



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**

CURSOS INSTITUCIONALES

CONTAMINACIÓN Y RESTAURACIÓN DE SUELOS

Del 14 al 18 de marzo de 2005

APUNTES GENERALES

CI-031

**Instructor: Ing. Fernando Santiago Gómez Martínez
SEMARNAT CHIAPAS
Marzo / 2005**

Contaminación y Restauración de Suelos

IHNE, SEMARNAT, CNA, SSA, SEDESOL
Chiapas



DECFI UNAM



Ing. Fernando Gómez

Tuxtla Gutiérrez

Marzo del 2005



1

Contenido

- Introducción a la contaminación y remediación de suelos en México.
- Problemas asociados a la contaminación de suelos.
- Prácticas que han contribuido a la contaminación del suelo con residuos peligrosos.
- Respuestas ante la contaminación de sitios con residuos peligrosos.
- Alemania, Estados Unidos, Japón.
- Situación general de la contaminación de suelos en México.
- Minería.
- Explotación del petróleo.
- Actividades agrícolas.
- Curtidurías.
- Uso de aguas residuales en irrigación de campos agrícolas.
- Basureros a cielo abierto.
- Contaminación de suelos en instalaciones de empresas.

2

➤ Relación industria y medio ambiente.

- ↻ Antecedentes.
- ↻ Relación industria y medio ambiente.
- ↻ Tendencias internacionales.
- ↻ Tendencias nacionales.

➤ Sustento legal de la protección del suelo y su remediación.

- ↻ Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA).
- ↻ Artículo 134 al 136 y 139.
- ↻ Artículo 140 al 143.
- ↻ Artículo 152 bis.

3

➤ Métodos de muestreo de suelos.

- ↻ Introducción
- ↻ Principales aspectos a considerar en muestreos de suelos contaminados.
- ↻ Definiciones.
- ↻ Emplazamientos o lugares contaminados que requieren de investigación.
- ↻ Proceso de investigación de suelos contaminados
- ↻ Proceso de investigación exploratoria
- ↻ Principios generales de los trabajos de investigación.
- ↻ Diseño de la estrategia de investigación.
- ↻ Diseño de la estrategia de muestreo.
- ↻ Principios generales
- ↻ Estrategia de muestreo del suelo
- ↻ Localización de los puntos de muestreo.
- ↻ Profundidad de muestreo.
- ↻ Número de muestras por cada punto de muestreo
- ↻ Estrategia de muestreo de las aguas subterráneas

4

- ☞ Contexto hidrogeológico
- ☞ Muestreo de las aguas subterráneas.
- ☞ Estrategia de muestreo del aire intersticial del suelo
- ☞ Estrategia de muestreo de otros elementos
- ☞ Diseño del programa de análisis químico.
- ☞ Diseño del plan de seguridad
- ☞ Preparación de los trabajos de campo.
- ☞ Aspectos generales
- ☞ Preparación de la toma de muestras
- ☞ Toma de muestras
- ☞ Toma de muestras de matriz sólida.
- ☞ Toma de muestras de suelo
- ☞ Toma de muestras de matriz líquida
- ☞ Toma de muestras de aguas subterráneas
- ☞ Toma de muestras de residuos líquidos.
- ☞ Toma de muestras de matriz gaseosa
- ☞ Registro de los datos de muestreo.
- ☞ Conservación y transporte de muestras sólidas
- ☞ Conservación y transporte de muestras líquidas
- ☞ Conservación y transporte de muestras gaseosas
- ☞ Control de calidad del proceso de toma y transporte de muestras

5

- ☞ Análisis In Situ.
- ☞ Introducción.
- ☞ Análisis In Situ de muestras sólidas
- ☞ Análisis In Situ de muestras líquidas
- ☞ Análisis In Situ de muestras de gases y vapores.
- ☞ Otras investigaciones y ensayos
- ☞ Investigaciones geofísicas
- ☞ Ensayos para determinar parámetros hidrodinámicos
- ☞ Ensayos de permeabilidad.
- ☞ Ensayos de bombeo
- ☞ Aspectos específicos de la Investigación Exploratoria
- ☞ Recopilación previa de información
- ☞ Estudio histórico
- ☞ Análisis del medio físico
- ☞ Visita de campo.
- ☞ Interpretación de resultados
- ☞ Evaluación de riesgos.
- ☞ Protocolo general de evaluación de riesgos.
- ☞ Informe de la investigación detallada
- ☞ Investigación de ruinas industriales

6

↳ Tecnologías de remediación para suelos contaminados.

