 ⁻⁴
Antraceno	216.2	1.25	0.00023	3.2 x 10 ⁻¹³	5.9 x 10 ⁻³
Fenantreno	101	1.025	0.0065	4.5 x 10 ⁻²	3.9 x 10 ⁻³

Nombre Común	Punto de fusión (°C)	Densidad a 20°C (g/ml)	Solubilidad en agua (moles/m ³)	Presión de vapor (atm)	Constante de Ley de Henry (atm·m ³ /moles)
Hydrocarbons Alogenados					
Diclorometano	-95.1	1.33	155	0.58	2.6×10^{-3}
Cloroformo	-63.5	1.48	67	0.25	3.8×10^{-3}
Cloroetano	-136.4	0.90	---	0.99	2.0×10^{-3}
1,1-Dicloroetano	-97.0	1.18	52	0.30	5.7×10^{-3}
1,2-Dicloroetano	-35.4	1.23	81	0.11	1.1×10^{-3}
1,1,1-Tricloroetano	-30.4	1.34	67	0.16	2.8×10^{-2}
Cloruro de Vinilo	-153.8	0.91	1.4	3.4	7.0×10^{-1}
cis-1,2-Dicloroetano	-80.5	1.28	36	0.27	---
trans-1,2-Dicloroetano	-50	1.26	65	0.43	---
1,1,2-Tricloroetano	-73	1.46	8.4	0.97	8.9×10^{-3}
Tetracloroetano	-19	1.62	0.73	0.025	2.3×10^{-2}

Fuente: Capel P.D., (1993)¹⁴

6.4 Tecnologías de rehabilitación *en el sitio (in situ)* para suelos y acuíferos contaminados

6.4.1 Sistema de Extracción por Vapor

- Resumen

El Sistema de Extracción por Vapor (SVE, por sus siglas en inglés) es una tecnología de tratamiento *in situ* que se encuentra en desarrollo. Ha sido ampliamente utilizado en años recientes para la rehabilitación de la zona vadosa o no saturada de sitios contaminados con compuestos orgánicos volátiles (VOCs, por sus siglas en inglés), orgánicos semivolátiles (SVOCs, por sus siglas en inglés)⁸⁹ y líquidos no acuosos (NALPs, por sus siglas en inglés) que están atrapados en la zona no saturada como saturación residual y en la zona saturada como productos flotantes, los cuales pudieron haber sido introducidos al subsuelo por un número de diferentes fuentes.^{88,89}

El sistema de extracción por vacío se conoce también como volatilización *in situ*, volatilización mejorada, aireación del suelo *in situ*, aireación forzada del suelo, remoción *in situ* por chorro de aire o extracción al vacío.⁹⁰

El tratamiento por vacío es un proceso que envuelve el paso de grandes volúmenes de aire a través o cerca de la mancha de contaminación utilizando un sistema de circulación de aire. Los compuestos orgánicos o varias fracciones de una mezcla de compuestos volatilizados son transportados a la superficie. Así, el método de extracción por vapor envuelve el flujo de fluidos, aire en este caso, y el transporte de masa disuelta en el fluido.⁸⁸

Muchos procesos complejos ocurren a microescala. Sin embargo, los tres principales factores que controlan la eficiencia en el funcionamiento de una operación de venteo de suelo dependerá significativamente de la composición química del o los contaminantes, del porcentaje de flujo de vapor a través de la zona no saturada y de la trayectoria del flujo de vapores respecto a la localización y distribución de los contaminantes.^{88,91}

Las emisiones de aire son normalmente controladas mediante sistemas de adsorción de los compuestos volátiles en carbón activado, la destrucción térmica o la oxidación catalítica.⁹² También se han usado otros métodos, como tratamiento biológico, condensación por refrigeración y oxidación ultravioleta.⁹⁰

La experiencia ha demostrado que el sistema SVE es ideal para remover VOCs y SVOCs de suelos con alta permeabilidad, y en tales situaciones puede llegar a tener una mayor eficiencia en costos y porcentaje de remoción en comparación con otras estrategias de rehabilitación como excavación, bombeo y tratamiento, incineración o lavado de suelo *in situ*.⁹³

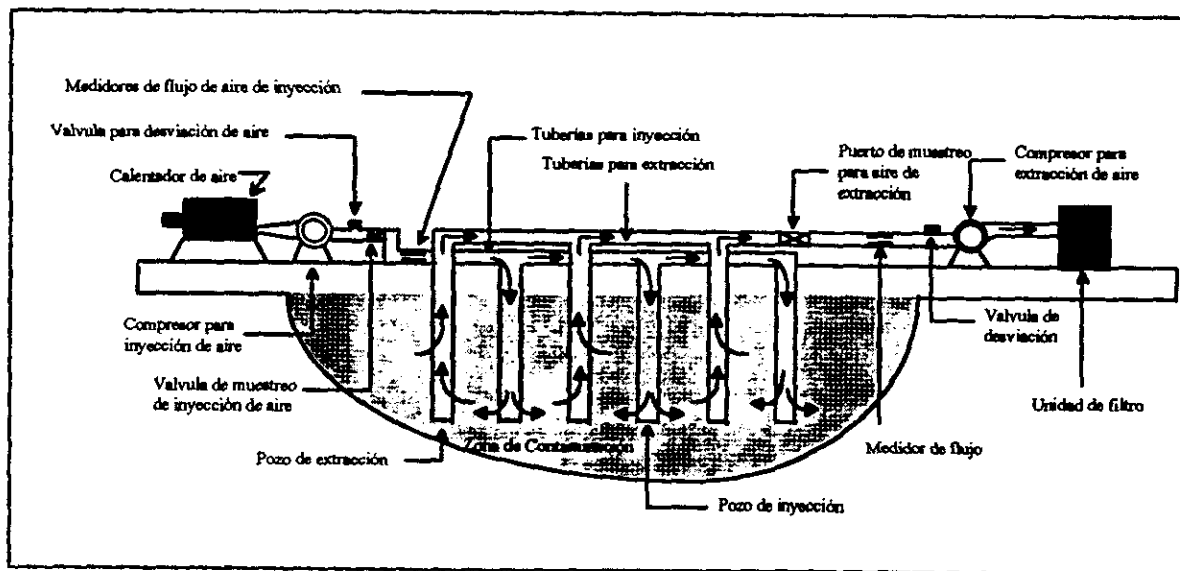
- Descripción de la tecnología

Es necesario desarrollar pruebas piloto para establecer la factibilidad de la tecnología así como para obtener la información necesaria para diseñar y configurar el sistema.⁸¹ Las pruebas piloto se deben desarrollar para obtener información del diseño, incluyendo pozos de extracción, radios de influencia, niveles de flujo de gas, nivel de vacío óptimo a aplicar y niveles de remoción de contaminantes. El costo de las pruebas pilotos puede variar de US \$ 10,000 (\$^M/_N 80,000) a US \$ 100,000 dólares (\$^M/_N 800,000).⁸⁰

Una vez que el área de contaminación ha sido definida, los pozos de extracción son colocados en sitios específicos para asegurar un adecuado flujo de vapor a través de la zona de contaminación a fin de minimizar el flujo de vapor a través de otras zonas.⁹² Algunos sistemas SVE son instalados con pozos de inyección de aire para tomar aire atmosférico ya sea de forma pasiva o forma activa mediante la inyección forzada de aire por medio de compresores.⁹⁴

Los procesos físicos fundamentales que ocurren durante la operación de venteo de suelos son fácilmente entendibles. Como se ilustra en la Figura. 6.4, un pozo de vacío induce el flujo de vapor a través del subsuelo, con lo que aumenta el grado natural de volatilización. Los compuestos con valores altos de presión de vapor son removidos primeramente y con el tiempo los contaminantes residuales atrapados en el subsuelo gradualmente llegan a tener una menor cantidad de compuestos volátiles. Debido al cambio de composición, la concentración de vapor de contaminantes y el porcentaje de masa removida decrece con el tiempo.⁹¹

Figura 6.4 Sistema de Extracción por Vapor



Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹⁴

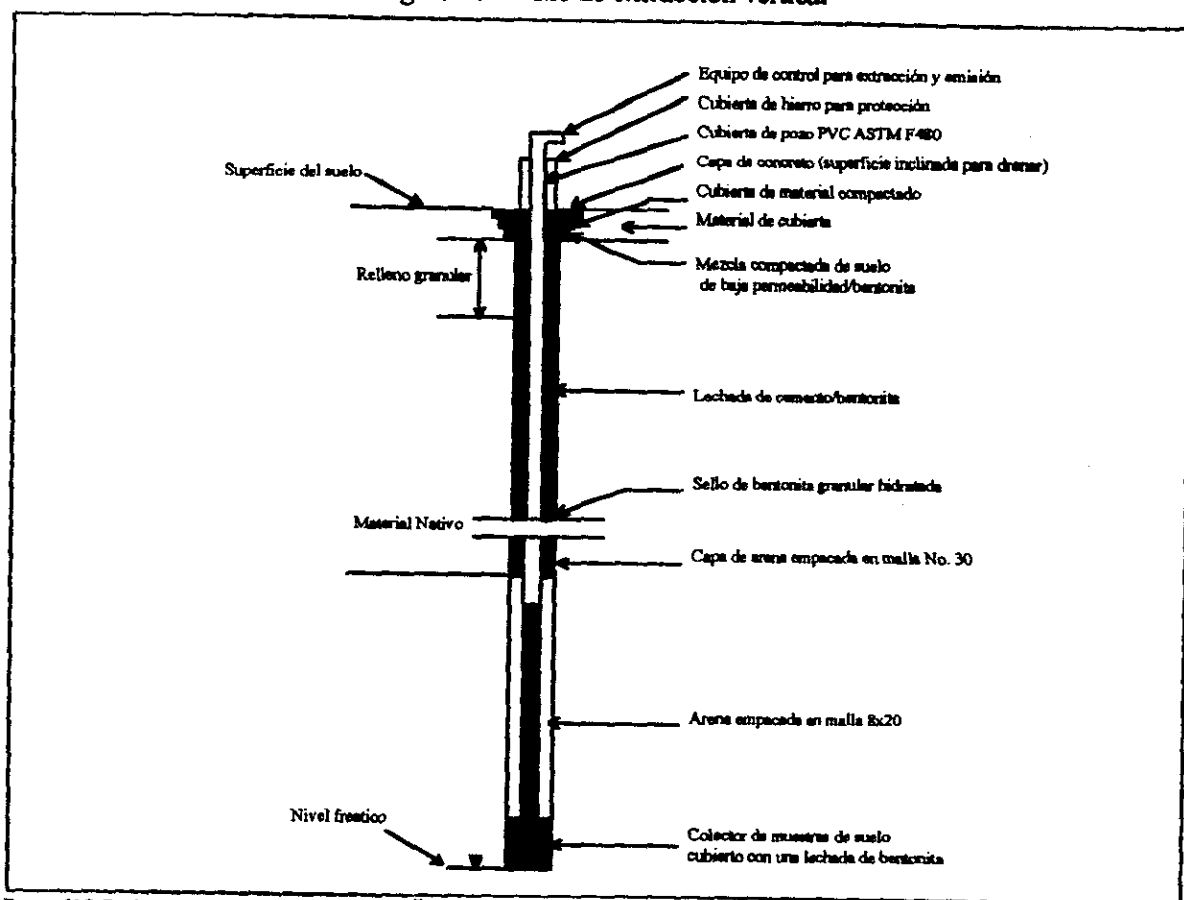
El aire forzado libera los compuestos volátiles del suelo y los acarrea al pozo de extracción. Los vapores contaminados y el agua que ingresa a los pozos de extracción son conducidos mediante un flujo inducido a un separador líquido-vapor. El agua de ingreso es separada y almacenada para posteriormente ser sometida a un tratamiento. Los vapores contaminados son entonces transportados mediante bombas de vacío hacia un sistema de tratamiento de vapor como una unidad de adsorción por carbón.^{94,92}

Un sistema típico de extracción por vapor tal como el que se muestra en la Figura 6.4 consiste de: uno o más pozos de extracción, uno o más inyectores de aire o pozos de inyección (opcional), tuberías para aire, bombas de vacío, compresores de aire, medidores de flujo y equipos de control, medidores de vacío, puertos de muestreo, separadores aire-agua (opcional), sistema de tratamiento de vapores (opcional), y (10) una cubierta (opcional).^{88,14}

Los pozos de extracción como el que se muestra en la Figura 6.5, son normalmente construidos de Policloruro de Vinilo (PVC, por sus siglas en inglés),⁹² los cuales son generalmente diseñados para penetrar completamente la zona no saturada hasta llegar a la zona capilar. La superficie de la columna perforada por los pozos verticales o la de las trincheras para pozos horizontales es normalmente cubierta con una lechada de cemento y bentonita⁹² para prevenir la penetración directa de aire de la superficie a lo largo de los pozos o a través de las trincheras.⁸⁸

Las dimensiones físicas de un sitio en particular pueden modificar el diseño de un sistema SVE. Si la profundidad de la zona no saturada es menor de 3 m y el área del sitio contaminado no es muy grande, es más recomendable utilizar un sistema horizontal de tuberías o trincheras que el sistema convencional de pozos.⁹² La literatura proporcionada por los proveedores de servicios de pozos horizontales muestran que, dependiendo de la geometría de la pluma de contaminación y las características del sitio, un pozo horizontal puede reemplazar 50 pozos verticales. Sin embargo, un proyecto hipotético de comparación de costos desarrollado por la compañía norteamericana *The Hazardous Waste Consultant* y un estudio llevado a cabo por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (US DoF, por sus siglas en inglés), ilustran que un pozo horizontal puede lograr los mismos objetivos de limpieza que hasta 80 pozos verticales, logrando ahorros en costos de cerca del 80%.^{90,95} Sin embargo, los costos de instalación de los pozos horizontales son aproximadamente diez veces más altos que los costos por instalación de pozos verticales.⁹⁶

Figura 6.5 Pozo de extracción vertical



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, (1994).⁸⁹

Los pozos de inyección son construidos de forma similar a los pozos de extracción y al igual que en estos, es necesario aplicar una cubierta de lechada de cemento y bentonita a fin de controlar el flujo de aire a través de las zonas de máxima contaminación. Los pozos de venteo son pasivos y permiten que el aire sea extraído del subsuelo en puntos específicos. Los pozos de inyección forzan al aire a penetrar dentro del subsuelo para que pueda ser utilizado en sistemas de circuito cerrado. La función de los pozos venteo y los pozos de inyección es aumentar el movimiento del aire en puntos estratégicos y promover el flujo horizontal de aire hacia los pozos de extracción.⁸⁸

Los pozos de inyección y extracción tienen un radio de influencia promedio entre 6-15 m dependiendo del tipo de suelo y la potencia de las bombas. Sin embargo, existen experiencias que muestran un radio de influencia de hasta 18 m.¹⁴

Los pozos de extracción y venteo son normalmente utilizados a profundidades de 1.5 m pero se han tenido experiencias exitosas hasta de 91 m. Los pozos horizontales de venteo o extracción son instalados en trincheras u orificios horizontales. Las técnicas de perforación horizontal más utilizadas son: tecnología de la industria petrolera, híbrido tecnología petrolera/tecnología industrial, tecnología

industrial de compactación y la tecnología industrial denominada cruce de río. Para profundidades entre 12-15 m es más recomendable utilizar la tecnología industrial de compactación y la tecnología industrial denominada cruce de río. Para profundidades superiores a los 15 m, la tecnología de la industria petrolera y el sistema híbrido de la tecnología petrolera/tecnología industrial resultan ser las más recomendables.^{81,90,96}

Las compresores reducen la presión del gas en los pozos de extracción e inducen el flujo del aire a los pozos. La presión de salida de las bombas o compresores puede ser usada para presionar la salida del gas a través de un sistema de tratamiento y regresar al interior del subsuelo si los pozos de inyección están utilizándolo. Los medidores de flujo de gas son instalados para medir el volumen de aire extraído. Las pérdidas de presión en todo el sistema son determinadas por medidores de vacío. Los puertos de muestreo pueden ser instalados dentro del sistema en la superficie de cada pozo, en el ventilador y después del tratamiento del vapor. Además, los equipos para el monitoreo de vapor y de la presión pueden ser instalados para medir las concentraciones de vapor en el suelo y el radio de influencia del vacío en los pozos de extracción.⁸⁸

Para proteger los compresores o bombas y para incrementar la eficiencia de los sistemas de tratamiento de vapor, es necesario instalar un sistema separador aire-agua. El condensado puede entonces ser tratado como un residuo peligroso dependiendo del tipo y concentración de los contaminantes. La necesidad de un separador puede ser eliminada cubriendo el área sujeta a tratamiento con una capa impermeable o mediante el diseño de los pozos de extracción para separar el agua del aire dentro del pozo empacado.

El sistema SVE produce varios materiales de desechos como vapor, residuos del tratamiento de líquidos, agua subterránea contaminada y restos de suelos provenientes de las operaciones de perforación de pozos.⁹⁴ Los vapores producidos por el proceso son generalmente tratados por adsorción en carbón activado granular o por medio de destrucción térmica. Otros métodos como condensación líquido-vapor, degradación biológica u oxidación ultravioleta han sido aplicados solo de forma limitada.⁹² Los tratamientos para el vapor pueden no requerirse si la tasa de emisión de contaminantes es baja y si estos son fácilmente degradados en la atmósfera.⁸⁸ El agua subterránea contaminada puede ser tratada y descargada sobre el sitio, o almacenada y tratada fuera del sitio. Los restos de suelos altamente contaminados provenientes de las actividades de perforación deben ser recolectados y tratados en el sitio o fuera de él mediante otras tecnologías de tratamiento como la incineración.⁹² Los residuos del tratamiento de líquidos (ejemplo: carbón activado granular ya utilizado) pueden ser enviados fuera del sitio para su regeneración o disposición final.⁹⁴

El porcentaje de remoción de vapores contaminados es de esperarse que sea afectado principalmente por la volatilidad de los contaminantes, su capacidad de sorción dentro del suelo, el porcentaje del

flujo de aire, la distribución del flujo de aire, la distribución inicial de los contaminantes, la estratificación del suelo o agregados y el contenido de humedad del suelo.⁹⁴

Las características del suelo en un sitio particular tendrán un efecto significativo en la aplicabilidad de los sistemas de extracción por vapor. La conductividad del aire controla el porcentaje en cual el aire puede ser extraído del suelo por la aplicación de vacío. El tamaño de partícula, el contenido de humedad, y la estratificación son probablemente las propiedades más importantes, ya que de ellos depende la facilidad que presente el suelo para la extracción de aire. El éxito del sistema de extracción por vapor en suelos arcillosos o limosos puede depender de la presencia de mas estratos de conducción, esto puede ser esperado por ejemplo en agregados aluviales, en suelos de grano fino con un contenido de humedad relativamente bajo.⁹⁴

El tratamiento de suelos contaminados por medio del sistema SVE incrementa su grado de dificultad conforme varía la composición del suelo. Las heterogeneidades del suelos ocasionan niveles de flujo y procesos de desorción variables. Sin embargo, este problema puede ser mitigado con un apropiado diseño de los sistemas de extracción por vacío. El sistema SVE trabaja mejor en suelos de permeabilidad media y alta como arena y grava, ya que el aire penetra más fácilmente en las capas del suelo extrayendo los vapores de los contaminantes. Sin embargo, SVE ha trabajado exitosamente en suelos que contengan arcillas o limos en combinación con estratificaciones permeables. Parámetros adicionales que afectan el desarrollo del sistema SVE incluyen.⁹⁴

Las características del suelo afectan significativamente el transporte y degradación de los contaminantes así como también a las posibilidades de éxito del sistema SVE. Las características más importantes del suelo son: estatigrafía, porosidad, distribución del tamaño de partícula, contenido de agua, saturación residual, presencia o ausencia de macroporos o rutas preferenciales de transporte.

El contenido de agua del suelo tiene un efecto significativo sobre la permeabilidad del aire. En general, altos contenidos de agua reducen la porosidad del suelo decreciendo por consecuencia los poros interconectados a través de los cuales puede el contaminante migrar por advección. El sistema SVE es generalmente más exitoso cuando se emplea en suelos con contenidos bajos de humedad. Sin embargo, si el contenido de agua es muy bajo, la fuerza de sorción del suelo se incrementa originando una reducción de la volatilización del gas dentro del suelo.

La permeabilidad es quizá el parámetro más importante en el diseño y operación de un sistema SVE. La permeabilidad incorpora los efectos de diferentes características del suelo y el vapor. La permeabilidad del aire incorpora muchas características del suelo incluyendo la porosidad, estructura, distribución del tamaño de partícula y contenido de agua.⁹⁴

De forma similar a las características del suelo, las propiedades químicas y físicas del contaminante tienen una gran influencia sobre su movimiento y degradación en el subsuelo. Características importantes incluyen: presión de vapor, coeficiente de sorción en el suelo y solubilidad. La volatilidad del contaminante controla en gran parte la cantidad de vapores presentes en los poros del suelo, es quizá la característica más importante que afecta la aplicabilidad del sistema SVE para esos productos. El parámetro que mejor describe la volatilidad de un compuesto es su presión de vapor. Las propiedades químicas del o los contaminantes dictarán si un sistema de extracción por vapor es factible. Un sistema de extracción en fase de vapor es más efectivo en la remoción de compuestos que muestran una significativa volatilidad en el suelo a temperatura ambiente. Los compuestos volátiles de bajo peso molecular son los más favorecidos. Es difícil remover contaminantes que presenten bajas presiones de vapor y/o alta solubilidad en agua.^{88,92} El grupo principal de contaminantes que remueve el sistema SVE son VOCs y algunos combustibles. La tecnología es típicamente aplicable solo a compuestos volátiles que presenten valores dimensionales de la constante de la Ley de Henry mayores de 0.01 o una presión de vapor mayor de 0.5 mm Hg (0.021 plg Hg). El sistema SVE no remueve hidrocarburos pesados, diesel, metales, PCBs o dioxinas.^{81,82,92} La solubilidad controla el grado al cual el contaminante se disuelve dentro del agua subterránea o en el agua de poro presente en la zona vadosa. Productos solubles son comúnmente disueltos en la infiltración de precipitaciones pudiendo migrar más lejos de la fuente de contaminación. Dentro de las contaminaciones por hidrocarburos, la mayor parte de los productos liberados provienen de tanques de almacenamiento subterráneo y son actualmente mezclas de diferentes compuestos. Cada tipo de producto tiene diferente composición por lo que su comportamiento dentro del subsuelo será diferente. El sistema SVE es más aplicable para aquellos productos químicos con una gran cantidad de fracciones ligeras (ejemplo: gasolinas) que para los que contienen una mayor proporción de fracciones pesadas (ejemplo: diesel).

Como se ha mencionado un gran número de variables caracterizan el diseño y operación exitosa de un sistema de extracción por vapor. La Tabla 6.2 muestra las variables específicas que pertenecen a estos grupos.

Los sistemas SVE varían en tamaño y grado de complejidad dependiendo de la capacidad del sistema y los requerimientos para el vapor y el líquido a tratamiento. El sistema es normalmente transportado por camiones adaptados específicamente a semitrailers de cubierta plana, por lo tanto, un área propia para el estacionamiento de esos vehículos debe ser incorporada en los planos. Se deben acondicionar vías de acceso adecuadas hacia el sitio contaminado para trasladar los equipos móviles de perforación y el equipo requerido para el proceso de rehabilitación.⁹²

Un sistema SVE de tamaño comercial puede requerir cerca de 300 m² de área para el equipo. Esta área no incluye el espacio para los pozos de monitoreo los cuales pueden cubrir un área de 150 m². Para un sistema con procesos de tratamiento para líquido y vapor integrado es necesaria un área

adicional basado en los requerimientos específicos estipulados por el diseñador y proveedor. Es necesario la instalación de un sistema eléctrico 440V trifásico. Para muchas aplicaciones SVE, el agua puede ser requerida en el sitio. La cantidad de agua necesaria es específica para el sitio y de acuerdo a las especificaciones del equipo.⁹²

Durante la operación a gran escala, el sistema SVE puede ser utilizado intermitentemente (operación pulsada) una vez que el nivel de remoción haya alcanzado un comportamiento asintótico. Esta operación pulsada puede incrementar el costo-beneficio del sistema gracias a la extracción de grandes

Tabla 6.2 Variables en el Sistema de Extracción por Vapor

Condiciones del sitio	Propiedades químicas	Propiedades del suelo	Variables de control	Variables de operación
Distribución de los VOCs	Constante de Henry	Permeabilidad (aire y agua)	Porcentaje de separación de aire	Gradientes de presión
Profundidad del agua subterránea	Solubilidad	Porosidad	Configuración de los pozos	Distribución final de VOCs
Porcentaje de infiltración	Equilibrio de adsorción	Concentración de carbono orgánico	Espaciamiento de los pozos de extracción	Contenido final de humedad
Localización de las heterogeneidades	Difusividad (aire y agua)	Estructura del suelo	Espaciamiento de los pozos de venteo	Concentración del aire de extracción
Temperatura	Densidad	Características de humedad del suelo	Extensión de cubierta superficial	Humedad del aire de extracción
Presión Atmosférica	Viscosidad	Distribución del tamaño de partícula	Duración del bombeo	Temperatura del aire de extracción
			Concentración de VOCs y contenido de humedad en el aire de venteo	Potencia de vacío utilizada

Fuente: Charbeneau J.R., Bedient B.P. and Locher C.R., (1992).

concentraciones de contaminantes. Después de que los contaminantes son removidos por el sistema SVE y no se han alcanzado los objetivos de limpieza, se debe investigar otras tecnologías de tratamiento como la biodegradación. El proyecto SVE es normalmente completado en 18 meses.⁸¹

El sistema SVE como un sistema *in situ* (no requiere un proceso de excavación), requiere el tratamiento del suelo a varios niveles de limpieza dependiendo de criterios específicos para el sitio según leyes federales y estatales. El tiempo requerido para alcanzar los niveles de limpieza necesarios puede ser estimado utilizando datos obtenidos a escala. Así mismo los modelos matemáticos pueden estimar el tiempo requerido para alcanzar los niveles de limpieza, los niveles de contaminación residual después de un periodo de operación determinado y pueden predecir la localización de los puntos críticos de contaminación a través de un diagrama de distribución de contaminantes.⁹² Los modelos matemáticos desarrollados para la simulación del proceso SVE se pueden clasificar en dos grupos: modelos analíticos y modelos numéricos los cuales sirven como herramientas de diseño.⁹⁷

En términos de actividades de monitoreo, se recomienda que los siguientes datos sean recolectados sobre la marcha: nivel de flujo de aire, presión en cada pozo de extracción e inyección, temperatura ambiental y del suelo, elevación del nivel freático, concentraciones de vapor en cada pozo de extracción y concentraciones de vapor gas-suelo en diferentes distancias de los pozos de extracción.

- **Aplicabilidad de la Tecnología**

La extensión vertical y horizontal en la cual se encuentran distribuidos los contaminantes en el subsuelo es una consideración muy importante en la decisión del sistema de extracción por vapor sobre otros métodos de tratamiento.⁹² Si la mancha de contaminación ha penetrado en el subsuelo más de 6 ó 7 m ó si ésta, se ha distribuido en cientos de metros cuadrados con una profundidad particular o bien, si el volumen de suelo contaminado sobrepasa los 382 m³, los costos de excavación llegan a ser excesivos en comparación con los del sistema de extracción por vapor.⁸⁸

Los costos del sistema SVE son específicos para cada sitio, dependiendo del tamaño del sitio, la hidrogeología local y la naturaleza y el grado de contaminación. Estos factores afectan el número de pozos, la capacidad de los compresores, el nivel de vacío requerido y el tiempo necesario para llevar a cabo el proceso de rehabilitación del sitio. El gas de salida y el agua subterránea que es constantemente extraída durante el proceso, por lo general, requieren un tratamiento previo a su disposición en el medio ambiente, lo que incrementa significativamente los costos. Los costos estimados para el sistema SVE tienen un intervalo de US \$ 10-50/m³ (\$^M/_N 80-400/m³) de suelo tratado.⁸⁶ Los principales costos en el sistema SVE corresponden a la construcción de los pozos de extracción y monitoreo, las bombas de vacío, sistemas de tuberías para vapor y agua, válvulas e instrumentación. Los costos de operación y mantenimiento incluyen mano de obra, fuerza motriz, mantenimiento y operaciones de monitoreo. La recolección y el almacenamiento del agua subterránea

y vapores contaminados son los que representan los costos más altos en esta lista, los costos de limpieza pueden incrementarse al doble si se utiliza carbón activado tanto para el vapor como para el agua. Los costos de energía eléctrica varían de acuerdo con la localización, pudiendo representar entre el 1 y 2 por ciento del costo total del proyecto.⁹²

La profundidad del nivel freático es también otro factor importante. En lugares donde el agua subterránea se encuentra a profundidades superiores a los 12 m y la mancha de contaminación se ha extendido hasta ese punto, el sistema de extracción por vapor puede ser una de las tecnologías potenciales a utilizar.⁹² La presencia de heterogeneidades en la matriz del suelo contaminado influye en el movimiento del aire, así como en la localización y distribución de los contaminantes. Generalmente se pueden presentar variaciones en la conductividad del aire a lo largo de los diferentes estratos. Una estratificación horizontal del suelo puede ser favorable para el sistema de extracción por vapor debido a que la relativa impenetrabilidad de los estratos limitarán el porcentaje de flujo vertical de la superficie del subsuelo y tenderá a aumentar la influencia del vacío horizontal aplicado por los puntos de extracción.⁹³

Los pozos de extracción provocan que el nivel freático se eleve y sature el suelo en el área de contaminación, la operación de bombeo es entonces necesaria para bajar el nivel freático y permitir un proceso de ventilación más eficiente. El sistema SVE puede ser utilizado en sitios donde no se requiera una rehabilitación completa. Generalmente, ninguna tecnología puede rehabilitar totalmente un sitio. Diversas tecnologías de tratamiento son normalmente combinadas para formar lo que se conoce como un tren de tratamiento. El sistema SVE puede ser integrado con el bombeo de agua subterránea y aspersión de aire para, simultáneamente, remover contaminantes de suelo y agua subterránea y estimular o aumentar la actividad biológica natural.⁹⁰

El sistema SVE ha removido de forma eficiente: Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno, Naftaleno, Percloroetileno, Tricloroetileno, Tricloroetano, Butanos, Pentanos, Hexanos y gasolinas.⁷ El sistema SVE puede remover contaminantes de mezclas de residuos como hidrocarburos clorados, Alcoholes incluyendo: metanol, etanol y propanol.¹⁴ La efectividad del sistema SVE sobre grupos generales de contaminantes en suelo se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Efectividad del sistema SVE sobre un grupo general de contaminantes

Grupo de contaminantes	Efectividad
Orgánicos	
Volátiles halogenados	☺
Semivolátiles halogenados	☺
Volátiles no halogenados	☺
Semivolátiles no halogenados	☺
PCBs	⊗
Pesticidas	⊗
Dioxinas/furanos	⊗
Cianidas orgánicas	⊗
Corrosivos orgánicos	⊗
Inorgánicos	
Metales volátiles	⊗
Metales novolátiles	⊗
Asbestos	⊗
Material radioactivo	⊗
Corrosivos inorgánicos	⊗
Cianidas inorgánicas	⊗
Reactivos	
Oxidantes	⊗
Reductores	☺

Fuente: Freeman Harry M. Eugene, Eugene F. Harris, (1995).⁸⁸

- ☺ Eficiencia demostrada
- ☺ Eficiencia potencial
- ⊗ Sin eficiencia

• **Ventajas y limitaciones de la tecnología**

Una de las ventajas asociadas al sistema de extracción por vapor es que crea un mínimo de perturbación en el sitio contaminado permitiendo en ocasiones no interrumpir las actividades propias del lugar, puede aplicarse a partir de equipo normal, existen experiencias demostrativas a nivel de laboratorio y a escala piloto que pueden ser utilizados en el tratamiento de grandes volúmenes de suelo a costos razonables. Puede ser utilizada en combinación con otras tecnologías de tratamiento. Con el sistema SVE es posible eliminar contaminantes de la zona vadosa reduciendo el riesgo de una potencial migración hacia el nivel freático.^{88,94,14}

Los factores que pueden limitar la aplicabilidad y éxito del proceso SVE incluyen:^{81,98,14}

- Suelos compactados o con un alto contenido de humedad (>50%) tienen una reducida permeabilidad al aire por lo que se requiere un alto nivel de vacío para remover los contaminantes, esto provoca un incremento de los costos y un retraso en la operaciones.
 - En suelos con grandes variaciones en la permeabilidad se requiere una amplia red de pozos de extracción lo cual puede resultar, por otro lado, en una desigual remoción de contaminantes de la zona afectada.
 - Es aplicable solo en suelos porosos con conductividades hidráulicas $>10^{-3}$ cm/s
 - Los suelos con un alto contenido orgánico o excesivamente húmedos tienen una alta capacidad de sorción de VOCs lo cual provoca una reducción en los niveles de remoción de contaminantes.
 - Las emisiones de vapor pueden requerir tratamiento para eliminar el posible daño al público y al ambiente.
 - Como resultado del tratamiento de los vapores contaminados, los líquidos residuales y el carbón activado usado pueden requerir tratamiento y/o disposición.
 - Las fluctuaciones del nivel freático reducen la eficiencia ya que incrementan la disolución de hidrocarburos solubles.
 - Altos volúmenes de escurrimientos saturan la zona vadosa originando una reducción en la eficiencia del método.
 - Suelos con temperaturas $< 10^{\circ}\text{C}$ no son eficientemente rehabilitados.
- **Situación actual de la tecnología**

El sistema SVE es la tecnología de tratamiento más frecuentemente utilizada en los sitios del *Programa Superfondo*.⁸¹ Durante 1989, en al menos 17 ocasiones se especificó el sistema SVE como parte de las acciones de rehabilitación. En el año de 1990, 13% del total de las tecnologías de tratamiento utilizadas en los sitios del *Superfondo* correspondían al sistema SVE.⁸³ Para 1991 el sistema SVE representaba 17% de las tecnologías utilizadas⁸⁴ y para 1994 la utilización del sistema SVE representaba ya un 19% del total de tecnologías de tratamiento utilizadas en los sitios del *Programa Superfondo*.⁸⁵

En años recientes ha surgido una segunda generación de métodos de rehabilitación basados en los principios del sistema SVE, notables ejemplos son:

- a) **Extracción de vapores del suelo mejorado térmicamente:** se puede mejorar la extracción de vapores del suelo con la inyección de aire caliente o vapor a través de los pozos de inyección. El aire caliente o el vapor ayuda a liberar algunos compuestos menos volátiles del suelo. Se han realizado demostraciones a gran escala del sistema de extracción con inyección de vapores en varios lugares de los Estados Unidos.⁸¹ Además del aire caliente o del vapor, se utilizan

radiofrecuencias para calentarlo y vaporizar o volatilizar mejor los compuestos en suelos arcillosos y limosos.⁹⁹ El Departamento de Energía de los Estados Unidos (DoE, por sus siglas en inglés) realizó pruebas en el año de 1995 demostrando que el calentamiento del suelo puede ser usado para incrementar el porcentaje de remoción del contaminante debido principalmente al incremento de la presión parcial de los contaminantes en la fase gaseosa así como por el incremento del flujo de gases extraídos a través del suelo. El proceso puede ser usado para la rehabilitación de suelos arcillosos con baja permeabilidad donde el venteo de suelos no es económicamente factible. En el estado de desarrollo actual, el proceso es aplicable para remover contaminantes que se encuentren en la zona vadosa y que presenten una presión de vapor entre 0.5-1 mm Hg a la temperatura de tratamiento (70-95 °C). Algunos ejemplos de contaminantes tratados son compuestos orgánicos volátiles, tetraclorobenceno, ácido benzoico, 1 heptano, 1-4 dibromobenceno y 3 clorofenol. Los costos de suelo tratado están en el intervalo de US \$ 30-40 (\$^M/_N 240-320) por tonelada de suelo tratado, sin embargo el costo se puede incrementar hasta los US \$ 144-200 (\$^M/_N 1152-1600) por tonelada de suelo tratado.^{100,97}

b) *Extracción de doble fase*: la extracción de doble fase es un sistema de tratamiento similar a la extracción de vapores del suelo, pero los pozos de extracción son más profundos y llegan a la zona saturada, debajo del nivel freático. Se aplica un fuerte vacío por medio de los pozos de extracción para extraer simultáneamente agua subterránea y vapores del suelo. Cuando los vapores llegan a la superficie, se separan y se someten a un tratamiento. En suelos densos y arcillosos, la extracción de doble fase es más eficaz que el método normal de extracción de vapores. Cuando la extracción de doble fase se combina con medidas biocorrectivas, aspersión de aire o bioaeración, la limpieza lleva menos tiempo.⁸¹ Una variación de este proceso llamado UVB (Unterdruck-Verdampfer-Brunner) originalmente desarrollado para hidrocarburos clorados ha sido utilizado en numerosos sitios contaminados en Alemania y ha sido recientemente introducido en los Estados Unidos. La Universidad de Stanford ha desarrollado otra variación de este proceso el cual ha empezado a ser evaluado como parte del Programa de Demostración Tecnológica del Departamento de Energía de Los Estados Unidos. Este sistema, combina el bombeo de agua subterránea con el venteo de suelos. Hasta el momento no existen datos referentes a los costos.¹⁰¹

