

# LOS GRANDES RETOS DE PEMEX EN MATERIA AMBIENTAL

## REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Susana SAVAL BOHÓRQUEZ

SUMARIO: I. *Introducción*. II. *El concepto de contaminación*; III. *Fuentes de contaminación en instalaciones petroleras*. IV. *Dispersión de contaminantes en suelos y acuíferos*. V. *La auditoría ambiental como parte de la caracterización de un sitio*. VI. *El concepto de remediación*. 1. *Tomando como referencia normas extranjeras*. 2. *Por evaluación de riesgo*. 3. *En función del uso que se dará al suelo*. VII. *Alternativas tecnológicas para la remediación de suelos*. 1. *Biorremediación*. 2. *Arrastre por aire (Air Stripping)*. 3. *Extracción al vacío*. 4. *Solidificación/Estabilización*. 5. *Lavado de suelo*. 6. *Desorción térmica*. 7. *Por arrastre de vapor*. 8. *Incineración*. 9. *Confinamiento*. 10. *Vitrificación*. VIII. *Costos de remediación*. IX. *Criterios para la selección de tecnologías de remediación*. X. *Acciones para la remediación de suelos en México*. 1. *Las empresas de consultoría ambiental*. 2. *Los organismos gubernamentales involucrados en materia ambiental*. 3. *El papel de las universidades*. 4. *Educación ambiental para la sociedad*. XI. *Los compromisos de PEMEX*. XII. *Conclusiones*. XIII. *Bibliografía*.

### I. INTRODUCCIÓN

El suelo y el subsuelo son términos que difícilmente pueden emplearse por separado. En un lenguaje coloquial, suelo es la superficie y subsuelo hacia la profundidad, sin existir una referencia para saber que tan profundo es el suelo y desde donde empieza el subsuelo.

Suelo y subsuelo constituyen un recurso natural que desempeña diversas funciones entre las que destacan su papel como medio filtrante durante la recarga de acuíferos y de protección de los mismos, también están integrados al escenario donde ocurren los ciclos biogeoquímicos, hidrológicos y de la cadena alimentaria, además de ser el espacio donde se realizan actividades agrícolas y ganaderas y áreas verdes de generación de oxígeno.

Aunque se ha venido haciendo mucho énfasis en el establecimiento de medidas preventivas con el fin de reducir o eliminar la descarga de materiales extraños al medio ambiente, no se puede ignorar la contaminación que ocurrió en el pasado.

Ante la inmensa superficie de zonas afectadas por la actividad humana, surge la necesidad de tomar acciones para controlar la dispersión de contaminantes y buscar su eliminación. En los países más avanzados se han desarrollado tecnologías para remediación y restauración de sitios, sin embargo, dado que cada sitio dañado constituye una problemática específica, se requiere el establecimiento de criterios y gran cantidad de información para decidir cómo controlar y eliminar los contaminantes.

Existen varios términos que comúnmente se usan como sinónimos: *remediación (remediation)*, *limpieza (clean-up)*, *restauración (restoration)*, *recuperación (reclamation)*, sin embargo, es necesario entender el contexto en el que estos se emplean, ya que puede hacerse alguna diferenciación entre ellos.

Se entiende por remediación o limpieza a las acciones que se toman para la reducción o eliminación de los niveles de contaminantes en suelo y subsuelo. Restauración o recuperación es la acción de devolver a un sitio, sus características originales. Es decir, rescatar o mejorar la función y la imagen que el suelo tenía antes de haber sido afectado por los contaminantes.

### *El concepto del suelo*

#### a) Desde el punto de vista científico-tecnológico

El suelo se define como un material no consolidado sobre la superficie de la tierra, que ha sido formado mediante una dinámica natural a partir de la corteza terrestre con la influencia de factores genéticos y ambientales, proceso que ha tomado miles de años para tenerlo en su estado comúnmente conocido. Es un medio complejo y dinámico en constante evolución.

El suelo y el subsuelo en su conjunto, porque no pueden ser entidades separadas, tienen diversas funciones como: filtro amortiguador y transformador, productor de alimentos, hábitat biológico y reserva genética, medio físico para la construcción, fuente de materias primas y herencia cultural.

Suelo y subsuelo son el filtro que limpia el agua de lluvia que recarga los acuíferos y que los protege contra la contaminación. El agua de lluvia arrastra un sinúmero de compuestos, durante su recorrido éstos son retenidos en el subsuelo, de aquí que se hable de una capacidad amortiguadora. Algunos compuestos son transformados por la microbiota nativa, antes de llegar a los acuíferos. Para resaltar esta importante función del suelo conviene recordar que los acuíferos constituyen la fuente de suministro de agua de las poblaciones.

Como productor de alimentos, el suelo es la base para la vida del hombre y los animales, permite la implantación de las raíces de las plantas y les proporciona agua y elementos nutritivos. La producción de alimentos depende, entre otros factores, de la disponibilidad y fertilidad de terrenos agrícolas.

El suelo desempeña también una importante función como hábitat biológico y reserva genética. Se pueden desarrollar gran cantidad de vegetales y animales que forman parte de la cadena alimentaria y constituyen la riqueza de la biodiversidad, por lo que deben ser protegidos de su posible extinción.

Para la construcción, el suelo es la base física de las edificaciones, sean viviendas, industrias, lugares de recreación, sistemas de transporte o sitios para disposición de residuos. También, es fuente de materias primas como arcillas, arena, grava y minerales.

Finalmente, el suelo alberga una importante herencia cultural, representada por tesoros arqueológicos y paleontológicos, que son una fuente única de información que debe ser mantenida como un testimonio de la historia de la tierra y de la humanidad.

Todo lo anterior lleva a pensar en la necesidad de prevenir daño al suelo y recuperarlo cuando éste es afectado, pero nunca destruirlo, debido a que es un recurso natural difícilmente renovable.

#### *b) Desde el punto de vista jurídico-administrativo*

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 de la sociedad.

Por otro lado, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección Ambiental 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 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 actividades industriales, como los residuos del procesamiento del petróleo, incluyendo combustibles y petroquímicos, aceites gastados y metales, los cuales se consideran residuos peligrosos.

Gran parte de los contaminantes del suelo y el subsuelo se generan en instalaciones que cuentan con tanques de almacenamiento de combustibles, los cuales son utilizados como materias primas, También en cementerios industriales que son zonas restringidas o de difícil acceso. Otros ejemplos de contaminantes son las aguas residuales que son vertidas sobre el suelo sin previo tratamiento, los lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento, la infiltración en canales de aguas residuales a cielo abierto, las fugas de alcantarillados y los agroquímicos.

La LGEEPA es el instrumento fundamental de referencia para realizar las auditorías ambientales, si partimos de la base que la legislación ambiental en materia de suelo es deficiente, las auditorías ambientales que oficialmente se realizan deben ser también deficientes. De ahí surge la necesidad de contar con una ley precisa en los aspectos considerados y clara en su redacción para evitar interpretaciones erróneas.

Otros instrumentos de referencia necesarios para que la ley pueda aplicarse y que no existen son: un Reglamento para la Protección del Medio Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación del Suelo y del Subsuelo y las normas oficiales mexicanas correspondientes.

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

*c) Desde el punto de vista político y social*

En la vida diaria de nuestro México, el suelo es visto con solamente dos ópticas, como el escenario de actividades agrícolas y forestales o bien como una superficie donde se asientan edificaciones.

Prácticamente todos los problemas de contaminación de suelos son ocasionados por actividades antropogénicas, ya sea por derrames accidentales o irresponsables, durante la descarga de subproductos o bien durante el transporte dentro y fuera de instalaciones industriales o de mantenimiento.

Somos una sociedad sin una cultura ambiental, no hemos sido educados para respetar a nuestro ambiente y esto ha sido la consecuencia de una actitud pasiva, que ha llegado incluso a nuestros gobernantes. En el pasado no se exigió a las industrias corregir los daños ocasionados por el derrame de contaminantes y ahora, la carencia de instrumentos legales y regulatorios en materia de suelo envuelve a todos los aspectos involucrados, en un círculo vicioso del que cada vez es más difícil salir.

Para involucrar a la sociedad, necesita haber pruebas de que hay voluntad política y ética detrás de todas las acciones encaminadas a mejorar el ambiente y la calidad de vida. La sociedad pierde cada vez más credibilidad en los funcionarios públicos, los problemas ambientales se han convertido en un tema de discursos políticos y el ambiente está cada vez más deteriorado. Esto ha venido a causar mayor desinterés de la sociedad, la cual asume un papel pasivo y ya no expresa sus ideas.