- ↳ Introducción
- ↳ Datos requeridos para la remediación de suelos contaminados
- ↳ Factores que inciden en la eficiencia de una tecnología de remediación
- ↳ Caracterización del contaminante
- ↳ Caracterización del suelo
- ↳ Fuentes de contaminación en México.
- ↳ Industria petroquímica
- ↳ Industria minera.
- ↳ Agroquímicos
- ↳ Estaciones de servicio
- ↳ Ferrocarriles
- ↳ Disposición de residuos peligrosos
- ↳ Tecnologías de remediación.
- ↳ Clasificación de tecnologías de remediación
- ↳ Tecnologías de remediación biológicas (biorremediación)
- ↳ Tecnologías in situ
- ↳ Tecnologías ex situ
- ↳ Tecnologías de remediación fisicoquímicas
- ↳ Tecnologías de remediación térmicas
- ↳ Trenes de tratamientos.
- ↳ Selección de una tecnología de remediación
- ↳ Tecnologías de remediación utilizadas en México
- ↳ A Compuestos orgánicos volátiles
- ↳ B Compuestos orgánicos semivolátiles.
- ↳ C Ácidos y bases
- ↳ Conclusiones y perspectivas

7

↳ Experiencias nacionales de remediación de suelos.

- ↳ Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.
- ↳ Experiencias diversas.
- ↳ Restauración de sitios contaminados en el Distrito Federal.
- ↳ Elementos para sustentar la política ambiental para la protección de suelos y su remediación.
- ↳ Actores a involucrar en el diseño e instrumentación de la política.
- ↳ Objetivo general de la política de protección y remediación de suelos.
- ↳ Objetivos particulares.
- ↳ Principios de la política.
- ↳ Estrategias de política.
- ↳ Gestión de suelos contaminados.
- ↳ Conclusiones.

↳ Ejemplos.

8

↘ Introducción a la contaminación y remediación de suelos en México.

9

↘ Introducción a la contaminación y remediación de suelos en México.

☞ Problemas asociados a la contaminación de suelos.

Una de las consecuencias del manejo y disposición inadecuados de los materiales peligrosos (corrosivos, reactivos, explosivos, tóxicos e inflamables) en cualesquiera de las fases de su ciclo de vida, incluyendo cuando se convierten en residuos peligrosos, es la pérdida de la fertilidad de los suelos, de su capacidad biodegradadora y de otras de sus funciones, que directa o indirectamente permiten la supervivencia de la flora y fauna, e incluso de los seres humanos, dadas las estrechas interrelaciones entre los diferentes elementos que constituyen a los ecosistemas.

Otro aspecto de suma importancia, es el deterioro creciente de las fuentes de abastecimiento de agua subterráneas o superficiales, derivado también de la contaminación de los suelos por materiales peligrosos (particularmente por agroquímicos) y todo tipo de residuos.

El costo elevado, y algunas veces desmesurado, que representa la remediación o restauración de los suelos y cuerpos de agua contaminados y deteriorados, limita su limpieza y anula la posibilidad de aprovecharlos, poniendo en riesgo a la salud humana y a los ecosistemas.

Nota: El término restauración, cuando se refiere a suelos o sitios contaminados con materiales o residuos, debe ser sustituido por el término remediación, que es más apropiado. La remediación se refiere al conjunto de actividades tendientes a reducir la presencia de materiales o residuos peligrosos en aquellos suelos o sitios contaminados.

10

☞ Prácticas que han contribuido a la contaminación del suelo con residuos peligrosos.

En todo el mundo, cuando aún no habían surgido las regulaciones relativas al manejo y disposición final de los residuos peligrosos, era práctica común (y lamentablemente aún lo sigue siendo en muchas empresas en México), que los establecimientos industriales y de servicios acumularan estos residuos en el interior de sus instalaciones.

Tratándose de residuos líquidos, lo más frecuente era depositarlos en lagunas o embalses, en tanques subterráneos o sobre la superficie, o bien en contenedores. En tanto que los residuos sólidos se apilaban, generalmente a cielo abierto y sin ninguna protección.