6.4.2 Lavado de suelo *in situ* (*in situ*)

• Resumen

El lavado de suelo *in situ* (*soil flushing*, SF, por sus siglas en inglés) es un método de tratamiento o proceso de extracción innovador que involucra la liberación de agua o de soluciones surfactantes en el suelo a través de pozos de inyección o mecanismos de irrigación. La solución con la carga de contaminantes es bombeada por medio de pozos de recuperación para su tratamiento posterior. La solución tratada puede reciclarse al sistema. Este proceso se continúa aplicando hasta que la concentración de los contaminantes alcancen los límites permisibles.^{81,87}

Normalmente, el lavado de suelo *in situ* es usado en conjunto con otras tecnologías de tratamiento que destruyen los contaminantes o los remueven del líquido de extracción y del agua subterránea.^{92,102} El método es potencialmente aplicable a todo tipo de suelo contaminado, pero tal aplicación requiere generalmente de una evaluación específica del sitio y del diseño del sistema.^{82,79}

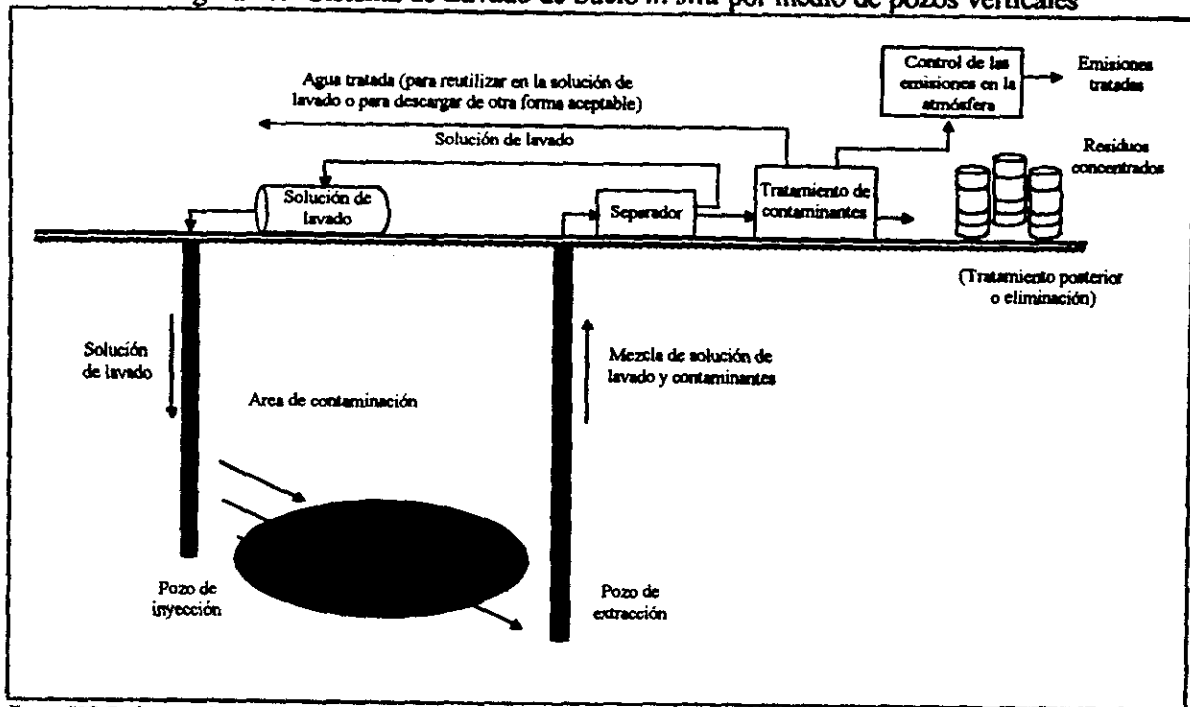
El sistema SF utiliza agua como fluido de lavado. Sin embargo, se pueden utilizar otros solventes (como soluciones ácidas, básicas o agentes tensoactivos) para contaminantes que son ligeramente solubles en agua.¹⁰³ El fluido de lavado es seleccionado con base en su habilidad para solubilizar los contaminantes y por sus efectos a la salud y al medio ambiente. Para compuestos hidrofóbicos (como la mayor parte de los hidrocarburos) el sistema SF utiliza solventes orgánicos. Para contaminantes hidrofílicos el lavado de suelo *in situ* utiliza agua como solvente.⁷⁹

El lavado de suelo *in situ* es una tecnología más aplicable a compuestos orgánicos solubles y metales, que se encuentran distribuidos en áreas extensas en concentraciones bajas o medias. En general el lavado de suelo *in situ* es más efectivo cuando el o los contaminantes presentan una alta solubilidad en agua, un bajo coeficiente de partición suelo-agua, K_{oc} , el cual es una medida del equilibrio entre el contenido orgánico del suelo y el agua. Un bajo valor de K_{oc} indica una favorable tendencia de lixiviación de los contaminantes del suelo. K_{oc} es el principal factor que controla la efectividad del lavado de suelo *in situ*.⁷⁹

• Descripción de la tecnología

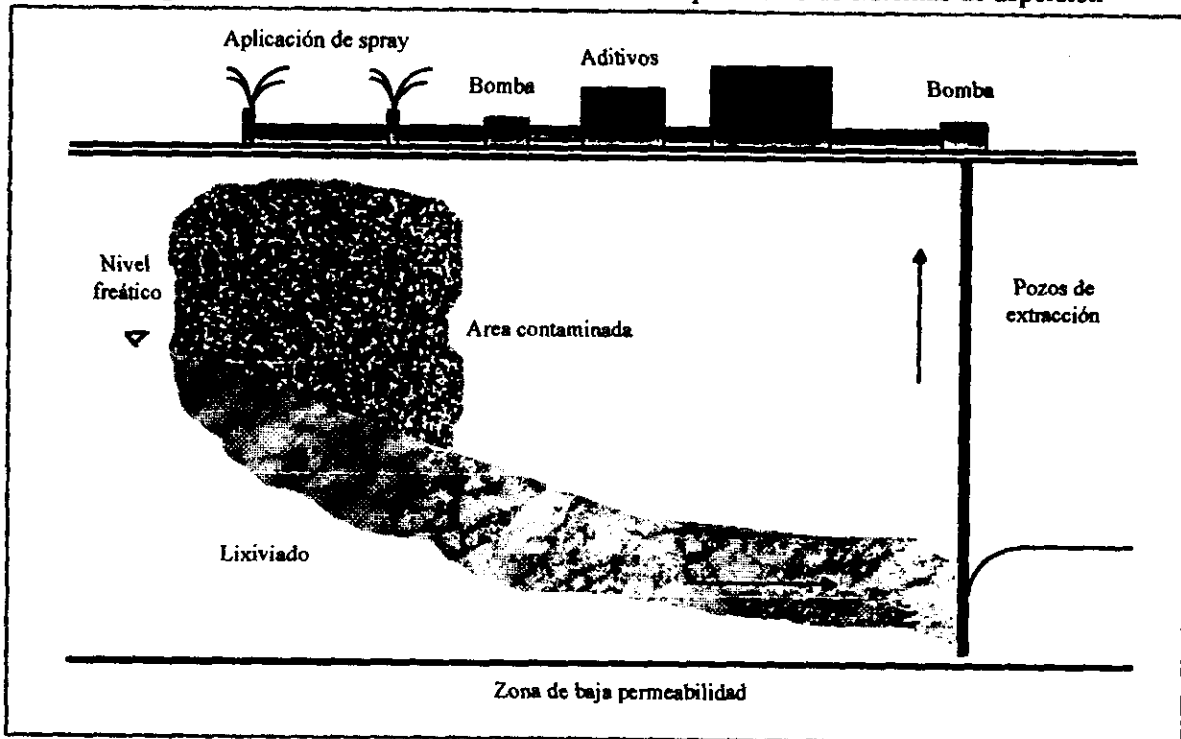
El fluido de lavado es introducido al suelo contaminado mediante pozos de inyección verticales u horizontales, sistemas de irrigación o la combinación de ambos. La solución se percola a través de la matriz del suelo absorbiendo los contaminantes a su paso, mientras se dirige a los pozos de recuperación. La solución y el agua subterránea son interceptados y bombeados a un sistema de recuperación y tratamiento con el objetivo de utilizarlos nuevamente. Las Figuras 6.6 y 6.7 presentan un diagrama general del sistema de lavado de suelo *in situ*.

Figura 6.6 Sistema de Lavado de Suelo *in situ* por medio de pozos verticales



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office, (1997).²¹

Figura 6.7 Sistema de Lavado de Suelo *in situ* por medio de sistemas de aspersión



Fuente: U.S. Department of Energy Office of Environmental Restoration, (1997).²²

La solución de enjuague mezclada con los contaminantes se extrae del suelo por bombeo en los pozos de extracción y, generalmente, pasa por un sistema de tratamiento para retirarle los contaminantes. Los contaminantes son tratados o eliminados y el agua tratada se reutiliza en la solución de enjuague o se elimina de forma aceptable. Debido a que se trata de un proceso circular, los sistemas de lavado de suelo *in situ* a menudo se denominan sistemas de inyección y recirculación.⁸¹

Las emisiones de aire contaminado que pueden obtenerse durante el tratamiento de las aguas residuales, deben recolectarse y someterse a un tratamiento.^{92,81}

El sistema de lavado de suelo *in situ* está constituido por lo general de:

- a) Pozos de inyección: son utilizados para inyectar el fluido de extracción dentro de los suelos contaminados. La profundidad y localización son específicos para el sitio.
- b) Pozos de recuperación: se utilizan para bombear el fluido de extracción mezclado con los contaminantes. La profundidad y localización son específicos para el sitio.
- c) Planta de tratamiento de aguas residuales: el sistema depende del tipo de contaminante que se pretenda remover del fluido de extracción. Por lo general, se aplican procesos comunes de tratamiento.
- d) Sistemas de contención: se utilizan generalmente para asegurar que el contaminante que está siendo removido durante el proceso de extracción no migre fuera del sitio. Algunos sistemas de contención utilizados son las paredes fabricadas de diferentes materiales.¹⁰⁴

El costo promedio de la limpieza de suelos contaminados a través del sistema SF, varía entre US \$ 50-120/yd³ (\$^M/_N 400-960), dependiendo de las características del sitio, la cantidad y los constituyentes de la contaminación, y los niveles de limpieza requeridos.¹⁰⁵

• Aplicabilidad de la Tecnología

El lavado de suelo *in situ* está limitado a lugares donde la hidrogeología es tal que permite garantizar que toda la zona de contaminación será alcanzada por el solvente de extracción y que el fluido de extracción con contaminantes podrá ser extraído casi en su totalidad.¹⁰⁴

Por lo anterior, la factibilidad de la aplicación del lavado de suelo *in situ* está basado en:¹⁰⁴

• Características del suelo.

Es importante conocer las características del suelo debido a los siguientes efectos:

- Condiciones de suelo altamente variables pueden producir inconsistencias durante el proceso.
- Suelos con alto contenido orgánico pueden inhibir la desorción de los contaminantes y tienen un alta afinidad por los compuestos orgánicos no polares.

- Suelos con grandes fracciones orgánicas pueden requerir un pretratamiento adicional.
 - Suelos de baja permeabilidad reducen el nivel de percolación y lixiviación.
 - Suelos con alta capacidad de intercambio catiónico (CEC, por sus siglas en inglés) pueden disminuir la movilidad del contaminante y atenuar el tratamiento de metales.
- Hidrología del sitio.
Su conocimiento es importante debido a que la dirección del flujo de agua subterránea debe ser bien definido para asegurar la recaptura del fluido de extracción.¹⁰⁴
 - Contaminantes.
Los contaminantes tienen diferentes afinidades de acuerdo con los tipos de suelos. El grado de adsorción es relativo al tipo de contaminante y tipo de suelo. Las características que deben considerarse incluyen: concentración, solubilidad, coeficiente de partición y potencial de reducción.¹⁰⁴
 - Agente de extracción.
El fluido de extracción debe tener las siguientes características:¹⁰⁴
 - Favorable coeficiente de separación para el proceso de extracción.
 - Baja volatilidad bajo condiciones de ambiente (para reducir los efectos de contaminación a la atmósfera).
 - Baja toxicidad.
 - De manejo fácil y seguro.
 - Ser recuperable para su reuso.
 - Alta solubilidad en agua.

Si el agente de extracción reacciona con el o los contaminante, no deben producir compuestos tóxicos.¹⁰⁴

- Mezclado
Un mezclado completo del suelo y la solución de lavado, incrementa el contacto entre las partículas del suelo y los contaminantes. Esta operación reduce el tiempo requerido para la extracción e incrementa la eficiencia de remoción.¹⁰⁴

La permeabilidad del suelo es un parámetro muy importante para determinar la factibilidad del lavado de suelo *in situ*. Suelos de baja permeabilidad ($K < 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s) limitarán la habilidad del fluido de extracción a percolar a través de la matriz del suelo en un tiempo razonable. El sistema SF es más comúnmente efectivo en suelos permeables ($K > 1.0 \times 10^{-3}$ cm/s), pero tiene una limitada aplicación en suelos menos permeables (1.0×10^{-5} cm/s $< K < 1.0 \times 10^{-3}$ cm/s).⁹²

El contenido de humedad del suelo puede afectar la cantidad del fluido de extracción. Suelos secos requerirán inicialmente más líquido de lavado para movilizar los contaminantes. El contenido de humedad es también utilizado para calcular el volumen de poro y determinar el nivel de tratamiento.⁹²

Suelos con altos contenidos húmicos y alta capacidad de intercambio catiónico, tienden a reducir la eficiencia de remoción del sistema de lavado de suelo *in situ*. Algunos contaminantes orgánicos pueden adsorberse a los materiales húmicos o a las arcillas y por consiguiente son difíciles de remover durante el proceso de lavado. Similarmente, la unión por medio de intercambio catiónico de ciertos metales con las arcillas, los hace difíciles de remover a través del sistema SF.⁹²

La capacidad buffer del suelo afectará la cantidad requerida de algunos aditivos, especialmente ácidos. Pueden ocurrir reacciones de precipitación debido a los cambios de pH en el fluido de extracción causado a su vez por los efectos de neutralización de los suelos con alta capacidad buffer.⁹²

La tecnología SF es generalmente utilizada en conjunto con otras alternativas de tratamiento como carbón activado, biodegradación o precipitación química para tratar el agua subterránea contaminada proveniente de los procesos de lavado de suelo.⁹²

En algunos casos, el proceso puede reducir la concentración de los contaminantes en el suelo a niveles aceptables y así servir como única tecnología de tratamiento. En otros casos, la biodegradación *in situ* u otras tecnologías *en el sitio (in situ)* pueden ser usadas en conjunto con el lavado de suelo *in situ* y alcanzar niveles eficientes de remoción. En general, el lavado de suelo *in situ* es efectivo en suelos que contengan arenas gruesa y gravas contaminadas con una amplia mezcla de contaminantes orgánicos, inorgánicos y reactivos. Suelos que contengan un alto porcentaje de limo y arcilla no responden bien al proceso SF, especialmente si ésta es aplicada como la única tecnología de tratamiento.⁹²

Un gran número de contaminantes pueden removerse del suelo a través del lavado de suelo *in situ*. La eficiencia de remoción depende del tipo de contaminante así como del tipo de suelo. Los contaminantes orgánicos solubles (hidrofilicos) son por lo general fácilmente removidos del suelo aplicando agua como solvente de extracción. Normalmente los compuestos orgánicos con coeficientes de partición octano/agua (K_{ow}) menores de 10 ($\log K_{ow} < 1$) son altamente solubles. Ejemplo de estos compuestos incluyen fenoles y ácidos carboxílicos. Compuestos orgánicos de baja solubilidad (hidrofóbicos) pueden ser removidos seleccionando un surfactante compatible con el o los contaminantes. Ejemplos de tales compuestos incluyen pesticidas, PCBs, semivolátiles (bencenos clorados, hidrocarburos polinucleares), productos del petróleo (gasolina, gas-avión, aceites y grasas) solventes clorados (tricloroetano) y solventes aromáticos (benceno, tolueno, xileno y etilbenceno). Sin embargo, la remoción de algunas de estas clases de contaminantes no está aun bien demostrada.⁹²

El lavado de suelo *in situ* ha sido considerado para el tratamiento de suelos contaminados con residuos peligrosos incluyendo pentaclorofenol y creosota de las operaciones de preservación de la madera; solventes orgánicos, cianidas y metales pesados de los residuos de la industria eléctrica; metales pesados de algunos lodos de pinturas, residuos de la producción de compuestos químicos orgánicos, pesticidas y residuos de su producción, hidrocarburos.^{92,106}

La concentración y distribución de los contaminantes orgánicos y metales, son parámetros químicos que determinan el tipo y cantidad de fluido de extracción requerido así como los requerimientos de pos-tratamiento.⁹² El proceso ha resultado sumamente efectivo para remover contaminantes como los que se muestran en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Contaminantes compatibles con el Sistema de Lavado de Suelo *in situ*

Contaminantes	Industria donde se utilizan
Metales pesados (plomo, cobre, zinc)	Reciclaje de baterías, revestimientos metálicos
Solventes halogenados (tricloroetano)	Limpieza en seco, ensamblaje de circuitos electrónicos
Aromáticos (benceno, tolueno, cresol)	Tratamiento de madera
PCBs	Plaguicidas, herbicidas

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office (1997).⁹²

- **Ventajas y limitaciones de la tecnología**

Generalmente, los tiempos de rehabilitación con esta tecnología son largos (uno o más años) debido a la lentitud de los procesos de difusión en la fase líquida. Requiere control hidráulico para evitar el movimiento de los contaminantes fuera del sitio. La hidrogeología de algunos sitios puede hacer difícil o imposible la aplicación del lavado de suelo *in situ*.⁹²

Los suelos con alto contenido de arcilla y limo tienden a ser menos permeables. En tales casos, el lavado de suelo *in situ* no es considerado como la única alternativa de tratamiento.

Contaminantes hidrofóbicos generalmente requieren surfactantes o solventes orgánicos para su remoción del suelo. Mezclas complejas de contaminantes (como mezclas de metales, compuestos orgánicos no volátiles y volátiles) hacen difícil formular un fluido de extracción adecuado que remueva eficientemente los diferentes tipos de contaminantes.^{92,105}

Mientras que los aditivos de lavado como surfactantes y agentes quelantes pueden incrementar la eficiencia de remoción de algunos contaminantes en los procesos de lavado de suelo *in situ*, estos también tienden a interferir con los procesos de tratamiento de agua residual. La presencia de aditivos en el suelo lavado y en los lodos procedentes del tratamiento de agua, pueden causar algunas dificultades en su disposición.^{92,105}

- **Situación actual de la tecnología**

El lavado de suelo *in situ* es una tecnología en desarrollo que ha tenido un uso limitado en los Estados Unidos. Sobre su utilización en los sitios contaminados del *Programa Superfondo*, existen informaciones contradictorias, mientras que algunas fuentes mencionan que hasta 1991 la tecnología había sido seleccionada en 12 sitios.^{92,81,107} Otras fuentes mencionan que la utilización del lavado de suelo *in situ* representó de 1991 a 1994 el 3% del total de tecnologías aplicadas con recursos del *Programa Superfondo*. En 1990 se seleccionó 11 veces, en 1991 se seleccionó 16 veces y en 1994 se seleccionó 14 veces.^{83,84,85}

6.4.3 Biorremediación

- **Resumen**

La biorremediación se define como el uso de microorganismos para promover la transformación de los residuos peligrosos a compuestos menos tóxicos y ambientalmente aceptables.¹⁰⁴

Si bien la biorremediación es vista como una nueva tecnología, el uso de la biooxidación para propósitos ambientales ha sido practicado por muchos años. Los procesos biológicos han sido usados para el tratamiento de aguas residuales por cerca de sesenta años. El biotratamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales, suelos contaminados de refinerías y residuos municipales ha sido practicado por varias décadas.^{108,109}

La biorremediación es un proceso que utiliza microorganismos o sus productos metabólicos para convertir sustancias complejas (substratos) a productos simples, normalmente reduciendo su toxicidad para el ambiente y la salud. El proceso consume el substrato y utiliza la energía química liberada para desarrollar termodinámicamente procesos no espontáneos, como síntesis de los componentes celulares. El procesos convierté sustancias complejas utilizándolas como fuentes de energía o fuentes de carbono. Cuando un compuesto orgánico es utilizado como fuente de carbono y el oxígeno es usado como aceptor final de electrones (proceso aerobio), el dióxido de carbono es normalmente liberado como un bioproducto de los procesos.

El tratamiento biológico puede ser una eficiente alternativa de tratamiento para residuos peligrosos en estado físico líquido, vapor o sólido.¹⁰⁴

Los procesos de biorremediación pueden ser ampliamente clasificados como tecnologías *fuera del sitio* (*ex situ*) y *en el sitio* (*in situ*). Las tecnologías *ex situ* son aquellos procesos de tratamiento que involucran la remoción física del material contaminante para ser tratado en otra área (posiblemente dentro del sitio). Bioreactores, biolabranza y composteo son algunos ejemplos de este tipo de tratamientos. En contraste, las técnicas *in situ* implican el tratamiento de material contaminado en el mismo sitio. Algunos ejemplos de esta clase de tecnologías de tratamiento son el bioventeo y la bioestimulación.¹⁰⁹

- **Descripción de la tecnología**

Existen muchos procesos de biorremediación y comúnmente es parte de un sistema total de rehabilitación, que puede ser usado con otras tecnologías para la rehabilitación de un sitio. El objetivo final de los procesos de biorremediación es el de proporcionar condiciones óptimas a las

bacterias nativas para que metabolicen los contaminantes de interés de la manera más eficiente posible.¹⁰⁸

La selección del proceso apropiado es una función de los objetivos de rehabilitación establecidos, las características físicas y químicas del material a ser tratado, las condiciones ambientales presentes, los equipos requeridos, las regulaciones ambientales, aspectos de seguridad y salud pública, tiempo requerido para la biorremediación y los requerimientos económicos globales.^{108,104}

Existen muchos factores que limitan los procesos de biorremediación, los factores que más afectan los proyectos son: la disponibilidad de fuentes de carbono, el contenido de humedad, pH, temperatura y disponibilidad de nutrientes en el suelo, presencia de especies microbianas.^{110,14}

- Fuente de carbono: la ausencia o escasez de una fuente de energía sustentable y disponible puede limitar el crecimiento microbiano. La gran mayoría de los microorganismos de los suelos son heterótrofos y requieren de materia orgánica para obtener su energía.¹⁴
- pH del suelo: El pH del suelo puede afectar el comportamiento y movilidad de los contaminantes debido a la adsorción. El pH de los suelos puede ser inhibitorio o tóxico en la vida microbiana. El pH del suelo es afectado por varios factores incluyendo: el tipo y cantidad de materiales orgánicos e inorgánicos presentes, porcentajes de suelo-solución y el contenido de sales (electrolitos) en el subsuelo. El intervalo de pH óptimo para el crecimiento de los microorganismos es de 6 a 8.¹⁴
- Temperatura del suelo: Principalmente para operaciones *in situ*, ya que todas las reacciones químicas y biológicas se controlan o afectan por la temperatura, por otra parte los microorganismos tienen enzimas que sufren una desnaturalización cuando la temperatura es mayor a 50°C, por lo que se convierte en un limitante de la actividad microbiana. La temperatura adecuada para la degradación de los hidrocarburos es entre 15-30°C. Por otro lado, la actividad microbiológica requiere de agua líquida, por lo que se debe mantener la temperatura por arriba del punto de congelación del agua para evitar que se detengan los procesos. La temperatura puede ser controlada por medio de la adición de nutrientes puesto que incrementan la actividad microbiana y con esto, la temperatura del suelo. La inyección de aire caliente es una alternativa, pero también incrementa los costos.¹⁴
- Contenido de humedad del suelo: Los niveles de humedad pueden ser cruciales para el éxito de la biorremediación *in situ*. Un suelo con un contenido de humedad del 50% es ideal para los procesos de biorremediación.¹⁴
- Presencia de nutrientes en el suelo: La ausencia de macronutrientes y micronutrientes puede limitar los procesos de biorremediación. Los macronutrientes son elementos que las bacterias

necesitan en relativamente grandes cantidades para llevar a cabo el metabolismo. Los macronutrientes incluyen: carbono, nitrógeno y fósforo. La relación óptima C:N:P es 25:1:0.5. Los micronutrientes son requeridos en pequeñas cantidades, incluyen: nitrógeno, fósforo y potasio.¹⁴

Los sistemas de biorremediación *ex situ* se refieren a la extracción y/o excavación de los materiales contaminados para ser sometidos a procesos de tratamiento en la superficie. Estos sistemas permiten potencialmente un monitoreo preciso de los parámetros que controlan el nivel de conversión de los hidrocarburos a dióxido de carbono y agua.^{14,111} Los factores específicos que afectan el desarrollo de los procesos de biorremediación *ex situ* se muestran de forma resumida en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Factores que deben ser considerados en la evaluación de la biorremediación *ex situ* como una alternativa de tratamiento para sitios contaminados

Tipo de contaminante	Gasolina Si ^a	Diesel Si ^b	Aceite Si ^b
Extensión de la contaminación	Confinado Si	Moderada Quizá	Dispersa Quizá ^c
Fase de la contaminación	Gasolina libre Si ^a	Adsorbida Si	Disuelta Quizá ^d
Precipitación	Fuerte Quizá ^e	Moderada Si	Baja Si
pH del suelo	Acido No ^b	Neutro Si	Básico No
Clima	Caliente Si	Templado Quizá	Frio No ^f

Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹⁴

- a: Se requieren precauciones cuando se trabaja en suelos altamente contaminados con gasolina ya que existe el riesgo de incendio y explosión así como riesgos a la salud.
- b: Los hidrocarburos de alto peso molecular requieren la preparación comercial de bacterias.
- c: La decisión esta basada en los costos de excavación y transportación, no en la factibilidad de los procesos de biodegradación.
- d: El agua subterránea puede ser tratada por métodos de biorremediación *ex situ*
- e: Las precipitaciones fuertes o los escurrimientos superficiales deben ser controlados para prevenir una dispersión de la contaminación.
- f: Si el pH del suelo esta fuera del rango 6-8, debe ser ajustado.
- g: Los procesos de oxidación generan calor. Con una apropiada preparación del sitio, los procesos *ex situ* pueden ser desarrollados aun en época de invierno en algunos lugares.

Muchos nombres y términos son aplicados a los sistemas de biorremediación, (biodegradación, biorrestauración, etc.) Los procesos de biorremediación *ex situ* pueden ser clasificados en dos grupos principales:

- Tratamiento *ex situ* de suelo contaminado
 - Biopilas
 - Biolabranza
 - Composteo
 - Reactores de suelo lodoso

- Tratamiento *ex situ* de agua subterránea contaminada
 - Bioreactores

- Biopilas.

Una biopila se construye por medio de la dispersión del suelo contaminado sobre una superficie también conocida como lecho o cama de tratamiento. El agua que contiene los nutrientes disueltos se hace pasar a través de la pila de suelo para estimular la biodegradación de los contaminantes. Existen dos tipos de biopilas:¹⁰⁴

- El oxígeno y los nutrientes son suministrados a los microorganismos mediante la aspersion de agua sobre la pila de suelo. El agua es aplicada por medio de un sistema de irrigación y el lecho es equipado con un sistema de drenaje colector. El liquido que lixivia a través de la pila, es recolectado y tratado en un bioreactor de fase liquida para posteriormente ser reciclado a través de la pila de suelo.
- Los nutrientes son mezclados con el suelo cuando se esta construyendo la pila. El aire es suministrado por medio de tuberías colocadas en el fondo y en la parte media de la pila.¹⁰⁴

- Biolabranza.

El suelo es dispersado sobre una superficie para estimular la degradación natural de los contaminantes. La biolabranza fue el primer método usado para la biorremediación de suelos y lodos contaminados, y ha estado siendo aplicada en la industria petrolera para el tratamiento de los residuos provenientes de los procesos de refinación. Este sistema es normalmente practicado donde las emisiones de aire no representan un riesgo a la salud humana. Los costos del tratamiento convencional están dentro del rango de US \$ 50 a 80 (\$^M/_N 400 a 640) por yarda cubica de suelo tratado. Para sitios con volúmenes superiores a los 46 m³ de suelo contaminado con diesel, el costo es de US \$ 30 (\$^M/_N 240)/yd³. En general para sitios contaminados con petróleo que rebasen las 8 m³ los costos de tratamiento oscilan entre US \$ 30-50 (\$^M/_N 240-400)/yd³ de suelo tratado.¹⁰⁴

- Composteo.

El composteo es una tecnología establecida para el tratamiento de lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales y es una tecnología que ha surgido para el tratamiento

de residuos peligrosos. La biodegradación de los compuestos orgánicos ocurre cuando el suelo o los lodos contaminados son mezclados con una fuente de carbono orgánico y otros agentes como cortezas de arboles, paja, madera, etc. Las pilas de composta son colocadas sobre lechos de tratamiento y la degradación microbiana es estimulada manteniendo un control sobre la temperatura, el contenido de humedad y los niveles de oxígeno y nutrientes en el interior de la pila de suelo. Los costos de tratamiento por el método de composteo pueden variar de US \$ 20 a 120 (\$^{M/N} 160-960) por tonelada húmeda de suelo, incluyendo los costos de preparación del sitio, equipo móvil, superficie de concreto, sistemas de aireación y los costos de operación y mantenimiento.¹⁰⁴

- Reactores de suelo lodoso.

En los reactores de suelo lodoso, el suelo o el lodo y los nutrientes contenidos en el agua son mezclados para formar un lodo acuoso dentro del cual ocurre la biodegradación de los contaminantes. El nivel de mezclado debe ser lo suficiente para mantener los sólidos en suspensión y el oxígeno debe ser suministrado a través del suelo lodoso para estimular la actividad microbiana.¹⁰⁴

Los tratamientos *in situ* se refieren a la aplicación de los procesos de rehabilitación en el sitio de la contaminación. Las ventajas de estos tratamientos es que no requieren la excavación y movimiento del material contaminado hacia otros lugares. Los sistemas de biorremediación *in situ* se recomiendan cuando la extensión de la contaminación es muy grande como en el caso de las refineries y los aeropuertos.¹¹² Los tratamientos *in situ* pueden ser aplicados a contaminantes orgánicos e inorgánicos.¹⁰⁴ Los factores específicos que afectan el desarrollo de los procesos de biorremediación *in situ* se muestran de forma resumida en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Factores que deben ser considerados en la evaluación de la biorremediación *in situ* como una alternativa de tratamiento para sitios contaminados

Tipo de suelo	Grava Si	Arena/Limo Quizá	Arcilla No
Tipo de contaminante	Gasolina Si ^a	Diesel Si ^b	Aceite Si ^c
Contenido de oxígeno	Aerobico Si	Moderado Si	Anaerobico No
Extensión de la contaminación	Grande Si	Moderada Si	Pequeña Si
Fase de la contaminación	Gasolina libre Si ^a	Adsorbida Si	Disuelta Quizá ^d
Temperatura del suelo	20 °C (70 °F) Si	10 °C (50 °F) Si	5 °C (40 °F) Si
Profundidad del agua subterránea	15 m ^d (50 ft) Si	9 m (30 ft) Quizá	3 m (10 ft) No

Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹²

- a: Utilizando cultivos microbiológicos preparados comercialmente
- b: Una pobre aireación del suelo puede ser mejorada con el bioventeo o la inyección de O₂
- c: Las condiciones específicas del sitio y del agua subterránea pueden hacer varias esos números.

Los procesos de biorremediación *in situ* pueden ser clasificados en dos grupos principales:

- Tratamiento *in situ* de suelo contaminado
 - Bioventeo
 - Bioestimulación
 - Tratamiento de suelo
- Tratamiento *in situ* de agua subterránea contaminada
 - Aspersión de aire (Air sparging)
- Bioventeo.

Es el término empleado para describir la combinación de tecnologías de extracción de vapor del suelo con la biorremediación. La operación de los sistemas de extracción de vapor del suelo además de volatilizar VOCs y SVOCs estimulan las actividades aerobias de biodegradación en el suelo. Los objetivos de esta tecnología son el balance de flujo de vapor y nutrientes en el suelo para maximizar la actividad microbiana, se requiere una cantidad adecuada de agua en la zona insaturada para permitir los requerimientos de biodegradación. El bioventeo es aplicado a cualquier contaminante que pueda ser degradado aerobicamente.¹¹²

El bioventeo presenta limitaciones físicas y químicas como el grado de movimiento del aire a través del suelo, el cual está gobernado por la permeabilidad, grado de heterogeneidad y contenido de humedad del suelo. Por otro lado las limitaciones químicas involucran el grado de contaminantes volátiles, su biodegradabilidad y solubilidad. Es una tecnología muy eficiente en suelos insaturados contaminados con hidrocarburos. Consiste en una aireación forzada, la cual se va reduciendo en intensidad, ya que primero se busca una volatilización y después el incremento de la biodegradación.¹¹²

- **Bioestimulación.**

La bioestimulación consiste en la inyección de nutrientes y oxígeno disuelto al subsuelo para estimular el crecimiento y las actividades microbianas. Si se requiere se extrae el agua para ser tratada o reciclada a la zona saturada e incrementar la humedad del suelo. La aplicación de este tratamiento depende de la permeabilidad, temperatura, disponibilidad de nutrientes y la presencia de poblaciones microbianas nativas en el suelo. Se requiere de la adición de agua conteniendo oxígeno, nutrientes, microbios y otros aditivos necesarios para la biodegradación de los hidrocarburos. Entre sus limitaciones están la reducción de los porcentajes de bioremediación debido a la temperatura del suelo, los potenciales de migración de los contaminantes a las aguas subterráneas. Se aplica en suelos insaturados. El tiempo requerido de rehabilitación puede variar de 6 a varios años, dependiendo de la extensión de la contaminación.¹¹⁰

- **Biolabranza *in situ* (biorremediación en fase-sólida).**

En esta técnica, el suelo es arado e irrigado para incrementar su aireación y optimizar los niveles de humedad y si es necesario se complementa con la adición de nutrientes inorgánicos. El sitio debe tener la característica de prevenir la migración de los contaminantes a otros sitios. Dentro de estas características está la profundidad del nivel freático, distancias a zonas residenciales y clima. Se debe cuidar el exceso de humedad, ya que puede generarse condiciones ácidas si existen compuestos clorados. Se requieren de sistemas de inyección, galerías filtrantes y de rociadores para los sistemas de distribución de los nutrientes; extraer al agua subterránea para su tratamiento. La biolabranza es influenciada de forma negativa por la presencia de metales pesados, pesticidas herbicidas y pH menores de 6.

Dentro de esta técnica de bioremediación existe la llamada *pasiva* que consiste en el mismo procedimiento descrito, con la diferencia de que al suelo no se le agregado ningún tipo de nutriente para estimular la actividad de los microorganismos, solo se efectúa un monitoreo para analizar los niveles de biodegradación de contaminantes y la acción de las poblaciones microbianas nativas.¹¹²

- Tratamiento *in situ* de agua subterránea (Air sparging).