*d) Desde el punto de vista internacional*

Aparentemente, hasta la fecha no se ha reportado la migración de contaminantes a los países vecinos, que hayan sido vertidos en nuestro territorio. Debemos estar concientes de que los contaminantes no distinguen fronteras y si las condiciones de un sitio favorecen su migración, estaríamos en graves problemas, de ahí la necesidad de tomar acciones antes de que pase más tiempo. Algo que nos ha evitado más problemas es el hecho de que el petróleo, por sus características, penetra muy lentamente

las capas del suelo, más bien se encuentra en la parte superficial. Cuando los derrames han ocurrido en las costas se ha facilitado relativamente su recuperación, dado que el aceite crudo flota en la superficie.

El compromiso que adquirimos recientemente ante la firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos 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. Entre los objetivos prioritarios de los Acuerdos de Cooperación Ambiental, quedó establecido: *fortalecer la conservación, la protección y el mejoramiento del ambiente a partir de la cooperación y el apoyo mutuo en políticas ambientales con un alto nivel de protección; esto incluye el establecimiento de las leyes y reglamentos, así como su observancia y cumplimiento.*

El hecho de no contar con una legislación clara en materia de suelo y subsuelo, nos pone en desventaja, por lo que se hace prioritaria una modificación razonable.

Estados Unidos cuenta con una legislación bien establecida en materia prevención y control de la contaminación de suelo y subsuelo. La ley federal directamente exige la limpieza del sitio contaminado con petróleo, a través del Acta de Conservación y Recuperación de Recursos (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA). Otras leyes rigen durante la remediación del sitio, como el Acta Global de Respuesta, Compensación y Responsabilidad (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability, CERCLA) de 1980, mejor conocida como *Superfund* y el Acta de Reautorización a las Mejoras del Superfund (Superfund Amendments Reauthorization Act, SARA) de 1986, así como el Acta de Seguridad de Agua Potable (Safe Drinking Water Act, SDWA) y el Acta de Agua Limpia (Clean Water Act, CWA). El organismo encargado de que estas leyes se cumplan es la Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency, EPA).

La EPA 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 sustancialmente más

## REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

157

estrictos y caros. Esto hace más atractivo el limpiar un derrame por voluntad propia en lugar de llevar el asunto a juicio.

Por lo que respecta a Canadá, el gobierno federal ha promulgado varias leyes ambientales de aplicación general, además de que cada provincia tiene sus propios esquemas que regulan la descarga o emisión de sustancias en el ambiente y establecen medidas de protección ambiental y procedimientos de evaluación ambiental. En Canadá ha sido muy fácil la toma de acciones a emergencias ambientales, debido a que como parte de su cultura todos los recursos naturales realmente se protegen de la contaminación. Por ejemplo, la declaración inicial del Acta Canadiense de Protección Ambiental (Canadian Environmental Protection Act, CEPA) de 1988 dice que: *la protección del ambiente es esencial para el bienestar de Canadá, la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente es de interés nacional, en parte por aspectos de salud y además porque éstas no pueden ser contenidas dentro de barreras geográficas y es necesario cumplir con las obligaciones internacionales en materia ambiental.*

Por otro lado, los propósitos del Acta Canadiense de Evaluación Ambiental (Canadian Environmental Assessment Act, CEAA, que sustituye a Environmental Review Process Guidelines Order, EARP) de 1992, son *asegurar que los efectos ambientales de proyectos se revisen cuidadosamente antes de que las autoridades responsables inicien su desarrollo*, esto asegura también que *los proyectos que se realicen en Canadá o en sus territorios federales no causen efectos ambientales adversos ni dentro ni fuera de la jurisdicción en la cual los proyectos son llevados a cabo.* Además de la claridad de esta legislación, la participación pública ha sido un factor fundamental para que se tenga un ambiente verdaderamente limpio que incluye: agua, aire y suelo. El Plan Verde para un Ambiente Saludable (Green Plan for a Healthy Environment) ha establecido objetivos muy precisos para trabajar por un ambiente limpio.

Una situación que vale la pena señalar, es el hecho de que en México la limpieza de sitios contaminados se ha venido dando como una condición de inversionistas extranjeros interesados en la compra de empresas mexicanas. Es decir, para que el inversionista extranjero decida comprar o invertir capital en una empresa mexicana, es necesario demostrar que no hay contaminantes en el subsuelo del terreno donde la empresa ha venido realizando sus actividades desde años atrás, si los hay, se debe limpiar el sitio en un tiempo que legalmente se determina al momento de

la transacción. Esta situación ha abierto mercado a todo tipo de tecnologías y consultoras ambientales extranjeras, de las cuales se hablará más adelante.

## II. EL CONCEPTO DE CONTAMINACIÓN

El término contaminación puede definirse como la introducción al ambiente de un compuesto, en cantidad tal que incrementa su concentración natural y que excede la capacidad de la naturaleza para degradarlo y reincorporarlo a los ciclos de transformación de la materia y energía.

El petróleo es una mezcla muy compleja de cientos de compuestos químicos, sus características y la proporción de sus constituyentes varían en función de su origen geológico y geográfico. El petróleo es un producto natural, por lo que la propia naturaleza es capaz de reincorporar una muy pequeña fracción de éste a los ciclos biogeoquímicos, ya que la complejidad química de algunos de sus constituyentes hace que el proceso requiera de varios años.

Cuando la cantidad de petróleo en el ambiente es mayor de la que puede ser reciclada, el petróleo se convierte en un contaminante presentando un impacto negativo, ya que entre sus componentes existen altas concentraciones de sustancias que son consideradas como residuos peligrosos por su efecto dañino a la salud. Ejemplos de éstos son: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos, naftaleno, antraceno, fenantreno, cresoles, fenol, ciclopentano, ciclohexano y etileno. Algunos de ellos son cancerígenos como es el caso de benceno, naftaleno, antraceno y fenantreno. Por lo anterior, los derrames de petróleo son considerados residuos peligrosos.

Otros productos, como los bifenilos policlorados son completamente sintéticos y altamente tóxicos, es decir, muy ajenos a la naturaleza, por lo que no pueden ser degradados de manera natural, ni reincorporados a ésta.

Cada sitio tiene sus características particulares y por lo tanto su propia dinámica, esa es la razón por la que cada región puede tener diferente normatividad relacionada con los límites máximos permisibles para los contaminantes.

### III. FUENTES DE CONTAMINACIÓN EN INSTALACIONES PETROLERAS

Como producto de las actividades petroleras los suelos son alterados por la construcción de rutas de acceso, remoción de la 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.

La contaminación de suelos y acuíferos ocasionada por la industria petrolera se presenta durante 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, Petroquímica.

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 consumo indiscriminado de agua, derrames, explosiones y descargas de residuos industriales de alta toxicidad y no biodegradables. Durante el transporte se presentan riesgos por derrame de residuos peligrosos.

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 intemperie 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 las 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, diésel, 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.

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.

#### IV. DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES EN SUELOS Y ACUÍFEROS

Una vez que ha ocurrido un derrame de contaminantes en el suelo, ocurren diversos fenómenos naturales que tienden a dirigirlos hacia las aguas subterráneas. Esto hace necesario el entender la forma en que los contaminantes penetran, migran y se dispersan en el subsuelo.

En términos generales, el comportamiento de los contaminantes está en función de sus características fisicoquímicas en las que se incluyen principalmente densidad, solubilidad, viscosidad, además de las características del medio que los rodea como son el tipo de suelo, su permeabilidad, el tamaño de las partículas, su contenido de humedad y de materia orgánica, así como la profundidad del nivel freático. Otros factores climatológicos como la temperatura y las precipitaciones pluviales, también tienen una gran influencia. Todas las variables en su conjunto, definen el tamaño y la distribución tridimensional del bulbo o mancha de contaminación en una zona específica.

De acuerdo a su densidad, los compuestos orgánicos se clasifican en dos grupos: aquellos cuya densidad es menor que la del agua se denominan ligeros mientras que a los que poseen una densidad mayor a la del agua se les conoce como densos. Esta clasificación es importante ya que es lo que determina el comportamiento de los contaminantes en el acuífero. Los

ligeros tienden a formar una capa en forma de “nata” en el nivel freático y se mueven horizontalmente en dirección al flujo del agua subterránea, como las gasolinas, los aceites y el petróleo crudo. Los densos por el contrario, migran hacia la base del acuífero creando una columna a partir de la cual pueden migrar en dirección al flujo del agua subterránea contaminando así el acuífero en toda su profundidad, ejemplo de éstos son los bifenilos policlorados.