Estas modalidades de manejo de los residuos industriales, junto con la forma usual de eliminar los residuos en tiraderos de basura, en barrancas y todo tipo de sitios inadecuados (lo que todavía ocurre en nuestro país con los residuos municipales e industriales no clasificados como peligrosos y, frecuentemente, también con los peligrosos) en todos los países, trajo consigo una extensa contaminación de suelos que, en muchos casos, condujo (o aún sigue conduciendo) a la contaminación de los cuerpos de abastecimiento de agua.

11

Así, por ejemplo, en los Estados Unidos de América y de acuerdo con un estudio realizado por la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR), el 41% de los 1,287 sitios incluidos en la base de datos HazDat, corresponden a lugares abandonados de depósito o tratamiento de residuos (como basureros a cielo abierto y rellenos sanitarios mal construidos u operados), el 33% son instalaciones de fábricas abandonadas y los incluidos en la categoría de "otros" comprenden cuerpos de agua contaminados, tales como pozos de abastecimiento o lagos.

En ese país, se han identificado más de 30 mil sitios contaminados, por lo cual tuvieron que desarrollar una metodología para evaluar sus implicaciones para el ambiente y la salud, a fin de establecer prioridades de limpieza.

En el estudio mencionado, también se refiere que la Agencia de Protección Ambiental (EPA), indica que cerca de 41 millones de personas habitan a una distancia de 4 millas de 1,134 sitios contaminados por el manejo inadecuado de residuos peligrosos, los cuales forman parte de la lista de sitios clasificados como prioritarios.

12

☛ Respuestas ante la contaminación de sitios con residuos peligrosos.

Por las experiencias antes señaladas, diversos países han establecido políticas tendentes a prevenir la contaminación y deterioro de los suelos, combinando diversos instrumentos de gestión que vinculan, hacen más consistentes y complementan las disposiciones regulatorias y los actos de autoridad relacionados con los materiales peligrosos, los diversos tipos de residuos y la gestión de los suelos y el agua

Sólo a manera de ejemplo, se resumirán a continuación algunos aspectos destacados de las experiencias en la materia en tres países: Alemania, Estados Unidos y Japón. Sin embargo, por la gran diferencia que existe en los sistemas jurídicos de los países pioneros en materia de protección de los suelos y el agua, así como de remediación de sitios contaminados, es preciso tener cautela al tratar de usarlos como modelo para sustentar una Política Nacional en la materia, dadas las peculiaridades del territorio nacional, de sus ecosistemas o de su población, así como por las circunstancias por las que atraviesa México

Lo cual no significa que no se pueda aprender de las experiencias de otros países, sobre todo en lo que se refiere al establecimiento de prioridades de acción basadas en la evaluación y ponderación de los riesgos asociados a la contaminación de los suelos, al igual que a los enfoques innovadores tendentes a prevenir y detener la liberación al ambiente de los materiales y residuos peligrosos

13

☛ Alemania, Estados Unidos, Japón.

Alemania.

La severa contaminación de las zonas industrializadas de la Alemania del Este, antes de la unificación, ha llevado a establecer una política de "reciclaje de sitios contaminados", mediante programas destinados a revalorar los que han sido dejados por industrias desplazadas hacia otras regiones, a través de esquemas de restauración en los que, de acuerdo con los usos futuros del suelo, se lleva a cabo la limpieza con distintos grados de intensidad, con la perspectiva de recuperar la inversión una vez que se vendan los terrenos y se proceda a su urbanización.

El programa se sustenta en la evaluación de los riesgos de los sitios contaminados que se realizan en fases, la primera de las cuales consiste en determinar cuáles fueron las actividades que se desarrollaron en cada uno de ellos para determinar el tipo de sustancias peligrosas involucradas; en la segunda fase, se jerarquizan dichas sustancias de acuerdo a sus posibles riesgos e identifican aquellas que puedan servir de indicadores de la magnitud de la contaminación (entre los criterios de selección se encuentran su solubilidad, su carcinogenicidad, su persistencia y capacidad de bioacumulación, entre otros), el tercer paso, y tal vez el más importante, consiste en verificar si ha habido movilización de las sustancias indicadoras hacia los acuíferos y hacia poblaciones vulnerables a sus efectos adversos.