La técnica de aspersión de aire es la introducción de aire por debajo del nivel freático para estimular la rehabilitación del sitio. La tecnología envuelve dos mecanismos de trabajo: volatilización y biodegradación. En el mayor de los casos la aspersión de aire es una tecnología híbrida basada en aspectos físicos y biológicos. El sistema de aspersión de aire puede ser dividida en dos técnicas distintas, aireación por pozos y la inyección de aire directa al acuífero para suministrar oxígeno y estimular la volatilización y biodegradación de los contaminantes que se encuentren en el agua subterránea.¹¹³

- **Aplicabilidad de la Tecnología**

Es necesario realizar pruebas de biotratabilidad para conocer ciertos parámetros que ayudan a determinar el tipo de tecnología que se puede utilizar, la biodegradabilidad de los contaminantes, la cinética de degradación de los contaminantes, las condiciones óptimas de crecimiento de los microorganismos, etc. Los datos mínimos requeridos para evaluar el potencial de biodegradabilidad de compuestos orgánicos de un suelo debe incluir análisis de requerimientos de oxígeno disuelto y nutrientes en concentraciones insuficientes para que ocurra el proceso biológico y análisis del potencial de transformación de los productos (componentes de la degradación).

Los procesos de biorremediación han mostrado ser potencialmente efectivos en degradar o transformar un gran número de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos solubles son considerados particularmente tratables por las técnicas de biorremediación. Sin embargo, los compuestos relativamente insolubles pueden ser degradados si están presentes los microorganismos degradadores. Los compuestos que son considerados tratables por la biodegradación incluye hidrocarburos (ejemplo: gasolina, diesel), solventes no clorados (ejemplo: acetona, alcohol), residuos provenientes del tratamiento de la madera (ejemplo: pentaclorofenol), algunos compuestos aromáticos clorados (ejemplo: clorobencenos), y algunos compuestos aromáticos clorados (ejemplo: tricloroetano y dicloroetano).¹¹⁴

- **Ventajas y limitaciones de la tecnología**

Los procesos de biorremediación ofrecen las siguientes ventajas:¹¹⁵

- Los contaminantes realmente son transformados y algunos completamente mineralizados.
- Se utilizan microorganismos cuyo hábitat natural es el suelo, sin introducir compuestos potencialmente peligrosos.
- Es una tecnología segura y económica.
- Las bacterias mueren cuando los nutrientes se agotan.
- El suelo puede ser reutilizado

La biorremediación tiene las siguientes desventajas:¹¹⁵

- Los microorganismos pueden inhibirse por la presencia de compuestos tóxicos.
- No tiene éxito en suelos de baja permeabilidad
- Algunos aditivos pueden tener efecto adverso.
- Requiere largos periodos de operación.

En el caso de la biorremediación *in situ*, esta ofrece las siguientes ventajas:¹⁰⁴

- Bajos costos de instalación.
- No requiere excavación y transportación del suelo.
- Puede utilizarse en la rehabilitación de grandes extensiones de suelo.

Los procesos de biorremediación *in situ* tienen la siguientes desventajas:¹⁰⁴

- Dificultad para monitorear y cuantificar la extensión o grado de biorremediación.
- Se puede producir productos de la biodegradación, los cuales permanecen en el suelo.
- Puede tomar un largo periodo de operación dependiendo del tipo de contaminante y condiciones ambientales.

- **Situación actual de la tecnología**

La biorremediación es uno de los relativamente poco métodos que se utilizan para la destrucción de compuestos orgánicos en sitios contaminados del programa Superfund.⁸⁵

En el año de 1990 los procesos de biorremediación *ex situ* e *in situ* representaron el 5% y el 3% respectivamente de todas las tecnologías de rehabilitación empleadas en los sitios del Superfund en ese año.⁸³ En el año de 1991 la biorremediación *ex situ* e *in situ* fueron seleccionadas en 25 y 20 ocasiones respectivamente, lo que represento un 5 y 4% del total de las tecnologías empleadas.⁸⁴ Para 1994 los sistemas de biodegradación *ex situ* e *in situ* representaron el 6 y 4% respectivamente al ser seleccionadas en 40 y 25 ocasiones como una de las alternativas de tratamiento.⁸⁵

6.5 Tecnologías de rehabilitación *fuera del sitio (ex situ)* para suelos y acuíferos contaminados

6.5.1 Lavado de suelo *fuera del sitio (ex situ)* y extracción química

- Resúmen

El lavado de suelo *ex situ* (soil washing, SW por sus siglas en inglés) y la extracción química (CHEX, por sus siglas en inglés) son procesos mecánicos de reducción de volumen y remoción de contaminantes. Si bien frecuentemente son considerados los mismos, la US EPA ha definido al lavado de suelo *ex situ* como un proceso de separación que usa agua como solvente, y la extracción química (para suelos contaminados) como un proceso que usa aditivos (como surfactantes o agentes quelantes). Estos procesos *remueven* y concentran los contaminantes reduciendo el volumen de suelo a tratar.

El lavado de suelo puede ser aplicado *ex situ* o *in situ*. El proceso *ex situ* se refiere más al lavado de suelo (soil washing), es la aplicación más común; su utilización es más apropiada cuando un volumen significativo de suelo puede ser reducido a través de la graduación del tamaño de partícula. El lavado de suelo *ex situ* no es altamente confiable en la extracción de contaminantes de la matriz del suelo al menos que el contaminante sea soluble en agua. El proceso *in situ* es generalmente referido al enjuague de suelo (soil flushing).¹⁰⁴

En general, la extracción química es más efectiva cuando un bajo coeficiente de partición sólido/líquido puede ser inducido a través del uso de aditivos y cuando las consideraciones del transporte difusivo o de masa no son limitadas.¹⁰⁴

La extracción química y el lavado de suelo *ex situ* han sido desarrollados a lo largo de tres principales líneas: (1) fraccionamiento del tamaño de partícula, (2) formación de sistemas acuosos usando algunos métodos mecánicos y/o químicos para remover y concentrar los contaminantes, y (3) decantación común empleando solventes para contaminantes orgánicos y ácidos, bases o agentes quelantes para contaminantes inorgánicos.¹¹⁶

Los contaminantes peligrosos tienden a unirse en forma química o física al limo y a la arcilla, materiales que a su vez, se unen a la arena y a las partículas de grava. En el procedimiento SW y CHEX se separan las partículas finas de suelo contaminado (limo y arcilla) de las partículas gruesas (arena y grava). Una vez concluido el procedimiento, el volumen más reducido de suelo, que contiene la mayoría de las partículas finas de limo y arcilla, puede ser sometida a un tratamiento posterior con otros métodos (como incineración y medidas biocorrectivas) o se puede eliminar conforme a las normas federales y estatales. La tierra más limpia, de mayor volumen, no es tóxica y se puede usar como material de relleno.^{117,118}

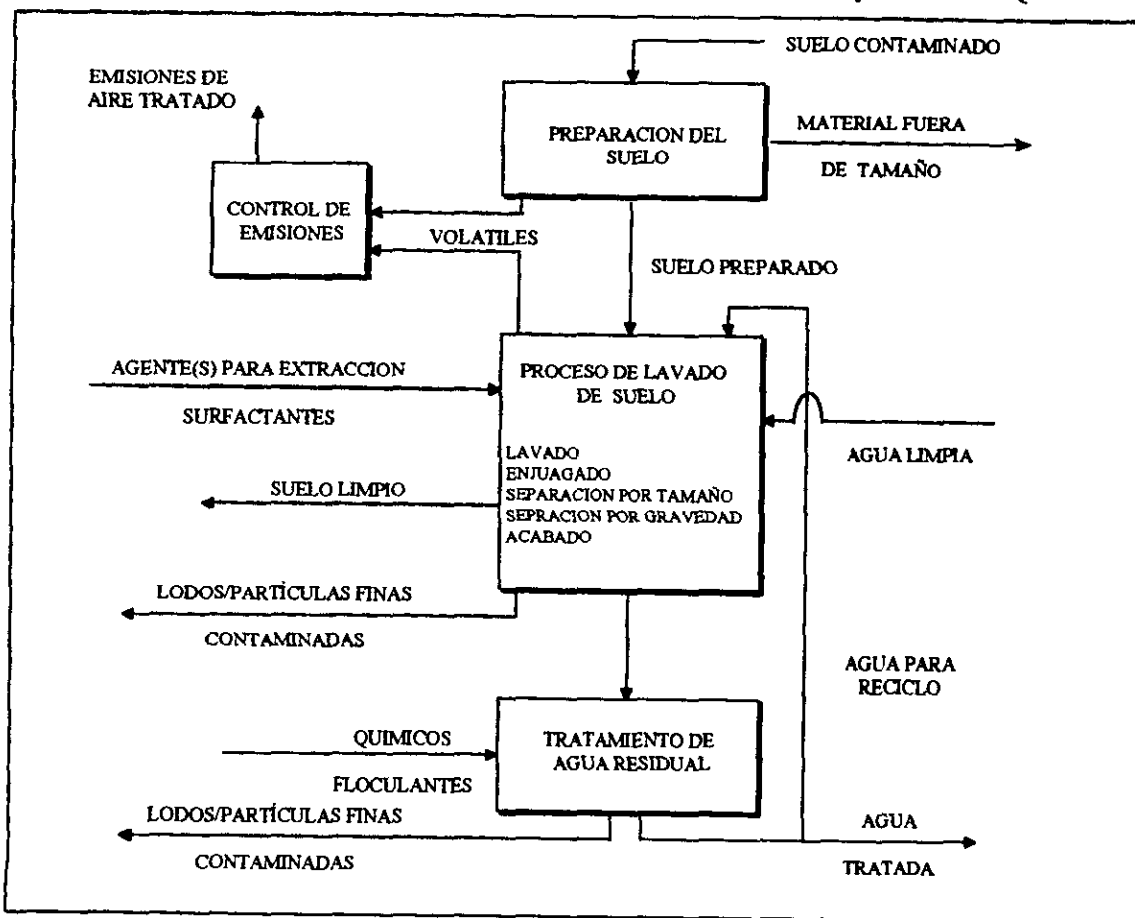
El uso del lavado de suelo *ex situ* como una tecnología de tratamiento está basado en las siguientes suposiciones: (1) los contaminantes están normalmente concentrados en la fracción fina de la matriz del suelo, por consiguiente separando la fracción fina de la matriz se reduce el volumen de suelo contaminado; (2) los contaminantes que no estén químicamente unidos a las partículas del suelo, pueden ser físicamente removidos de la matriz del suelo, así se logra una reducción del volumen del suelo contaminado.¹¹⁷

El uso de la extracción química como una tecnología de tratamiento para suelo contaminado está basado en la suposición de que los contaminantes están reversiblemente adsorbidos al suelo o al líquido que flota libremente en el agua subterránea. Para remover los contaminantes adsorbidos se utiliza un proceso no destructivo de transferencia de masa. Para ayudar en la desorción y la solubilización de los contaminantes se utilizan aditivos.¹¹⁷

- Descripción de la tecnología

Existe una gran variedad de procesos de lavado de suelo *ex situ* y extracción química, la Figura 6.8 presenta un diagrama general del proceso.

Figura 6.8 Esquema general del Sistema de Lavado de Suelo *ex situ* y Extracción Química



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Office of Emergency and Remedial Response, (1994).¹¹⁷

El proceso inicia con la excavación del suelo contaminado y su traslado a un lugar de tránsito donde se prepara la tierra para el tratamiento, pasándola por una criba a fin de separar residuos de gran tamaño, escombros y piedras. La tierra puede tratarse por tandas, semitandas o en forma continua. En la modalidad de semitandas, el material pasa por el extractor en incrementos. Si se trata la tierra en forma continua, tal vez sea necesario hacerla más fluida para que pueda pasar fácilmente por el proceso mediante bombeo. Para esto se le agrega agua o, en el caso de lodos oleosos, solventes.⁸¹

El material remanente se coloca en una unidad de lavado de suelo cuyo tamaño es variable. Algunas tratan 25 toneladas por día, mientras que otras tienen una capacidad para más de 125 toneladas diarias y ocupan un área de 140 a 1, 000 metros cuadrados o más.⁸¹ Existen unidades móviles con capacidad de 0.5 a 1.5 toneladas por hora que ocupan una superficie aproximada de 25 x 50 m.^{99,119,120} El área exacta dependerá del sistema de tratamiento seleccionado, la dimensión del área de almacenamiento para el suelo, y/o el número de tanques o lagunas necesarias para la preparación del fluido de lavado y el agua residual tratada.⁹²

Posteriormente el suelo es mezclado por medio de aspersión o chorro a presión, con una solución de lavado y agitado. La solución de lavado puede tener aditivos para facilitar la remoción de contaminantes. El fluido de lavado, el cual contiene algunos contaminantes, es drenado y enviado a la planta de tratamiento para ser tratado por métodos convencionales de tratamiento y posteriormente ser reciclado al proceso. El suelo es mantenido para un tratamiento adicional. El suelo parcialmente tratado es entonces lavado con agua limpia. Las partículas más pesadas como gravas y arenas tienden a fijarse en el fondo de la unidad de lavado siendo removidas, recolectadas y enviadas para su análisis. Si el material presenta altos índices de contaminación pasará nuevamente por un proceso de lavado o bien, por algún proceso alternativo. Si el material se encuentra limpio o presenta contaminantes dentro de niveles permisibles podrá usarse como material de relleno.¹¹⁷

La velocidad con que se disuelven los contaminantes del suelo dependen de varios factores como la temperatura, el contenido de humedad y el grado de contaminación, entre otros. Cada uno de estos factores es decisivo para la concepción del tratamiento. Es necesario realizar estudios de tratabilidad en un laboratorio para determinar la cantidad de fluido de lavado que se necesita y el tiempo que el material debe permanecer en la unidad de lavado a fin de garantizar la máxima eficiencia posible.

Los procesos SW y CHEX producen tres fracciones que requieren separación: la mezcla de líquido de lavado contaminado; la tierra tratada que, según la concentración de contaminantes presentes, podrá requerir una repetición del ciclo o un tratamiento posterior con otra alternativa de tratamiento; el agua, que debe analizarse para determinar si necesita tratamiento posterior antes de depositarla en una planta de tratamiento pública o en otra zona de descarga aprobada.¹¹⁷

Después viene el procedimiento de separación. Se separan los contaminantes del líquido de lavado cambiando la presión y la temperatura, usando otro solvente para sacar el primero de la mezcla de solventes y contaminantes o con otros procedimientos de separación como filtración. Cuando concluye este paso lo que queda son contaminantes concentrados en un pequeño volumen de tierra (principalmente partículas de arcilla y limo) la cual es también analizada. Si el material no presenta contaminación se retorna al sitio o se utiliza como material de relleno en otro lugar. Si el material, está contaminado, se recolecta para la aplicación de un tratamiento alternativo o para su disposición final en un relleno.^{81,117}

El lavado de suelo *ex situ* y la extracción química pueden ser utilizados como tecnologías únicas o en combinación con otros sistemas de tratamiento. En algunos casos, el proceso SW y CHEX pueden alcanzar los niveles de limpieza deseados y en otros casos los procesos son más exitosos cuando se utilizan en combinación con otras alternativas de tratamiento. Pueden utilizarse como un paso previo al proceso principal de tratamiento a fin de disminuir los costos por medio de la reducción de la cantidad de material a ser procesada por otras tecnologías como incineración. También pueden ser utilizadas eficientemente para transformar el suelo a ser tratado en condiciones más homogéneas y aumentar las operaciones en los subsiguientes sistemas de tratamiento. En general, los sistemas SW y CHEX son efectivos en arenas gruesas y gravas contaminadas con un amplio rango de compuestos orgánicos, inorgánicos. Los suelos que contengan grandes cantidades de arcilla y limo normalmente no responden bien al lavado de suelo *ex situ*, especialmente si se aplica como única alternativa de tratamiento.⁹²

Idealmente el proceso de lavado de suelo *ex situ* reduce el volumen de suelo a tratar en un 90%, lo cual significa que solo en 10% del volumen original necesitara tratamiento. Sin embargo, existen sistemas en los que se alcanzan hasta un 95% de reducción del volumen original.¹²¹ Si los residuos tienen un alto porcentaje de limo fino y arcilla, una parte mayor del material deberá ser sometida a otro tratamiento subsiguiente más costoso.⁸¹

Los tiempos de operación variaran en función de la cantidad y concentración de los contaminantes, así como del tipo de suelo. Los costos de operación son más dependientes de los procesos post-tratamiento, varían entre US \$ 120-200 (\$^M/_N 960-1600)/ton. Dependiendo del volumen de suelo a tratar, de su contenido de partículas finas, y de la cantidad y concentración de los contaminantes. El costo total del proceso incluye los costos de los procesos pre-tratamiento, pos-tratamiento, disposición y análisis de control de calidad de proceso.^{122,107}

El lavado de suelo es comúnmente utilizado en combinación con las siguientes tecnologías: biorremediación, incineración y solidificación/estabilización. El tiempo promedio de una operación de limpieza de 28, 200 ton³ deberá ser menor de 3 meses.¹²²

Los modelos de diseño son virtualmente inexistentes. Los factores más importantes en el diseño de los procesos SW y CHEX son:¹⁰⁴

- a) Tipo de contaminante y concentración.
- b) Solubilidad del contaminante en el agente de extracción.
- c) Cinética química del solvente.
- d) Características de sorción del contaminante
- e) Granulometría del material (graduación de las partículas del suelo)
- f) Tipo de suelo
- g) Contenido de humedad del suelo
- h) Contenido orgánico del suelo

Una eficiencia óptima de los sistemas de lavado de suelo *ex situ* y extracción química depende de la solubilidad del contaminante, de la transferencia de masa y de cinética química.

Para propósitos de lavado de suelo *ex situ* y de extracción con solventes, los suelos son clasificados como gruesos, arenosos y finos.

- Fracción gruesa: normalmente más grande de 2 cm de diámetro
 - Esta fracción es analizada para asegurar que esté libre de contaminantes antes de separarse de otras fracciones previo a los procesos de tratamiento.
 - Si la fracción gruesa contiene un nivel de contaminación inaceptable, será objeto de procesos de reducción de tamaño previo al tratamiento.
- Fracción arenosa: normalmente entre 2 cm y 63 μm de diámetro
 - Esta fracción es normalmente limpiada en los procesos de lavado de suelo *ex situ* y extracción química.
- Fracción fina: normalmente menor de 63 μm de diámetro
 - Esta fracción normalmente contienen altas concentraciones de contaminantes y deber ser subsecuentemente tratada o dispuesta de forma segura.

La Tabla 6.7 presenta un ejemplo de la distribución de contaminantes entre partículas del suelo

Tabla 6.7 Distribución de contaminantes entre partículas del suelo

Distribución del tamaño de partícula	Aceite y grasa mg/kg	Volumen % del total	Contaminación % del total
Total	36,040	100	100
> 2 mm	40	5	0.1
2 mm > x > 0.06 mm	300	80	0.8
< 0.06 mm	35,700	15	99.1

Fuente: Grasso Domenic, (1993).¹⁰⁴

Los sistemas de extracción química y lavado de suelo *ex situ*, normalmente consisten de los siguientes componentes:¹⁰⁴

- Sistema de reducción de tamaño:
 - Estrusores primarios
 - Estrusores secundarios
- Equipos de cribado:
 - Grizzly*
 - Trommel*
 - Tamiz
- Equipos de separación:
 - Clasificadores
 - Clarificadores
- Mecanismos de mezclado y extracción:
 - Impellers*
 - liquido de lavado
- Equipo de tratamiento de fluido de lavado:
 - Precipitación
 - Concentración/separación de contaminantes
 - Pulimento
- Emisiones de aire
- Tratamiento secundario de partículas finas (pasta de limo y arcilla)
- Equipo de reducción de tamaño.

El equipo de reducción de tamaño es necesario cuando las partículas gruesas del suelo a limpiar son mayores que el intervalo de 2-5 cm. Esto se hace para facilitar el manejo de materiales en el proceso. Una variedad de equipos de reducción de tamaño puede ser empleado, incluyendo: estrusores primarios (para +100 mm) y estrusores secundarios (100 mm a 5 mm).¹⁰⁴
- Equipo de cribado.

El equipo de tamizado es utilizado para separar el material grueso del suelo y puede ser usado cuando el material grueso no necesita ser tratado. Los equipos de cribado incluyen:

 - *Grizzly*
 - Tamizadores
 - Cama de cribado

- *Trommel*
 - Vibradores
 - Agitadores
 - Cribas rotatorias
- Equipo de separación.
El equipo de separación es utilizado para separar las partículas finas de las partículas medianas que se encuentran en el agua. Cualquier sistema que remueva partículas de un líquido es un clarificador. Un mecanismo que separe sólidos en fracciones, como compuestos flotantes y partículas sedimentadas, es un clasificador. El mismo principio de separación se aplica para el clarificador y clasificador.¹⁰⁴
 - Equipo para clasificación (separación de tamaño por medio de precipitación)
 - Tanques de sedimentación (partículas medianas)
 - Espesador (partículas medianas)
 - *Elutriator* (clasificador de influente)
 - Clasificador de espiral inclinado (partículas medianas)
 - Hidrociclón (partículas finas)
 - Centrifuga (partículas finas)

Los hidrociclones son menos eficientes que la centrifugas pero tiene una alta capacidad, bajos requerimientos y bajos costos. Por otro lado, las centrifugas son equipos grandes, extremadamente costosos y difíciles de operar.

- Equipo de concentración por gravedad: la separación por centrifuga tiende a ser ampliamente remplazada por los separadores por gravedad debido a su gran eficiencia y tamaño pequeño. Ejemplos de equipos de concentración por gravedad incluyen:
 - Mesas de agitación
 - Ciclones de media densidad
- Flotación: separación de partículas vía densidad.
- Desecadores (separación solido-liquido): es normalmente aplicado en las partículas de suelo antes de su disposición o después del tratamiento secundario. Una variedad de métodos puede ser usado para el secado de partículas finas.
 - Unidades de secado que producen lodos con 2-15% de sólidos
 - Unidades de filtración que producen lodos con 20-45% de sólidos

- **Mecanismos de mezclado y extracción**

Estos mecanismos son utilizados para poner en contacto el suelo con el fluido de lavado. De nuevo, una amplia variedad de equipo esta disponible :

- *Impellers*
- Chorro de agua a alta presión (5000 psi)
- Unidades de vibración de baja frecuencia

- **Tratamiento del fluido de lavado**

El fluido de lavado debe ser reciclado al proceso de tratamiento. Dependiendo del tipo de fluido de lavado a ser tratado, un numero de opciones de tratamiento esta disponible.¹⁰⁴

- **Concentración/separación de contaminantes**

- Coagulación
- Floculación
- Espesamiento
- Secado
- Filtración

- **Biodegradación**

- **Pulimento**

- Intercambio iónico
- Carbón activado
- Microfiltración

- **Emisiones de aire**

Las emisiones de aire pueden ser de consideración durante las operaciones de excavación, procesos de reducción de tamaño, procesos de separación de partículas (cribado en seco) y procesos de tratamiento. Las emisiones de aire son controladas por sistemas de captura y tratamiento. Los sistemas de tratamiento incluyen precipitadores electrostáticos, sistemas de carbón y sistemas de lavado por aire húmedo.

- **Tratamiento secundario de partículas finas**

Algunos sistemas de lavado de suelo *ex situ* y extracción con solventes, desarrollan tratamientos secundarios de partículas. Estos normalmente incluyen:¹⁰⁴

- Extracción secundaria
- Enjuagado
- Secado

Existen cuatro principales grupos de residuos que se generan durante el lavado de suelos: suelos contaminados provenientes de las unidades de lavado de suelo, agua residual, lodos del tratamiento de aguas residuales y emisiones de aire.⁹²

- **Aplicabilidad de la Tecnología**

El lavado de suelo *ex situ* y la extracción con solventes son procesos que pueden ser eficientes en separar contaminantes peligrosos de materiales no peligrosos y concentrarlos para un tratamiento posterior. Como se separan los contaminantes, se puede seleccionar el método de tratamiento más apropiado para cada uno. Tras la extracción con solventes, algunos contaminantes pueden reciclarse o reutilizarse en la industria manufacturera, reduciendo al mínimo la necesidad de eliminarlos.⁹¹

Se ha comprobado que los sistemas SW y CHEX son eficaces para tratar sedimentos, lodos residuales, y tierra que contiene principalmente contaminantes orgánicos como bifenilos policlorados (PCBs, por sus siglas en inglés), VOCs, solventes halogenados y residuos del petróleo. Generalmente estos contaminantes provienen del desengrasado de metales, la limpieza de tableros de circuitos impresos, gasolina y procesos de fabricación de conservadores de la madera. Estas técnicas por lo general no se usan para extraer contaminantes inorgánicos, es decir ácidos, bases, sales y metales pesados; ya que estos materiales no se disuelven fácilmente en la mayoría de los solventes utilizados. La Tabla 6.8 presenta una lista de los solventes más comúnmente utilizados en los procesos de extracción química.

Tabla 6.8 Solventes utilizados en los procesos de extracción química en suelos contaminados

Solventes	
Dióxido de carbono líquido	Propano
Butano	Trietilamina
Acetona	Metanol
Hexano	Eter dimetilico

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office, (1997).⁹¹

Las eficiencias de remoción dependen del tipo de contaminante así como del tipo de suelo. Los VOCs son más fáciles de remover con el sistema de lavado *ex situ*, experiencias muestran que los compuestos orgánicos volátiles pueden ser removidos en un porcentaje de eficiencia de 90-99%. Los compuestos orgánicos semivolátiles pueden ser removido con un porcentaje menor de 40-90% dependiendo de la selección del surfactante apropiado. Metales y pesticidas, los cuales son menos solubles en agua requieren ácidos o agentes quelantes para un lavado de suelo exitoso. El proceso puede ser aplicado en el tratamiento de suelos contaminados con residuos peligrosos incluyendo compuestos químicos preservadores de madera (pentaclorofenol y creosota), solventes orgánicos,

cianidas, metales pesados, lodos provenientes de la fabricación de pinturas, residuos provenientes de la formulación y producción de plaguicidas y residuos del petróleo.⁹²

Teóricamente, es factible tratar una amplia variedad de contaminantes, mientras se seleccione el solvente correcto. Los compuestos presentados como factibles a ser tratados por el proceso de lavado de suelo *ex situ* y la extracción con solventes son presentados en la Tabla 6.9.

Tabla 6.9 Compuestos factibles a ser tratados con el Sistema de Lavado de Suelo *ex situ* y Extracción Química

Compuestos volátiles	
2,3,7,8 -tetraclorodibenzo-p-dioxin	Xileno
Pentaclorofenol	Fenol
1,2 -dicloroetano	Clorometano
Compuestos semivolátiles	
Antraceno	PCBs
Trinitrobenceno	Pireno
Hidrocarburos aromáticos	Naftaleno
Hidrocarburos Poliaromaticos	Fenantreno
Metales	
Arsénico	Cobre
Cadmio	Plomo
Cromo	Niquel

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office, (1997).⁹³

El gran problema de la aplicación de los sistemas de lavado de suelo *ex situ* y la extracción con solventes es la amplia variabilidad de condiciones encontradas en la mayor parte de los sitios contaminados. Esta variabilidad se presenta tanto en el tipo de contaminantes como en la naturaleza mineralógica del suelo.

La Tabla 6.10 presenta los factores que deben ser considerados en la evaluación de lavado de suelo *ex situ* y de la extracción con solventes.

Tabla 6.10 Factores que deben ser considerados en la evaluación del Sistema de Lavado de Suelo *ex situ* y Extracción Química

Tipo de suelo	Grava Si	Arena/limo Quizá	Arcilla No
Tipo de contaminante	Gasolina Si	Diesel Quizá	Aceite Quizá
Extensión de la contaminación	Grande No	Moderada Si	Pequeña Si
Fase de la contaminación	Producto libre No	Gasolina interperizada Si	Agua subterránea Quizá ^b
Zona del subsuelo	Vadosa Si	Fluctuación Quizá	Agua subterránea Quizá
Profundidad del agua subterránea	15 m ^c (50 ft) Si	9 m (30 ft) Quizá	3 m (10 ft) No

Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹¹

- a: Diesel e hidrocarburos pesados requieren extracción con detergentes para hacer más eficiente la remoción.
- b: El lavado de suelo *ex situ* y la extracción química no deben ser usados si el tratamiento puede contaminar otras fuentes de agua subterránea.
- c: Las condiciones específicas del sitio pueden variar estos números.

Una aplicación óptima de cualquier sistema SW y CHEX generalmente se lleva a cabo en cuatro etapas: (1) pruebas de laboratorio, (2) procesos de ingeniería, (3) pruebas a escala piloto y (4) operación a gran escala.¹¹⁶

Fase I: Pruebas de laboratorio

Objetivo: Desarrollar pruebas de laboratorio con 100-1000g de suelo contaminado a fin de lograr el porcentaje máximo de remoción y/o lograr los objetivos de limpieza mientras se produce simultáneamente la menor cantidad de materia de desecho - qué contienen el contaminantes- el cual requiere una disposición final o un posterior tratamiento.

Tiempo estimado: 2-12 semanas

Fase II: Procesos de ingeniería

Objetivo: Basados en los éxitos técnicos de las pruebas de laboratorio se llevan a cabo estudios y pruebas de ingeniería de proceso y optimación para identificar los cambios o modificaciones requeridas para un particular proceso a utilizarse en un sitio específico.

Tiempo estimado: 1-24 semanas

Fase III: Pruebas a escala piloto

Objetivo: Para la limpieza de grandes volúmenes de suelo (>10, 000 m³), se llevan a cabo pruebas a escala piloto en el sitio con el objetivo de determinar los parámetros de operación, costos finales de limpieza, establecimiento de los objetivos de limpieza, control de derrames, control de emisiones a la atmósfera, procesos de tratamiento de agua y costos aceptables.

Tiempo estimado: 1-4 semanas

Fase IV: Operación a gran escala

Objetivo: Llevar a cabo la rehabilitación del sitio y reemplazar el volumen de suelo limpio dentro del sitio original de excavación.

Tiempo estimado: 1-4 años

Las cuatro fases anteriores son aplicadas a proyectos que tengan que ver con el tratamiento de grandes volúmenes de suelo contaminado (>10, 000 m³) con diversos contaminantes. Sin embargo, proyectos pequeños donde los contaminantes pueden ser fácilmente removidos, las fases de estudios de laboratorio y procesos de ingeniería se realizan en un periodo de tiempo más corto y a un costo menor. Las pruebas a escala piloto pueden no requerirse. Esto considera que los procesos SW y CHEX han sido suficientemente analizados en pruebas de campo por lo que los parámetros generales de operación están bien definidos.¹¹⁶

- **Ventajas y limitaciones de la tecnología**

La extracción con solventes y el lavado de suelo *ex situ* son efectivos en separar contaminantes peligrosos de algunos tipos de lodos residuales, sedimentos y tierra. Estos procesos no reducen la toxicidad de los contaminantes, por consiguiente, el producto final del proceso (los residuos concentrados) debe ser sometido a un tratamiento posterior. Algunas limitaciones de estas tecnologías son las siguientes.^{81,104,122}

- La presencia de plomo y de otros contaminantes inorgánicos podría interferir en la extracción de materiales orgánicos.
- La aplicación de las tecnologías podría implicar complejas consideraciones técnicas, por ejemplo, algunos sistemas utilizan butano y propano comprimido, que exigen un manejo estricto para evitar que se vaporicen y se incendien.
- Podría ser necesario un tratamiento preliminar extenso de los residuos para eliminar o desmenuzar los terrones grandes.
- Los contaminantes no son destruidos.
- Las partículas finas (pasta de limo y arcilla) y los fluidos de lavado requieren un tratamiento secundario para poder alcanzar los niveles permisibles para su disposición o descarga.
- Los lodos provenientes de los sistemas de tratamiento de agua deben ser tratados.

- Mezclas complejas de residuos hacen dificultosa la formulación del fluido de lavado.

Los procesos de lavado de suelo *ex situ* y la extracción química se utiliza para tratar una amplia gama de contaminantes como metales, gasolinas, aceites y plaguicidas. El uso de estas tecnologías presentan varias ventajas:^{81,116}

- Ofrece un sistema cerrado que minimiza la emisión de contaminantes a la atmósfera y la posibilidad de contaminar otros sitios.
 - Crea un sistema que no es afectado por condiciones externas. Este sistema permite controlar las condiciones - como pH y temperatura - en las cuales se tratan las partículas de suelo.
 - Permite excavar los residuos peligrosos y tratarlos en el lugar.
 - Existen unidades móviles que minimizan el riesgo de expandir la contaminación cuando el material es transportado hasta un sitio de tratamiento.
 - Tiene una favorable percepción para el público.
 - Resultan ser tecnologías relativamente de bajo costo para la minimización del volumen de suelos contaminados.
 - Puede pretratar efectivamente suelos para su posterior biorremediación
 - Se logran niveles de limpieza menor a 1 ppm (partes por millón) para algunos contaminantes sobre un amplio intervalo de tipos de suelos.
- **Situación actual de la tecnología**

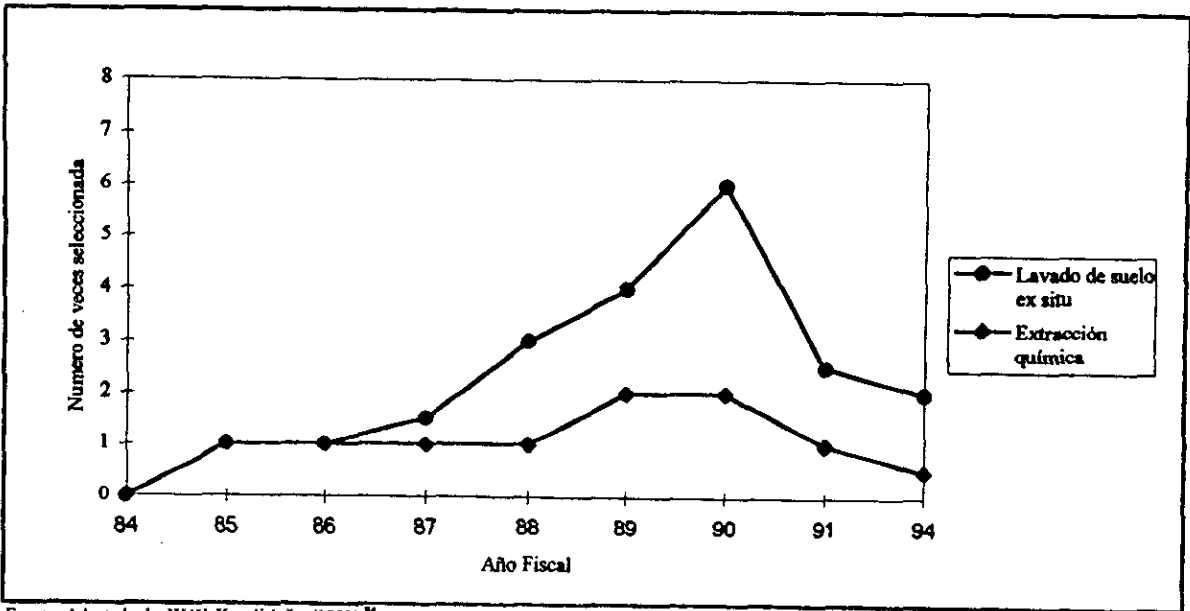
Los sistemas de lavado de suelo *ex situ* y la extracción química fueron primeramente desarrollados por la US EPA a finales de la década de los setentas como un medio para rehabilitar arena contaminada por derrames petroleros. La primera unidad utilizó surfactantes para ayudar a la limpieza de la arena.