La combinación de las características del subsuelo, de los contaminantes y las condiciones climatológicas del sitio pueden dar lugar a los diferentes procesos de transporte y distribución de contaminantes. Para entender el transporte y destino de contaminantes en el subsuelo es necesario realizar una buena caracterización del sitio con la cual se conocerán la carga hidráulica y la estratigrafía, así como los coeficientes de adsorción y la permeabilidad del suelo. Con esta información es posible calibrar modelos matemáticos que sean representativos de la distribución tridimensional de los contaminantes en el sitio.

## V. LA AUDITORÍA AMBIENTAL COMO PARTE DE LA CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO

Por definición, una auditoría ambiental en materia de suelos se refiere a la identificación y evaluación del estado de la contaminación en suelo y subsuelo, incluyendo las aguas subterráneas.

Por otro lado, la caracterización de un sitio del que ya se sabe que ha sido afectado, se refiere a los estudios que permitirán conocer las características de funcionamiento del subsuelo como filtro amortiguador y el comportamiento de los contaminantes en él. Los estudios preliminares de dicha caracterización corresponden a los de una auditoría ambiental.

En los países avanzados, no se practican las auditorías ambientales de esta forma, basta con detectar la presencia de un contaminante en suelo o aguas subterráneas para proceder directa e inmediatamente a la caracterización geohidrológica y química del sitio y de los alrededores. La meta final de estas actividades es proponer alternativas para la limpieza del sitio.

Las etapas básicas de la caracterización de un sitio, que también corresponden a la de una auditoría ambiental en materia de suelo y subsuelo, se describen a continuación:

*Recopilación de la información.* En principio se requiere un plano del terreno donde se encuentran las instalaciones donde se puedan identificar las instalaciones subterráneas (tanques y ductos), los talleres de mantenimiento, las zonas de disposición de desechos e instalaciones antiguas. Estos datos servirán para detectar la fuente de la contaminación, por lo que es de gran utilidad ubicar las instalaciones en un plano que incluya las zonas circundantes para definir sitios que servirán como control. También se deberán recopilar datos hidrogeológicos, relacionados con la profundidad del nivel freático, la dirección del flujo de la corriente subterránea y la conductividad hidráulica, información que servirá para pronosticar la migración de los contaminantes hacia el acuífero. Un plano de ubicación de los pozos existentes y su caudal de extracción permitirán predecir el efecto sobre la población aledaña.

*Reconocimiento del sitio.* En la visita a campo se podrá contrastar toda la información recabada. En el caso de instalaciones petroleras o petroquímicas, se podrán registrar las áreas visiblemente contaminadas así como instalaciones o zonas potencialmente contaminantes.

*Investigación inicial de la contaminación.* La información obtenida servirá como base para definir los puntos donde se deberán perforar los pozos de monitoreo y donde se habrán de tomar muestras de suelo a las diferentes profundidades. Las muestras deberán ser llevadas a un laboratorio químico para la identificación y cuantificación de los contaminantes presentes. En la actualidad ya existen equipos analíticos para realizar pruebas en campo, lo que evita la pérdida de contaminantes de características volátiles. Con la información obtenida será posible realizar un diagnóstico del sitio, en el que se podrán identificar las manchas de contaminación y los gradientes que se forman en función de las características del suelo. Cuando se determinan las características de permeabilidad y porosidad en las muestras de suelo, se pueden correr modelos de migración de los contaminantes que son una herramienta de gran utilidad para el pronóstico y de seguimiento en las actividades de remediación.

Como resultado de la carencia de una legislación clara en materia de suelo y subsuelo en México, el ejercicio de la auditoría ambiental en esta materia se confunde. En los formatos oficiales lo referente a “*Control de la Contaminación del Suelo*” únicamente cuestiona sobre la generación y disposición de residuos sólidos y peligrosos, mientras que las instalaciones subterráneas que merecen mayor investigación dentro de esta materia, se dejan dentro de una sección titulada *Instalaciones*, a la cual se le da menor

importancia. Tampoco se considera que en los tanques subterráneos o sobre tierra pueden albergar combustibles o solventes que son empleados como materias primas, por lo que no corresponden a residuos, aunque pueden tener el mismo grado de peligrosidad.

En instalaciones petroleras en operación se han practicado auditorías ambientales, con el propósito de identificar áreas afectadas. Esto ha dado como resultado un inventario de los residuos generados, la detección de fuentes de contaminación y zonas de alto riesgo actual y potencial. No obstante, hace falta complementar la información sobre el tipo y la concentración de contaminantes presentes y las características de los suelos afectados, es decir, se requiere una caracterización completa para estimar la extensión de las manchas de contaminación y su posible llegada a las aguas subterráneas.

Durante la realización de las auditorías ambientales es indispensable considerar los terrenos aledaños a las instalaciones petroleras, mismos que en ocasiones han servido como cementerios o como zonas de vertido de desechos petroleros y que por la cercanía de poblaciones representan un alto riesgo para la salud.

## VI. EL CONCEPTO DE REMEDIACIÓN

Una vez que se ha diagnosticado el estado de contaminación de un sitio, suelo y subsuelo, se deben plantear alternativas para su limpieza y establecer los niveles de limpieza. Es decir, el límite máximo de contaminantes que se aceptará en un suelo después de haber sido sometido a un tratamiento de remediación.

Dado que en México no existen norma oficiales (NOM) que establezcan estos niveles de limpieza, se puede seguir uno de los siguientes caminos: 1) tomando como referencia normas extranjeras, 2) por evaluación de riesgo o 3) en función del uso que se dará al suelo.

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 contamos con métodos analíticos oficiales para determinar la concentración de contaminantes en México, se acostumbra recurrir a los establecidos por otras instituciones oficiales extranjeras. Los más comunes son los métodos EPA (Environmental Protection Agency) y los ASTM (American Society for Testing

Materials), 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 procedimiento.

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 de ellos por separado, algunos eligen solamente el benceno por ser el más tóxico. Para gasolinas y diésel también se cuantifican los HTP, para el caso del diésel se puede cuantificar alguno 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.

### 1. *Tomando como referencia normas extranjeras*

El ejemplo clásico es tomar como referencia los estándares establecidos por la EPA en los Estados Unidos. En ese país, no existe un listado de normas único, los gobiernos estatales han establecido sus propios límites permisibles, los cuales fueron definidos de acuerdo a una evaluación de riesgo. En la Tabla 1 se presentan valores que rigen en algunos de los estados. Podrá observarse que para un mismo parámetro indicador, hay una amplia variación de nivel permisible, también se observa que las concentraciones en suelo (mg/kg o ppm, partes por millón) son mayores a las que se piden en agua (ug/l o ppb, partes por billón) debido a que se emplean los estándares para agua potable. Los niveles de limpieza para el benceno va de 0.005 a 50 mg/kg en suelo y de 0.2 a 71 ug/l en agua subterránea, en el caso del tolueno va de 0.3 a 200 mg/kg en suelo y hasta 200,000 ug/l para agua. La concentración permisible de gasolina en suelo medida como HTP es de 50 a 1000 mg/kg y solamente en dos estados, Georgia y New Jersey, se registra el uso de hidrocarburos polinucleoaromáticos como parámetros indicadores de la presencia de diésel o gasolina.

## REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Tabla 1. Límites permisibles de contaminantes en suelos y aguas subterráneas en algunos estados de los Estados Unidos de Norteamérica

Estado	Contaminante	Parámetro indicador	Límite permisible (nivel de limpieza)		Método analítico	
			Suelo (mg/kg)	Agua subterránea (ug/l)	Suelo	Agua subterránea
Alabama	gasolina	benceno		5		EPA 602,624
		tolueno		1000		EPA 602,624
		etilbenceno		700		EPA 602,624
		xilenos		10,000		EPA 602,624
	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100		EPA 9071 EPA 418.1	
Arizona	gasolina	HTP		1		EPA 418.1
		benceno	0.13	5	EPA 8 020	EPA 502.2
		tolueno	200	1000	EPA 8 020	EPA 502.2
		etilbenceno	68	700	EPA 8020	EPA 502.2
		xilenos	44	10,000	EPA 8020	EPA 502.2
Arkansas	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100-1000		EPA 418.1 EPA 8015M	
		BTEX	0-400		EPA 8020	
California	gasolina	benceno	0.3-1		EPA 8020	
		tolueno	0.3-50		EPA 8020	
		etilbenceno	1-50		EPA 8020	
		xilenos	1-50		EPA 8020	
Delaware	gasolina diésel	HTP	100		EPA 418.1M EPA 9071 EPA 8015M	
		BTEX	10		EPA 3010 + 8020	

Tabla 1. Continuación.