14

Los límites máximos permisibles de las sustancias peligrosas establecidos en las distintas normas relativas a emisiones al aire, descargas al agua, contaminación de suelos y agua, sirven de referencia al determinar el grado de limpieza de los sitios destinados a los diferentes usos.

Para elaborar el diseño de los programas y ponerlos en práctica se involucra a todas las partes interesadas (empresas contaminadoras, gobierno local y federal, inversionistas, fuentes de financiamiento), ya que se requiere la participación de todos para poder contar con los recursos financieros y crear los mercados.

Estados Unidos

En Estados Unidos, además de las disposiciones legales que regulan los residuos de toda índole, contenidas en la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA), publicada en 1976 y reformada decenas de veces, entre otras, a través de las "Enmiendas de los Residuos Peligrosos y Sólidos" de 1984 (HSWA por sus siglas en inglés), se generaron otros ordenamientos tales como los contenidos en:

✓ El Código de Reglamentos Federales (CFR), que proporciona requisitos explícitos y legalmente exigibles a quienes manejen residuos peligrosos, descritos en el Apéndice A

✓ La Ley Detallada de Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambiental (CERCLA), publicada en 1980 y conocida como el "Superfondo", que aborda la limpieza de la contaminación por las partes responsables de ella y sienta las bases legales para la creación de un fondo fiduciario para las actividades de restauración de los sitios contaminados en los que se desconoce a los responsables de dicha contaminación

15

Es importante destacar que la aplicación de las disposiciones de CERCLA han dado lugar a litigios que han consumido gran parte de los recursos del fondo fiduciario, junto con los gastos de los muestreos y análisis para caracterizar los sitios contaminados, con lo cual han quedado pocos recursos para limpiar dichos sitios

Ante estas circunstancias y por las dificultades creadas por la Ley RCRA, al considerar que los suelos contaminados con residuos peligrosos deben manejarse como si se tratara de este tipo de residuos enfocando su remediación, la EPA ha tenido que desarrollar múltiples estrategias y ordenamientos legales para sortear y superar estas dificultades. Uno de los enfoques más sobresalientes, es el tendiente a prevenir que se contaminen los suelos y a crear garantías financieras para limpiarlos en caso de que esto ocurra, las cuales se imponen a los particulares que generan, tratan, almacenan y disponen finalmente de los residuos peligrosos

Así, por ejemplo, existen disposiciones legales rigurosas para regular todas las modalidades de manejo de los residuos peligrosos que, entre otros, incluyen condiciones muy precisas para llevar a cabo el cierre de las instalaciones que realizan las actividades antes mencionadas (y para efectuar el monitoreo del agua subterránea, durante 50 años posteriores al cierre de las instalaciones de confinamiento de residuos peligrosos), así como para prevenir y responder a accidentes que involucren tales actividades y residuos. Al mismo tiempo, se ha establecido una gama de garantías financieras para asegurar que tales acciones se lleven a cabo y sin las cuales no se puede autorizar a las empresas a realizar las actividades de manejo de residuos a las que aplican (tratamiento, almacenamiento y disposición final: TSDF). Junto con ello, se ha desarrollado un Programa denominado "Campos Cafés", enfocado a remediar y valorizar los sitios remediados para recuperar la inversión aplicada a su limpieza y reaprovecharlos.

16

Japón.

En Japón, se ha informado de la creciente contaminación del suelo en zonas urbanas, en particular en los terrenos ocupados por instalaciones industriales, y de las fuentes de abastecimiento de agua. Estas últimas, también se han visto contaminadas en las áreas rurales por otros procesos como son la minería, que han traído como consecuencia casos de intoxicación humana por el consumo de granos contaminados con metales como el cadmio por la irrigación de cultivos agrícolas con las aguas contaminadas por residuos o jales mineros.

Lo anterior ha dado lugar a la promulgación de las leyes sobre el Control de la Contaminación del Agua y sobre el Control de la Contaminación del Suelo en Terrenos Agrícolas (1971), así como de la Norma Oficial Ambiental sobre la Contaminación del Suelo (1991), de la Norma Voluntaria sobre Estudios y Medidas de la Contaminación del Suelo por Metales Pesados y Otros (1994) y la Norma Voluntaria Provisional sobre Estudios y Medidas de la Contaminación del Suelo y Aguas Subterráneas por Compuestos Orgánicos Clorados (1994).