La tecnología ha sido extensamente utilizada en Europa principalmente en Alemania¹²¹ y Holanda. Varias compañías en los Estados Unidos han desarrollados extensas pruebas a escala de laboratorio y piloto de los diferentes sistemas de lavado de suelo *ex situ* y extracción con solventes.^{123,124,125} Sin embargo, su utilización a gran escala ha sido limitada.¹⁰⁴

Durante 1986-1989, el lavado de suelo *ex situ* fue seleccionado como una de las estrategias de rehabilitación en ocho sitios del *Programa Superfondo*.⁹²

Mientras que en el año de 1990 el lavado de suelo *ex situ* representaba el 5% y la extracción química el 2% del total de las tecnologías empleadas en los sitios del *Programa Superfondo*⁸³, para 1994 ese porcentaje se había reducido, el lavado de suelo *ex situ* representaba solo el 2% y la extracción con solventes < 1%.⁸⁵

Figura 6.9 Selección de las tecnologías de lavado de suelo *ex situ* y extracción con solventes en sitios del Programa Superfondo



Fuente: Adaptado de: W.W. Kovalick Jr., (1993).²⁴

6.5.2 Control hidráulico y sistemas de bombeo y tratamiento

- **Resumen**

El objetivo del control hidráulico de la contaminación en el agua subterránea consiste en: alterar el régimen del flujo de agua subterránea para prevenir una descarga fuera del sitio de control, reducir el nivel de migración de la pluma de contaminación y remover los contaminantes o confinar la pluma de contaminación. El mantenimiento de pozos y bombas es particularmente importante para una exitosa implementación de estos métodos. El diseño de los sistemas puede ser alterado de acuerdo a las características específicas del sitio contaminado. Los sistemas de control hidráulico pueden incluir: sistemas de intersección y/o sistemas de pozos de bombeo e inyección.⁵⁵

Los sistemas de intersección son utilizados para coleccionar agua subterránea contaminada cerca del nivel freático y pueden consistir de canales, una línea de tuberías perforadas y enterradas y/o trincheras abiertas, normalmente rellenas de grava. Estos sistemas operan similarmente a una línea infinita de pozos, son eficientes en la remoción de contaminantes que se encuentren cerca de la superficie del nivel freático. Las trincheras son normalmente utilizadas para coleccionar líquidos no acuosos, particularmente LNAPLs, como petróleo crudo o gasolina, los cuales son ligeros y tienden a moverse cerca de la franja capilar ligeramente por arriba del nivel freático.⁵⁵

En la actualidad la única tecnología de tratamiento de agua subterránea que ha llegado a ser efectiva en la rehabilitación de contaminaciones profundas y extensa de agua subterránea es la extracción de agua contaminada y su tratamiento posterior en la superficie por medio de tecnologías de tratamiento apropiadas. Esta tecnología es popularmente conocida como bombeo y tratamiento.¹²⁶

El programa de extracción de agua subterránea es diseñado para bombear agua de pozos o trincheras de intersección con el objetivo de lograr un control hidráulico en la fuente de contaminación y en la pluma de contaminantes disueltos (líquidos no acuosos, NALPs, por sus siglas en inglés). Históricamente esta tecnología fue la primera alternativa de tratamiento en conjunto con excavación, utilizada para la rehabilitación de sitios contaminados.⁹⁸

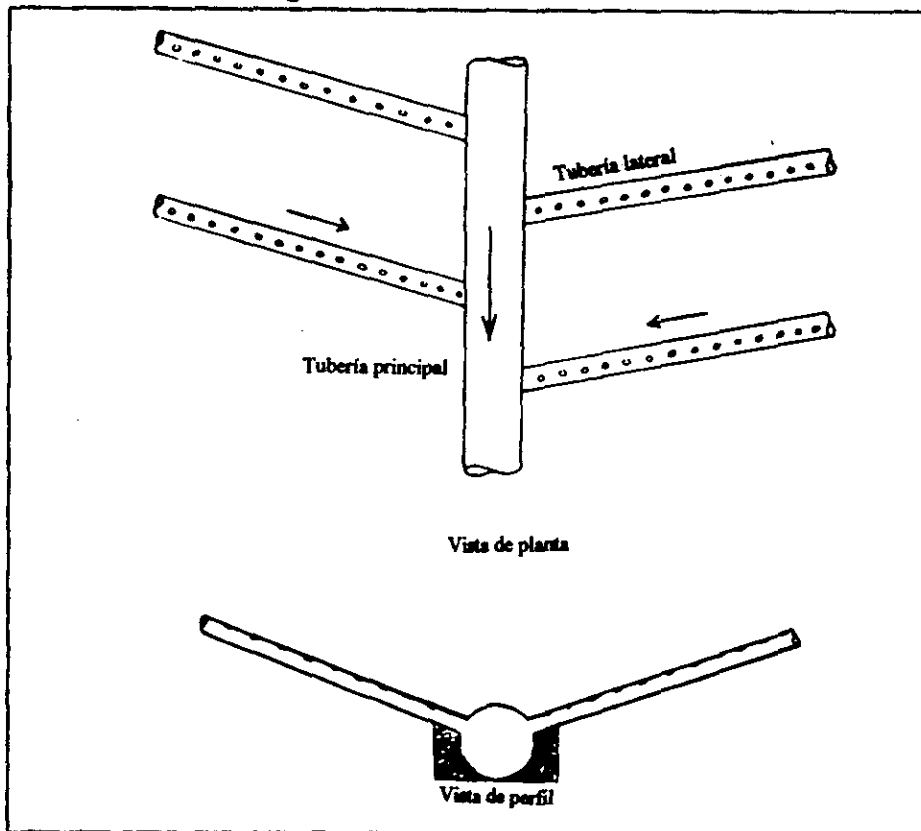
- **Descripción de la tecnología**

Los sistemas de control hidráulico pueden incluir: sistemas de intersección y/o sistemas de pozos de bombeo e inyección. La construcción de los sistemas de intersección es relativamente simple y envuelve la excavación de un sistema de trincheras, la colocación de tuberías perforadas en su interior y la aplicación de un material de relleno grueso como grava.

- Drenes de recolección.

Normalmente los sistemas colectores consisten de una serie de tuberías laterales de alimentación conectadas a una tubería principal de recolección como se muestra en la Figura 6.10. El agua fluye a través de la tubería principal hacia la zona de desagüe de donde es entonces bombeada a la superficie para su tratamiento y/o descarga.⁶¹

Figura 6.10 Sistema dren colector



Fuente: Carter L.W. and Knox R.C., (1985).⁶¹

Los sistemas colectores utilizados de manera preventiva como el sistema de recolección de lixiviados, normalmente incluyen una serie de drenes laterales de 10 a 15 cm (4 a 6 in, en unidades inglesas) de diámetro conectados a una tubería principal de 20 a 30 cm (8 a 12 in, en unidades inglesas) de diámetro.⁶¹

Los sistemas de intersección utilizados como una medida de abatimiento pueden ser clasificados como drenes de alivio o drenes de intersección. Los drenes de alivio son instalados en forma paralela, de lado a lado o completamente alrededor del perímetro de la mancha de contaminación. Generalmente son utilizados para prevenir que la contaminación alcance mayores dimensiones.⁶¹

Los drenes de intersección son utilizados para coleccionar agua subterránea y prevenir que la contaminación alcance los pozos y/o cuerpos superficiales de agua localizados gradientes abajo

del sitio contaminado. Los drenes de intersección son instalados de forma perpendicular al flujo de agua subterránea.⁶¹

Los principales parámetros en el diseño de los drenes de recolección son el tamaño de la tubería y el espaciamiento entre ellas. Los costos para los sistemas de desagüe poco profundos o drenes de recolección están estimados en el orden de US \$ 1,235 a 1,730 (\$^M/_N 9,880 a 13,840) por hectárea drenada dependiendo de la profundidad y localización de la contaminación así como de los materiales utilizados.⁶¹

- **Trincheras de intersección.**

Las trincheras pueden ser activas (utilizando bombeo) o pasivas (flujo por gravedad). Los sistemas activos consisten de una red de pozos de remoción o un sistema de tuberías perforadas de recolección (dren colector) colocadas en el fondo de la trinchera. Los sistemas activos son normalmente rellenos de arena gruesa o grava para promover la estabilidad de la pared. Los sistemas pasivos son utilizados casi exclusivamente para la recolección de contaminantes que flotan en la superficie del agua, como los hidrocarburos.⁶¹ El sistema de trincheras es utilizado en situaciones donde el nivel freático no se encuentra muy profundo y esta constituido de materiales de baja conductividad hidráulica o acuíferos altamente heterogéneos. Económicamente, la profundidad de las trincheras esta limitado a menos de 6 m (20 ft en unidades inglesas) en la mayor parte de las situaciones. La trinchera puede ser cubierta con una película impermeable a lo largo del gradiente inferior.⁷⁸ Todos los sistemas de intersección requieren de un excavación de al menos 0.90 a 1.2 m (3 a 4 ft, en unidades inglesas) por debajo del nivel freático para prevenir el escape de los contaminantes.⁶¹ La Figura 6.11 muestra un sistema de trincheras.

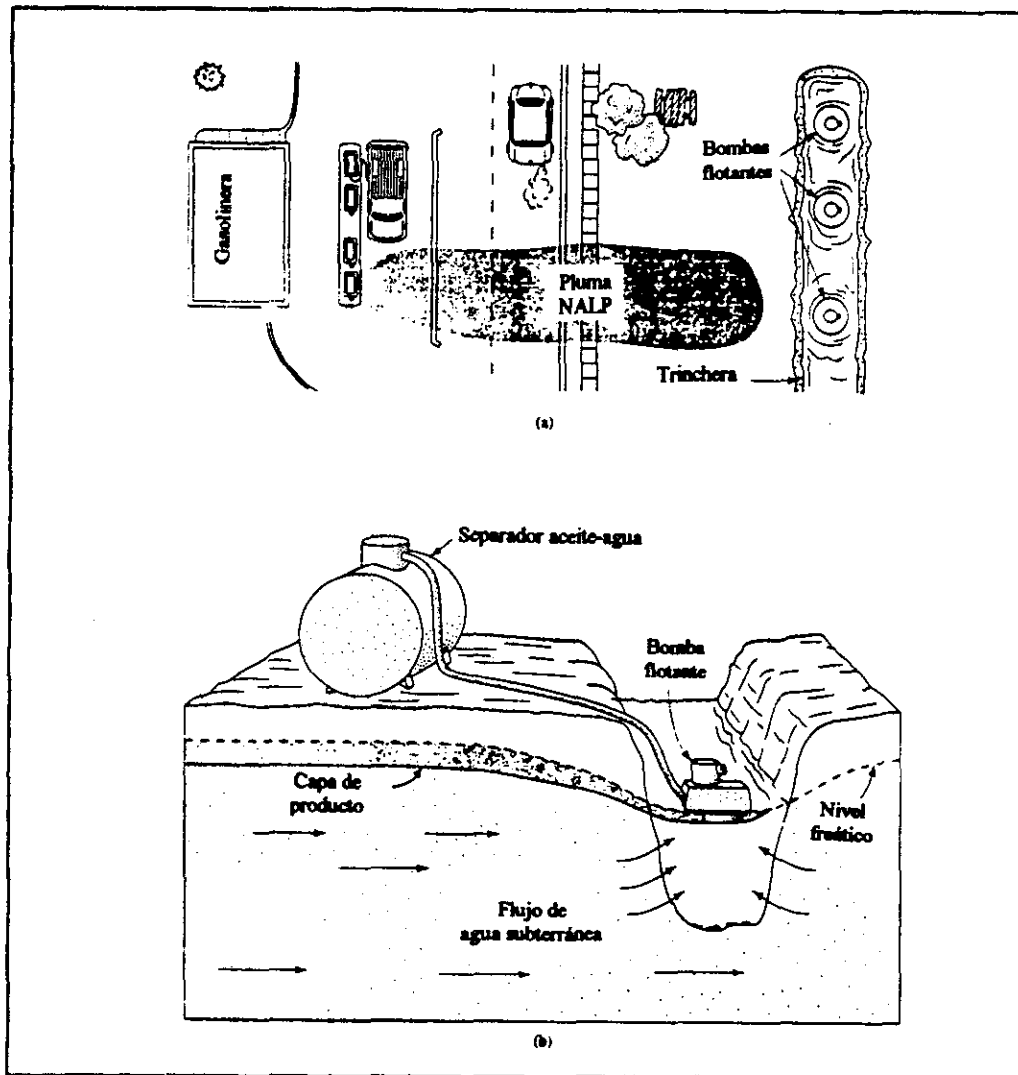
- **Paredes verticales.**

Las paredes verticales representan una tecnología para aislar o encapsular un área a fin de prevenir la contaminación del agua subterránea o bien, restringir el movimiento del agua subterránea previamente contaminada. La tecnología envuelve la excavación de una trinchera- que posteriormente es rellena con material impermeable- alrededor de un área. Las paredes verticales utilizadas para el control de la contaminación en el agua subterránea se pueden clasificar en los siguientes grupos: 1) paredes verticales de suelo-bentonita , 2) paredes verticales de cemento-bentonita, 3) paredes verticales de concreto plástico, 4) Paredes verticales de viga vibratoria, 5) Paredes verticales de lamina de acero, y 6) paredes verticales de tratamiento.^{127,128}

Las paredes de tratamiento, también llamadas paredes reactivas, paredes de tratamiento pasivo o barreras permeables; son uno de los sistemas de contención más innovadores. Las paredes de tratamiento son rellenas con diversos tipos de materiales (rellenos activos), los cuales son cuidadosamente seleccionados por su capacidad para eliminar determinados tipos de contaminantes. Cuando el agua subterránea contaminada pasa por la pared de tratamiento, los

contaminantes quedan atrapados en la pared o son transformados en compuestos inocuos. La ventaja principal de los muros de tratamiento en comparación con otros métodos tradicionales como el bombeo y tratamiento del agua subterránea, es que son sistemas pasivos que tratan los contaminantes *in situ*. Se calcula que utilizando paredes de tratamiento en lugar del sistema de bombeo y tratamiento, se puede ahorrar por lo menos el 50% de los costos. El sitio ideal para la instalación de las paredes de tratamiento es un suelo arenoso contaminado hasta una profundidad de 15 m como máximo y una corriente de agua subterránea abundante y constante.¹²⁹

Figura 6.11 (a) Vista aérea de una pluma de contaminación de LNAPLs y una trinchera de intersección (b) Corte seccional de una trinchera y bomba flotante utilizada para capturar productos flotantes y abatir el nivel freático



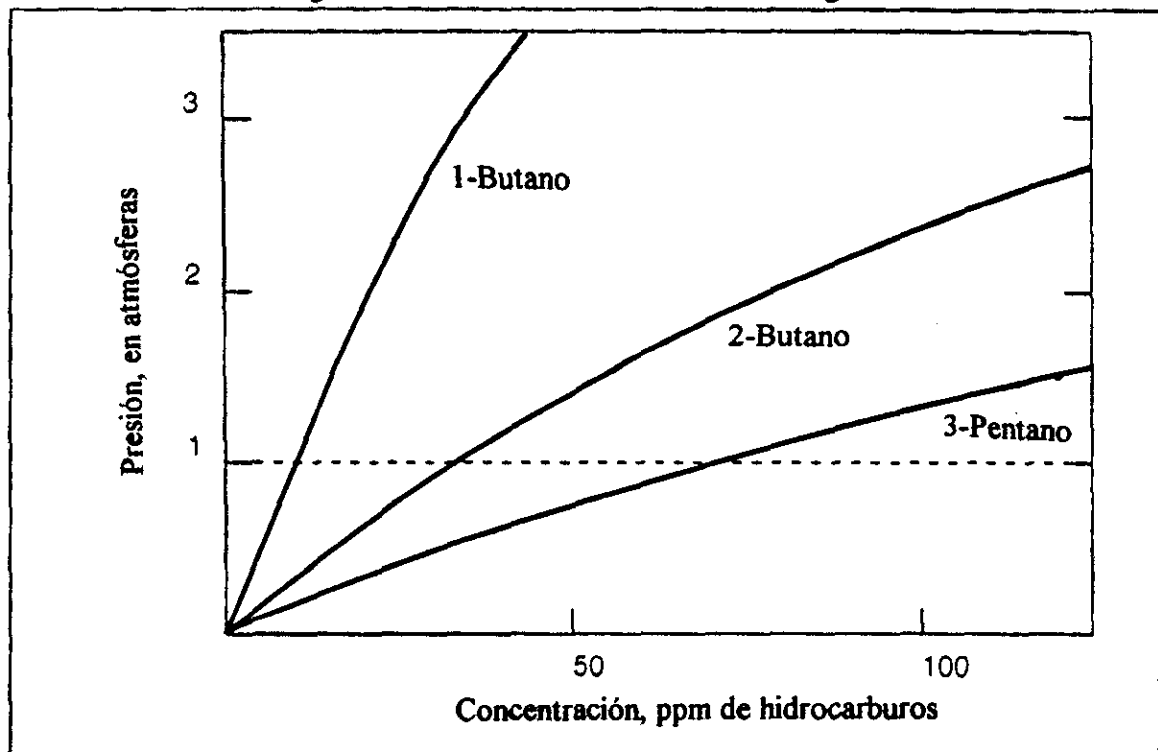
Fuente: Bedient B. Philip, Rifai S. Hanadi and Newell J. Charles, (1994).⁵³

En la actualidad la única tecnología de tratamiento de agua subterránea que ha llegado a ser efectiva en la rehabilitación de contaminaciones profundas y extensa de agua subterránea es la extracción de

agua contaminada y su tratamiento posterior en la superficie por medio de tecnologías de tratamiento apropiadas. Esta tecnología es popularmente conocida como bombeo y tratamiento.¹²⁶

Los pozos de bombeo son usados para extraer agua de la zona saturada por medio de una zona de captura creada por la migración de los contaminantes.⁶¹ Las bases técnicas y la efectividad del sistema de bombeo y tratamiento de agua subterránea está basada en la Ley de Henry para sustancias disueltas. Figura 6.12. La ley de Henry predice una relación lineal para la solubilidad de los hidrocarburos en el agua. Para hidrocarburos ligeros el dato es predicho muy bien. La gráfica muestra la relación entre la solubilidad y la presión de vapor para hidrocarburos disueltos en agua. Conforme aumenta la concentración del hidrocarburo disuelto se observa un incremento aproximadamente lineal en la presión de vapor del hidrocarburo.¹⁴

Figura 6.12 Solubilidad de hidrocarburos en agua



Fuente: Cole G. Mattney, (1994).¹⁴

El tratamiento del agua subterránea gira alrededor de la solubilidad de los hidrocarburos. Los tratamientos cuentan con dos diferentes efectos: uno a nivel de la superficie y otro a nivel del subsuelo. En la superficie, el factor a controlar es la eficiencia de los procesos de separación de hidrocarburos-agua. Una de las siguientes opciones puede ser asumida para el tratamiento de agua: (1) el agua puede ser tratada y reinyectada; la reinyección de agua tratada ayuda a incrementar la velocidad del agua subterránea en la vecindad de los pozos y facilita la desorción de los contaminantes para una rápida limpieza, pero requiere de la instalación de pozos adicionales, (2) el agua puede ser descargada al sistema de drenaje, esta opción requiere que el agua reúna los requisitos

de descarga, y (3) el agua puede ser recolectada para su disposición, resulta ser la opción mas cara y menos deseable.^{14,61} Cada opción tiene sus ventajas y limitaciones. La opción final que es seleccionada, frecuentemente es seleccionada en base a consideraciones regulatorias por arriba de las consideraciones técnicas.¹³⁰

El principal problema con el sistema de pozos de bombeo es el propio tratamiento y disposición del agua contaminada una vez que ha sido bombeada hacia la superficie. Existen numerosos sistemas de tratamiento de agua subterránea:¹⁴

- Separación aceite/agua
- Aspersión de aire
- Oxidación, usando ozono, O₃
- Adsorción en unidades de carbón activado (GAC, por sus siglas en ingles)
- Tratamiento biológico, normalmente biodegradación desarrollada fuera del sitio.
- Biofiltración

El sistema de separación aceite-agua puede ser tan simple como un gran tanque en el cual los hidrocarburos disueltos se separan lentamente. Este es un proceso lento; sin embargo, la separación es mejorada si las soluciones son aireadas. El ozono es producido *in situ* por la irradiación de luz ultravioleta a un flujo de agua contaminada. Los compuestos aromáticos e hidrocarburos alifáticos ligeros son oxidados a CO₂ y H₂O. Puesto que el proceso de filtración con carbón activado es un proceso caro, los filtros de carbón activado son frecuentemente utilizados en combinación con otros métodos. Las unidades de carbón activado pueden adsorber hidrocarburos en una proporción de 6.8 kg de hidrocarburos por 45.36 kg de carbón.¹⁴

Si bien existen numerosos sistemas de tratamiento de agua subterránea, la aspersión de aire y la adsorción a carbón activado son las técnicas de tratamiento más comunes para contaminantes orgánicos. El carbón activado y la aspersión de aire son frecuentemente utilizados en serie cuando están presentes compuestos orgánicos volátiles y no volátiles y cuando se requiere una alta eficiencia de remoción.¹³⁰

La selección de la tecnología de tratamiento está influenciada por la naturaleza de los contaminantes presentes. El agua subterránea contaminada con compuestos orgánicos puede ser tratada por separación física o técnicas de oxidación. Los compuestos inorgánicos no pueden ser oxidados a CO₂ y H₂O y, así, deben ser separados físicamente del agua subterránea.¹³⁰

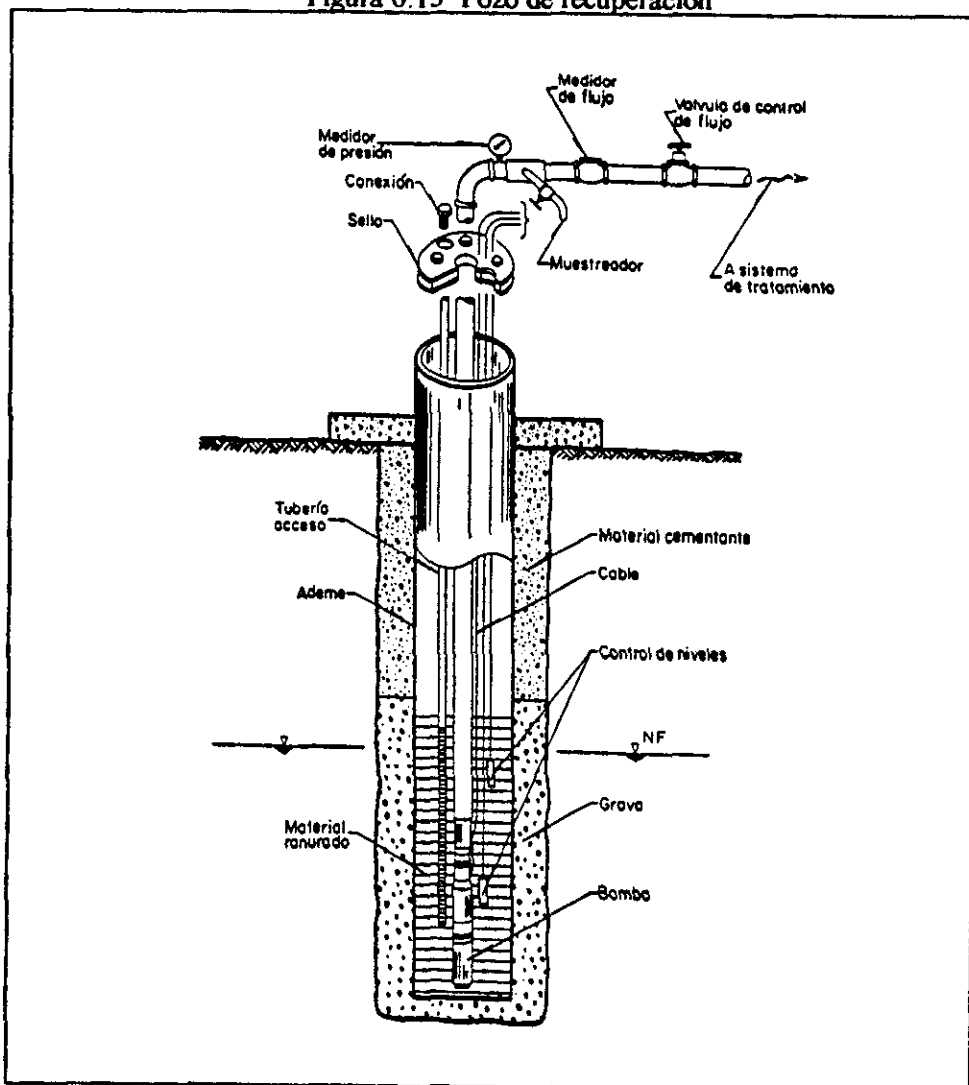
Se pueden utilizar pozos de recuperación sencillos o múltiples. Los pozos de recuperación son construidos de una variedad de materiales como PVC, acero al carbón, acero galvanizado, acero inoxidable y fibra de vidrio; dependiendo del tipo y concentración del contaminante así como el

periodo de tiempo programado para la operación. Un aspecto muy importante en los pozos de bombeo es la reacción del agua subterránea contaminado con los materiales de construcción lo que puede ocasionar una disminución de la vida útil de la envoltura o protección. La envoltura y protección de PVC pueden perder su integridad estructural si ellos son colocados en contacto con concentraciones altas de contaminantes orgánicos. Los pozos para la recuperación de hidrocarburos en fase libre frecuentemente son construidos de acero o fibra de vidrio.¹³⁰

La profundidad del pozo normalmente se determina con base en las características específicas del sitio. Sin embargo, la mayor parte de los pozos penetran parcialmente la matriz del suelo, prolongándose solo a una profundidad que intercepte la extensión vertical del bulbo de contaminación. Para sitios contaminados con NAPLs, la red de pozos debe ser siempre instalada en la elevación del nivel freático históricamente más alta para asegurar la recuperación del producto libre bajo condiciones poco frecuentes de elevación del nivel freático. Los diámetros de los pozos de recuperación varían de 5-30 dependiendo del uso del pozo y del equipo de bombeo utilizado. El diámetro del pozo debe ser suficiente para permitir la fácil instalación de todos los mecanismos de monitoreo.⁷⁸

El diseño de los pozos de recuperación depende del tipo de acuífero que ha sido contaminado y el nivel de recuperación que es requerido. Este nivel de recuperación debe ser determinado antes de iniciar el diseño de los pozos de recuperación ya que el tamaño y tipo de bomba serán los principales factores en la determinación del diámetro de los pozos. El diámetro de diseño de los pozos de recuperación puede variar desde pozos de 40 mm de diámetro que usan bombas de desplazamiento neumático y que recuperan cerca de 10 l/día, a pozos de gran diámetro que utilizan bombas de alta capacidad y que pueden recuperar cerca de 10, 000 l/min.¹³⁰ La Figura 6.13 muestra un pozo de recuperación.

Figura 6.13 Pozo de recuperación



Fuente: Kent Bob and Mann Perry, (1993).¹²⁹

En el diseño del sistema de extracción y tratamiento de agua subterránea se utilizan soluciones analíticas o numéricas y técnicas de modelación para optimizar su funcionamiento.⁷⁸ El número de pozos, su localización y los niveles de bombeo requerido son parámetros claves en el diseño. Los diseños más exitosos han sido desarrollados para suelos relativamente arenosos o arenoso-limosos.⁶¹

El propósito de la modelación matemática del flujo de agua subterránea con fines de rehabilitación incluye los siguientes:

- a) La predicción de la concentración de los contaminantes en los puntos de recepción.
- b) Estimar los efectos de las acciones en el control de la fuente de contaminación durante el proceso de rehabilitación.

- c) Guiar la localización de los pozos de monitoreo y la caracterización hidrogeológica cuando el estudio de rehabilitación es conducido en fases.
- d) Evaluar las expectativas de rehabilitación desarrolladas bajo una variedad de alternativas de diseños a fin de predecir la eficiencia y el tiempo requerido para alcanzar algunos niveles de limpieza específicos.

La determinación de usar o no modelos matemáticos y la profundidad con que estos se utilicen depende de los objetivos de la modelación, la facilidad con la cual el subsuelo puede ser conceptualizado matemáticamente y la disponibilidad de los datos. Los datos de campo son recolectados para caracterizar las variables que gobiernan la hidrogeología y el comportamiento de los contaminantes. Frecuentemente son utilizadas estimaciones basadas en valores de literatura.⁶¹

Los pozos de bombeo requieren continuo mantenimiento. Los pozos de recuperación están sujetos al mismo fenómeno de corrosión y taponamiento que ocurre en los pozos de suministro de agua. Los problemas más comunes de taponamiento son causados por precipitación de carbonato de calcio o magnesio y compuestos de hierro. Los pozos de recuperación pueden tener también problemas de mantenimiento en acuíferos que están muy contaminados. Muchos compuestos orgánicos pueden sufrir reacciones químicas que resultan en la precipitación o crecimiento de lodos orgánicos. Estos lodos crecen en la protección o empaque del filtro y son difíciles de remover.^{78,103}

La Tabla 6.11 resume las consideraciones más importantes en la toma de decisión del sistema de bombeo y tratamiento de agua subterránea. El método es una tecnología comprobada y es ampliamente utilizada para tratar agua subterránea contaminada con hidrocarburos y residuos peligrosos. Sus costos son comparables a volatilización y excavación. La aspersion de aire puede incrementar la eficiencia del método.¹⁴

Tabla 6.11 Factores que deben ser considerados en la evaluación de los sistemas de extracción y tratamiento de agua subterránea

Tipo de suelo	Grava Si	Arena/limo Quizá	Arcilla No
Profundidad del agua subterránea	3 m (10 ft) Si	9 m (30 ft) Quizá	15 m ^a (50 ft) No
Tipo de contaminante	Gasolina Si	Diesel No ^b	Aceite No ^b
Extensión de la contaminación	Grande Si	Moderada Si	Pequeña Si
Fase de la contaminación	Producto libre No	Adsorbida Quizá ^c	Disuelta Si
Zona del subsuelo	Vadosa No	Fluctuación Quizá	Agua subterránea Quizá
Requerimiento de pozos	Inyección Si	Recuperación Quizá	Extracción Si

Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹⁴

- a: Las condiciones específicas del sitio pueden variar estos números.
- b: Diesel e hidrocarburos pesados requieren extracción con detergentes para hacer más eficiente la remoción.
- c: La gasolina adsorbida puede actuar como una fuente de contaminación.
- d: Los pozos de inyección incrementan la eficiencia y permiten reciclar el agua extraída.

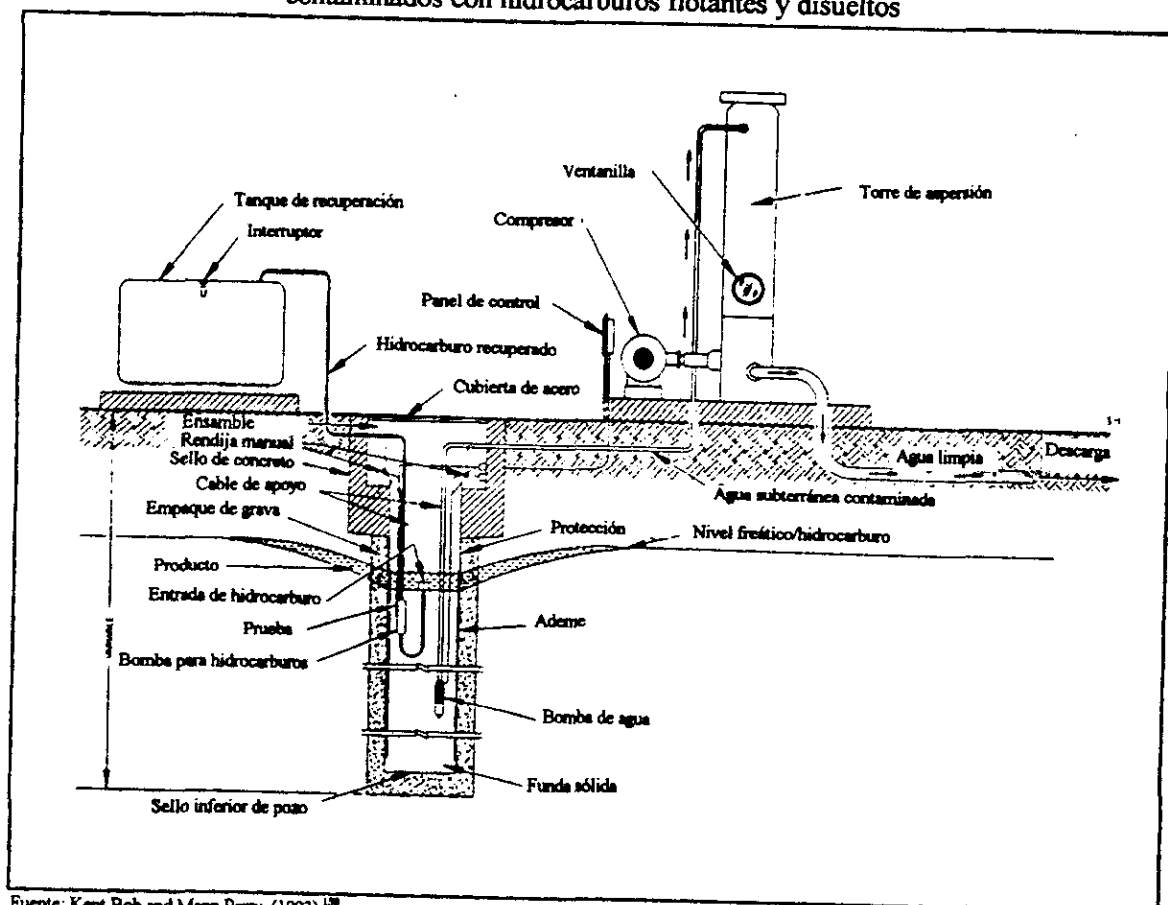
Una variedad de equipo de extracción está disponible comercialmente. Estos incluyen bombas sumergibles modificadas para ser compatibles con el contaminante, sistemas de bombeo neumático y bombas de succión. Sistemas de control están disponibles para mantener una carga constante o niveles de bombeo para los pozos. Interruptores de bajo amperaje, flotadores, probadores de conductividad, son utilizados para el control de las operaciones de bombeo.⁷⁸

Dos tipos generales de sistemas de bombeo son usados en la recuperación de agua subterránea contaminada: sistema de bombeo doble y sistema de bombeo simple. Los sistemas de bombeo doble se usan para la recuperación de compuestos orgánicos que no son miscibles en el agua como hidrocarburos de cadena recta. La mayor parte de los productos derivados del petróleo caen en esta categoría.¹³⁰

La Figura 6.14 ilustra un típico sistema de recuperación de bombeo doble usado para la recuperación de hidrocarburos que son menos densos que el agua como la gasolina. En este sistema, el nivel freático es abatido por el bombeo de extracción de agua subterránea y los hidrocarburos flotantes acumulados en el cono de depresión. Los hidrocarburos son removidos por medio del bombeo de extracción y enviados al tanque de recuperación de hidrocarburos. El agua subterránea bombeada

hacia la superficie contienen contaminantes solubles como benceno, etilbenceno, tolueno y xilenos que son removidos por medio de un apropiado sistema de tratamiento de agua.¹³⁰

Figura 6.14 Sistema de recuperación de bombeo doble y aspersión de aire para acuíferos contaminados con hidrocarburos flotantes y disueltos



Fuente: Kent Bob and Mann Perry, (1993).¹³⁰

El sistema de recuperación de bombeo doble fue desarrollado para separar la fase libre de hidrocarburos y el agua subterránea en el pozo de recuperación. El sistema de bombeo simple recupera hidrocarburos y agua, y libera una mezcla de fluidos a través de una tubería sencilla a un separador hidrocarburo/agua localizado en la superficie. El separador es usado como su nombre lo indica para separar la fase de hidrocarburos de la fase de agua, la cual requiere un tratamiento. Se emplean bombas eléctricas sumergibles y sistemas impulsados por gasolinas.¹³⁰

Existen tres potenciales opciones para el control de las emisiones de vapor provenientes del tratamiento de aspersión de aire: (1) descarga directa a la atmósfera, (2) incineración/combustión y (3) adsorción a carbón. La descarga directa es la alternativa más económica. Cuando el nivel de contaminación en el agua subterránea es bajo, la descarga directa es frecuentemente aprobada por las autoridades ambientales. Sin embargo, cuando el nivel de contaminación es alto, el tratamiento de las emisiones de vapor puede ser requerido. La adsorción de vapores en carbón es similar al concepto de

adsorción de contaminantes del agua. El gran problema con los sistemas de adsorción a carbón, es la disposición o regeneración de las unidades de carbón.¹³⁰

Los costos generales para los proyectos de extracción de agua subterránea pueden variar significativamente en función con los costos asociados con la operación y mantenimiento.⁷⁸

- **Aplicabilidad de la Tecnología**

Casi todas las actividades de rehabilitación de agua subterránea en sitios contaminados están basadas en su extracción por medio de pozos, drenes y trincheras normalmente acompañadas por un tratamiento previo a su disposición.¹³¹ La Tabla 6.12 presenta la rehabilitación de algunos sitios del Programa Superfondo donde se han utilizado sistemas de control hidráulico y bombeo y tratamiento.