<i>Estado</i>	<i>Contaminante</i>	<i>Parámetro indicador</i>	<i>Límite permisible (nivel de limpieza)</i>		<i>Método analítico</i>	
Florida	gasolina	benceno		1	EPA 602	
		BTEX		50	EPA 602	
	diésel	naftalenos		100	EPA 610	
Georgia	gasolina	benceno		5-71	EPA 8020	
		tolueno		1000-200,000	EPA 8020	
		etilbenceno		700-28,718	EPA 8020	
		xilenos		10,000	EPA 8020	
		BTEX	20-100		EPA 8020	
	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100-500		California M	
	diésel	benzopireno		0.03-0.2	EPA 550 EPA 8270	
		antraceno		110,000	EPA 8270	
		criseno		0.3	EPA 8270	
		fluorantreno		370	EPA 8270	
		fluoreno		14,000	EPA 8270	
		pireno		11,000	EPA 8270	
Idaho	gasolina	benceno		5	EPA 8020	
		tolueno		1000	EPA 8020	
		etilbenceno		700	EPA 8020	
			xilenos		10,000	EPA 8020
			HTP	40-200		EPA 9015
		diésel	HTP	100-2000		EPA 8015
	aceite gastado	HTP	100		EPA 418.1	
Kansas	gasolina	benceno	1.4	5	EPA 502.2	
		tolueno		1000	EPA 502.2	
		etilbenceno		680	EPA 502.2	

## REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

Tabla 1. Continuación.

<i>Estado</i>	<i>Contaminante</i>	<i>Parámetro indicador</i>	<i>Límite permisible (nivel de limpieza)</i>		<i>Método analítico</i>	
		xilenos		440		EPA 202.2
	gasolina diésel aceite gastado	HTP	100			
	diésel	naftaleno		143		
Kentucky	gasolina	BTEX(c/u)	1	5	EPA 8240	EPA 8240
Louisiana	gasolina	BTEX	100		EPA 8020	
Michigan	gasolina	benceno	24	1	EPA 8020	EPA 8020
		tolueno	16,000	790	EPA 8020	EPA 8020
		etilbenceno	1500	74	EPA 8020	EPA 8020
		xilenos	5600	280	EPA 8020	EPA 8020
Missouri	gasolina	HTP	50-500	5-10	EPA 418.1M	EPA 418.1
Montana	gasolina diésel	HTP	100			
Nebraska	gasolina diésel	benceno	0.005-50	5	EPA 8021	EPA 8021
		BTEX	1-10,000		EPA 8021	
Nevada	gasolina diésel	HTP	100		EPA 8015	
New Jersey	gasolina	benceno	3-13	0.2	EPA SW 846	EPA SW 846
		tolueno	1000	1000	EPA SW 846	EPA SW 846
		etilbenceno	1000	700	EPA S2 846	EPA SW 846
		xileno	110-1000	40	EPA SW 846	EPA SW 846
		antraceno	10,000	2000	EPA SW 846	EPA SW 846
		naftaleno	230-4200		EPA SW 846	EPA SW 846

HTP: hidrocarburos totales del petróleo; BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos; M: método modificado.

## 2. *Por evaluación de riesgo*

Se refiere a los valores deducidos después de una evaluación de los riesgos específicos del lugar de estudio. Las normas oficiales en los estados de Estados Unidos fueron establecidas bajo este criterio.

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 de 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 remediación de un sitio son inminentes.

El análisis de riesgo consta de tres principales criterios:

- la aditividad del nivel de peligrosidad para químicos que tienen efectos tóxicos similares (por ejemplo hemólisis de eritrocitos, daño nervioso o daño hepático);
- la aditividad del nivel de peligrosidad para exposición de un mismo compuesto encontrado en varias fuentes (por ejemplo agua, alimentos de origen vegetal y animal);
- los efectos sinérgicos, que se refiere al nivel de peligrosidad de dos o más compuestos que es mayor cuando están juntos en comparación con la suma de los efectos de los mismos compuestos por separado.

Existen siete metodologías para realizar estudios de evaluación de riesgo que se han desarrollado en los Estados Unidos, todas ellas deben incluir variables que claramente representen los niveles de peligrosidad, de exposición y de riesgo para un sitio en particular. En la Tabla 2 se resumen las diferentes metodologías, los criterios que emplean cada una de ellas están marcados con una cruz.

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

## REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

dos aspectos es la desarrollada por la EPA (3) en la cual la evaluación de la salud pública involucra el establecimiento de objetivos y la estimación del riesgo para alternativas de remediación, por lo que toma en cuenta los siguientes aspectos:

- la posibilidad de nuevas formas de exposición causadas por la remediación;
- la necesidad de indicadores químicos;
- las concentraciones tóxicas son determinadas en los puntos de exposición;
- las velocidades de liberación de contaminantes;
- el riesgo crónico de compuestos no-carcinógenos;
- el efecto de la remediación sobre la salud a corto plazo;
- la permanencia de contaminantes por el fracaso de una remediación.

Aparentemente en México se han difundido muy poco este tipo de metodologías, por lo que sería muy conveniente profundizar en ellas para entender la forma en que se establecen los límites permisibles, que finalmente para el caso de los Estados Unidos corresponde al inciso anterior (6.2).

Tabla 2. Comparación de las diferentes metodologías para evaluación de riesgo\*

<i>Criterio</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
<i>Peligrosidad</i>							
Valor de toxicidad	X	X	X	X	X	X	
Toxicidad aguda no-carcinógena	X	X	X	X		X	
Toxicidad crónica no-carcinógena	X	X	X	X		X	
Toxicidad crónica carcinógena	X		X	X	X	X	
Mezclas de contaminantes			X	X	X		X
Factor de peso del cuerpo	X	X	X	X			
Factores farmacocinéticos	X						

Tabla 2. Continuación							
<i>Criterio</i>	1	2	3	4	5	6	7
<i>Exposición</i>							
Inhalación de aire	X	X	X			X	X
Inhalación de polvos	X	X	X				
Ingestión de agua	X	X	X			X	
Ingestión de suelo				X	X		
Absorción dérmica							
Consumo de vegetales	X	X					
Consumo de carne	X	X					
Consumo de pescado	X	X	X				
Destino ambiental	X	X	X				X
Factor de vida media			X	X			X
Factores específicos del sitio	X	X	X			X	X
<i>Análisis de riesgo</i>							
Aditividad del efecto de toxicidad	X		X				
Exposición a medios múltiples	X	X	X				
Efectos sinérgicos							

**\*Metodologías:**

1. Departamento de Servicios de Salud de California
2. Rosenblatt D.H., Dacre J.C., and Cogley
3. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)
4. Ford K.L. and Gurba P.
5. Stockman S.K. and Dime R.
6. Departamento de Ecología del Estado de Washington
7. Departamento de Servicios de Salud del Estado de California

### 3. En función del uso que se dará al suelo

En esta opción se analizan las propiedades de un suelo en función de algún uso que se le vaya a dar, también se analiza si su contaminación es un riesgo para la salud de los habitantes aledaños a la zona. Lo más común es pensar que el suelo se va a utilizar como medio para el crecimiento de

especies vegetales, aunque no necesariamente como una actividad económica, también se puede usar el suelo como material estructural en una construcción. Este es el criterio que se sigue en Holanda que también tiene alguna base en estudios de evaluación de riesgo. Algunos ejemplos de límites permisibles para contaminantes establecidos por la legislación holandesa se muestran en la Tabla 3, se podrá observar que éstos son más estrictos que los norteamericanos.

Tabla 3. Comparación de la concentración permisible de algunos contaminantes entre Estados Unidos\* y Holanda

<i>Contaminante</i>	<i>Suelo (mg/kg)</i>		<i>Agua subterránea (ug/l)</i>	
	Estados Unidos	Holanda	Estados Unidos	Holanda
Cromo	800	100	50	1
Plomo	500	85	50	15
Benceno	0.1	0.05	5	0.2
Tolueno	50	0.05	1000	0.2

\*Las cifras corresponden a promedios de todos los estados.