Tabla 6.12 Sitios del Programa Superfondo donde se han utilizado sistemas de control hidráulico y bombeo y tratamiento para las actividades de rehabilitación

Sitio	Contaminantes	Tratamiento de agua subterránea	Periodo
Amoco Petroleum Pipeline. Constantine, Michigan	Benceno, Tolueno Etilbenceno, Xilenos, Metilterbutileter	Carbón activado granular y aspersión de aire	1988 a la fecha
U.S. Department of Energy Kansas City Plant. Kansas City, Missouri.	Tetracloroetano (PCE), Tricloroetano (TCE), 1,2- dicloroetano (1,2-DCE), Cloruro De Vinilo	Proceso de oxidación avanzada (AOPs)	1988 a la fecha
Twin Cities Army Ammunition Plant. New Brighton, Minnesota.	1,1-dicloroetileno, 1,1- dicloroetano, cis-1,2- dicloroetileno (1,2-DCE), Cloroformo, 1,1,1- tricloroetano (1,1,1-TCE), Tricloroetileno (TRCLE), Tetracloroetileno (TCLEE)	Aspersión de aire	1982 a la fecha
U.S. Department of Energy Lawrence Livermore National Laboratory Site. Livermore, California.	TCE, PCE, 1,1 & 1,2- Dicloroetileno, 1,1 & 1,2- dicloroetano, Cloroformo, Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos, Cromo, Plomo	Luz ultravioleta (UV)/Oxidación, aspersión de aire, intercambio iónico y Carbón Activado Granular	1989 a la fecha
Operable Unit D. McClellan Air Force Base, California.	TCE, cis-1,2-DCE, PCE	Aspersión de aire	1987 a la fecha

Fuente: Adaptado de: U.S. Department of Energy, (1997).^{132,133,134,135,136}

El bombeo y tratamiento es más efectivo en situaciones donde la fuente de contaminación ha sido eliminada y para contaminantes con alta movilidad y solubilidad en agua. Esta tecnología no es favorable para sitios que presenten baja conductividad hidráulica, o geología muy compleja y

heterogénea, para contaminantes que son hidrofóbicos y adsorbidos al suelo y en presencia de NAPLs residual. Los compuestos no acuosos que permanecen en microfracturas o en zonas de baja conductividad hidráulica actúan como una importante y continua fuente de contaminación.^{98,61}

La efectividad del uso de la tecnología de bombeo y tratamiento como tecnología única para la rehabilitación de un sitio es limitada.⁶¹

El sistema de bombeo y tratamiento puede mostrar inicialmente un decremento en la concentración de los contaminantes; sin embargo, los niveles se estabilizan por lo general en un punto por arriba de los objetivos de limpieza.⁷⁸

- **Ventajas y limitaciones de la tecnología**

La Tabla 6.13 presenta algunas de las ventajas y limitaciones de los sistemas de intersección. La ventaja mas obvia de los sistemas de intersección es que son métodos relativamente simples en su construcción.

Tabla 6.13 Ventajas y limitaciones de los sistemas de intersección

Ventajas	Desventajas
Se pueden utilizar para recuperar lixiviados de rellenos sanitarios.	Cuando existen contaminantes disueltos puede ser necesario el monitoreo de agua subterránea gradientes abajo de la línea de recuperación.
Puede utilizarse para monitorear y recuperar contaminantes.	Los sistemas abiertos requieren precauciones de seguridad para prevenir incendios y explosiones.
Produce mucho menos fluido para manejar que los sistemas de bombeo.	El sistema de trincheras es menos eficiente que el sistema de extracción.
	Los costos de operación y mantenimiento son altos.

Fuente: Canter L.W. and Knox R.C., (1985)⁶²

La principal razón para la pobre reputación del bombeo y tratamiento son las expectativas irreales que los compuestos químicos que han contaminado un acuífero por años o décadas puedan ser removidos a concentraciones de partes por billón en un corto periodo de tiempo.¹²⁶

Las principales desventajas de sistema de bombeo y tratamiento es que es un sistema caro en su diseño, instalación y operación, y en todos los casos conocidos los sistemas deben mantenerse en operación por décadas antes de poder alcanzar los niveles de limpieza.¹²⁶ La Tabla 6.14 muestra las ventajas y limitaciones de los sistemas de extracción.

Tabla 6.14 Ventajas y limitaciones de los sistemas de extracción

Ventajas	Desventajas
Medio eficiente y efectivo de asegurar el control de la contaminación del agua subterránea	Los costos de operación y mantenimiento son altos
Puede ser instalado rápidamente	Se requiere un monitoreo continuo después de la instalación
Los pozos de monitoreo instalados previamente pueden ser algunas veces empleados como parte del sistema de pozos	Los sistemas de recuperación remueven agua limpia junto con agua contaminada
Algunas veces puede contemplarse la recarga del acuífero como parte de la estrategia	Algunos sistemas pueden requerir el uso de sofisticados modelos matemáticos para evaluar su efectividad
Alta flexibilidad de los diseños	Los sistemas de bombeo usualmente requieren tratamiento del agua extraída en la superficie antes de la descarga
Los costos de construcción pueden ser más bajos que las barreras artificiales	Su aplicación en suelos finos es limitada

Fuente: Kent Bob and Mann Perry, (1993).¹⁸

- **Situación actual de la tecnología**

Hay muy poca documentación acerca de la historia de un acuífero contaminado que haya sido completamente limpiado. Muchas operaciones de recuperación han sido finalizadas, pero no ha sido recuperada toda la masa contaminante. En realidad en algunos sitios donde se ha aplicado el sistema de bombeo y tratamiento se han suspendido operaciones debido a que las concentraciones de los contaminantes han sido reducidos a niveles aceptables por las autoridades reguladoras. Muchos profesionistas en el área piensan que con el sistema de bombeo y tratamiento nunca se disminuye las concentraciones de los contaminantes orgánicos a los niveles originales. Es por esto que evaluaciones de riesgo basados en la salud han sido sugeridas como un método para determinar cuándo parar las operaciones de recuperación.

En algunos sistemas de recuperación, la concentración de los contaminantes se ha observado que disminuyen en un poco de recuperación después de un extenso período de cierre. En el caso de contaminantes orgánicos, esto se ha atribuido a la desorción de contaminantes, predominantemente de la matriz arcillosa de un acuífero, en la columna de agua. Esto ha llevado al concepto de que los pozos de bombeo deben ser operados de una manera cíclica para maximizar la recuperación de los contaminantes.⁶¹

6.5.3 Tratamiento térmico

- **Resumen**

La destrucción térmica es la destrucción controlada de los compuestos por oxidación térmica.¹⁰⁴ Involucra la exposición controlada de los residuos a altas temperaturas (normalmente 900 °C o más) y que son normalmente convertidos a dióxido de carbono, agua y otros productos de la combustión. Los productos específicos de la destrucción térmica varían dependiendo del tipo de residuo y las condiciones de operación.^{104,137}

Los procesos de destrucción térmica para suelos y lodos contaminados incluyen: incineradores de lecho fluidizado, hornos de incineración rotatorio, procesos industriales a altas temperaturas como hornos cementeros y hornos industriales, tratamiento térmico infrarrojo, sistemas de incineración pirolítica y oxidación térmica.^{137,138}

La incineración en hornos rotatorios es el método más común de destrucción térmica de materiales contaminados. Los incineradores rotatorios pueden ser fácilmente diseñados para el proceso de grandes volúmenes de residuos. Los sistemas de alimentación pueden ser alterados para manejar grandes partículas y los tiempos de residencia pueden ser incrementados para asegurar una completa oxidación de los contaminantes.¹⁰⁴

La mayor parte de los procesos de destrucción térmica consisten de un sistema de alimentación de residuos, una cámara de combustión, un sistema de monitoreo de la combustión, un equipo para el tratamiento y monitoreo de las emisiones de gases contaminados y un sistema de remoción de cenizas. Los procesos de destrucción térmica normalmente operan en dos unidades. En la primer cámara de combustión se inicia una combustión parcial donde los contaminantes son desorbidos del material contaminante. La destrucción completa de los contaminantes orgánicos ocurre en la cámara de combustión secundaria.¹⁰⁴

El diseño y operación adecuada de los sistemas de destrucción térmica ofrecen una buena alternativa para destruir los residuos a la vez que se logra una significativa reducción en su peso y volumen, producir un producto estéril, y en algunas ocasiones recuperar energía y materiales como ácido clorhídrico o sulfúrico. Sin embargo, un mal diseño y operación pueden afectar la salud pública a través de las emisiones de los componentes potencialmente peligrosos de los residuos.¹³⁷

- **Descripción de la tecnología**

Los dos tipos más comunes de limpieza de sitios corresponden a los sitios contaminados con residuos peligrosos y los sitios contaminados con hidrocarburos. Las tecnologías para la limpieza de esos

sitios es un poco diferente. Para la limpieza de sitios con residuos peligrosos generalmente se utiliza un sistema de incineración completa (cámara de combustión primaria, cámara de combustión secundaria y un completo sistema de control de emisiones a la atmósfera), mientras que para la rehabilitación de sitios contaminados con hidrocarburos se utiliza un equipo de venteo térmico de suelos (normalmente un secador con un sistema de control de emisión de partículas).¹³⁴

Las tecnologías de tratamiento térmico fuera del sitio son divididas en dos grandes categorías:

- a) Venteo térmico de suelos a bajas temperaturas (LTTS, por sus siglas en ingles).
- b) Tratamiento térmico a altas temperaturas (HTTT, por sus siglas en ingles).

El tratamiento térmico por venteo a bajas temperaturas, LTTS, es un calentamiento del suelo a temperaturas suficientemente altas para volatilizar los hidrocarburos pero no lo suficientemente altas para provocar su ignición y combustión. Después de la volatilización, el vapor puede ser quemado o recolectado para su disposición.¹⁴

El suelo es alimentado en el interior de una cámara de venteo donde los gases a altas temperaturas provocan la volatilización de los hidrocarburos. Los vapores son quemados o colectados. Normalmente la cámara de venteo es rotada o agitada para proporcionar un buen contacto entre las partículas del suelo y los gases calientes. Los vapores de la cámara de venteo son pasados a través de una flama, un convertidor catalítico o un filtro de carbono. La elección del sistema de tratamiento depende del tipo de unidad fija o móvil.¹⁴

La ventaja de este método es que proporciona un medio relativamente simple para la limpieza de sitios fuertemente contaminados. El tiempo de tratamiento es corto y los suelos tratado pueden utilizarse como material de relleno. La desventaja es que los costos son comparativamente altos y son requeridos equipos especializados que no son ampliamente disponibles.

Existen diferentes tipos de unidades LTTS, incluyendo unidades móviles. Algunos problemas que limitan el uso del sistema LTTS incluyen los siguientes:¹⁴

- Los suelos con alto contenido de metales pueden dañar los convertidores catalíticos.
- Los suelos con alto contenido de materia orgánica reducen la eficiencia del sistema.
- El sistema no es tan eficiente en presencia de suelos con grandes partículas, las cuales limitan el área superficial y la volatilización.
- La presencia de escombros grandes como bloques de concreto o asfalto pueden dañar el equipo.
- Los plásticos pueden dañar las cámaras de venteo.

El sistema LTTS es más conveniente en suelos ligeros puestos que se requiere una gran área superficial y un tamaño de partícula pequeño. Este sistema es más efectivo en el tratamiento de hidrocarburos ligeros.

Los suelos corrosivos con un pH fuera del intervalo de 5 a 11 son demasiados corrosivos para ser tratados con el sistema LTTS. Las arcillas y limos son generalmente muy grandes y al igual que los hidrocarburos pesados, los cuales no se volatilizan lo suficientemente rápido, son más eficientemente tratados por un sistema térmico de alta temperatura. Los suelos con un alto contenido de humedad y alta capacidad calorífica son tratado eficientemente por el sistema HTTT.¹⁴

La Tabla 6.15 presenta un resumen de los factores que más comúnmente influyen en la decisión de utilizar un sistema de venteo térmico de suelos a bajas temperaturas.

Tabla 6.15 Factores que deben ser considerados en la evaluación del sistema de venteo térmico de suelos a bajas temperaturas

Tipo de suelo	Grava Si	Arena/limo Si	Arcilla Quizá ^a
Tipo de contaminante	Gasolina Si ^b	Diesel Si	Aceite No
Extensión de la contaminación	Confinado Si	Moderada Si	Dispersa Quizá ^c
Fase de la contaminación	Gasolina libre No ^b	Adsorbida Si	Disuelta No
Contenido de humedad del suelo	Alto No	Moderado Quizá	Bajo Si
Profundidad del agua subterránea	15 m ^d (50 ft) Si	9 m (30 ft) Quizá	3 m (10 ft) No
Costos de transportación	Bajo Si	Moderado Quizá	Alto No

Fuente: Cole G. Mattney, (1994).¹⁴

- a: El tamaño de partícula deber ser lo suficientemente pequeña para una buena volatilización.
- b: Son mas convenientes compuestos de bajos pesos moleculares e hidrocarburos mas volátiles
- c: Las condiciones específicas del sitio, los costos de equipo y transportación influyen fuertemente esta decisión.
- d: Las profundidades son arbitrarias. Las condiciones específicas del sitio puede hacer variar estos números.

El sistema de venteo térmico precalienta el suelo para volatilizar los compuestos orgánicos y posteriormente incinerarlos en un quemador secundario. Como regla general, el sistema LTTS es más efectivo en suelos ligeros contaminados con hidrocarburos ligeros. El método requiere un intimo contacto entre el aire caliente y las partículas del suelo. Las arcillas y los limos forman terrenos demasiado grandes para tratarse eficientemente con este sistema. Los hidrocarburos pesados, los

cuales no volatilizan lo suficientemente rápido, son mas convenientemente tratados por el sistema de tratamiento térmico a altas temperaturas.¹⁴

El sistema LTTS requiere un control más preciso de la temperatura, pero opera a bajas temperaturas. La temperatura varia dependiendo del tiempo de residencia del suelo en el incinerador, pero son normalmente abajo de 800 °C (1500 °F). El sistema LTTS se caracteriza por su bajo consumo de combustible. Las temperaturas de operación normalmente utilizadas son las siguientes:¹⁴

- Temperatura para venteo de suelo contaminados con hidrocarburos ligeros: 50 a 160 °C (120 a 320 °F).
- Temperatura para venteo de suelo contaminados con hidrocarburos pesados: 200 a 300 °C (390 a 570 °F).
- Temperaturas de incineración: 800 a 2, 000 °C (1, 500 a 3, 500 °F)

La unidad móvil de desorción térmica comercialmente disponible tiene una capacidad de 10 ton/hr para suelos con un contenido de humedad del 10 al 15%. El sistema tiene una alta efectividad para sitios Tipo 1 y 2 con una extensión de contaminación de mediana a grande. La unidad incluye una cámara principal la cual es operada a una temperatura adecuada para volatilizar los contaminantes orgánicos del suelo. Este concepto permite la operación de la unidad a temperaturas bajas en la cámara principal, con la consecuente baja utilización de combustible auxiliar. La unidad móvil puede ser operada con una cámara secundaria de combustión térmica o con un sistema de tratamiento fisico/químico de gas, el cual condensa el material orgánico volatilizado, recuperándolo y concentrándolo para su disposición final. El suelo requiere un pretatamiento para alcanzar un tamaño mediano de partícula.¹³⁴

Los sistemas térmicos a altas temperaturas son consideradas como tecnologías en desarrollo particularmente como una aplicación para suelos contaminados con petróleo. Sin embargo, los hornos de incineración rotatorios son utilizados casi rutinariamente donde existen instalaciones disponibles. Los sistemas HTTT son eficientes en tratar suelos que son difíciles de rehabilitar con otras alternativas de tratamiento.¹⁴

Existen diferentes tipos de incineradores disponibles incluyendo: hornos rotatorios, hornos de mezclado, hornos cementeros rotatorios, incineradores de lecho fluidizado. Los hornos rotatorios y los incineradores de lecho fluidizado están disponibles como unidades transportables.¹⁴

El sistema HTTT es más eficiente para suelos con contaminaciones ligeras o moderadas. El tratamiento de hidrocarburos ligeros como gasolina o gas avión, no es conveniente por la tecnología HTTT debido al alto riesgo de fuego y explosión. Las arcillas y limos, las cuales no son

generalmente tratados por otros métodos de forma eficiente, pueden ser tratados en hornos rotatorios. Algunos problemas que limitan el uso de los sistemas HTTT incluyen los siguientes:¹⁴

- Los suelos con alto contenido de metales (plomo, arsénico y plata) pueden dañar los convertidores catalíticos.
- Los suelos con alto contenido de materia orgánica reducen la eficiencia y aumentan los costos de operación del sistema.
- La presencia de escombros grandes como bloques de concreto o asfalto pueden dañar el equipo.
- Los plásticos pueden ensuciar las cámaras de venteo.

La Tabla 6.16 presenta un resumen de los factores que más comúnmente influyen en la decisión de utilizar un sistema de tratamiento térmico a altas temperaturas.

Tabla 6.16 Factores que deben ser considerados en la evaluación del sistema de tratamiento térmico a altas temperaturas

Tipo de suelo	Grava Si	Arena/limo Si	Arcilla Quizá ^a
Tipo de contaminante	Gasolina Si ^b	Diesel Si	Aceite No
Extensión de la contaminación	Confinado Si	Moderada Si	Dispersa Quizá ^c
Fase de la contaminación	Gasolina libre No ^b	Adsorbida Si	Disuelta No
Contenido de humedad del suelo	Alto No	Moderado Quizá	Bajo Si
Profundidad del agua subterránea	15 m ^d (50 ft) Si	9 m (30 ft) Quizá	3 m (10 ft) No
Costos de transportación	Bajo Si	Moderado Quizá	Alto No

Fuente: Cole G. Matney, (1994).¹⁴

- a: El tamaño de partícula deber ser lo suficientemente pequeña para una buena volatilización.
- b: Son mas convenientes compuestos de bajos pesos moleculares e hidrocarburos mas volátiles. Sin embargo, existe peligro de incendio/explosión con suelos altamente contaminados con gasolina.
- c: Las condiciones específicas del sitio, los costos de equipo y transportación influyen fuertemente esta decisión.
- d: Las profundidades son arbitrarias. Las condiciones específicas del sitio puede hacer variar estos números.

Los sistemas de tratamiento térmico móviles y transportables son frecuentemente utilizados como conceptos iguales. Sin embargo, un sistema de tratamiento térmico móvil es definido como un sistema adaptado a un camión. La instalación de este sistema en campo toma una semana y requiere un

minimo de preparativos. Un sistema de tratamiento térmico transportable es definido como un sistema adaptado a un camión y que para su instalación en campo se requiere mas de una semana e importantes preparativos.^{139,140}

La mayoría de las tecnologías de tratamiento propuestas para la rehabilitación de sitios contaminados son aplicables a sistemas transportables. Estas tecnologías deben ser transportadas con todos sus dispositivos de operación, incluyendo instalaciones para el laboratorio, estaciones para personal, etc. Estos sistemas pueden resultar en una caravana de 10 a 20 camiones, requiriendo de 2 a 3 meses para su instalación en campo.¹⁴¹

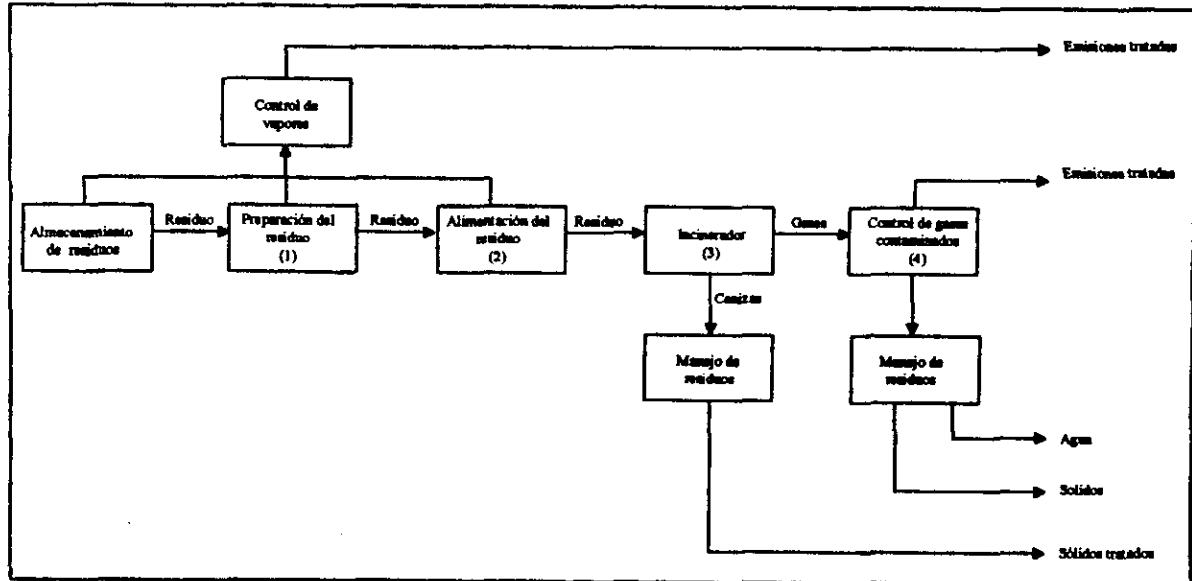
En general, los sistemas transportables de incineración deben contar con los siguientes componentes:

- Sistemas para el manejo y alimentación de los materiales
- Cámaras de reacción térmica
- Sistemas para la remoción y manejo de cenizas
- Cuarto y equipo para control de procesos
- Sistemas de control de emisiones
- Sistemas de combustible auxiliar
- Sistemas de tratamiento y almacenamiento de agua residual

Los componentes son diseñados en módulos que necesitan un mínimo de requerimientos para su ensamble y posterior operación en forma conjunta. Normalmente tienen un tamaño que permite ser transportados por camiones, trailers o semitrailers normales que reúnen los requerimientos federales y estatales concernientes a tamaño y peso. En general, los módulos no exceden los 18, 000 kg y no son mas grandes de 12 x 27 x 4 m. Los módulos pueden ser diseñados para poder ser operados sobre una base de concreto o bien sobre un vehículo de transporte sin requerir demasiados preparativos para su instalación.¹³⁹

La Figura 6.15 presenta un proceso de incineración móvil/transportable. La preparación de los residuos (1) incluye la excavación y/o el movimiento de los residuos al sitio de tratamiento. Dependiendo de los requerimientos de alimentación de residuos os dentro de la cámara de combustión del incinerador. Pueden ser utilizados diferentes equipos para lograr el tamaño de partícula adecuado. Los sistemas de alimentación (2) varían con el tipo de incinerador. El mecanismo de alimentación establece los requerimientos para la preparación de los materiales a incinerar y puede ocasionar muchos problemas durante la operación si no es cuidadosamente diseñado. Los diferentes diseños de incineradores (3) utilizan diferente mecanismos para obtener la temperatura a la cual el horno es operado, el tiempo durante el cual el material es sujeto a esa temperatura, y la turbulencia requerida para asegurar que todo el material combustible esté expuesto al oxígeno para asegurar una completa combustión.¹⁴

Figura 6.15 Proceso de incineración móvil/transportable



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, (1996).¹⁴⁰

Para el establecimiento de un plan de incineración es necesario conducir una investigación del sitio, así como obtener datos adicionales sobre los antecedentes, costos y tipos de los sistemas apropiados. La investigación del sitio debe establecer:¹³⁹

- La localización del sitio (rural, urbana)
- Geología/hidrogeología del área (nivel freático, acuíferos, suelo)
- Tipos de residuos peligrosos presentes (sólidos, líquidos, lodos, gases)
- Características de los residuos (corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos, inflamables o biológico-infecciosos)
- Composición química de los residuos
- Cantidad de residuos
- Extensión de la contaminación (área de impacto)
- Estructura del depósito(s) de los residuos peligrosos (tambores, lagunas, etc.)

Antecedentes importantes adicionales incluyen:¹³⁹

- Costos de transportación
- Costos de excavación (en el caso de acciones de rehabilitación)
- Tipo y extensión de la contaminación (en el caso de rehabilitación)

Si la incineración es el tratamiento preferido, necesitan ser incluidas consideraciones adicionales para que pueda ser especificado el incinerador correcto.¹³⁹

- Transportabilidad
- Funcionamiento
- Tipos de residuos
- Requerimientos de pretratamiento
- Eficiencia de destrucción térmica (DRE, por sus siglas en ingles)
- Eficiencia de combustión

Para fines de tratamiento térmico, los suelos pueden ser agrupados por la extensión y tipo de contaminación como:¹³⁹

- Extensión de la contaminación:
 - Pequeña (menos de 5 000 toneladas)
 - Mediana (entre 5 000 y 30 000 toneladas)
 - Grande (superior a las 30 000 toneladas)
- Tipos de suelo contaminado:
 - Tipo 1: Suelos con un contenido de humedad menor al 30% y contaminados ligeramente con compuestos orgánicos.
 - Tipo 2: Lodos con un contenido de humedad superior al 30% y contaminados ligeramente con compuestos orgánicos no biológicos.
 - Tipo 3: Sitios ligeramente contaminados con tambores de almacenamiento de residuos peligrosos.
 - Tipo 4: Sitios con suelos, lodos y tambores contaminados.

Los siguientes sistemas de tratamiento térmico, están disponibles comercialmente en equipos móviles y/o transportables:

- Hornos rotatorios.

Los sistemas de tratamiento térmico en hornos rotatorios transportables y móviles están disponibles para la limpieza de sitios contaminados. Estos sistemas tienen una capacidad de 1 a 5 ton/hr para suelos con un contenido de humedad de 10 a 15%. Estas unidades pueden ser utilizados en sitios del Tipo 1 al 4 con una extensión de contaminación de tamaño pequeño a mediano. Los hornos rotatorios pueden manejar diferentes tipos de residuos. En intervalos de capacidad de 4 a 5 ton/hr los hornos rotatorios disponibles son transportables no móviles. La capacidad de esas unidades es función del contenido de humedad. Una unidad que puede procesar 5 toneladas de suelo con un 15% de humedad en una hora, no será capaz de manejar 3.2 toneladas por hora de suelo con un 30% de humedad. Se requiere un pretatamiento del residuo y los suelos para la reducción del tamaño a grado medio.¹³⁹

- Hornos de tratamiento infrarrojo.

El horno eléctrico de tratamiento infrarrojo (IRCF, por sus siglas en ingles) es potencialmente el sistema más móvil de los sistemas disponibles actualmente. El IRCF tiene una capacidad de 4 a 8 ton/hr para suelo con un contenido de humedad del 10 al 15%. La capacidad del sistema IRCF es fuertemente afectada por el contenido de humedad y la capacidad calorífica del suelo. El sistema IRCF es efectivo en sitios Tipo 1 y 2 con un grado de contaminación de pequeña a mediana. La corrosión de las bandas metálicas de transportación es un serio problema con ciertos tipos de suelos contaminados con sales y compuestos orgánicos clorados. El sistema IRCF requiere una preparación del suelo a un tamaño de partícula de 2 a 2.54 cm.¹³⁹

- Lecho fluidizado.

Existen dos tipos de sistemas móviles/transportables de lechos fluidizados disponibles comercialmente., una unidad de lecho burbujeante y otra con lecho circular. La unidad de lecho burbujeante tiene una capacidad de cerca de 4 ton/hr para suelos con una humedad de 10 al 15%. Estas unidades son transportables y pueden ser utilizadas en sitios Tipo 1,2 y 4 con una extensión de contaminación mediana. Estos sistemas no deben ser utilizados en sitios Tipo 3 contaminados con tambores ya que se requiere preparar un sistema especial de alimentación de tambores a la cámara de combustión. El sistema de lecho fluidizado es un sistema muy eficiente. Sin embargo, los residuos que contengan sales de potasio y/o sodio pueden provocar que la cama tienda a desfluidizarse. El sistema de lecho fluidizado requiere que los residuos sean cuidadosamente pretratados para lograr un reducción de partículas y la remoción de metales que permita una conveniente fluidización del lecho.¹³⁹

- Sistema híbrido de tratamiento térmico.

El sistema de tratamiento térmico denominado HTTS, es el sistema transportable más grande disponible comercialmente. El sistema HTTS tiene una capacidad superior a las 20 ton/hr para suelo con un contenido de humedad del 10 al 15%. Es muy eficiente en sitios Tipo 1, 2, 3, 4 con una extensión de contaminación de mediana a grande. El sistema HTTS requiere de un pretratamiento de los residuos y el suelo para lograr una reducción del tamaño de partícula.¹³⁹

La mayor parte de los proyectos han sido evaluados con costos por tonelada de residuo incinerado. Para suelos contaminados ligeramente los costos son como sigue: en sitios pequeños en el intervalo de las 1000 toneladas los costos varían de US \$ 1,000 a 1,500 (\$^M/_N 8,000-12,000) por tonelada. Para sitios de tamaño mediano, el intervalo de costos es de US \$ 200 a 500 (\$^M/_N 1,600-4,000) por tonelada. Para sitios grandes, los costos van de US \$ 100 a 400 (\$^M/_N 800-3,200) por tonelada. Sin embargo, estas estimaciones dependen de la capacidad del equipo a ser utilizado.¹³⁹

- **Aplicabilidad de la Tecnología**

Los sistemas de tratamiento móviles/transportables han demostrado su efectividad en tratar suelos, sedimentos, lodos y líquidos que contienen principalmente contaminantes orgánicos como compuestos halogenados volátiles y semivolátiles, compuestos no halogenados volátiles y semivolátiles, PCBs, dioxinas/furanos, cianidas orgánicas y compuestos orgánicos corrosivos.¹⁴¹

El proceso es aplicable para el tratamiento térmico de un amplio rango de residuos peligrosos que incluyen pesticidas y herbicidas, fenoles clorados, benceno clorado, conservadores de la madera, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, residuos de la producción de compuestos orgánicos, residuos de la producción de pesticidas, residuos de la fabricación de explosivos y residuos del proceso de la refinación del petróleo.¹⁴¹

La efectividad del sistema de incineración móvil/transportable sobre un grupo general de contaminantes para varias matrices se muestra en la Tabla 6.17.

Tabla 6.17 Efectividad de la incineración sobre un grupo general de contaminantes para suelo, sedimentos, lodos y líquidos

Grupo de contaminantes	Efectividad		
	Suelo/Sedimento	Lodo	Líquido
Orgánicos			
Volátiles halogenados	☺	☺	☺
Semivolátiles halogenados	☺	☺	☺
Volátiles no halogenados	☺	☺	☺
Semivolátiles no halogenados	☺	☺	☺
PCBs	☺	☺	☺
Pesticidas (halogenados)	☺	☺	☺
Dioxinas/furanos	☺	☺	☺
Cianidas orgánicas	☺	☺	☺
Corrosivos orgánicos	☺	☺	☺
Inorgánicos			
Metales volátiles	⊗	⊗	⊗
Metales novolátiles	⊗	⊗	⊗
Asbestos	⊗	⊗	⊗
Material radioactivo	⊗	⊗	⊗
Corrosivos inorgánicos	⊗	⊗	⊗
Cianidas inorgánicas	☺	☺	☺
Reactivos			
Oxidantes	☺	☺	☺
Reductores	☺	☺	☺

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory, (1996).¹⁴¹

- ☺ Eficiencia demostrada
- ☺ Eficiencia potencial
- ⊗ Sin eficiencia

El proceso de desorción térmica a bajas temperaturas puede ser descrito como un sistema *ex situ* de extracción de vapor del suelo. Este proceso utiliza aire, calor o agitación mecánica para incrementar la transferencia de masa de los contaminantes a la fase gaseosa. Una vez en la fase gaseosa, los contaminantes puede ser tratados de una manera mas eficientemente por métodos térmicos o físicos. El proceso de desorción térmica a bajas temperaturas es utilizado especialmente para suelos contaminados.¹⁰⁴

El proceso puede ser efectivo para remover compuestos orgánicos volátiles de la matriz del suelo. La desorción térmica a bajas temperaturas es aplicable para los siguientes tipos de residuos.¹⁰⁴

- Compuestos alifáticos o compuestos aromáticos halogenados.
- Compuestos volátiles no halogenados.

- Compuestos semivolátiles no halogenados.

La efectividad del tratamiento térmico sobre contaminantes específicos se muestra en la Tabla 6.18

Tabla 6.18 Efectividad del tratamiento térmico sobre contaminantes específicos

Compuestos volátiles		
Acetonas	1,1-Dicloroetano	1,1,2-Tricloroetano
Benceno	1,2- Dicloroetano	Tolueno
Tetracloruro de carbono	1,1,1-Tricloroetano	Cloruro de Vinilo
Cloroformo	1,1,2,2-Tetracloroetano	trans-1,2-Dicloroetano
Compuestos semivolátiles		
Etilbenceno	Naftaleno	Xileno

Fuente: Grasso Domenic, (1993).¹⁰⁴

- **Ventajas y limitaciones de la tecnología**

De manera general la destrucción térmica ofrece las siguientes ventajas:¹⁰⁴

- Destrucción completa de los compuestos peligrosos.
- Reducción de peso y volumen de material.
- Cortos tiempos de residencia
- Control de la emisiones de descarga.
- Recuperación de calor.
- Posibilidad de operar en el sitio.
- Es aplicable para numerosos tipos de residuos

La destrucción térmica tiene las siguientes limitaciones:¹⁰⁴

- Algunos materiales no son incinerables.
- Genera algunos compuestos orgánicos tóxicos
- Requiere de altos costos de operación comparado con otras tecnologías.
- Se requiere personal altamente capacitado.
- Continuamente se requiere de combustible suplementario.
- Presenta un grado importante de oposición pública

En el caso específico de los hornos rotatorios, estos ofrecen las siguientes ventajas:¹⁰⁴

- Puede mantener un alto tiempo de residencia y mezclado de los residuos sólidos.
- Puede manejar una variedad de residuos incluyendo tambores y otros contenedores.

- La remoción de cenizas es continua y no interfiere con las operaciones.

Los hornos rotatorios de incineración tienen las siguientes limitaciones:¹⁰⁴

- Altos costos de instalación.
- Problemas con el mantenimiento de los sellos de los hornos.
- Los lodos acuosos pueden mojar y formar incrustaciones en las paredes refractarias.

Los incineradores de lecho fluidizado poseen un alto nivel de eficiencia y ofrecen las siguientes ventajas:¹⁰⁴

- Simples de diseño, pocas partes móviles y bajos costos de mantenimiento.
- Alta eficiencia de combustión.
- El lecho es térmicamente seguro, una vez apagado el sistema, el lecho pierde temperatura a razón de 10 °F por hora. Reiniciar las operaciones requieren poco tiempo de precalentamiento.
- No se requieren quemadores de los gases de emisión debido a los altos tiempos de residencia.

El sistema de lecho fluidizado presenta las siguientes desventajas:¹⁰⁴

- Altos costos de operación.
- La remoción de cenizas es difícil.
- Ciertos residuos pueden causar aglomeraciones en el lecho.
- Altas emisiones de partículas comparadas con otros sistemas.
- El material a incinerar requiere ser homogeneizado antes de ser inyectado a la cámara de combustión.