## VII. ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS

El desarrollo de las tecnologías de remediación a nivel mundial, se inició en los países desarrollados hace más de 10 años. El interés se dio después de haber encontrado en los acuíferos que abastecen de agua a las poblaciones, residuos de compuestos considerados peligrosos en concentraciones que sobrepasaban los límites permitidos.

Con la finalidad de proteger la salud de la humanidad, los gobiernos de países desarrollados establecieron como una actividad prioritaria, la búsqueda de opciones para reducir los niveles de contaminación en suelos y acuíferos. En el caso de los Estados Unidos de Norteamérica, fueron la Agencia de Protección Ambiental y el Departamento de Energía, a través del Superfund, quienes organizaron a las diferentes instituciones de investigación públicas y privadas para el desarrollo de tecnologías tendientes a la limpieza de suelos y acuíferos contaminados con desechos militares en las localidades que funcionaron como puntos estratégicos durante la II Guerra Mundial. Otros países desarrollados siguieron caminos similares.

Como parte de las acciones que tomó el Superfund con patrocinio de la EPA, en 1990 se realizó un proyecto para evaluar las tecnologías europeas más exitosas e innovadoras donde se tenía un mayor avance. En la primera fase se identificaron 95 tecnologías innovadoras en uso o en investigación y se seleccionaron las más prometedoras, mismas que se estudiaron en la siguiente fase del proyecto, finalmente en la tercera fase, se seleccionaron las más exitosas tecnologías a gran escala que fueron extracción al vacío de un suelo contaminado con hidrocarburos, lavado *in situ* de un suelo contaminado con cadmio, arrastre con vapor *in situ* y otras tecnologías de biolabranza y lavado de suelo.

Las actividades de investigación realizadas en los Estados Unidos dieron origen a diversas tecnologías de remediación, todas ellas con diferentes bases de funcionamiento. Las que primero se desarrollaron fueron de tipo fisicoquímico, como la incineración, y la solidificación/estabilización. Posteriormente, surgieron otras innovadoras como la desorción térmica, la extracción con vapor, el lavado de suelo y las de tipo biológico. Otras tecnologías más recientes fueron la vitrificación, la encapsulación y el venteo seguido de condensación.

De manera simultánea al desarrollo de tecnologías de remediación se dio el auge de técnicas para la caracterización y monitoreo hidrogeológicos. De esta forma se desarrollaron diferentes arreglos de piezómetros que permitían conocer de una manera rápida la conductividad hidráulica, así como técnicas de perforación para la toma de muestras inalteradas, sin dejar atrás el desarrollo de modelos matemáticos y de paquetes de cómputo para generar mapas tridimensionales de la distribución de contaminantes.

Existen en el mercado mundial, diversas tecnologías para remediación que ya se han comercializado. Debe tomarse en consideración que no todas las tecnologías son aplicables a todos los casos. Para estar seguro de esto se deben realizar estudios de tratabilidad a nivel de laboratorio y de ser posible pruebas de demostración en campo.

Las tecnologías de remediación pueden aplicarse *in situ* ó *ex situ*, generalmente las tecnologías *in situ* se emplean cuando la contaminación ha alcanzado el nivel freático y se debe evitar que el bulbo de contaminación se extienda en todo el acuífero. Las tecnologías *ex situ* se utilizan cuando la contaminación se presenta solamente en la parte superficial del suelo o bien en la zona no saturada hasta donde la maquinaria pesada permita la extracción del material.

Antes de iniciar un proceso de remediación es muy importante cerrar la fuente de contaminación, para asegurar la efectividad de cualquier estrategia planteada.

A continuación se analiza, de una manera general, la base de funcionamiento de las diferentes tecnologías de remediación disponibles en el mercado, tratando de hacer énfasis a su aplicación en sitios contaminados con hidrocarburos del petróleo.

### 1. *Biorremediación*

La presencia prolongada de los contaminantes en los suelos ha ocasionado que muchas bacterias ahí presentes hayan desarrollado la capacidad bioquímica para degradarlos. Esta capacidad es precisamente la base de las tecnologías de biorremediación, que en los últimos años han surgido como una alternativa muy atractiva para la limpieza de suelos y acuíferos. Una de las principales características de la biorremediación es que los contaminantes realmente se pueden transformar en compuestos inocuos al ambiente y no solamente se transfieren de lugar.

Por lo que respecta a las técnicas de base microbiológica, inicialmente se aplicaron el composteo y la biolabranza (*land-farming*), así como el uso de reactores con cepas puras de bacterias degradadoras combinado con el bombeo e inyección del agua subterránea a través de pozos. Posteriormente, se aplicaron otras técnicas innovadoras como la bioestimulación y el bioventeo. La diferencia entre las diferentes tecnologías de biorremediación se pueden apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Funcionamiento de las diferentes tecnologías de biorremediación

<i>Tecnología</i>	<i>Base de funcionamiento</i>
Bioestimulación	Adición de nutrientes para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Bioaumentación	Adición de bacterias previamente seleccionadas por su capacidad para degradar contaminantes.
Bioventeo	Suministro de aire para estimular la actividad de las bacterias nativas.
Biolabranza	El suelo se extiende en una capa de tamaño regular y se revuelve periódicamente.

En general, las ventajas de las tecnologías de biorremediación son:

- los contaminantes son realmente transformados y algunos completamente biodegradados;
- se utilizan bacterias cuyo hábitat natural es el suelo, sin introducir otras potencialmente peligrosas;
- es una tecnología segura y económica;
- el suelo puede ser reutilizado;
- las bacterias mueren cuando los nutrientes y los contaminantes orgánicos se agotan.

Entre las desventajas de la biorremediación están:

- que las bacterias pueden inhibirse por la presencia de tóxicos o altas concentraciones de contaminantes;
- el proceso no tiene éxito en suelos de baja permeabilidad;
- algunos aditivos como los surfactantes pueden tener efecto adverso en aplicaciones *in situ*;
- requiere largos periodos de tiempo;
- no es aplicable en sitios con muy altas concentraciones de hidrocarburos altamente halogenados, metales y desechos radioactivos.

Para los procesos *ex situ* se prefiere utilizar aditivos con actividad de superficie conocidos comúnmente como surfactantes. Dado que los hidrocarburos del petróleo son insolubles en agua, la función de los surfactantes es favorecer su solubilidad y hacerlos con ello más susceptibles de ser degradados por los microorganismos. Los surfactantes pueden ser sintéticos o de origen biológico, estos últimos tienen la ventaja de ser biodegradables por los mismos microorganismos del suelo, por lo que son preferidos sobre los primeros.

## 2. Arrastre por aire (air stripping)

Esta tecnología se aplica a contaminantes volátiles presentes en el agua subterránea. El aire se inyecta a profundidad y la recuperación de los contaminantes se realiza en una torre empacada o en un tanque de aeración y requiere acoplarse a otro tipo de proceso para recuperar o destruir los contaminantes retirados del sitio. Esta tecnología es muy empleada por su

efectividad y tiene la ventaja de tener un bajo costo de operación. Las desventajas son:

- uso limitado a compuestos volátiles;
- generación de ruido;
- los contaminantes no se destruyen por lo que requiere acoplarse a otro tipo de tecnología.

### 3. *Extracción al vacío*

Este tipo de tecnología se aplica solamente para la extracción de compuestos volátiles, por lo que no es una opción recomendable para la remediación de suelos contaminados con petróleo, pero sí es atractiva para manchas superficiales de gasolinas. Sobre la zona afectada se colocan cubiertas que permiten captar los gases extraídos. Este proceso requiere ser acoplado a otro para eliminar los contaminantes o bien recuperarlos y reciclarlos.

### 4. *Solidificación/estabilización*

Las tecnologías de solidificación y estabilización son empleadas para la inmovilización de contaminantes, reduciendo la generación de lixiviados. Son muy útiles para el tratamiento de residuos altamente peligrosos y que no pueden ser destruidos o transformados, como es el caso de los compuestos inorgánicos.

El origen de las tecnologías de solidificación es muy antiguo, se conocen como mezclas suelo-cemento y se han empleado para mejorar la capacidad de soporte de carga de un terreno. Dada la experiencia de su uso en la construcción de terraplenes y su facilidad de manejo, fueron adaptadas posteriormente a la remediación de suelos. Para que estas tecnologías tengan éxito, se debe asegurar un perfecto mezclado entre el cemento y el suelo y la humedad necesaria para lograr fraguado. No son adecuadas para suelos con alto contenido de grasas y aceites, por lo que no se recomiendan para suelos contaminados con hidrocarburos. La mezcla suelo-cemento, producto de la solidificación, tiene características de resistencia a la compresión que dependen de los aditivos empleados, que no son más que catalizadores del fraguado. Los valores de resistencia alcanzados son los que determinarán la utilidad del material obtenido, que

puede ser como base de un camino, terreno para recreación o cimiento de una pequeña construcción, aunque en términos generales el suelo tratado pierde algunas de sus propiedades originales.

Las tecnologías de estabilización emplean productos químicos inertes que microencapsulan los compuestos contaminantes, dando como resultado un material sólido en forma de pequeñas partículas. El suelo contaminado debe mezclarse perfectamente para lograr que los contaminantes queden retenidos permanentemente. El material resultante puede utilizarse como suelo o mezclarse con tierra no contaminada para permitir el desarrollo de especies vegetales.

Un aspecto importante que debe cuidarse al emplear este tipo de tecnologías es la composición química de los aditivos empleados, los cuales pueden contener compuestos que en concentraciones elevadas representan un riesgo para la salud. Estas tecnologías tienen la facilidad aplicarse en el propio sitio y la ventaja de requerir muy cortos tiempos de tratamiento, aunque solamente se emplean para manchas de contaminación superficiales.

### 5. *Lavado de suelo*

Esta tecnología se utiliza solamente para procesos *ex situ*. Con el suelo contaminado se construyen pilas las cuales se bañan con solventes orgánicos o mezclas de ellos, puede permitirse una recirculación para optimizar el uso del solvente. Tanto los solventes como los hidrocarburos pueden separarse y reciclarse, sin embargo, implica un gasto importante de solventes, un costo de separación de éstos y un alto riesgo de explosión.

### 6. *Desorción térmica*

El proceso se realiza *ex situ*, el suelo contaminado se introduce al sistema con ayuda de un tornillo sinfín y se aplica temperatura para que los contaminantes vayan desorbiéndose y puedan recuperarse de manera similar a una destilación. La desorción térmica tiene un menor costo que la incineración, el tiempo de tratamiento depende de las características del suelo y del contaminante y tiene la ventaja de que el suelo puede ser reutilizado. Sin embargo, no es una alternativa recomendable para suelos contaminados con petróleo, ya que conforme se va aumentando la tempe-

ratura el manejo del material se hace muy difícil y no se logran recuperar los contaminantes.

### *7. Por arrastre de vapor*

Esta tecnología se basa en el mismo principio que la de arrastre con aire, la diferencia radica en la inyección de vapor a través de pozos. Los contaminantes que logran desorberse del suelo son los que se recuperan, pueden recuperarse para reciclarse o bien acoplarse a otro tipo de proceso para que puedan ser destruidos. No es muy recomendable para suelos contaminados con petróleo.

### *8. Incineración*

La incineración es el tratamiento de elección para la destrucción de residuos peligrosos y la solución efectiva para suelos con alta concentración de contaminantes orgánicos, los cuales se llevan a una completa mineralización transformándose en dióxido de carbono el cual se descarga a la atmósfera, pero se genera una alta concentración de partículas suspendidas por lo que un buen equipo debe contar con sistemas de control de emisiones para asegurar que se trata de una tecnología limpia.

El material inorgánico resultante requiere tratarse como residuo peligroso antes de su disposición final, si rebasa las concentraciones permisibles (generalmente basado en normas extranjeras). Cuando esto ocurre se debe enviar a confinamiento. La operación de un proceso de incineración implica un alto costo, que está influido por la necesidad de transportación a la planta de tratamiento.

### *9. Confinamiento*

El confinamiento no es precisamente una opción de remediación, se recomienda cuando se tienen residuos peligrosos que no pueden ser tratados mediante otras tecnologías, o bien acoplado a otros procesos como la incineración. Para esta opción debe considerarse el costo de envasado del material en contenedores especiales y el de transporte al sitio de confinamiento. En México aún no se cuenta con instalaciones seguras para ello, por lo que es preferible buscar otras opciones antes de pensar en el confinamiento.

## 10. *Vitrificación*

Consiste en introducir dos electrodos en el suelo donde se localiza la mancha de contaminación, suministrar una muy alta carga eléctrica para lograr la vitrificación de los contaminantes. La tecnología solamente opera en la zona no saturada, es aún más costosa que la incineración, por lo que no ha logrado llevarse a una escala mayor, solamente se ha operado a escala de demostración en campo.

De lo anterior se podría resumir que las tecnologías más prometedoras para el tratamiento de suelos contaminados con petróleo son la biorremediación, algunas técnicas de estabilización y la incineración. Para asegurarse de cual es la idónea para un sitio en particular, es indispensable realizar pruebas preliminares de tratabilidad en el laboratorio, donde deben simularse las condiciones que prevalecen en el campo. Lo más recomendable es realizar pruebas de demostración en campo a escala piloto, sin embargo, ésta tiene un costo alto por lo que muchas compañías prefieren no hacerlo.

## VIII. COSTOS DE REMEDIACIÓN

Un proyecto de remediación abarca tres etapas principales: la caracterización, las pruebas de tratabilidad y la conceptualización del proceso de tratamiento, es decir, el diseño, adecuación y puesta en funcionamiento del mismo.

Hacer un desglose de los gastos de un proyecto de remediación, es algo muy sano, ya que permite entender lo complejo del problema y la urgente necesidad de progreso que tiene México en esta materia.

Para estimar los costos de un proyecto de remediación se deben considerar los siguientes rubros: equipo, trabajo de campo, trabajo de laboratorio y trabajo de gabinete. Los gastos generados en cada uno se desglosan a continuación.

### *Equipo*

Los gastos requeridos corresponden a inversión, operación y desgaste del equipo, con la consecuente necesidad de mantenimiento. El equipo se

necesita en actividades de prospección y monitoreo, así como durante las propias actividades de remediación:

- prospección: perforación de pozos, toma de muestras;
- operación: bombas, compresoras, sistemas de extracción, mezcladoras, movimiento de materiales, reactores, centrífugas, filtros;
- monitoreo: toma de muestras y análisis *in situ*.

### *Trabajo de campo*

Este incluye lo siguiente:

- reconocimiento del sitio con ayuda de planos de localización;
- perforación de pozos para toma de muestras, para monitoreo o para procesos de extracción-tratamiento-inyección;
- instalación de equipo de proceso o auxiliares;
- movimiento de materiales común en los procesos *ex situ*;
- operación y supervisión en todas las actividades.

### *Trabajo de laboratorio*

El trabajo de laboratorio es de dos tipos analítico y de adecuación a las condiciones de campo:

- análisis químicos para conocer el tipo y concentración de los contaminantes;
- análisis fisicoquímicos para conocer las características del suelo;
- pruebas de tratabilidad para evaluar la capacidad y eficiencia de la eliminación de contaminantes.

### *Trabajo de gabinete*

Es una actividad de tipo administrativo para integrar todas las actividades referentes al proyecto, a ésta corresponden:

- calendarización;
- planeación;
- diseño;

- análisis e interpretación de resultados;
- elaboración de informes.

## IX. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

El suelo es un recurso natural difícilmente renovable, por lo que para eliminar los contaminantes de un sitio afectado, deben buscarse alternativas factibles y económicas que no lleven a la destrucción o confinamiento del suelo a menos que sea el último recurso.

Hay en el mercado diversas tecnologías de remediación y también diversas compañías que ofrecen sus servicios. En aspectos de remediación de suelos y otros servicios para el control de la contaminación no es recomendable adjudicar un contrato únicamente por licitación, ya que se corre el riesgo de un fracaso en el servicio y consecuentemente una pérdida de recursos y de tiempo.

La selección de una tecnología va acompañada de la selección de la compañía que la aplicará. Hay dos caminos principales para realizar esta selección, una es evaluar los antecedentes curriculares de la compañía y la otra evaluar las bases científicas de las tecnologías. Se puede hacer una selección en trabajo de gabinete, o bien probar las tecnologías en campo a escala de demostración. Un ejemplo de ésta opción se ha venido desarrollando para PEMEX-Refinación a través del servicio EOE-7242, en el que participan el Instituto Mexicano del Petróleo y la Universidad Nacional Autónoma de México a través del Instituto de Ingeniería. Los criterios que se han considerado para la evaluación se presentan a continuación.