• Situación actual de la tecnología

La incineración es la tecnología de tratamiento que ocupa el segundo lugar de preferencia para la rehabilitación de suelos, lodos y sedimentos dentro del *Programa Superfondo*. La ventaja principal de los sistemas de incineración es su capacidad de alcanzar estrictos niveles de limpieza para mezclas de residuos altamente contaminantes.⁸⁵

En el año de 1990 los sistemas de incineración utilizados fuera del sitio (*off-site*) y en el mismo sitio contaminado (*on-site*) representaron el 16 y 17% respectivamente del total de las tecnologías empleadas en los sitios del programa Superfund. En ese mismo año la desorción térmica, la cual es considerada dentro del grupo de las tecnologías innovadoras, representó un 5% al ser seleccionada en 17 ocasiones.⁸³

Para el año de 1991, la incineración *off-site* representaba el 17% y la incineración *on-site* el 13% del total de las tecnologías empleadas ese año en los sitios del Superfund al ser seleccionadas en 85 y 65 ocasiones. Para ese mismo año la utilización del sistema de desorción térmica se había incrementado a un 6%.⁸⁴

Durante el año de 1994, el sistema de incineración *off-site* fue seleccionado en 78 ocasiones para representar un 17% del total de las tecnologías. Por otro lado y en ese mismo año la incineración *on-site* represento el 15% al ser seleccionada en 107 ocasiones; mientras tanto, la desorción térmica paso a ocupar el segundo lugar de preferencia entre las tecnologías de innovación utilizadas en el Superfund al ser seleccionadas en 51 ocasiones lo que represento el 7% del total de las tecnologías empleadas en ese año.⁸⁵

En el siguiente cuadro se ilustra un poco el panorama internacional, mostrando el número de plantas de incineración para residuos en funcionamiento en algunos países.¹⁴²

Tabla 6.19 Panorama internacional: Procesos de incineración

Pais	Población millones de habitantes	Numero de plantas de tratamiento térmico	Cantidad tratada de residuos mton/año
Suecia	8.6	23	1.8
Dinamarca	5.2	38	1.7
Alemania	61.2	47	9.2
Holanda	14.9	12	2.8
Francia	55.8	170	7.6
España	39.8	22	0.7
Italia	57.6	94	2.7
Gran Bretaña	57.1	34	1.3
Hungría	10.6	1	0.3
Estados Unidos	248.3	168	28.6
Japón	123.2	1893	32
Canadá	23.1	17	1.7

Fuente: Aduna B. Ma. de Lourdes, (1995).¹⁴²

6.5.4 Solidificación/Estabilización

- **Resumen**

Originalmente desarrollada en los años cincuenta, la solidificación/estabilización (S/S, por sus siglas en inglés), ha sido más recientemente utilizada para tratar residuos industriales, peligrosos y radiactivos.¹⁰⁴ La principal razón de estabilizar y/o solidificar los residuos fue la necesidad de producir un material sólido que cumpliera con los requerimientos del Departamento de Transportes de los Estados Unidos (DOT, por sus siglas en inglés), de que se convirtieran a una forma sólida antes de embarcarse. Por lo que, se trabajó en desarrollar materiales sólidos que fueran apropiados para la contención de residuos radioactivos a largo plazo. Los principales objetivos que los materiales solidificados deben cumplir son:¹⁴³

- a) Cubrir los residuos de una forma tal, que no se presentaran escurrimientos.
- b) No ser degradable.
- c) Reducir la posibilidad de exposición a la radiación.
- d) Ser fácil de producir y barato.

Los materiales empleados para cumplir los requerimientos anteriores han sido: cemento, material bituminoso, resinas de urea-formaldehído ó vidrio.¹⁴³

En la literatura, varios términos son usados para describir los procesos de estabilización/solidificación de los residuos peligrosos, y el significado de esos términos continuamente no está muy claro.¹⁴⁴ La US EPA ha definido estabilización y solidificación como:²⁶

- **Estabilización:** Se refiere a las técnicas que reducen el grado de peligrosidad potencial de los residuos mediante la transformación de los contaminantes a sus formas menos solubles. La naturaleza física y la características de manejo de los residuos no necesariamente cambian con la estabilización.
- **Solidificación:** se refiere a las técnicas que encapsulan el residuo en un monolito sólido de alta integridad estructural. La encapsulación puede ser de partículas finas (microencapsulación) o de un bloque o recipiente de residuos (macroencapsulación). La solidificación no necesariamente envuelve la interacción química entre los residuos y los agentes solidificantes; sin embargo, pueden unirse mecánicamente a los residuos dentro del monolito.

Las técnicas de estabilización y solidificación pueden ser utilizadas solas o combinadas con otros tratamientos y métodos de disposición. El objetivo principal es convertir los residuos tóxicos en una

masa físicamente estable, inerte, que tenga baja lixiviabilidad y con suficiente resistencia mecánica que permita su disposición de forma segura.¹⁴⁵

- **Descripción de la tecnología**

Los procesos de estabilización/solidificación a diferencia de muchas tecnologías, no destruye los contaminantes. El principal objetivo de esta clase de tratamientos es eliminar la peligrosidad de los residuos, para que puedan ser manejados como residuos no peligrosos, mejorando las características físicas y de manejo del residuo, disminuyendo el área superficial a través de la cual los contaminantes pueden transferirse o lixiviar y limitando la solubilidad o reduciendo la toxicidad de los constituyentes peligrosos.^{104,145}

La estabilización/solidificación es una tecnología donde los residuos tóxicos son mezclados con materiales solidificantes, capturando o fijando los residuos dentro de una estructura sólida. Si bien los términos de solidificación y estabilización son normalmente intercambiados, estos representan diferentes conceptos para el control de los residuos peligrosos.¹⁴⁵ La tecnología ha sido aplicada en la rehabilitación de sitios contaminados con residuos peligrosos y el tratamiento de residuos provenientes de otros sistemas de tratamiento.¹⁴⁶

- Estabilización (fijación química): se refiere a las técnicas concebidas para modificar los desechos de forma química, ya sea transformándolos o inmovilizándolos, para formar compuestos insolubles que atrapan a los elementos o compuestos tóxicos. Es importante distinguir entre estabilización química y estabilización física:^{144,145}
 - Estabilización química: sugiere la inmovilización de los residuos tóxico por medio de una reacción química, para formar compuestos insolubles dentro de una estructura cristalina estable.
 - Estabilización física: envuelve el mezclado de lodo o residuo semilíquido con un agente aglutinante con el fin de producir sólidos de granulación gruesa, de consistencia parecida al suelo, los cuales pueden ser transportados fácilmente por medio de camiones o furgones hasta el sitio de disposición.
- Solidificación: concierne a las técnicas que cambian las características físicas del desecho para producir una estructura sólida de tipo monolítico, a partir de un desecho líquido y genera un producto con mejores características físicas e integridad estructural al atrapar mecánicamente los contaminantes. Esto permita que el material pueda ser transportado y manejado fácilmente. Esta estructura modificada también reduce significativamente la posibilidad de lixiviación al reducir la movilidad y el área superficial expuesta del desecho, minimizando la posibilidad de contaminación del agua subterránea y superficial. Aún así, una vez realizada la estabilización/solidificación, el

producto debe pasar entre otras pruebas, por la de lixiviación a fin de ser declarado como desecho no peligroso y de que pueda ser dispuesto en un relleno sanitario.^{144,145}

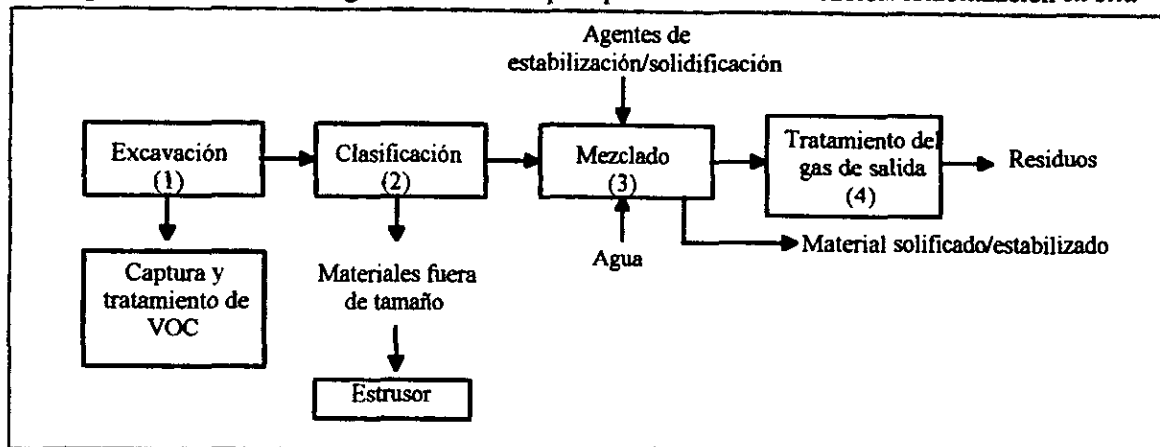
- Encapsulación: es el proceso que involucra el completo revestimiento de partículas tóxicas o del residuo aglomerado con una nueva sustancia, por ejemplo, el agente aglutinante o aditivo para la estabilización/solidificación. La Microencapsulación es la encapsulación de partículas individuales. La Macroencapsulación es la encapsulación de una aglomeración de partículas de residuo o materiales microencapsulados.^{143,146}

Para cumplir con el objetivo de disponer los contaminantes como no reactivos e inmovilizarlos, la matriz debe poseer buenas características de estabilidad dimensional, de resistencia a los ciclos de congelación-descongelación, de permeabilidad, de tolerancia a las tensiones y de resistencia a la acción de agentes biológicos. El cemento Portland es el endurecedor más utilizado en tales procesos.

El mezclado de los residuos y los agentes S/S puede llevarse a cabo fuera del subsuelo en operaciones de alimentación continua o por lotes; o puede desarrollarse dentro del subsuelo (*in situ*) en una operación de alimentación continua. Durante las operaciones *in situ*, los agentes S/S son inyectados al subsuelo por medio de barrenas y mezclados con el suelo y los contaminantes a profundidades de 9 a 30 m.¹⁴⁷

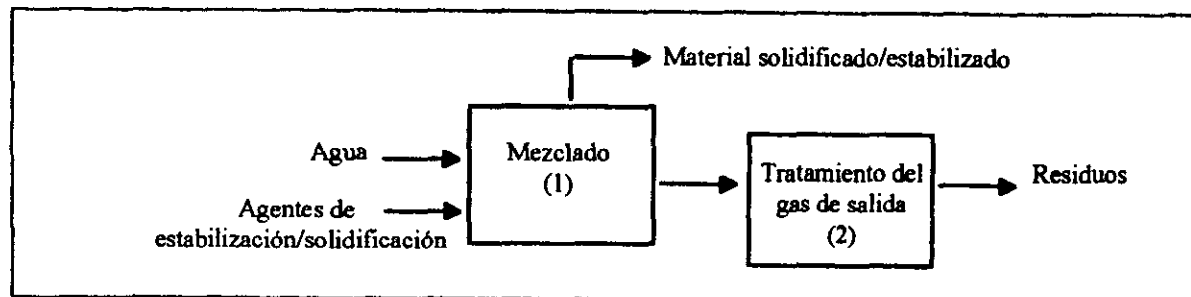
Las Figuras 6.16 y 6.17 ilustran los elementos genéricos y típicos de los procesos de solidificación/estabilización *in situ* y *ex situ* respectivamente. El proceso *ex situ* incluye: (1) un proceso de excavación para remover los contaminantes del subsuelo, (2) clasificación para eliminar los materiales fuera de tamaño, (3) mezclado y (4) tratamiento de los gases de salida. El proceso *in situ* tiene solo dos pasos: (1) mezclado y (2) tratamiento de los gases de salida.¹⁴⁷

Figura 6.16 Elementos genéricos de un típico proceso de solidificación/estabilización *ex situ*



Fuente: Fink Larry and Wahl George, (1996).¹⁴⁷

Figura 6.17 Elementos genéricos de un típico proceso de solidificación/estabilización *in situ*



Fuente: Fink Larry and Wahl George, (1996).¹⁴⁷

Ambos procesos requieren de equipos que permitan el correcto mezclado de agua, residuos y agentes S/S. El proceso *ex situ* requiere un sistema para depositar los residuos tratados en moldes o trincheras superficiales.¹⁴⁷

Los costos estimados para el tratamiento de residuos con el sistema de estabilización/solidificación son de US \$ 50-250 (\$^M/_N 400-2,000) por tonelada. Los costos son altamente variables debido a las variaciones del sitio, suelo y características de los contaminantes que afectan el desarrollo de los procesos S/S.¹⁴⁷

Los procesos de estabilización/solidificación se clasifican, de acuerdo:¹⁴³

- Al aditivo ó aglutinante principal que se añade al desecho, de la siguiente manera :
 - A. Técnicas que utilizan cemento como base
 - B. Técnicas que utilizan cal como base
 - C. Proceso de encapsulación termoplástica
 - D. Técnicas que utilizan un polímero orgánico como base
- El mecanismo de contención o aglutinación del contaminante.
 - E. Sorción
 - F. Reacciones puzolánicas
 - G. Reacciones de cemento Portland-Puzolana
 - H. Microencapsulación Termoplástica
 - I. Macroencapsulación
- Tipos de procesos.
 - J. Procesos en tambor
 - K. Procesos en planta
 - L. Procesos en planta móvil

M. Procesos *in situ*

Los sistemas de aglutinación se subdividen a su vez en dos amplias categorías: orgánicos e inorgánicos. La mayoría de los sistemas de aglutinación inorgánicos que se emplean incluyen varias combinaciones de cementos hidráulicos, cal, puzolanas, yeso y silicatos. Los aglutinantes orgánicos que se utilizan son epóxidos, poliéster, asfalto, poliolefinas y urea-formaldehído. También se usan combinaciones de ambas categorías, entre los que se encuentran la tierra de diatomácea con cemento y poliestireno; poliuretano y cemento; geles con silicato y cemento con cal.¹⁴³

El conocimiento que se tenga de estos agentes aglutinantes es un factor importante para la evaluación y selección de una tecnología. De esta manera se obtiene información sobre los requerimientos del proceso, el pretratamiento del residuo, las interacciones residuo-aglutinante y el comportamiento de los productos esperados.¹⁴³

Dentro de las diversas tecnologías que se aplican en el tratamiento de residuos peligrosos se encuentran los procesos de solidificación/estabilización, y dentro de ellas se pueden agrupar los sistemas de:¹⁴⁵

- Solidificación a través de la adición de cemento
- Solidificación a través de la adición de cal y/o materiales puzolánicos
- Encapsulación termoplástica
- Microencapsulación termofija
- Macroencapsulación
- Elaboración de un producto cementoso
- Vitricación
- Procesos poliméricos de solidificación

Las dos primeros métodos son los más comúnmente utilizados, son apropiados para la gran mayoría de los residuos inorgánicos. Los costos de tratamiento para el resto de los procesos es generalmente alto y son reservados para residuos problemáticos como los residuos radiactivos o aquellos con alto contenido orgánico.¹⁴⁵

- **Procesos basados en la adición de cemento.**

En esta técnica los desechos se mezclan con cemento Portland, junto con aditivos-ceniza muy fina y/o agua u otro agregado y se ajusta el pH con algún ácido; para formar una masa monolítica muy parecida a la roca. Los aditivos se usan para mejorar las características físicas y disminuir las pérdidas por escurrimientos provenientes del residuo solidificado resultante.¹⁴⁵

El mecanismo de estabilización es la formación de productos de hidratación de los compuestos de silicato y agua. Se forma un gel de hidrato de silicato de calcio. A continuación se hincha este gel y forma la matriz de cemento, compuesta de fibrillas entrelazadas de silicato y productos de hidratación. El agua se remueve durante la hidratación del cemento Portland. El éxito de ésta tecnología se debe a la reducción de la relación área superficial - volumen y a un decremento en la permeabilidad de la masa de lodo.

Los desechos que se pueden tratar son: metales pesados como Cu, Cr, Ni, Pb, Zn y sólidos orgánicos como plásticos y resinas.

Las ventajas de este proceso son los bajos costos, la sencillez, ya que puede realizarse *in situ* y que genera un sólido de alta resistencia. Las desventajas en cambio, son que puede estar sujeto a lixiviado y pueden existir interferencias con otros compuestos como boratos y sulfatos.¹⁴⁵

- Procesos basados en la adición de cal y materiales puzolánicos.

La cal y los materiales puzolánicos en combinación, producen matrices cementosas que atrapan química y físicamente al residuo. Las puzolanas se definen como aquellos materiales, que aunque no son cementosos, contienen constituyentes que se combinarán con cal a temperatura ordinaria en presencia de agua, para formar compuestos insolubles que poseen propiedades cementosas. De esta manera, el agua se remueve durante la hidratación del concreto cal - puzolana.

Se pueden utilizar materiales naturales y artificiales, incluyendo polvo volcánico y ceniza, así como arcillas cocidas y mortero quemado. Las puzolanas más comúnmente utilizadas en los procesos de fijación química son la ceniza muy fina y el polvo de horno de cocción de cemento, ambos son residuos por sí mismos así que el proceso presenta la ventaja de co-disposición.

Este método consiste en mezclar los desechos con cal Ca(OH)_2 y silicatos para formar un sólido. Así se pueden tratar las cenizas y las escorias provenientes de hornos, el polvo de hornos de cemento y los metales pesados como Pb, Ar y Zn.

Es un proceso barato y relativamente sencillo, aconsejable para desechos (cenizas) de las plantas de energía eléctrica. Los problemas que presenta es el aumento de volumen del desecho y que depende de la formación de compuestos como silicatos de calcio e hidratos de aluminio.¹⁴⁵

- Encapsulación Termoplástica.

Los materiales termoplásticos son plásticos orgánicos capaces de reblandecer y endurecer con el calentamiento y enfriamiento. Son generalmente lineales con muy pocos enlaces cruzados, si los hay; ya sea que se hinchen apreciablemente o que sean solubles en solventes orgánicos. Estos

materiales incluyen el asfalto, betún, polietileno, polipropileno y nylon. Los que se utilizan más son el asfalto y el betún.

Mediante este método, el desecho es secado ó deshidratado hasta obtener un alto contenido de sólidos y después se mezcla con el polímero a temperatura elevada, generalmente 100°C. Algunos procesos utilizan suspensiones líquidas y las mezclan con los materiales termoplásticos, mientras se incrementa la temperatura para evaporar el exceso de agua. El proceso emplea operaciones de mezclado tipo batch ó continuo, pero evidentemente consume gran cantidad de energía.

Ciertos materiales como el azufre, se incorporan en la matriz de encapsulación para mejorar la resistencia física y la integridad estructural. Las mezclas azufre/asfalto que contienen más del 60% de azufre, pueden ofrecer una técnica más efectiva en costo, sujeta a la disponibilidad de grandes cantidades de azufre a bajo costo, proveniente de fuentes secundarias como depósitos de residuos de gas, refinerías de petróleo y del procesamiento del carbón de piedra

Sirve para tratar metales pesados, por ejemplo Pb, Cd, Cu, Ni ó As y es aconsejable para materiales radiactivos. Entre las ventajas que presenta se encuentra que no incrementa su volumen como en los procesos de cal ó cemento y produce un material de muy baja lixiviación. Entre las desventajas destaca la alta inversión de equipos, los elevados costos de energía y que no es aplicable a disolventes, grasas y sales.

- **Microencapsulación termofija.**

Los termofijos son materiales que se vuelven sólidos y se endurecen cuando se calientan. Permanecen sólidos aún después de ciclos subsecuentes de calentamiento y enfriamiento. Los procesos de Microencapsulación involucran la polimerización en situ, colocando un recubrimiento impermeable alrededor de las partículas de residuo. Los monómeros orgánicos se mezclan completamente con el residuo y se adiciona un promotor catalizador para iniciar la polimerización, aplicando un mezclado continuo hasta que el catalizador se haya dispersado. La mezcla se transfiere a otro contenedor y se deja endurecer en él. El material polimérico por lo general no se combina químicamente con el residuo ; se forma una masa esponjosa que atrapa a las partículas de residuo mientras se permite que el líquido escape. La masa polimérica se puede secar antes de disponerla, pero frecuentemente se entierra sin que se seque el interior de los contenedores.

Los principales tipos de polímeros orgánicos que se emplean para el tratamiento de residuos, son los procesos con urea-formaldehído, poliéster y polibutadieno ; el fenol-formaldehído y las resinas epóxicas se usan en menor extensión.

La presencia de enlaces cruzados está influenciada por parámetros como el pH, el contenido de agua y los constituyentes iónicos en las corrientes de alimentación. El polímero endurecido de enlace cruzado que se produce es estable al calor y soluble a solventes orgánicos.

Los desechos que se pueden tratar en este proceso son halogenuros, sulfatos, desechos ácidos y materiales radiactivos.

Algunas desventajas de éste proceso son que los contaminantes no se encuentran químicamente unidos, requiere de equipo especializado, además de que algunas resinas se descomponen con el tiempo. Algunos catalizadores son corrosivos y no es aplicable a compuestos orgánicos como plásticos, aceites y disolventes.^{145,143}

- **Macroencapsulación.**

La macroencapsulación consiste básicamente en el confinamiento de materiales residuales, que se hayan tratado o no previamente, mediante un recubrimiento inerte e impermeable. Por lo general, se considera para los residuos que se deban contener, que la pared del contenedor se corroerá y subsecuentemente se consumirá hasta exhibir las características de la carga que sostiene. Por lo que, se puede reforzar el contenedor por medio de una chaqueta que soporte dicha carga. En un proceso, el reactivo empleado es una mezcla de fibra de vidrio, resinas termofijas reforzadas y resinas de poliuretano a base de agua. Esta mezcla se esparce sobre la pared del contenedor para proveer una chaqueta exterior flexible, que proteja a la carga del lixiviado y de la fuerza mecánica.

También se debe aclarar que una de las técnicas simples de macroencapsulación, involucra el uso de cemento Portland ordinario, típicamente empleado cuando se van a disponer residuos de laboratorio como botellas de productos químicos, etc. El material una vez contenido en empaques, se transfiere a un tambor de acero y se llenan los intersticios con una solución de cemento Portland ordinario. El cemento endurecido encierra a los productos químicos y nuevamente se coloca dentro del tambor que soportó la carga original. El contenedor se puede disponer en un relleno sanitario.

En general, la macroencapsulación involucra el uso de un proceso de estabilización/solidificación que microencapsule el contaminante; para compensar la posibilidad de que éste no quede completamente aislado, se procede a macroencapsular la matriz que lo contiene.^{145,143}

- **Vitrificación.**

El tratamiento de vitrificación térmica es usado para inmovilizar los componentes peligrosos de los residuos y transformar el comportamiento químico y físico del mismo. La destrucción de los

residuos peligrosos es logrado en una cámara de reacción a altas temperaturas y sin oxígeno (termólisis) que permite reducir los compuestos a sus estados elementales o moléculas reducidas como CO, H₂ y carbón.

Durante el proceso los contaminantes elementales se funden junto con la masa vítrea (silicosa). Los productos inorgánicos obtenidos son muy poco solubles. La desventaja es que no permite el reuso o reciclado, como en el caso de la producción de ladrillos.

Se puede realizar este proceso *in situ*, insertando cuatro electrodos en el suelo a la profundidad deseada. Se coloca una mezcla de grafito y vidrio conductores entre los electrodos, para que el calor generado por la corriente entre los mismos, permita la formación del vidrio. El grafito es consumido por oxidación durante el proceso y la corriente es transferida al suelo fundido que se transforma en material conductor. Los compuestos orgánicos se termolizan transformándose en gases combustibles ligeros que migran a la superficie donde son quemados en presencia de oxígeno. Los materiales inorgánicos quedan formando parte del vidrio ya sea disueltos o simplemente encapsulados. Cuando la corriente eléctrica cesa, el vidrio se solidifica y los gases se captan mediante una cámara de extracción, para su posterior tratamiento.

Cabe hacer mención que con estos sistemas *in situ* se elimina la posibilidad de contaminar los acuíferos, pero se destruye el suelo que es un material invaluable que tarda miles de años en formarse y que es vital. Estos procesos se aplican por lo general a residuos que son radiactivos y/o otros extremadamente peligrosos.¹⁴⁵

Para el caso de residuos radiactivos, se aplican aquellos clasificados como de alto nivel, es decir, aquellos residuos líquidos o productos solidificados, asociados con el primer ciclo de extracción por solventes o su equivalente en una instalación que procese combustibles irradiados del reactor, por ejemplo, los residuos que permanecen como producto final después de separar el uranio no utilizado (no fisionado) del reactor. El vidrio de boro silicato es la forma preferida en la mayoría de los programas que emplea ésta técnica. Requiere de relativamente bajas temperaturas de formación, alta retención de especies volátiles durante el procesamiento y poca cantidad de lixiviados.¹⁴³

- **Aplicabilidad de la Tecnología**

Una amplia variedad de residuos han sido tratados por los procesos de estabilización/solidificación incluyendo rebabas metálicas, residuos ácidos provenientes de las industrias de cromado y fundición, lodos de plantas de tratamiento de agua, lodos provenientes de las industrias de alimentos. Los datos disponibles señalan que los procesos de solidificación son más favorables para los residuos inorgánicos, especialmente aquellos que contienen cationes. Los

procesos de encapsulación son más eficientes para tratar residuos orgánicos e inorgánicos aniónicos.¹⁴⁵ La Tabla 6.20 presenta la aplicación de los procesos de estabilización/solidificación sobre diferentes tipos de residuos.

Tabla 6.20 Aplicación de las tecnologías de estabilización/solidificación

Método	Tipo de residuo ^a	Estado físico del residuo	
Adición de cemento	1 • 2 • 3 • 4 • 5	Sólido	Líquido
Adición de cal	1 • 2 • 3 • 4 • 5	Sólido	Líquido
Microencapsulación termoplástica	1 • 2 • 5	Sólido	Líquido
Microencapsulación termofija	1 • 2 • 5	Sólido	Líquido
Macroencapsulación	1 • 2 • 3 • 4 • 6	Sólido	Líquido
Productos cementosos	1 • 2 • 3 • 4 • 5	Sólido	Líquido
Vitrificación	5 ^b	Sólido	Líquido
Sorbentes	1 • 2 • 3 • 4 • 5		Líquido
Inyección en pozos profundos	1 • 2 • 3 • 4 • 5 • 6 • 7		Líquido

Fuente: Becerril Josefina, Navarrete Eugenia, (1993)¹⁴⁵

a:

- 1: Producto químico orgánico sin metales pesados
- 2: Producto químico inorgánico con metales pesados
- 3: Producto químico inorgánico sin metales pesados
- 4: Producto químico orgánico con metales pesados
- 5: Radiológico
- 6: Biológico
- 7: Flamable
- 8: Explosivo

b: Residuos de toxicidad extremadamente alta

Tabla 6.21 Compatibilidad de algunas clases de residuos con las diferentes técnicas de estabilización/solidificación

Componente del residuo	Proceso basado en cemento	Proceso basado en cal	Encapsulación termoplástica	Microencapsulación termofija	Macroencapsulación
Compuestos orgánicos					
Solventes orgánicos y aceites	Dificultades para el fraguado, puede escapar como vapor	Dificultades para el fraguado, puede escapar como vapor	Los compuestos orgánicos pueden evaporarse con el calentamiento	Puede retardar el fraguado del polímero	Se debe absorber primero en una matriz sólida
Compuestos orgánicos sólidos: plásticos, resinas, etc.	Buena, generalmente incrementa su estabilidad	Buena, generalmente incrementa su estabilidad	Posible empleo como agente aglutinante	Puede retardar el fraguado del polímero	Compatible, muchos materiales de encapsulación son plásticos
Compuestos inorgánicos					
Residuos ácidos	El cemento neutraliza los ácidos	Compatible	Puede neutralizarse antes de su incorporación	Compatible	Puede neutralizarse antes de su incorporación
Oxidantes	Compatible	Compatible	Puede originar fuego que destruya la matriz	Puede originar fuego que destruya la matriz	Puede deteriorar los materiales de encapsulación
Sulfatos	Retarda el fraguado y origina fracturas si no se utiliza cemento especial	Compatible	Puede deshidratarse y rehidratarse causando cuarteaduras	Compatible	Compatible
Haluros	Los lixiviados del cemento pueden retardar el fraguado	Puede retardar el fraguado, lixivia fácilmente	Se puede deshidratar	Compatible	Compatible
Metales pesados	Compatible	Compatible	Compatible	El pH ácido solubiliza a los hidróxidos metálicos	Compatible
Materiales radioactivos	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible

Fuente: Becerril, Josefina, Nevenrete Etc., (1993).¹⁰

- **Ventajas y limitaciones de la tecnología**

A continuación se presentan algunas de las ventajas y limitaciones de las diferentes tecnologías utilizadas en los procesos de estabilización/solidificación.¹⁴³

- **Técnicas basadas en la adición de cemento.**

- **Ventajas:**

- Los aditivos están disponibles a un precio razonable.
- Están bien establecidas las técnicas de mezclado y manejo de cemento.
- Se puede conseguir fácilmente el equipo de procesamiento necesario.
- Las técnicas toleran razonablemente algunas variaciones químicas en los lodos.
- La resistencia y la permeabilidad del producto final puede variar al controlar la cantidad de cemento que se adiciona al proceso.

- **Desventajas:**

- Las mezclas de cemento-residuo poco resistentes, son con frecuencia vulnerables a las soluciones ácidas de lixiviado. Las condiciones extremas pueden originar la descomposición del material fijo, provocando un escurrimiento acelerado de los contaminantes.
- Se requiere de alguna(s) etapa(s) de pretratamiento, tipos de cementos más caros o aditivos costosos para la estabilización de residuos que contienen impurezas, que afectan el fraguado y curado del cemento.
- El cemento y otros aditivos aumentan considerablemente el peso y volumen de los lodos.

- **Técnicas basadas en la adición de cal.**

- **Ventajas:**

- Generalmente los aditivos son muy baratos y fácilmente disponibles.
- El equipo requerido para el procesamiento es simple de operar y fácil de conseguir.
- La química de las reacciones puzolánicas está relativamente bien establecida.

- **Desventajas:**

- La cal y otros aditivos adicionan peso y volumen al lodo residual.
- Los lodos estabilizados son vulnerables a soluciones ácidas y a los problemas de curación y fraguado, asociados con la presencia de contaminantes inorgánicos.

- Encapsulación termoplástica

- Ventajas:

- Los niveles de migración de contaminantes para las técnicas de fijación termoplásticas, son menores que para la mayoría de las demás.
- Son primordialmente resistentes a las soluciones más acuosas.
- Los materiales termoplásticos se adhieren bien a los materiales incorporados.

- Desventajas:

- Necesitan por lo general equipo costoso y el trabajo personal experimentado.
- Se debe tener cuidado al procesar lodos que contengan contaminantes que se puedan volatilizar a bajas temperaturas.
- Los materiales termoplásticos son inflamables.
- Los lodos húmedos se deben secar antes de que se puedan mezclar con el material termoplástico.
- Existen ciertas limitaciones acerca de los tipos de contaminantes que se pueden procesar con los procesos termoplásticos. Los solventes orgánicos y varios compuestos inorgánicos, originan un deterioro lento del producto.
- La naturaleza plástica de las mezclas termoplástico-lodo, requiere del uso de contenedores para el transporte y disposición de material.

- Microencapsulación termofija.

- Ventajas:

- Únicamente se requieren pequeñas cantidades de aditivos para lograr que la mezcla se fije.
- Estas técnicas se pueden aplicar a lodos húmedos o secos.
- La mezcla de residuo-polímero orgánico presenta una densidad menor, en comparación con otras técnicas de fijación.

- Desventajas:

- El proceso sólo produce una matriz de resina negligente, en la cual se encuentran atrapados los contaminantes.
- Algunos polímeros orgánicos son biodegradables.
- El producto final se coloca generalmente en un contenedor antes de disponerlo.

- Macroencapsulación.

- Ventajas:

- Los lodos estabilizados por este procesos, se aíslan totalmente de los alrededores y por lo tanto, se pueden contener los contaminantes que sean muy solubles.

- Como los materiales revestidos son resistentes y químicamente inertes, generalmente no se requiere de un contenedor secundario.
- Desventajas:
 - Los materiales empleados en los procesos son caros.
 - Las técnicas requieren de equipo especializado y de tratamiento térmico para formar las chaquetas.
 - Se debe secar el lodo antes de que se pueda aplicar el proceso.

- **Situación actual de la tecnología**

Los procesos de estabilización/solidificación son los procesos más frecuentemente seleccionados como alternativas de tratamiento para sitios contaminados del *Programa Superfondo*. Relativamente muy pocas tecnologías han sido seleccionadas para rehabilitar sitios contaminados con residuos que contengan metales. En la actualidad los procesos de estabilización/solidificación se encaminan a ser la tecnología mas viable para este tipo de residuos. En algunos casos los procesos de S/S han sido seleccionados para tratar sitios contaminados con compuestos orgánicos, principalmente semivolátiles.⁸⁵

En el año de 1990 las tecnologías de S/S fueron seleccionadas en 86 ocasiones como una de las alternativas de tratamiento para sitios contaminados del *Programa Superfondo*, esta cifra representó el 24% del total de los procesos utilizados en ese año.⁸³

Para el año de 1991 los procesos de S/S fueron seleccionados en 128 ocasiones para representar el 26% del total de las tecnologías empleadas en los sitios del *Superfondo*.⁸⁴

En 1994 la utilización de las técnicas de S/S represento el 29% del total de las tecnologías, al ser seleccionadas en 202 ocasiones como una de las alternativas a utilizar en la rehabilitación de sitios contaminados.⁸⁵

CAPITULO VII

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y REHABILITACIÓN DE SUELOS Y ACUÍFEROS CONTAMINADOS CON HIDROCARBUROS EN MÉXICO

Entre los principales problemas ambientales que México afronta, el generado por la contaminación de suelos y acuíferos con hidrocarburos es de suma importancia ya que este se refleja directamente en la modificación de ecosistemas y constituye un peligro para la salud del ser humano.

La contaminación del suelo y el agua subterránea por hidrocarburos, se debe principalmente a fugas en contenedores, derrames accidentales, ubicación, construcción y operación inadecuada de rellenos sanitarios, descargas de aguas residuales en canales, ríos y suelos y la aplicación indiscriminada de agroquímicos. Es lógico pensar que las zonas de mayor riesgo de contaminación por hidrocarburos son las zonas cercanas a complejos petroquímicos y zonas industriales. Sin embargo, la producción nacional y la introducción al mercado de innumerables productos de uso muy extendido, tales como, desengrasantes, limpiadores, removedores de pinturas, solventes para ceras y grasas, pesticidas, etc., ha hecho que el problema se haya extendido hacia otras zonas de México. A pesar de la gravedad de esta problemática, actualmente en México existe poca experiencia para evaluación y saneamiento de sitios contaminados. Sumado a esto, México no cuenta además con una normatividad clara en materia de protección y conservación del suelo y subsuelo. Por otro lado, Petróleos Mexicanos, la Comisión Federal de Electricidad, Ferrocarriles Nacionales de México y la Comisión Nacional del Agua, en vinculación con instituciones académicas como la Universidad Nacional Autónoma de México, son instituciones que se han preocupado en años recientes por establecer estudios y proyectos que permitan evaluar el grado de contaminación de suelos y subsuelos, así como su posible saneamiento. Sin embargo, al establecer estrategias de rehabilitación se han tenido que consultar metodologías y procedimientos tanto para la evaluación de suelos y acuíferos contaminados como para la selección de alternativas de rehabilitación que cita la bibliografía internacional sin tomar en cuenta, que en muchas ocasiones, estas no son aplicables a la realidad mexicana.

El objetivo de este capítulo es presentar una propuesta acerca de los lineamientos que deben de seguirse en la evaluación y saneamiento de suelos y acuíferos contaminados por hidrocarburos en México.

7.1 Evaluación del sitio contaminado

7.1.1 Caracterización del lugar

Para la caracterización del sitio es recomendable realizar primeramente un estudio de gabinete, para lo cual es necesario contar con la máxima información posible acerca de la geología (regional y local): descripción de la estructura geológica, clasificación del tipo de suelo y subsuelo (composición de los mismos), identificación y descripción del área sísmica donde se localiza la zona afectada, descripción de la topografía del entorno, la hidrología: región hidrológica, cuerpos de agua existentes en el área, longitud o área del (los) cuerpo (s) de agua, volumen (es) promedio anual, así como gastos hidrométricos, afluentes, influentes y principales corrientes subterráneas, nombre (s) común (es) de los cuerpos de agua, corrientes superficiales y sub-superficial (es), geohidrología local: profundidad del nivel freático, dirección del flujo de la corriente subterránea y conductividad hidráulica, climatología y meteorología: tipo de clima, temperaturas, precipitación pluvial promedio anual y vientos dominantes, plano regional indicando la localización de la zona afectada, acceso y vías de comunicación de la zona a asentamientos humanos, colindancias con predios aledaños a la misma, ubicación de los pozos existentes y su caudal de extracción, y el tipo de utilización del suelo en las áreas circundantes a la zona afectada; flora y fauna: tipos de vegetación, especies dominantes, diversidad; localización de las instalaciones, los procesos de producción, tipos de productos, materias primas, ubicación de instalaciones de almacenamiento y tuberías superficiales y subterráneas (tanques y ductos), historial sobre todos los accidentes ocurridos en el interior de las instalaciones, aspectos socioeconómicos: población, servicios, empleos, plan de zonificación, tipo de economía del lugar o de la zona de influencia, etc.

El análisis de esta información permite conocer principalmente las características geohidrológicas del sitio así como, las características físicas y químicas de los contaminantes y con esto, elaborar un primer diagnóstico de la contaminación, pronosticar de manera general la migración de los contaminantes hacia el acuífero y predecir el efecto sobre la población aledaña.

7.1.2 Visita de prospección

Las actividades de prospección se realizan a fin de constatar toda la información recopilada en el estudio de gabinete, reconocer físicamente la zona e instalaciones, identificar las causas de la contaminación, cerrar las fuentes contaminantes y algo muy importante; proporcionar una evaluación de la magnitud de la contaminación. Una vez que se han realizado los trabajos de reconocimiento del sitio y basados en la información recabada tanto en el estudio de gabinete como en la visita de prospección, se elabora una estrategia de muestreo apropiada.

7.1.3 Muestreo

La operación de muestreo es quizá la parte más importante dentro de las actividades de caracterización y evaluación de la contaminación de un sitio. El muestreo proporciona la información necesaria para poder realizar un diagnóstico de la contaminación.

La información recopilada en el estudio de gabinete y la visita de prospección sirven de base para definir el tipo de muestreo, el número y ubicación de puntos de muestreo y monitoreo, y la definición de los parámetros a considerar.

La selección del tipo de sondeo y muestreo ya sea de vapores, agua, suelo o contaminante líquido, depende principalmente del tipo de suelo y subsuelo afectado; y de la naturaleza y extensión de la contaminación. Es óptimo iniciar con un muestreo de vapores con el objetivo de delimitar las áreas de mayor contaminación y entonces definir los puntos de muestreo para suelo y agua. El número de puntos de muestreo debe ser suficiente para lograr establecer la extensión de la contaminación, así como las zonas principales de migración horizontal; sin embargo, el costo se eleva considerablemente a mayor número de puntos de muestreo y análisis, por lo que estos deben ser los mínimos necesarios.

Uno de los factores más importantes en el diseño del muestreo es la ubicación de los puntos para muestrear, ya sea vapores, agua o suelo. Los factores a considerar son los siguientes:

- seleccionar los puntos a partir del sitio de generación de la contaminación, si éste se desconoce, o si son muy variados; se considera seccionar y en cada una se inicia a partir del punto donde se presuponga el sitio más contaminado.
- La selección debe realizarse con base en la dirección del flujo del agua subterránea; si el nivel estático está a gran profundidad, debe considerarse la pendiente del terreno cuando se trate de derrames superficiales ya que la contaminación escurrirá por el terreno y posteriormente se infiltrará verticalmente por la zona no saturada.
- Debe considerarse la instalación de al menos un punto de muestreo gradiente hidráulico arriba de la zona más contaminada o de la fuente de contaminación, a fin de que sirva como un punto testigo para compararlo con la zona contaminada.
- En ciertos casos se emplea una retícula y los puntos de muestreo se ubican equidistantes. Esto sin embargo, puede resultar de costos muy elevados.

Los parámetros que de forma general se requieren para caracterizar suelos e hidrogeología son:

- estratigrafía del sitio,
- permeabilidad y porosidad,
- profundidad del nivel freático,
- tipo y profundidad del acuífero subyacente,

Cuando se conoce la causa de la contaminación, se buscan específicamente los compuestos correspondientes y la magnitud se puede expresar a través de un parámetro indicador, que corresponda al contaminante que se encuentre en mayor proporción o que es el más peligroso. En el caso de las gasolinas se cuantifican los hidrocarburos monoaromáticos totales como BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) o cada uno de ellos por separado, algunos eligen solamente el benceno por ser el más tóxico. Para gasolinas y diesel también se cuantifican los HTP, para el caso del diesel se puede cuantificar algunos de sus hidrocarburos polinucleoaromáticos (HPNA) como naftaleno, antraceno o fenantreno que son también muy tóxicos. Si se desconoce la causa de la contaminación o son muchas mezclas de contaminantes, la concentración de contaminantes se puede evaluar de manera global como hidrocarburos totales del petróleo (HTP). Debido a que México tampoco cuenta con métodos analíticos oficiales para determinar la concentración de contaminantes, se acostumbra recurrir a los establecidos por otras instituciones oficiales extranjeras. Los más comunes son los métodos EPA y los ASTM.

7.1.4 Diagnostico

El análisis de la información proporcionada por el muestreo, permite elaborar un diagnostico de la magnitud del área y profundidad de la contaminación, así como las zonas de mayor afectación.

7.2 Establecimiento de los objetivos de limpieza

Una vez que se ha evaluado la contaminación de un sitio se deben establecer los niveles de limpieza, es decir, la concentración máxima de contaminantes que se aceptará en el suelo, subsuelo y agua subterránea después de haber sido sometido a un tratamiento de rehabilitación.

Las dos principales enfoques que se han utilizado para el establecimiento de los criterios de limpieza son: el enfoque *por criterios*, que recomienda el uso de criterios preestablecidos definidos en función de diferentes parámetros; y el enfoque *caso por caso*, que consiste en la evaluación de cada sitio mediante el análisis de los riesgos específicos.

Sin embargo y debido a que México no cuenta con lineamientos ambientales que permitan establecer los objetivos de limpieza por cualquiera de estas dos metodologías, se ha acostumbrado tomar como referencia los niveles de limpieza utilizados en programas de rehabilitación en el extranjero, principalmente en Estados Unidos y Canadá, sin tomar en cuenta que en muchos casos, no son aplicables a las condiciones ambientales, socioeconómicas y de salud de México.

La metodología propuesta por el Instituto Nacional de Ecología en su anteproyecto de Norma Mexicana denominada *Restauración de suelos contaminados: metodología para la determinación de criterios de limpieza en base a riesgos*,⁷⁶ es una buena alternativa para el establecimiento de los objetivos de limpieza, ya que permite analizar cada caso particular de contaminación y sus posibles efectos adversos en el ambiente y seres humano. Sin embargo, es necesario considerar que actualmente las instituciones de México carecen en la mayor parte, de datos estadísticos que permitan evaluar aspectos socioeconómicos y de salud pública de la población mexicana, lo que provoca que en ocasiones, los resultados obtenidos a partir de estudios de evaluación de riesgo no sean cien por ciento confiables.

Es muy importante tener en cuenta el riesgo a la salud y por otro lado el efecto adverso al ambiente; en ocasiones por las características hidrogeológicas del sitio puede existir poca afectación al ambiente y el riesgo a la salud puede caer dentro de los niveles de aceptación y en esos casos no se justifica un programa de rehabilitación.

Aparentemente en México se ha difundido muy poco la utilización de los estudios de riesgo para el establecimiento de los objetivos de limpieza, es por esto, que es conveniente profundizar en el conocimiento de este tipo de metodología para entender la forma en que se establecen los límites permisibles. Sin embargo, es necesario establecer criterios bajo los cuales dichos datos sean considerados como guías, y no necesariamente metas, para el saneamiento de sitios contaminados.

7.3 Selección de la tecnología de rehabilitación para suelo y acuífero contaminado

La selección de la tecnología más adecuada para la rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados con hidrocarburos, requiere entre otras cosas del conocimiento previo de las características geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas del sitio, así como del nivel de contaminación y de los niveles de limpieza que se deben satisfacer de acuerdo con la normatividad y con los resultados del análisis de riesgo a la salud. Por lo anterior, no existen alternativas de tratamiento que puedan ser consideradas como efectivas en todos los casos y situaciones de contaminación.

Existen diversas tecnologías que se han utilizado exitosamente en los programas de rehabilitación de Estados Unidos, Canadá y Europa. Sin embargo, debe tomarse en consideración que no todas las

técnicas son aplicables a todos los casos. Es necesario analizar independientemente caso por caso, y realizar estudios de prefactibilidad a nivel laboratorio y de ser posible pruebas de evaluación nivel de campo.

Por lo general, la selección del concepto de rehabilitación más adecuado, utiliza la siguiente metodología:

- Caracterización de la situación inicial
- Pre-evaluación
- Evaluación específica de la contaminación.
- Determinación de los objetivos de limpieza
- Propuesta y clasificación de las alternativas viables de limpieza
- Consideraciones económicas
- Selección de la tecnología de rehabilitación más adecuada

En general pero sin hablar de certificación, las técnicas más aprobadas en la literatura son:

- Venteo y extracción de vapor.
- Solidificación/estabilización.
- Flujo y lavado de suelo con soluciones surfactantes.
- Biorremediación.
- Bombeo y tratamiento (extracción del agua subterránea y tratamiento).

La Tabla 7.1 presenta una descripción de las tecnologías de rehabilitación comúnmente utilizadas en los programas de limpieza de sitios contaminados.

Es importante señalar que en países del tercer mundo como México, donde no es posible destinar grandes recursos económicos para el saneamiento de sitios contaminados, resulta imperativo estimular y desarrollar proyectos de investigación que reditúen el involucramiento de sistemas utilizados en países desarrollados y su posible adecuación a las condiciones de México. Es necesario además, contar con una política ambiental clara y completa en materia de protección y conservación de suelo y subsuelo.

Tabla 7.1 Descripción de las tecnologías de rehabilitación comúnmente utilizadas en los programas de limpieza de sitios contaminados

<p>Alternativa de rehabilitación:</p>	<p>Sistema de extracción por vapor</p>
<p>Aplicabilidad:</p>	<p>Compuestos volátiles con valores dimensionales de la constante de la Ley de Henry mayores de 0.01 o una presión de vapor mayor de 0.5 mm Hg (0.021 plg Hg). El grupo principal de contaminantes que remueve son VOCs y algunos combustibles; Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno, Naftaleno, Percloroetileno, Tricloroetileno, Tricloroetano, Butanos, Pentanos, Hexanos, gasolinas, contaminantes de mezclas de residuos como hidrocarburos clorados, alcoholes incluyendo: metanol, etanol y propanol. El sistema no remueve hidrocarburos pesados, diesel, metales, PCBs o dioxinas.</p>
<p>Ventajas y limitaciones:</p>	<p>Es aplicable solo en suelos porosos con conductividades hidráulicas $>10^{-3}$ cm/s, crea un mínimo de perturbación en el sitio contaminado. Puede ser utilizada en combinación con otras tecnologías de tratamiento. Es posible eliminar contaminantes de la zona vadosa reduciendo el riesgo de una potencial migración hacia el nivel freático. Los factores que pueden limitar la aplicabilidad del proceso incluyen; suelos compactados o con un alto contenido de humedad ($>50\%$), suelos con grandes variaciones en la permeabilidad, en suelos con un alto contenido orgánico o excesivamente húmedos se obtienen bajos niveles de remoción de contaminantes, las emisiones de vapor, los líquidos residuales y el carbón activado usado pueden requerir tratamiento y/o disposición, suelos con temperaturas $<10^{\circ}\text{C}$ no son eficientemente rehabilitados.</p>
<p>Tiempo promedio de la rehabilitación:</p>	<p>De varias semanas a un par de años</p>
<p>Costos estimados:</p>	<p>Los costos del sistema son específicos para cada sitio, dependiendo del tamaño del sitio, la hidrogeología local y la naturaleza y el grado de contaminación. Los costos estimados tienen un intervalo de US \$ 10-50/m² (\$^M/N, 80-400/m²) de suelo tratado.</p>
<p>Alternativa de rehabilitación:</p>	<p>Lavado de suelo <i>en el sitio (in situ)</i></p>
<p>Aplicabilidad:</p>	<p>Efectiva en suelos permeables ($K >1.0 \times 10^{-3}$ cm/s). Suelos secos requieren inicialmente más líquido de lavado para movilizar los contaminantes. Es efectivo en suelos que contengan arenas gruesa y gravas contaminadas con una amplia mezcla de contaminantes orgánicos, inorgánicos y reactivos. Es efectivo en el tratamiento de suelos contaminados con pesticidas, PCBs, semivolátiles (bencenos clorados, hidrocarburos polinucleares), productos del petróleo (gasolina, gas-avión, aceites y grasas) solventes clorados (tricloroetano), solventes aromáticos (benceno, tolueno, xileno y etilbenceno), metales pesados (plomo, cobre, zinc); Sin embargo, la remoción de algunas de estas clases de contaminantes no está aun bien demostrada.</p>
<p>Ventajas y limitaciones:</p>	<p>Generalmente, los tiempos de rehabilitación son largos (uno o más años). Requiere control hidráulico para evitar el movimiento de los contaminantes fuera del sitio. La hidrogeología de algunos sitios puede hacer difícil o imposible la aplicación del sistema. No es aplicable en suelos con alto contenido de arcilla y limo. Mezclas complejas de contaminantes (como mezclas de metales, compuestos orgánicos no volátiles y volátiles) hacen difícil formular un fluido de extracción adecuado que remueva eficientemente los diferentes tipos de contaminantes.</p>
<p>Tiempo promedio de la rehabilitación:</p>	<p>De uno a más años</p>
<p>Costos estimados:</p>	<p>El costo promedio varía entre US \$ 50-120/yd³ (\$^M/N, 400-960).</p>

<p>Alternativa de rehabilitación: Biorremediación</p> <p>Aplicabilidad:</p>	<p>Es muy efectiva en suelos con un contenido de humedad del 50% y un intervalo de pH de 6 a 8. La temperatura adecuada para la degradación de los hidrocarburos es entre 15-30°C. Los compuestos que son considerados tratables por la biodegradación incluyen hidrocarburos (ejemplo: gasolina, diesel), solventes no clorados (ejemplo: acetona, alcohol), residuos provenientes del tratamiento de la madera (ejemplo: pentaclorofenol), algunos compuestos aromáticos clorados (ejemplo: clorobencenos), y algunos compuestos aromáticos clorados (ejemplo: tricloroetano y dicloroetano).</p> <p>Ventajas y limitaciones:</p> <p>Los contaminantes realmente son transformados y algunos completamente mineralizados, se utilizan microorganismos cuyo hábitat natural es el suelo, sin introducir compuestos potencialmente peligrosos; es una tecnología segura y económica, las bacterias mueren cuando los nutrientes se agotan, el suelo puede ser reutilizado. La biorremediación tiene las siguientes desventajas; los microorganismos pueden inhibirse por la presencia de compuestos tóxicos, no tiene éxito en suelos de baja permeabilidad, algunos aditivos pueden tener efecto adverso, requiere largos periodos de operación.</p> <p>Tiempo promedio de la rehabilitación:</p> <p>De meses a años</p> <p>Costos estimados:</p> <p>Para el sistema de biolabranza los costos del tratamiento convencional están dentro del rango de US \$ 50 a 80 (\$^M/_N 400 a 640) por yarda cubica de suelo tratado. Para sitios con volúmenes superiores a los 46 m³ de suelo contaminado con diesel, el costo es de US \$ 30 (\$^M/_N 240)/yd³. En general para sitios contaminados con petróleo que rebasen las 8 m³ los costos de tratamiento oscilan entre US \$ 30-50 (\$^M/_N 240-400)/yd³ de suelo tratado. Para el sistema de composteo los costos de tratamiento pueden variar de US \$ 20 a 120 (\$^M/_N 160-960) por tonelada húmeda de suelo.</p>
<p>Alternativa de rehabilitación: Lavado de suelo fuera del sitio (ex situ)</p> <p>Aplicabilidad:</p>	<p>Es eficaz para tratar sedimentos, lodos residuales, y tierra que contiene principalmente contaminantes orgánicos como PCBs, VOCs, solventes halogenados, preservadores de madera (pentaclorofenol y creosota), solventes orgánicos, cianidas, metales pesados (Arsénico, Cobre, Cadmio, Plomo, Cromo, Niquel), compuestos volátiles como 2,3,7,8 -tetraclorodibenzo-p-dioxin, xileno, pentaclorofenol, Fenol, 1,2 -dicloroetano, clorometano, compuestos semivolátiles como antraceno, trinitrobenceno, pireno, hidrocarburos aromáticos, naftaleno, hidrocarburos poliaromaticos y fenantreno. Esta técnica por lo general no se usan para extraer contaminantes inorgánicos, es decir ácidos, bases y sales; ya que estos materiales no se disuelven fácilmente en la mayoría de los solventes utilizados. El gran problema de la aplicación de los sistemas de lavado de suelo <i>ex situ</i> y la extracción con solventes es la amplia variabilidad de condiciones encontradas en la mayor parte de los sitios contaminados.</p> <p>Ventajas y limitaciones:</p> <p>Ofrece un sistema cerrado que minimiza la emisión de contaminantes a la atmósfera y la posibilidad de contaminar otros sitios, permite controlar las condiciones de tratamiento - como pH y temperatura -, existen unidades móviles que minimizan el riesgo de expandir la contaminación, tiene una favorable percepción para el público, es una tecnología relativamente de bajo costo, puede pretratar efectivamente suelos para su posterior biorremediación. Por otro lado, los contaminantes no son destruidos, las partículas finas (pasta de limo y arcilla) y los fluidos de lavado requieren un tratamiento secundario para poder alcanzar los niveles permisibles para su disposición o descarga, los lodos provenientes de los sistemas de tratamiento de agua deben ser tratados y las mezclas complejas de residuos hacen difícilosa la formulación del fluido de lavado.</p> <p>Tiempo promedio de la rehabilitación:</p> <p>Los tiempos de operación varían en función de la cantidad y concentración de los contaminantes, así como del tipo de suelo. El tiempo de operación puede variar de horas a días.</p> <p>Costos estimados:</p> <p>Los costos de operación varían entre US \$ 120-200 (\$^M/_N 960-1600)/ton.</p>

<p>Alternativa de rehabilitación: Control hidráulico y sistemas de bombeo y tratamiento</p>	<p>Es favorable para acuíferos contaminados con LNAPLs. La efectividad del uso de la tecnología de bombeo y tratamiento como tecnología única para la rehabilitación de un sitio es limitada. El sistema de bombeo y tratamiento puede mostrar inicialmente un decremento en la concentración de los contaminantes; sin embargo, los niveles se estabilizan por lo general en un punto por arriba de los objetivos de limpieza.</p>
<p>Ventajas y limitaciones:</p>	<p>Algunas ventajas que presentan los sistemas de intersección: se pueden utilizar para recuperar lixiviados de rellenos sanitarios, puede utilizarse para monitorear y recuperar contaminantes, produce mucho menos fluido para manejar que los sistemas de bombeo. Las desventajas que presenta este sistema son; cuando existen contaminantes disueltos puede ser necesario el monitoreo de agua subterránea gradientes abajo de la línea de recuperación, los sistemas abiertos requieren precauciones de seguridad para prevenir incendios y explosiones, el sistema de trincheras es menos eficiente que el sistema de extracción, los costos de operación y mantenimiento son altos. Las ventajas que presenta el sistema de bombeo y tratamiento son; es un medio eficiente y efectivo de asegurar el control de la contaminación del agua subterránea, puede ser instalado rápidamente, los pozos de monitoreo instalados previamente pueden ser algunas veces empleados como parte del sistema de pozos, algunas veces puede contemplarse la recarga del acuífero como parte de la estrategia, alta flexibilidad de los diseños y los costos de construcción pueden ser más bajos que las barreras artificiales. Las principales desventajas del sistema de bombeo y tratamiento es que es un sistema caro en su diseño, instalación y operación, y en todos los casos conocidos los sistemas deben mantenerse en operación por décadas antes de poder alcanzar los niveles de limpieza, los sistemas de bombeo usualmente requieren tratamiento del agua extraída en la superficie antes de la descarga, su aplicación en suelos finos es limitada, los costos de operación y mantenimiento son altos.</p>
<p>Tiempo promedio de la rehabilitación:</p>	<p>Varia de meses a años.</p>
<p>Costos estimados:</p>	<p>Los costos de operación varían entre US \$ 25-210 (\$^M/_N 200-1680)/m³</p>
<p>Alternativa de rehabilitación: Tratamiento térmico</p>	<p>Es eficiente en el tratamiento de suelos, sedimentos, lodos y líquidos contaminados principalmente con compuestos orgánicos como compuestos halogenados volátiles y semivolátiles, compuestos no halogenados volátiles y semivolátiles, PCBs, dioxinas/furanos, cianidas orgánicas, compuestos orgánicos corrosivos, pesticidas y herbicidas, fenoles clorados y conservadores de la madera.</p>
<p>Ventajas y limitaciones:</p>	<p>Destruye completamente los compuestos peligrosos, se emplean pocos tiempos de operación, se controlan las emisiones de descarga, existe la posibilidad de operar en el sitio y es aplicable para numerosos tipos de residuos. La destrucción térmica tiene las siguientes limitaciones; algunos materiales no son incinerables, genera algunos compuestos orgánicos tóxicos, requiere de altos costos de operación comparado con otras tecnologías, se requiere personal altamente capacitado, continuamente se requiere de combustible suplementario, presenta un grado importante de oposición pública.</p>
<p>Tiempo promedio de la rehabilitación:</p>	<p>Varia de meses a años.</p>
<p>Costos estimados:</p>	<p>Los costos de operación varían entre US \$ 100-1500 (\$^M/_N 800-12000)/ton</p>

<p>Alternativa de rehabilitación: Aplicabilidad:</p>	<p>Estabilización/solidificación Es aplicable a suelos contaminados con rebabas metálicas, residuos ácidos provenientes de las industrias de cromado y fundición, lodos de plantas de tratamiento de agua, lodos provenientes de las industrias de alimentos. Es más favorable para los residuos inorgánicos, especialmente aquellos que contienen cationes. Los procesos de encapsulación son más eficientes para tratar residuos orgánicos e inorgánicos aniónicos.</p>
<p>Ventajas y limitaciones:</p>	<p>Algunas de las ventajas; el proceso produce materiales revestidos resistentes y químicamente inertes un material inerte, por lo que generalmente no se requiere de un contenedor secundario los aditivos están disponibles a un precio razonable, las técnicas toleran razonablemente algunas variaciones químicas en los lodos. Algunas desventajas; se requiere de alguna(s) etapa(s) de pretratamiento, se utiliza equipo especializado, por lo general equipo costoso y el trabajo de personal experimentado, se debe tener cuidado al procesar lodos que contengan contaminantes que se puedan volatilizar a bajas temperaturas.</p>
<p>Tiempo promedio de la rehabilitación:</p>	<p>Varia de meses a años.</p>
<p>Costos estimados:</p>	<p>Los costos de operación varían entre US \$ 50-250 (\$^M/_N 400-2000)/ton</p>

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- México enfrenta actualmente el deterioro del subsuelo en muchos sitios. Entre los principales problemas ambientales, el generado por el manejo inadecuado de los residuos peligrosos y la consecuente contaminación de suelos y aguas subterráneas son de suma importancia, ya que esto se refleja directamente en la modificación de ecosistemas con la consecuente pérdida de biodiversidad así como un riesgo potencial para la salud del ser humano.
- Para analizar las estrategias de desarrollo a seguir en cada país es necesaria la evaluación objetiva de los riesgos que presentan las fuentes de energía. En la actualidad no existe fuente energética que no implique un costo ambiental. Los combustibles fósiles continúan siendo la principal fuente de energía utilizada en los procesos industriales. Es por tanto necesario tomar en cuenta el costo ambiental que la explotación de cada una de las fuentes de energía implica, al momento de diseñar una política de desarrollo sustentable. Es necesario recordar además, que el costo ambiental lleva implícito un costo sobre el bienestar humano.
- Las actividades de la industria petrolera, a nivel mundial, son consideradas como una de las más complejas debido a la diversidad de operaciones que implica su desarrollo. Derivado de esta diversidad de procesos, los residuos que genera presentan una gran variedad de características, desde las que no se consideran peligrosas para la salud y el ambiente, hasta las muy peligrosas. Esta situación la hace una de las industrias de más alto riesgo y potencialmente contaminadora.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX), ha sufrido un considerable retraso en materia de protección ambiental por lo que en la actualidad muchas de las actividades que realiza en materia de protección ambiental, se dirigen no sólo a la prevención de la contaminación sino también a su corrección. Sin embargo, hasta el momento no existen datos que revelen la realización de trabajos específicos de rehabilitación de sitios contaminados, ya que únicamente se tiene conocimiento de trabajos que este organismo ha desarrollado por medio de sus memorias de labores, los cuales presentan información muy general.
- Al igual que PEMEX, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Ferrocarriles Nacionales de México (FNM), manejan con una *ENORME* hermeticidad la información de carácter ambiental y de forma especial, la relacionada con la rehabilitación de sitios contaminados por lo que actualmente no se cuenta con estadísticas que permitan identificar claramente los trabajos realizados, así como los resultados obtenidos.

- En México existe poca experiencia para la atención de sitios contaminados por el manejo inadecuado, tanto de residuos, como de procesos industriales. Los lineamientos sobre procedimientos técnicos apropiados para la evaluación de riesgo de sitios potencialmente contaminados y las tecnologías para la descontaminación o el aislamiento de estos sitios se han iniciado hace muy poco tiempo. Además, las autoridades carecen de un sistema de información que sustente la toma de decisiones con respecto a la evaluación de riesgo ambiental y a la salud humana.
- Durante los años de 1995 y 1996 se llevó a cabo un proceso exhaustivo de revisión de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente con miras a establecer importantes reformas a este cuerpo legal. Sin embargo, hasta la fecha nuestro país no cuenta con una legislación clara en materia de suelo y subsuelo. En ningún reglamento ni Norma Oficial Mexicana se mencionan criterios para la evaluación de suelos contaminados. Por otro lado, la LGEEPA no ha instrumentado o especificado a través de Reglamentos o Normas Oficiales Mexicanas (NOM) los criterios para la evaluación de los suelos y aguas subterráneas contaminadas, mucho menos se cuenta con los niveles de limpieza para suelos y aguas subterráneas. Debido a esto las autoridades ambientales mexicanas han establecido procedimientos y límites de limpieza a partir de información extranjera, principalmente de los Estados Unidos de América, pero sin un criterio objetivo y uniforme para seleccionar la más adecuada a nuestro medio.
- México no cuenta con un programa central para el financiamiento gubernamental de reparación de sitios contaminados. La SEMARNAP ha creado un programa para solicitar contribuciones voluntarias de industrias para la limpieza de sitios abandonados con residuos peligrosos. Este programa establece que la SEMARNAP tendrá un papel de supervisión administrativa en acciones de limpieza, mientras que las industrias serán responsables de los contratistas y de llevar a cabo las actividades de reparación que fueran necesarias.
- En la legislación norteamericana existe desde 1965 la Ley sobre Disposición de Residuos Sólidos y desde 1970 la Ley de Recuperación de Recursos, las cuales se fusionaron en 1976 para formar la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos. El 8 de noviembre de 1984 la RCRA es ratificada por el Congreso de los Estados Unidos de América y transformada en la Reforma de los Residuos Sólidos y Peligrosos, incorporando importantes reformas y programas, entre otros, el Programa de Tanques de Almacenamiento Subterráneo como subtítulo I del RCRA.
- En el año de 1980 se emitió la Ley Global de Responsabilidad, Compensación y Respuesta al Medio Ambiente. Posteriormente, en 1986, La CERCLA es reformado en la Ley de Restauración y Reforma al *Superfondo* que proporciona fondos federales por 9000 millones de dólares para atender sitios donde no es posible identificar al contaminador o éste no tiene la capacidad

económica y técnica para limpiar el sitio. La CERCLA establece por otra parte, la Lista Nacional de Prioridades, la cual incluye los sitios más seriamente contaminados que sean candidatos para su limpieza y el Plan Nacional de Contingencias, que establece los procedimientos de cómo limpiar un sitio de la NPL y cualquier otro lugar contaminado.

- Para la toma de decisión de la tecnología de rehabilitación más adecuada, es necesario desarrollar una estrategia de investigación y trabajo que permita seleccionar la opción de tratamiento óptima de acuerdo con una serie de factores de decisión, impacto ambiental y análisis de costo-eficiencia. Los pasos básicos de esta metodología incluyen: Actividades preliminares, investigación de rehabilitación, estudio de factibilidad, diseño de la rehabilitación y acción de la rehabilitación.
- Las actividades preliminares comprenden la selección de un grupo multidisciplinario de trabajo, la recopilación, evaluación y análisis de la información existente y disponible, la definición y caracterización del problema, la formulación y la planeación del proyecto de rehabilitación del sitio. La investigación de la rehabilitación permite tener una mejor definición de las características particulares del problema y las posibles tecnologías de rehabilitación a desarrollar mediante la compilación e interpretación de los datos de la exploración de campo, las pruebas de laboratorio, y la realización de un análisis de riesgo para estimar las condiciones del sitio. El detalle y duración de la investigación de rehabilitación se determina en función de la urgencia del problema y de los recursos disponibles. El estudio de factibilidad tiene el objetivo de desarrollar y evaluar un conjunto de alternativas de tratamiento para seleccionar la más adecuada a las condiciones específicas del sitio sujeto a estudio.
- La decisión de la tecnología más adecuada para rehabilitar un suelo o un acuífero contaminado requiere del conocimiento previo de las características hidrogeológicas del sitio así como de las propiedades físicas y químicas de los compuestos que se desea remover. La realización de los estudios preliminares hasta la decisión de la alternativa final debe ser elaborada por un equipo multidisciplinario de trabajo.
- Una vez que se ha diagnosticado el estado de contaminación del suelo y del subsuelo, se deben plantear alternativas de tratamiento y establecer los objetivos de limpieza, lo que resulta ser problema crítico y controversial en la rehabilitación de sitios contaminados. En este último aspecto, varios criterios han sido desarrollados; sin embargo, hasta este momento el debate continúa sobre cuál o cuáles son los más apropiados.
- Existen dos escuelas principales para la selección de criterios de limpieza dependiendo de: el enfoque *por criterios*, que recomienda el uso de criterios preestablecidos definidos en función de diferentes parámetros. El enfoque *caso por caso*, que consiste en la evaluación de cada sitio mediante el análisis de los riesgos específicos. En países que no cuenten con lineamientos que

establezcan estos niveles de limpieza se puede seguir uno de estos caminos, o bien la combinación de ellos. Otra alternativa aplicada por países, que como México carecen de una normatividad clara en este renglón, es tomar como referencia normas extranjeras.

- Los Estados Unidos de Norteamérica no cuentan con un listado de normas único, los gobiernos estatales han establecido sus propios límites permisibles. Existe todavía mucha confusión respecto a los estándares de limpieza, esto debido en gran parte a que todavía no está bien definido el concepto "qué tan limpio es limpio".
- El tratamiento de sitios contaminados es un campo de la tecnología que se ha desarrollado y crecido en Estados Unidos, Canadá y Europa desde 1980, año en que el Congreso norteamericano aprobó la *Ley del Superfondo* para la limpieza de sitios contaminados. Ciertas técnicas establecidas, como la incineración y la solidificación/estabilización, son las que más se han usado para operaciones de limpieza con recursos del *Superfondo*. Sin embargo, para 1990, 40% de las técnicas de tratamiento que se estaban usando eran innovadoras. En 1991 de las 498 tecnologías que se utilizaron en los sitios del *Superfondo* 210 eran técnicas innovadoras lo que representa un 42%. En 1994 esa cifra llegó casi al 43%. Las técnicas de tratamiento innovadoras de uso más frecuente son el sistema de extracción por vapor, aspersión de aire, medidas biocorrectivas, desorción térmica, lavado de suelo *en el sitio (in situ)* y *fuera del sitio (ex situ)*, deshalogenación química.
- El Sistema de Extracción por Vapor es una tecnología de tratamiento *in situ*. Ha sido ampliamente utilizado para la rehabilitación de la zona vadosa o no saturada de sitios contaminados con compuestos orgánicos volátiles, orgánicos semivolátiles. El sistema SVE ha removido de forma eficiente: Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno, Naftaleno, Percloroetileno, Tricloroetileno, Tricloroetano, Butanos, Pentanos, Hexanos y gasolinas. El sistema SVE puede remover contaminantes de mezclas de residuos como hidrocarburos clorados, alcoholes incluyendo: metanol, etanol y propanol.
- El lavado de suelo *in situ* (soil flushing, SF) es un método de tratamiento o proceso de extracción innovador que involucra la liberación de agua o de soluciones surfactantes en el suelo a través de pozos de inyección o mecanismos de irrigación. La solución con la carga de contaminantes es bombeada por medio de pozos de recuperación para su tratamiento posterior. La solución tratada puede reciclarse al sistema. Este proceso se continúa aplicando hasta que la concentración de los contaminantes alcancen los límites permisibles. El lavado de suelo *in situ* es una tecnología más aplicable a compuestos orgánicos solubles y metales, que se encuentran distribuidos en áreas extensas en concentraciones bajas o medias.

- La biorremediación es un proceso que utiliza microorganismos o sus productos metabólicos para convertir sustancias complejas (substratos) a productos simples, normalmente reduciendo su toxicidad para el ambiente y la salud. Los procesos de biorremediación pueden ser ampliamente clasificados como tecnologías *fuera del sitio (ex situ)* y *en el sitio (in situ)*. Los compuestos orgánicos solubles son considerados particularmente tratables por las técnicas de biorremediación. Sin embargo, los compuestos relativamente insolubles pueden ser degradados si están presentes los microorganismos degradadores. Los compuestos que son considerados tratables por la biodegradación incluye hidrocarburos (ejemplo: gasolina, diesel), solventes no clorados (ejemplo: acetona, alcohol), residuos provenientes del tratamiento de la madera (ejemplo: pentaclorofenol), algunos compuestos aromáticos clorados (ejemplo: clorobenzenos), y algunos compuestos aromáticos clorados (ejemplo: tricloroetano y dicloroetano).
- El lavado de suelo *ex situ* y la extracción química son procesos mecánicos de reducción de volumen y remoción de contaminantes. Si bien frecuentemente son considerados los mismos, el lavado de suelo *ex situ* es un proceso de separación que usa agua como solvente, y la extracción química (para suelos contaminados) es un proceso que usa aditivos (como surfactantes o agentes quelantes). Estos procesos remueven y concentran los contaminantes reduciendo el volumen de suelo a tratar. El proceso puede ser aplicado en el tratamiento de suelos contaminados con residuos peligrosos incluyendo compuestos químicos preservadores de madera (pentaclorofenol y creosota), solventes orgánicos, cianidas, metales pesados, lodos provenientes de la fabricación de pinturas, residuos provenientes de la formulación y producción de plaguicidas y residuos del petróleo.
- El objetivo del control hidráulico de la contaminación en el agua subterránea consiste en alterar el régimen del flujo de agua subterránea para prevenir una descarga fuera del sitio de control, reducir el nivel de migración de la pluma de contaminación y remover los contaminantes o confinar la pluma de contaminación. Los sistemas de control hidráulico pueden incluir sistemas de intersección y/o sistemas de pozos de bombeo e inyección.
- Casi todas las actividades de rehabilitación de agua subterránea en sitios contaminados están basadas en su extracción por medio de pozos, drenes y trincheras normalmente acompañadas por un tratamiento previo a su disposición. El bombeo y tratamiento es más efectivo en situaciones donde la fuente de contaminación ha sido eliminada y para contaminantes con alta movilidad y solubilidad en agua. Esta tecnología no es favorable para sitios que presenten baja conductividad hidráulica, hidráulica o geología muy compleja y heterogénea, para contaminantes que son hidrofóbicos y adsorbidos al suelo y en presencia de NAPLs residual.
- La destrucción térmica es la destrucción controlada de los compuestos por oxidación térmica. Envuelve la exposición controlada de los residuos a altas temperaturas (normalmente 900 °C o

mas) y que son normalmente convertidos a dióxido de carbono, agua y otros productos de la combustión. Los procesos de destrucción térmica para suelos y lodos contaminados incluyen: incineradores de lecho fluidizado, hornos de incineración rotatorio, procesos industriales a altas temperaturas como hornos cementeros y hornos industriales, tratamiento térmico infrarrojo, sistemas de incineración pirolítica y oxidación térmica. La incineración en hornos rotatorios es el método más común de destrucción térmica de materiales contaminados.