Evaluación en trabajo de gabinete:

- experiencia previa avalada por usuarios y por una autoridad ambiental;
- base científico-tecnológica de los desarrollos;
- estrategia para la evaluación técnica del problema;
- antecedentes curriculares del personal técnico.

### Evaluación en campo:

- desarrollo de pruebas de tratabilidad en el laboratorio;
- estrategia para las pruebas de demostración en campo;
- capacidad técnica del personal;
- apoyo analítico especializado;
- efectividad en la eliminación de contaminantes;
- tiempo en que se logra la eliminación de contaminantes;
- costo por unidad de volumen tratado;
- impacto ambiental del proceso;
- seguridad ambiental durante y posterior al tratamiento.

A cada uno de los rubros anteriores se le asignó un peso específico con la finalidad de hacer una evaluación objetiva que arrojara cifras y no únicamente estimaciones. A través de la estrategia planteada se ha logrado la evaluación tanto de la eficiencia de la tecnología como del desempeño de la compañía, además de que se han podido probar diferentes tipos de tecnologías. Para la realización de las pruebas en campo se eligió un suelo con altos niveles de contaminación, medida como hidrocarburos totales del petróleo (HTP), con la idea de que las tecnologías que logren resultados exitosos en los peores casos, puedan hacerlo en suelos menos contaminados. A través de esta evaluación PEMEX-Refinación podrá contar con los elementos técnicos y económicos para asignar contratos con mayores posibilidades de éxito.

## X. ACCIONES PARA LA REMEDIACIÓN DE SUELOS EN MÉXICO

### 1. *Las empresas de consultoría ambiental*

Como se mencionó anteriormente, la remediación de suelos es una práctica que se está dando recientemente en México, para el caso de PEMEX, la institución ya cuenta con listas de prestadores de servicios que han venido realizando trabajos petroleros, dichas compañías cuentan con autorización del Instituto Nacional de Ecología para el transporte y manejo de residuos peligrosos. Esas mismas compañías han encontrado buenas oportunidades de negocio, ofreciendo servicios de remediación, el problema es que sus técnicos no cuentan con los conocimientos necesarios para

realizar dichos servicios. Algunas de ellas se han asociado a través de las llamadas *join ventures* con firmas extranjeras y sus asociados toman participación directa en los proyectos, otras son solamente representantes de firmas extranjeras y aplican las tecnologías como una receta de cocina, pero no pueden dar soluciones a imprevistos porque no tienen el dominio de la tecnología.

Un aspecto que llama la atención, es el hecho de que en una gran proporción, las compañías se presentan como “líderes” en procesos de mediación. En la práctica se ha podido constatar que ese adjetivo es sólo parte de la mercadotecnia y que lo que dicen no siempre es verdad. Aquí es donde debe plantearse una estrategia de selección para no arriesgar con principiantes, dado que el presupuesto para actividades de control ambiental generalmente es limitado, dado que se trata de acciones que no generarán ganancias económicas.

## *2. Los organismos gubernamentales involucrados en materia ambiental*

Como ya se sabe, en México los aspectos relacionados con el ambiente son competencia directa de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca a partir del presente año. Esta se apoya en el Instituto Nacional de Ecología (INE) para el desarrollo de los instrumentos regulatorios y certificación de actividades para el control del ambiente, y en la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (Profepa) para los estudios de impacto ambiental y auditorías ambientales. Una situación compleja que se está dando es que estas dos instituciones han establecido ciertas reglas sin que exista un marco jurídico claro. Desafortunadamente es cada vez mayor la cantidad de trabajo que deben atender dichos organismos y menor el presupuesto con el que deben realizarlo, requieren de especialistas que no pueden contratar y no pueden dar opciones de actualización a sus empleados. Lo anterior les ha generado ya una imagen muy politizada reforzada por algunas situaciones poco éticas.

Por lo que respecta a remediación de suelos contaminados, las instituciones citadas no han mostrado un amplio dominio del conocimiento, aunque hay que reconocer que sí se ha logrado mucho. Pero en este caso se deben redoblar esfuerzos ya que suelo y subsuelo no han sido suficientemente abordados. Dichas instituciones deberían apoyarse más en las universidades, sin embargo, el canal de comunicación no se ha dado abiertamente, sólo para algunos casos específicos. Además, el gobierno

federal debería dar un mayor apoyo, sabiendo el compromiso que se tiene a nivel nacional porque ya no es posible descuidar de esa manera nuestros suelos, ni es conveniente la imagen que se da hacia el exterior.

Hay varios aspectos que es necesario abordar de manera urgente, y para los cuales sería indispensable trabajar con grupos interdisciplinarios e interinstitucionales, los cuales se citan a continuación:

- la creación de un Reglamento en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de Suelo y Subsuelo que responda a la Legislación Ambiental correspondiente que está en proceso de revisión;
- la preparación de especialistas en evaluación de riesgo en materia de contaminación de suelo y subsuelo, que puedan aportar elementos adecuados a nuestro medio durante la creación de las normas técnicas correspondientes;
- la generación de los instrumentos regulatorios (Normas Oficiales Mexicanas) fundamentales para las acciones de remediación 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 remediación;
- revisión y adecuación de los formatos oficiales de auditorías ambientales donde se integre en un solo rubro toda aquella información correspondiente a contaminación de suelo y subsuelo incluyendo la existencia de cementerios y zonas fuera de las áreas de proceso (se pueden citar dos ejemplos, la investigación de tanques subterráneos está en el apartado de “Instalaciones” y debe ir en “Contaminación de Suelo”, además, el apartado de “Contaminación del Suelo” debe incluir también el “Subsuelo”;
- desarrollo de evaluaciones más objetivas donde se le de un peso específico a los aspectos correspondientes a una auditoría ambiental, para arrojar cifras que puedan interpretarse como “calificaciones”, esto elimina la subjetividad, permite homogeneizar los diferentes criterios y ahorra muchas horas de interpretación y redacción (algo que podría servir de ejemplo, es una metodología desarrollada en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, para realizar estudios de impacto ambiental con ayuda de computadora, la cual ya ha sido probada en situaciones reales);

- desarrollo de metodologías objetivas para la evaluación de tecnologías para remediación de sitios contaminados (la desarrollada por el Instituto de Ingeniería, UNAM e Instituto Mexicano del Petróleo para PEMEX-Refinación podría servir de ejemplo y como base para ser enriquecida).

Por otro lado, los organismos gubernamentales deberán trabajar mucho en aclarar su interrelación, referida a los aspectos de contaminación de suelo y subsuelo, entre ellos: la Comisión Nacional del Agua, la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, la Secretaría de Recursos Hidráulicos y la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal.

### 3. *El papel de las universidades*

*Preparación de personal capacitado.* A pesar de la importancia de los problemas ambientales y de la necesidad de soluciones adecuadas a nuestro medio, no existen carreras a nivel licenciatura que permitan la formación de profesionales de buen nivel, con una visión muy dirigida al control de la contaminación ambiental, mucho menos en lo que se refiere al recurso suelo. Las áreas técnicas donde las universidades necesitan reforzar la formación de profesionistas con enfoque ambiental de muy alto nivel son: hidrogeología, geociencias, geotécnica, fisicoquímica, química analítica y biotecnología, entre otras.

A nivel posgrado existen más opciones para la preparación de personal más especializado, además los estudiantes cuentan ya con una base de licenciatura. Esto hace más fluida la enseñanza, sin embargo, hay poco personal académico a nivel posgrado con experiencia en control de la contaminación, éste generalmente se encuentra realizando trabajos en campo. Otra opción son los cursos de actualización, en donde se tiene la gran ventaja de contratar profesores por un cierto número de horas, las necesarias para impartir temas muy especializados. A este respecto, las universidades han estado realizando una labor importante.

Otra área que requiere de especialistas es la legislación, las universidades deberán preocuparse por generar “abogados ambientales” que adquieran esta visión durante su formación, no que se formen en el ejercicio de su profesión. Los países desarrollados tienen amplia experiencia en esta materia algunos esquemas podrían servir como base para su adecuación en México.

*Desarrollo, adaptación e innovación de tecnologías.* Esta actividad puede desarrollarse de manera institucional o como apoyo directo a empresas de consultoría. Para que la interacción entre las universidades y las empresas de consultoría ambiental se pueda dar fácilmente, se deben contemplar dos aspectos importantes: 1) que el investigador aborde el problema tratando de cumplir con el objetivo del proyecto por el camino más corto, sin desviarse por la curiosidad científica, y 2) que la empresa acepte que los gastos de investigación son altos, que ésta es necesaria y que toma su tiempo.

Con base en lo anterior y considerando que cualquier nuevo desarrollo podría tomar muchos años de trabajo antes de ser llevados a la práctica, lo más recomendable para nuestro país es recurrir a las tecnologías existentes que ya hayan sido probadas en otros sitios contaminados y realizar los ajustes necesarios, innovación o adaptación, para aplicarla en los sitios a remediar, dado que cada uno tiene sus características particulares.

*Evaluación de proyectos de remediación.* En este caso investigadores universitarios se pueden involucrar como evaluadores de tecnologías o desarrollando elementos necesarios para que PEMEX pueda cumplir mejor su función en el cuidado del ambiente. De esta forma, se tiene la ventaja de contar con una asesoría de muy alto nivel y muy versátil, tanto como sea necesario.

Dado que la llegada de tecnologías de remediación a nuestro país se está dando actualmente y se tiene ya la conciencia de remediar, a todas las empresas de PEMEX les convendría seleccionar las tecnologías adecuadas y a las empresas que se encargarán de llevarlas a la práctica, con otros elementos de mayor peso que los que se tienen en un concurso de licitación, donde el criterio más empleado es el presupuesto más bajo, las compañías que presentan presupuestos económicos, no necesariamente son las que tienen una mejor base tecnológica. Este aspecto es un motivo de amplia discusión.

#### 4. *Educación ambiental para la sociedad*

En términos generales, la sociedad carece de muchos conocimientos que son necesarios para comprender la importancia de su participación en la vida diaria, ya sea como actores principales o bien como afectados por acciones tomadas equivocadamente. Los avances que se han logrado para “educar a la sociedad” en materia de aire podrían servir como ejemplo,

en general, la sociedad actualmente se preocupa un poco más por tener un aire limpio. Mucho se tendrá que trabajar en materia de agua todavía y más aún en materia de suelo, donde no está claro el papel de éste como un “recurso natural”.

## XI. LOS COMPROMISOS DE PEMEX

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, los derrames que ocurrieron en el pasado son tan antiguos como la industria petrolera, y por el grado de intemperización que tienen se hace muy difícil su tratamiento.

Como parte del marco jurídico de PEMEX en materia ambiental, el artículo 23 del Reglamento de Trabajos Petroleros indica que PEMEX tiene la obligación de mantener todas sus instalaciones en buen estado sanitario y de conservación. Por otro lado, en el artículo 37 se señala que corresponde al organismo permisionario la responsabilidad por los daños y perjuicios que se ocasionen al tránsito terrestre, al fluvial o al marítimo, al ambiente, la pesca, la agricultura, la ganadería o a terceras personas.

En su informe 93-94, PEMEX establece que como resultado de las contingencias ambientales por accidentes ocurridos durante el bienio y que produjeron impactos al ambiente, se llevaron a cabo trabajos de restauración y reforestación orientados a restituir a sus condiciones originales en 450 hectáreas en donde se emplean técnicas de biorremediación, químicas y físicas.

Lo anterior muestra que PEMEX como empresa está conciente de sus obligaciones y su responsabilidad hacia el ambiente, pero hace falta aún más. En algunos casos todavía impera el maquillaje sobre las verdaderas soluciones, y se han enterrado muchos derrames en lugar de tratarlos. Hace falta estimular más la ética y el respeto al medio ambiente a través de la educación que pueda brindarse a los empleados que realizan directamente las actividades en campo, quienes están muy involucrados.

## XII. CONCLUSIONES

En este documento se ha tratado de enfatizar la función tan importante del suelo como barrera de protección de los acuíferos que son la fuente de suministro de agua a las poblaciones y la imperante necesidad de limpiar los suelos contaminados, con la finalidad de proteger la calidad del agua que utilizarán las generaciones futuras.

La diversidad de los aspectos incluidos son una muestra de lo compleja que es la tarea de remediación de un sitio contaminado, no por los aspectos técnicos, ya que los grandes avances de investigación y desarrollo de tecnologías innovadoras extranjeras han abierto una amplia gama de posibilidades para abordar los problemas de contaminación de suelos y acuíferos. El problema es que como país, aún no estamos preparados para enfrentar con herramientas propias las acciones de remediación, no tenemos el marco jurídico que sirva como el punto de partida, ni los instrumentos regulatorios auxiliares, sin embargo, tenemos que empezar a actuar. El hecho de que no podamos esperar más tiempo, nos puede llevar a tomar decisiones que tal vez no sean las más adecuadas, pero tendrán que modificarse sobre la marcha, como ha sucedido en numerosas acciones para el control de la contaminación ambiental.

Uno de los aspectos que conviene analizar y discutir ampliamente es el hecho de tomar como nuestros, las regulaciones y los procedimientos que han seguido otros países, específicamente Estados Unidos. Tal vez como punto de partida sí conviene hacerlo, porque no tenemos alguna base, pero tendremos que ir generando lo propio y dejar que se vaya retroalimentado de manera constante al poner en práctica algunas acciones. En varias situaciones hemos tomado como referencia, cualquier valor de las concentraciones permisibles de contaminantes que rigen en Estados Unidos, sin saber cómo fueron establecidas y sin entender por qué para un mismo parámetro indicador existe un amplio intervalo para escoger un valor. Para estar seguros que los valores elegidos fueron los adecuados tendremos que prepararnos para realizar los estudios de evaluación de riesgo aplicables específicamente a los sitios donde están los problemas de contaminación de suelos.

Otro aspecto en el que debemos generar herramientas modernas es en las auditorías ambientales, en la evaluación de tecnologías para remediación y en la selección de compañías de servicios ambientales. Aquí,

necesitamos crear esquemas más objetivos donde se puedan unificar los criterios de los diferentes especialistas y en los que las opiniones se emitan de una forma cuantitativa con base en los aspectos de mayor peso específico. Esto dará una mayor claridad a las evaluaciones y se podrán tener resultados precisos en un menor tiempo.

Finalmente, la complejidad de los trabajos de remediación de suelos contaminados con petróleo que PEMEX tendrá que dar inicio en un corto tiempo, sugiere la integración de grupos interdisciplinarios e interinstitucionales en los que especialistas de alto nivel en aspectos técnicos y legales aporten nuevas ideas para responder con más confianza a éste que es uno de sus grandes retos.

### XIII. BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, S. A., 1995. "Retos y oportunidades de la ciencia del suelo al inicio del siglo XXI", *Terra* 13(1): 3-16.
- BENIDICKSON J., DOERN G.B., OLEWILER N., *Getting the Green Light, Environmental Regulation and Investment in Canada*. C.D. Howe Institute.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1995*, 22a. edición, Ediciones Delma.
- EPA, 1991. *Understanding Bioremediation, A Guide for Citizens*, EPA/540/2-91/002.
- KOSTECKI P.T., CALABRESE, E. J., and HORTON, H. M., 1989. "Review of present risk assessment models for petroleum contaminated soils. Chap. 21", in *Petroleum Contaminated Soils*, Vol. I, De. Kostecki P.T. and Calabrese E.J., Lewis Publishers, Inc. USA.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1994*, 3a. ed., Ediciones Delma.
- OLIVER T., KOSTECHI P., and CALABRESE E., 1993. *State Summary of Soil and Groundwater Cleanup Standards for Hydrocarbons*, Association for the Environmental Health of Soils, for EPA Office of Underground Storage Tanks.
- PHEIFFER T.H., NUNNO T. J., and WALTERS, J. S., 1990. EPAs Assessment of European Contaminated Soil Treatment Techniques. *Environ. Progress* 9(2): 79-86.

## REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

189

- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 1994. Formato oficial para auditorías ambientales, Subdirección de Auditoría Ambiental.
- RUSSELL D.L., 1992. *Remediation Manual for Petroleum-Contaminated Sites*, Technomic Publishing Co., USA.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, *Tratado de Libre Comercio en América del Norte, Acuerdos de Cooperación Ambiental y Laboral*, 1993.
- Secretaría de Desarrollo Social, Instituto Nacional de Ecología. 1993-1994. *Informe de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente* (Capítulo 7: Suelo y Capítulo 13: Industria Petrolera). México.
- United States Department of Energy, Office of Environmental Restoration and Waste Management, 1993. *Technology Development, A National Program of Demonstration, Testing and Evaluation*.
- United States Environmental Protection Agency, 1993. *Cleaning up the Nation's waste sites: Markets and Technology Trends*.