- El tratamiento térmico por venteo a bajas temperaturas, LTTS, es un calentamiento del suelo a temperaturas suficientemente altas para volatilizar los hidrocarburos pero no lo suficientemente altas para provocar su ignición y combustión. El proceso de desorción térmica a bajas temperaturas puede ser descrito como un sistema *ex situ* de extracción de vapor del suelo y es utilizado especialmente para suelos contaminados con compuestos alifáticos o compuestos aromáticos halogenados, compuestos volátiles no halogenados y compuestos semivolátiles no halogenados.
- La solidificación/estabilización, ha sido más recientemente utilizada para tratar residuos industriales, peligrosos y radiactivos. Estabilización se refiere a las técnicas que reducen el grado de peligrosidad potencial de los residuos mediante la transformación de los contaminantes a sus formas menos solubles. La naturaleza física y la características de manejo de los residuos no necesariamente cambian con la estabilización. Solidificación: se refiere a las técnicas que encapsulan el residuo en un monolito sólido de alta integridad estructural. La encapsulación puede ser de partículas finas (microencapsulación) o de un bloque o recipiente de residuos (macroencapsulación). La solidificación no necesariamente envuelve la interacción química entre los residuos y los agentes solidificantes; sin embargo, pueden unirse mecánicamente a los residuos dentro del monolito.
- En base a la información presentada en este trabajo de investigación, se puede concluir que su objetivo principal de proporcionar una herramienta de consulta para la rehabilitación de suelos contaminados por hidrocarburos, de acuerdo con las posibilidades técnicas y económicas de México se ha cumplido.

7.1 Recomendaciones

- Es importante que organismos gubernamentales como PEMEX, CFE y FNM, cuenten con estadísticas ambientales confiables y de acceso público que permitan evaluar entre otras cosas, la situación actual de la contaminación de suelos y aguas subterráneas nacionales, las medidas de saneamiento establecidas, los recursos monetarios asignados a esas tareas y los resultados obtenidos.
- La legislación ambiental mexicana todavía presenta serios vacíos que es urgente cubrir. Es necesario el desarrollo de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que permitan el establecimiento de metodologías oficiales en las actividades de rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados. Así mismo, es importante la creación de un Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación del Suelo, que responda a las necesidades de solución de la problemática ambiental actual.
- Es necesario la especificación a través de Reglamentos o Normas Oficiales Mexicanas de los criterios de evaluación de suelos y acuíferos contaminados, así como, los criterios de limpieza para los mismos.
- Las autoridades ambientales requieren instrumentar mecanismos de financiamiento destinados a prevenir la contaminación y cubrir las actividades de rehabilitación de suelos y acuíferos contaminados.
- Es importante la elaboración de inventarios (censos) de sitios contaminados en el país que permitan conocer su ubicación geográfica, el grado de contaminación y las acciones de rehabilitación implementadas.
- Debido a que en México, existe poca experiencia en el saneamiento de sitios contaminados, resulta imperativo estimular y desarrollar proyectos de investigación que permitan el involucramiento de sistemas establecidos en países desarrollados y su posible adecuación a las condiciones de nuestro país.
- Si bien las actividades de rehabilitación de sitios contaminados en países desarrollados se iniciaron a principios de la década de los setenta, es necesario continuar con el desarrollo de tecnologías de rehabilitación más eficientes y menos costosas.

- Las autoridades ambientales requieren desarrollar, en el marco de un concepto integral de prevención y control de la contaminación, los instrumentos legales en materia de sitios contaminados
- Por lo que respecta a México hay varios aspectos que es necesario abordar de manera urgente, los cuales se citan a continuación: La creación de un Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación del Suelo y Subsuelo que responda a la Legislación Ambiental; La generación de los instrumentos regulatorios (Normas Oficiales Mexicanas) fundamentales para las acciones de rehabilitación de suelos, como son los límites permisibles de contaminantes que se convertirán en los niveles de limpieza para sitios contaminados y la metodología oficial para el seguimiento de las actividades de rehabilitación; La creación de programas de financiamiento destinados específicamente a prevenir y controlar la contaminación de suelo y subsuelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Muñoz B. Jorge, (1992). *Los Recursos Naturales y su Protección Jurídica en México*, en Universidad Nacional Autónoma de México/Petróleos Mexicanos. La Industria Petrolera ante la Regulación Jurídico-Ecológica en México. UNAM/PEMEX. México. Pp. 32.
2. Rangel A. José, Salgado L. Laura, Vázquez M. María, Vilchis J. Jesús y Zegarra M. Héctor, (1995). *Estudio de prefactibilidad para el establecimiento de BIO IN SITU S.A., una empresa de biorremediación de suelos contaminados por crudos*. Tesis de licenciatura para obtener el grado de Ing. Bioquímico. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. México. Pp. 7.
3. Lozada Javier, (1988). *Temple y Destello*. PEMEX. México. Pp. 19.
4. Vega G. Sylvia, (1992). *Petróleo, Medio Ambiente y Salud*, en Universidad Nacional Autónoma de México/Petróleos Mexicanos. La Industria Petrolera ante la Regulación Jurídico-Ecológica en México. UNAM/PEMEX. México. Pp. 90, 91.
5. Saval Bohórquez Susana, (1995). *Biorremediación de suelos contaminados*, en Universidad Nacional Autónoma de México/Petróleos Mexicanos. Pemex: Ambiente y Energía. Los retos del futuro. UNAM/PEMEX. México. Pp 93, 153, 154, 159, 160, 163, 164, 168, 169, 186.
6. Osorio Avril, Aguilar A. Humberto, (1992). *La industria petrolera en al ámbito internacional y el medio ambiente*, en Universidad Nacional Autónoma de México/Petróleos Mexicanos. La Industria Petrolera ante la Regulación Jurídico-Ecológica en México. UNAM/PEMEX. México. Pp. 216.
7. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno de México, (1997). *Planeación del Seminario Internacional Sobre Lineamientos Ambientales para la Restauración de Sitios Contaminados*. Instituto Nacional de Ecología. México. Pp. 1.
8. Secretaría de Energía. Gobierno de México, (1997). *Petróleos Mexicanos*. Internet home page: <http://www.energia.gob.mx/>
9. Quintanilla J., Bauer M., (1995). *Los grandes retos de PEMEX en materia ambiental*, en Universidad Nacional Autónoma de México/Petróleos Mexicanos. Pemex: Ambiente y Energía. Los retos del futuro. UNAM/PEMEX. México. Pp 213, 214.
10. Chang Y. David and López Irina, (1992). *Determination of keroseno and 2 Diesel by Purge and Trap versus extraction procedure* en Kostecki T. Paul and Calabrese J. Edward (eds.). Contaminated Soils. Diesel Fuel Contamination. Lewis Publishers. USA. Pp. 23.
11. Douglas G.S., McCarthy K.J., Dahlen D.T., Seavey J.A., Steinhever W.G., Prince R.C. and Elmendorf D.L., (1992). *The Use of Hydrocarbon Analysis for Environmental Assessment and Remediation* en Kostecki T. Paul and Calabrese J. Edward (eds.). Contaminated Soils. Diesel Fuel Contamination. Lewis Publishers. USA. Pp. 1.

12. Reisinger Jamaes H., (1995). *Hydrocarbon Bioremediation an overview*, en Reisinger Jamaes H., E. Robert, Kittel and A. Jeffrey. *Applied Bioremediation of Petroleum Hydrocarbons*. Battelle Press. USA. Pp 1-4.
13. Moctezuma Enriquez Lino, (1993) *Rehabilitacion de acuíferos*. Tesis de licenciatura para obtener el grado de Ingeniero Petrolero. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. México. Pp. 49.
14. Cole G. Mattney, (1994). *Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites*. CRC Press, Inc. USA. Pp. 19, 20, 23, 76-88, 173, 209, 210, 222-226, 243, 246-252.
15. Freeze Alain R. and Cherry A. John, (1979). *Grounwater*. Prentice Hall, Inc. USA. Pp. 444-447.
16. Salgado Celis Lourdes, (1988). *La Industria Petrolera en México. Una crónica: de los inicios a la expropiación*. Tomo I. Petróleos Mexicanos. México. Pp. 29, 87.
17. Argumosa López Rosalía, (1986). *La Contaminación Ambiental Producida por el Petróleo en el Sureste de México*. Tesis de licenciatura para obtener el grado de Licenciada en Derecho. Facultad de Derecho. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 55, 58, 65, 66, 69, 70-73, 96, 102.
18. Meyer Lorenzo, (1988). *México y Estados Unidos en el conflicto petrolero (1917-1942)*. Petróleos Mexicanos. México. Pp. 23, 24, 36.
19. Petróleos Mexicanos, (1996). *Memoria de Labores 1995*. PEMEX. México. Pp. 42, 60, 76, 289.
20. Silva Herzog Jesús, (1981). *La expropiación del petróleo 1936-1938*. Fondo de Cultura Económica. México. Pp. 31.
21. Villegas M. Gloria, Konzevik C. Adriana, Luna A. María, de Olloqui G. Guillermina y Villarreal M. Evangelina, (1988). *La industria petrolera en México. Cronologia 1857-1988*. Petróleos Mexicanos. México. Pp. 203.
22. Oil Bibliography Archive, (1996). *PEMEX, History of*. Internet home page: <http://menic.utexas.edu/menic/oil/biblio/1996/0150.html>.
23. Leos Chavez Héctor, (1993). *Origen y Naturaleza de la Modernización de Petróleos Mexicanos*. Programa Universitario de Energía. Universidad Nacional Autónoma de México. Pp. 11.
24. Petróleos Mexicanos, (1981). *Cinco años de realizaciones de la industria petrolera*. PEMEX. México. Pp. 22, 25, 30.
25. Petróleos Mexicanos, (1984). *El Petróleo*. PEMEX. México. Pp. 51.
26. Petróleos Mexicanos, (1979). *Zona petrolífera mezozoica del sureste*. PEMEX. México. Pp. 2.
27. Petróleos Mexicanos, (1984). *La sonda de Campeche Abkatún-Atasca*. PEMEX. México. Pp. 1.
28. Centro de Ecodesarrollo Nacional, (1981). *Petróleo y Ecodesarrollo*. Centro de Ecodesarrollo Nacional. México. Pp. 112.
29. Petróleos Mexicanos, (1992). *Memoria de Labores 1991*. PEMEX. México. Pp. 11, 22, 29.
30. Petróleos Mexicanos, (1993). *Memoria de Labores 1992*. PEMEX. México. Pp. 14, 23, 40.
31. Petróleos Mexicanos, (1994). *Memoria de Labores 1993*. PEMEX. México. Pp. 60.
32. Petróleos Mexicanos, (1995). *Memoria de Labores 1994*. PEMEX. México. Pp. 68.
33. Petróleos Mexicanos, (1997) *Memoria de Labores 1996*. PEMEX. México. Pp. 42, 58, 72, 78.

34. González R. Fernando, (1975). *El Problema Ferrocarrilero y la Compañía de los Ferrocarriles Nacionales de México*. Liga de Economistas Revolucionarios de la República Mexicana, A.C. México. Pp 29.
35. Ortiz Hernán Sergio, (1987). *Los Ferrocarriles de México. Una visión Social y Económica*. Ferrocarriles Nacionales de México. México. Pp. 233.
36. Shillie Gustavo, Vocal Ejecutivo del Comité de Protección Ambiental de FNM., (Mayo de 1997). *Comunicación verbal*. Ferrocarriles Nacionales. México.
37. Secretaría de Energía. Gobierno de México, (1997). *Comisión Federal de Electricidad*. Internet home page: <http://www.cfe.gob.mx/git/infohist.html>.
38. Comisión Federal de Electricidad, (1993). *Convenio CFE-SUTERM No. 40/93. Creación de la Gerencia de Protección Ambiental*. México. Pp. 2.
39. Juárez Najera M., (1996). *Estudios de la contaminación del suelo en plantas industriales en el marco de la auditoría ambiental*. Tesis para obtener el grado de Maestra en Ingeniería Ambiental. DEPI/UNAM. México. Pp. 19, 20.
40. Cancino Aguilar Miguel A., (1994). *El marco jurídico para la prevención y control de la contaminación atmosférica*, en Universidad Nacional Autónoma de México. Unidad Azcapotzalco Derecho Ambiental. México. Pp. 111.
41. González Aguirre Rosa L. y Quintero Ramírez Rodolfo, (1995). *La biotecnología ambiental en México*, en Instituto de Ingeniería. Memorias del Segundo Minisimposio Internacional sobre Remoción de Contaminantes de Agua y Suelos. UNAM. México, D.F. Pp. 29.
42. Cortinas de Nava Cristina y Vega Greason Sylvia, (1993). *Residuos peligrosos en el mundo y en México*. Serie Monografica No. 3. Secretaria de Desarrollo Social/Instituto Nacional de Ecología. Pp. 73.
43. Secretaría de Desarrollo Social. Gobierno de México, (1993). *Bases para una política nacional de residuos peligrosos*. SEDESOL. México. Pp. 2-4.
44. Comisión para la Cooperación Ambiental Canada-México-Estados Unidos, (1995). *Base de datos*. Internet home page: <http://cec.org/spanish/index.html>
45. González Villamil Myriam, (1994). *Marco legal del manejo de los residuos peligrosos, de las actividades altamente riesgosas y de la contaminación por ruido en Universidad Nacional Autónoma de México*. Unidad Azcapotzalco. Derecho Ambiental. México. Pp. 162.
46. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, (1994). *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos*. Décima edición. Ed. Porrúa, S.A., México. Pp. 196-228.
47. Díaz y Díaz Martín, (1995). *El régimen jurídico ambiental del subsuelo en México*, en Universidad Nacional Autónoma de México/Petróleos Mexicanos. Pemex: Ambiente y Energía. Los retos del futuro. UNAM/PEMEX. Pp. 53.
48. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos, (1995). *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. 22a. edición, Ediciones Delma. México.

49. Carmona Lara María, (1995). *Aspectos jurídicos de la auditoria ambiental en México*, en Universidad Nacional Autónoma de México/Petróleos Mexicanos. Pemex: Ambiente y Energía. Los retos del futuro. UNAM/PEMEX. Pp. 96.
50. Diario Reforma, (Enero 30 de 1997). *Informe Anual de Labores de la Semarnap: Julia Carabias*. México. Pp. 14A Sección Nacional.
51. Gasca González Soledad, (1994), *El ejercicio de los actos de auditoria en materia ambiental*, en Universidad Nacional Autónoma de México. Unidad Azcapotzalco Derecho Ambiental. México. Pp. 412.
52. Comisión Nacional del Agua. Gobierno de México, (1996). *Ley de Aguas Nacionales*. 2a. edición. México. Pp. 47.
53. Comisión Nacional del Agua. Gobierno de México, (1996). *Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales*. 2a. edición. México. Pp. 139.
54. Bacon Brown Nancy, (1995). *Los residuos peligrosos*. en Rivero Serrano O., Garfias Vázquez M. y González Martínez S. (eds.). Residuos Peligrosos. Programa Universitario del Medio Ambiente. UNAM. México. Pp. 24.
55. Benedient Philp B., Rifai Hanadi S. and Newell Charles J., (1994). *Groundwater Contamination. Transport and Remediation*. Prentice Hall, Inc. USA. Pp. 425-427, 432, 433, 485, 491.
56. Mackenthum Kenneth M. and Bregman Jacob I., (1992). *Environmental Regulations Handbook*. Lewis Publishers, Inc. USA. Pp. 21, 22.
57. Kore Herman, (1991). *Handbook of Environmental Health and Safety. Principles and Practices*. Vol. II. Lewis Publishers, Inc. USA. Pp. 195-197.
58. Holm A. Larry, (1993). *Strategies for Remediation*, en David E. Daniel E., Geotechnical Practice for Waste Disposal. Chapman & Hall. USA. Pp. 293, 299.
59. Nyer K. Evan, (1993). *Practical Techniques for Groundwater and Soil Remediation*. Lewis Publishers, USA. Pp. 7.
60. Nyer K. Evan, (1992). *Groundwater Treatment Technology*. Second Edition. Van Nostrand Reinhold, USA. Pp. 25.
61. Canter L.W. and Knox R.C., (1990). *Ground Water Pollution Control*. Lewis Publishers, Inc. Pp. 16-41, 165, 177.
62. Blackman Jr. William, (1996). *Basic Hazardous Waste Management*. Second Edition. CRC Press, Inc. USA Pp. 208.
63. Water Pollution Control Federation, (1990). *Hazardous Waste Site Remediation Management*. WCPF. USA. Pp. 5.
64. Soesilo Andy J. And Wilson R. Stephanie, (1995). *Hazardous Waste Planning*. CRC Press, INC. Pp. 194.
65. Pérez C., Ramón, (1996). *Biorremediación de suelos Contaminados con Gasolina*, en Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM. Curso Biorremediación de suelos y acuíferos. México, D.F.

66. Freeman M. Harry (ed.), (1989). *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*. McGraw-Hill. USA. Pp. 12.3.
67. LaGrega D. Michael, Buckingham L. Phillip and Evans C. Jeffrey, (1994). *Hazardous Waste Management*. McGraw Hill, Inc. USA. Pp. 1008.
68. Siegrist L. Robert, (1990). *Development and Implementation of Soil Quality and Cleanup Criteria for Contaminated Sites*, en F. Arendt M. Hinsenveld and W.J van den Brink (eds.). *Contaminated Soil '90*. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. Pp. 149, 150.
69. Ruymbeke Van Claire, (1996). *Evaluación de Riesgo y Definición de Criterios de Limpieza*, en Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM. Memorias del curso Biorremediación de suelos y acuíferos. México, D.F. Pp. 2, 3, 14-19.
70. Henry C., Evan, (1992). *Solvable Problems of Hydrocarbon Contaminated Soils: An industry Perspective*, en Calabrese J., Edward & Kostecki T., Paul. (eds.). *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater*. Volume 2. Lewis Publishers. Pp. 7.
71. Wong J., Jeffrey; Schaum Michael; Butler G., Edward and Becker A., Richard, (1991). *Looking Past Soil Cleanup Numbers*, en Calabrese J., Edward & Kostecki T., Paul. (eds.). *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater*. Volume 1. Lewis Publishers. Pp. 7, 8.
72. Bell Charles, Kostecki T., Paul and Calabrese J., Edward, (1991). *Review of State Cleanup Level for Hydrocarbon Contaminated Soils*, en Calabrese J., Edward & Kostecki T., Paul. (eds.). *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater*. Volume 1. Lewis Publishers. Pp. 78-88.
73. Bauman Bruce, (1989). *Current Issues in Management of Motor Fuel Contaminated Soils*, en Calabrese J., Edward & Kostecki T., Paul. (eds.). *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater*. Volume 2. Lewis Publishers. Pp. 31.
74. Michaud M., Jayne; Parsons H., Alan and Ripple R., Stephen, (1991). *Human Health Risks Associated with Contaminated Sites: Critical Factors in the Exposure Assessment*, en Calabrese J., Edward & Kostecki T., Paul. (eds.). *Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater*. Volume 1. Lewis Publishers. Pp. 284.
75. Dirección General de la Calidad del Ambiente de Canadá, (1991). *Revisión y recomendaciones de los criterios provisionales canadienses para la calidad ambiental de zonas contaminadas*. Canadá.
76. Instituto Nacional de Ecología. Gobierno de México, (1996). *Propuesta de Anteproyecto de Norma Mexicana "Restauración de Suelos Contaminados: Metodología para la Determinación de Criterios de Limpieza en Base a Riesgos"*, en Memorias del Curso Biorremediación de Suelos y Acuíferos contaminados (1996). Programa Universitario del Medio Ambiente. UNAM. México.
77. Secretaría de Desarrollo Social, Secretaría de Gobernación. Gobierno de México, (1989). *Criterios Ecológicos de la Calidad del Agua*. Diario Oficial de la Federación del 13 de diciembre de 1989. México.
78. Zoller Uri, (1994). *Groundwater Contamination and Control*. Marcel Dekker, Inc. Pp. 607, 634-636.

79. D. Kofi Asante-Duah, (1996). *Management of Contaminated Site Problems*. CRC Press, Inc. USA. Pp. 197, 198, 202, 203.
80. Christopher M. Palmer, (1996). *Contaminant Hydrogeology*. CRC Press, Inc. USA. Pp. 183.
81. U.S. Environmental Protection Agency. Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office, (1997). *Hazardous Waste Clean-Up Information Data Base*. Internet home page: <http://www.clu-in.com/>
82. W.H. Rulkens, J.T.C. Grotenhuis and E.R. Soczo, (1993) *Remediation of Contaminated Soil: State of the art and desirable future developments*, en F. Arendt, G.J. Annokkée, R. Bosman and W.J. van den Brink (eds.). *Contaminated Soil '93*. Kluwer Academic Publishers. Pp. 1007-1018.
83. W. W. Kovalick Jr., (1992). *Trends in Innovative Treatment Technologies at Contaminated Sites*. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 26, No. 1-2. Pp. 99-106.
84. W. W. Kovalick Jr., (1993). *Trends in Implementing Innovative Technologies in the U.S.*, en F. Arendt, G.J. Annokkée, R. Bosman and W.J. van den Brink (eds.). *Contaminated Soil '93*. Kluwer Academic Publishers. Pp. 1093-1100.
85. W. W. Kovalick, Jr & J Kingscott ohn, (1996). *Status of remediation Technology in the United States* in Masashi Kamon (eds). *Environmental. Geotechnics. Proceedings of the second International Congress on Environmental Geotechnics. Osaka Japan 5-8 November 1996. Volume 2*. Balkema, Rotterdam. Pp. 258-300.
86. U.S. Environmental Protection Agency, (1997). *Federal Remediation Technologies Roundtable Data Base*. Internet home page: <http://www.frtr.gov/>
87. Iturbe Rosario, (1995). *Apuntes de la cátedra: Control de la Contaminación del Agua Subterránea*. UNAM/DEPFI. México.
88. Charbeneau J.R., Bedient B.P. and Loehr C.R., (1992). *Groundwater Remediation*. Vol. 8. Technomic Publishing Company Inc. USA. Pp. 143-159.
89. Clifford K. Ho, Ssy-Wen Liu and Kent S. Udell, (1994). *Propagation of evaporation and condensation fronts during multicomponent soil vapor extraction*. *Journal Contaminant Hydrology*. 16: 381-401.
90. U.S. Department of Energy. Office of Environmental Restoration, (1997). *Environmental Restoration Data Base*. Internet home page: <http://www.em.doe.gov/er/index.html>
91. Johnson, P.C., Kembrowski W Marian. and Colthart D. James, (1990). *Quantitative Analysis for the Cleanup of Hydrocarbon-Contaminated Soils by In-Situ Soil Venting*. *Groundwater*. 28:3: 413-429.
92. Freeman M. Harry, Harris F. Eugene, (1995). *Hazardous Waste Remediation Innovative Treatment Technologies*. Technomic Publishing Company, Inc. Pp. 103-111, 121, 131.
93. Johnson, P.C., C.C. Stanley, M. W. Kembrowski, D.L. Byers and J. D. Colthart. (1990) *A Practical Approach to the Design, Operation, and Monitoring of In-Situ Soil Venting Systems*. *Ground Water Monitoring Review*, 10:2:159-178.
94. U.S. Environmental Protection Agency, (1997). *EnvironSense Data Base*. Internet Home page: <http://es.inel.gov/techinfo/case/comm/soilvape.html>

95. U.S. Environmental Protection Agency, (1994). *Horizontal Wells Prove Effective for Remediating Groundwater and Soil*. Internet home page: <http://denix.cecer.army.mil/denix/Public/Library/Remedy/McClellan/toc.html>
96. U.S. Department of Energy, (1997). *Defense Environmental Network & Information Exchange*. Internet home page: <http://denix.cecer.army.mil/denix/denix>
97. K. Rathfelder, J.R. Lang, and L.M. Abriola, (1997). *Soil Vapor Extraction System*. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Michigan. Ann Arbor. Internet: <http://www.agu.org/cevgeophys/rathf01/rathf01.html>
98. K. Wehrle, (1993). *Soil Vapor Extraction (SVE) limitations*, en F. Arendt, G.J. Annokkée, R. Bosman and W.J. van den Brink (eds.). *Contaminated Soil '93*. Kluwer Academic Publishers. Pp. 1463-1465.
99. U.S. Department of Energy, (1997). *Oak Ridge National Laboratory Data Base*. Internet home page: <http://www.ornl.gov/K25/techdemo/insitu.htm>
100. U.S. Naval Facilities Engineering Service Center Environmental Restoration Division, (1997). *Restoration Development Data Base*. Internet home page: <http://cayuga.nfesc.navy.mil/cc/projects/sive.htm>
101. U.S. Department of Energy. Office of Environmental Restoration, (1997). *Environmental Restoration Data Base*. Internet home page: <http://www.em.doe.gov/er/index.html>
102. Rawe Jim, (1996). *In situ Soil Flushing*, en J. Russell Boulding (ed.). EPA Environmental Engineering Sourcebook. Ann Arbor Press, Inc. Pp. 101.
103. Manahan E. Stanley, (1990). *Hazardous Waste Chemistry, Toxicology and Treatment*. Lewis Publishers. Pp. 284.
104. Grasso Domenic, (1993). *Hazardous Waste Site Remediation*. CRC Press, Inc. Capítulos: G, H, J, K.
105. Ellison Richard, (1991). *Comparison and Critical Review of Onsite Treatment of Petroleum Contaminated Soils* en Calabrese J. Edward and Kosteci T. Paul. *Hydrocarbon on Contaminated Soil*. Volume I. Pp. 308.
106. Williams A. Michael & Willis A. Craig, (1996). *Monitoring a soil flushing remedial design using neutron moderation*, en Masashi Kamon (eds.). *Environmental Geotechnics. Proceedings of the second International Congress on Environmental Geotechnics*. Osaka Japan 5-8 November 1996. Volume 2. Balkema, Rotterdam. Pp. 1114-1123.
107. Geraghty & Miller Inc., (1997). *Alternative Remedial Technologies Data Base*. Internet home page: <http://www.gmgw.com/art/artcost.html>
108. Norris D. Robert, (1994). *Handbook of Bioremediation*. CRC Press, Inc. Pp. 19.
109. Baker H. Katherine and Hersun S. Diane, (1994) *Introduction and Overview of Bioremediation*, en Katherine H. Baker and Diane S. Hersun (eds.). *Bioremediation*. McGraw-Hill, Inc. Pp. 2, 3.
110. Baker H. Katherine, (1994). *Bioremediation of Surface and Subsurface Soils*, en Katherine H. Baker and Diane S. Hersun (eds.). *Bioremediation*. McGraw-Hill, Inc. Pp. 211-212.

111. Rogers A. Jean, Tedaldi J. Dante and Kvanaugh C. Michael, (1993). *A Screening Protocol for Bioremediation of Contaminantes Soil*. Environmental Progress. Vol. 12. No. 2. May 1993. Pp. 146-156.
112. Troy A. Marleen (1994). *Bioengineering of Soils and Ground Waters*, en Katherine H. Baker and Diane S. Hersun. Bioremediation. McGraw-Hill, Inc. Pp.173-174.
113. Hinchee R.E., (1994). *Air Sparging State of the Art*, en Robert E. Hinchee (ed.). Air Sparging for Site Remediation. CRC Press, INC. Pp. 1-13.
114. Rawe Jim and Meagher-Harteell Evelyn, (1996). *In Situ Biodegradation Treatment*, en J. Russell Boulding. (ed.). EPA Environmental Engineering Sourcebook. Ann Arbor Press, Inc. Pp. 143-144.
115. Saval Bohórquez Susana, (1996). *Conferencia en la catedra: Manejo, Tratamiento y Disposición Final de Residuos Peligrosos*. UNAM.DEPMI. México.
116. Paul B. Trost, (1993). *Soil Washing*, en David E. Daniel (ed.). Geotechnical Practice for Waste Disposal. Chapman & Hall, London. Pp. 585, 588, 593, 594.
117. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Emergency and Remedial Response, (1994). *Common Cleanup Methods at Superfund Site*. EPA 540/R-94/043. USA.
118. Duke Engineering & Services Company, (1997). *INTERA Data Base*. Internet home page: <http://www.intera.com/>
119. National Technology Transfer Center, (1997). *Today's Technologies Data Base*. Internet home page: <http://www.nttc.edu/>
120. Network of Experts Committed to the Service of the Environmental Industry, (1997). *Enviro Access Data Base*. Internet home page: <http://www.enviroaccess.ca/eng/index/html>
121. Elliot Golderg. Environmental Services for Lockwood Greene Engineers Inc., (1997). *German washing process pulls out contaminants in a fine slurry*. Internet home page: <http://www.gvi.net/soils/AugSept1995/wash.html>
122. Department of Energy Office of Environmental Management, (1997). *Science and Technology Data Base*. Internet home page: <http://em-50-em.doc.gov/>
123. Environmental Remediation International, Ltd., (1997). *Resource Recovery Specialist Data Base*. Internet home page: <http://www.enrem.com/>
124. Parker Harry W., Krishnan Ramesh, Narayan Raghu and Tock Richard, (1997). *Advances in Soil Washing Techniques*. Internet home page: <http://www.ttu.edu/~biology/TIESpage/CurrentResearch/Pollution.html>
125. Soil Wash Technologies Inc., (1997). *State of the Art Soil Decontamination and Remediation*. Internet home page: <http://www.soilwashtech.com/index.html>
126. Hoffman Fredric, (1993). *Ground-Water Remediation Using "Smart Pump and Treatment"*. Ground Water Vol. 31. No. 1. Pp. 98-106.
127. Cavalli J. Nicholas, (1992). *Composite Barrier Slurry Wall*, en David. B. Paul, Richard R. Davidson, and Nicholas J. Cavalli. Slurry Walls Design, Construction, and Quality Control. American Society for Testing and Materials. Pp. 78-79.

128. Rumer R. Ralph and Ryan E. Michael, (1995). *Barrier Containment Technologies for Environmental Remediation Applications*. John Wiley & Sons, Inc. Pp. 11, 14, 15.
129. U.S. Environmental Protection Agency. Solid Waste and Emergency Response Technology Innovative Office, (1997). *Guía del ciudadano: Muros de tratamiento*. Internet home page: <http://www.clu-in.com/TOOLKIT/GUIDES/SPANISH/SPANWALL.HTM>.
130. Kent Bob and Mann Perry, (1993). *Recovery Well Systems*, en David E. Daniel (ed.). *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. Chapman & Hall, London. Pp. 497-519.
131. Douglas M. Mackay and John A. Cherry, (1989). *Groundwater contamination: Pump-and-treat remediation*. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 23, No. 6, 1989. Pp. 630-636.
132. U.S. Department of Energy, (1997). *Petroleum Product Recovery and Contaminated Groundwater Remediation Amoco Petroleum Pipeline Constantine, Michigan*. Internet home page: <http://denix.cecer.army.mil/denix/Public/Library/Remedy/Amoc/amoco.html>
133. U.S. Department of Energy, (1997). *Pum and Treat of Contaminated Groundwater at U.S. Department of Energy Kansas City Plant Kansas City, Missouri*. Internet home page: <http://denix.cecer.army.mil/denix/Public/Library/Remedy/Kansas/ksplnt01.html>
134. U.S. Department of Energy, (1997). *Pum and Treat of Contaminated Groundwater at Twin Cities Army Ammunition Plant New Brighton, Minnesota*. Internet home page: <http://denix.cecer.army.mil/denix/Public/Library/Remedy/Twin/twin01.html>
135. U.S. Department of Energy, (1997). *Pum and Treat of Contaminated Groundwater at U.S. Department of Energy Lawrence Livermore National Laboratory Livermore Site Livermore, California*. Internet home page: <http://denix.cecer.army.mil/denix/Public/Library/Remedy/LLPT/ltnl01.html>
136. U.S. Department of Energy, (1997). *Pum and Treat of Contaminated Groundwater Operable Unit D McClellan Air Force Base, California*. Internet home page: <http://denix.cecer.army.mil/denix/Public/Library/Remedy/MCLD/mcled01.html>
137. Timothy E. Oppelt, (1988). *A profile of Hazardous Waste Thermal Destruction Facilities: Performance and Prospects*, en Harry M. Freeman. *Incinerating Hazardous Wastes*. Technomic Publishing Company, Inc., Pp. 3.
138. Holden Tim et al., (1989). *How to Select Hazardous Waste Treatment Technologies for Soils and Sludges*. Noyes Data Corporation. USA. Pp. 28.
139. Kesketh H.E., Cross E.L. and Tessitore J.L., (1990). *Incineration for Site Cleanup and Destruction of Hazardous Waste*. Technomic Publishing Company, Inc. Pp. 1-22, 65,66.
140. Cudahy J. James and Troxler L. William, (1990). *1990 Thermal Remediation Industry Contractor Survey*. Air & Waste Management Association. Volume 4. No. 8. August 1990. Pp. 1178-1182.
141. U.S. Environmental Protection Agency. Risk Reduction Engineering Laboratory, (1996). *Mobile/Transportable Incineration Treatment*, en J. Russell Boulding (ed.). EPA Environmental Engineering Sourcebook. Ann Arbor Press, Inc. Pp. 317-323.

142. Aduna B. Ma. de Lourdes, (1995). *Gasificación de residuos peligrosos*. Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Facultad de Química. UNAM. México. Pp. 34.
143. Becerril Josefina y Navarrete Eugenia, (1993). *Recopilación, Aplicación y Evaluación de las Tecnologías de Estabilización/Solidificación para el Tratamiento de Residuos Peligrosos*. CENAPRED. México. Pp. 1-30.
144. U.S. Environmental Protection Agency, (1989). *Stabilization/Solification of CERCLA and RCRA Wastes*. EPA/625/6-89/022. Pp. 1-1.
145. Batstone Roger, Smith E. James Jr. and Wilson David, (1989). *The Safe Disposal of Hazardous Wastes. The special Needs and Problems of Developing Countries*. World Bank Technical Paper No. 93. Volume II. Pp. 333.
146. LaGrega D. Michael, Buckingham L. Phillip and Evans C. Jeffrey, (1994). *Hazardous Waste Management*. McGraw-Hill, Inc. USA. Pp. 641-648.
147. Fink Larry and Wahl George, (1996). *Solification/Stabilization of Organics and Inorganics*, en J. Russell Boulding. EPA Environmental Engineering Sourcebook. Ann Arbor Press, Inc. Pp. 307.
148. Capel, P.D., (1993). *Organic Chemical Concepts*, en Alley, W. A., Van (de.). Regional Ground-water Quality. Nostrand Reinhold. N.Y. Pp. 155-179.
149. Ramírez, Q.R., Castañón, R., (1996). *Bio-remediación de suelo ¿oportunidad de desarrollo en México?*, en Memorias del Curso Biorremediación de suelos y acuíferos contaminados (1996). Programa Universitario del Medio Ambiente. UNAM. México.
150. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited, (1997). *Oil Spills From Tankers Data Base*. Internet home page: <http://www.cutter.com/osir/biglist.htm>
151. Iturbe R., Navarro I., (1997) *Lineamientos para la evaluación y saneamiento de sitios contaminados por hidrocarburos en México*. Seminario Internacional sobre Restauración de Sitios Contaminados. Mayo 26-29 de 1997. Instituto Nacional de Ecología. México