En la Ley de 1971 sobre contaminación del suelo en terrenos agrícolas, se fijaron límites máximos de cadmio en arroz (1mg/kg), de cobre en tierra (125 mg/kg) y de arsénico en tierra (15 mg/kg), en base a lo cual el gobernador local diseña un plan para controlar la contaminación del suelo, eliminar los contaminantes y definir los usos del suelo una vez restaurado, además de identificar áreas de alto riesgo en las que no se pueden permitir actividades agrícolas, en cuyo caso la empresa contaminante debe de indemnizar a los agricultores.

17

En 1994, se identificaron 128 zonas agrícolas contaminadas, con un área aproximada de 7, 140 hectáreas, que sobrepasaron los límites de contaminación establecidos; en 91 de estas zonas el cadmio rebasó la norma, en 37 el cobre y en 14 el arsénico.

En el mismo año, se identificaron 232 casos de contaminación del suelo en zonas urbanas, 109 de los cuales afectaron el entorno, ya sea ríos o aguas subterráneas. En particular, se identificó la contaminación de aguas subterráneas por tricloroetileno y tetracloroetileno.

Entre las industrias que más contribuyen a este tipo de contaminación se identificaron la de galvanización mediante cianuro y cromo hexavalente, la química que emplea plomo y mercurio, la de maquinaria eléctrica que utiliza tricloroetileno y la de lavandería que usa tetracloroetileno.

La Norma Oficial Ambiental sobre Contaminación de Suelos establece límites permisibles para 25 tipos de contaminantes, como se indica en el cuadro siguiente. Sin embargo, algunos de estos límites se amplían como se muestra en el cuadro subsecuente, cuando el suelo contaminado está separado del nivel de aguas subterráneas y la concentración de los contaminantes en ellas es inferior a la indicada previamente:

18

Límites permisibles de contaminantes del suelo establecidos en el Japón.

TIPO DE CONTAMINANTE	LÍMITE PERMISIBLE
Cadmio	0.01 mg/l en arrozal 1.00 mg/kg de tierra agrícola
Cianuro	No detectado
Fosforo organico (paration, metil paration, metilzimeton, EPN)	No detectado
Plomo	0.01 mg/l en arrozal
Cromo hexavalente	15 mg/kg en tierra agrícola
Arsénico	0.05 mg/l 0.01 mg/l en arrozal
Mercurio total	15 mg/kg en tierra agrícola
Mercurio alquímico	0.0005 mg/l
Bifenilos policlorados (BPC's)	No detectado
Cobre	No detectado
Diclorometano	125 mg/kg en tierra agrícola de arrozal
1,2-dicloroetano	0.02 mg/l
Tetracloruro de carbono	0.02 mg/l
1,1-dicloroetileno	0.002 mg/l
Cis-1,2-dicloroetileno	0.02 mg/l
1,1,1-tricloroetano	0.04 mg/l
1,1,2-tricloroetano	1 mg/l
Tricloroetileno	0.006 mg/l
Tetracloroetileno	0.003 mg/l
1,3-dicloropropeno	0.01 mg/l
Thiuram	0.02 mg/l
Sumazina	0.006 mg/l
Thiobengarb	0.003 mg/l
	0.02 mg/l
Benceno	0.01 mg/l
Selenio	0.01 mg/l

19

Ajustes a los límites permisibles de contaminantes en suelo, en función de la profundidad de las aguas subterráneas, en Japón.

TIPO DE CONTAMINANTE	LÍMITE PERMISIBLE	
	Cuando la concentración del contaminante en agua subterránea es menor que	Ampliación de los valores de control
Cadmio	0.01 mg/l	0.03 mg/l
Plomo	0.01 mg/l	0.03 mg/l
Cromo hexavalente	0.05 mg/l	0.0015 mg/l
Arsénico	0.01 mg/l	0.03 mg/l
Mercurio total	0.0005 mg/l	0.0015 mg/l
Selenio	0.01 mg/l	0.03 mg/l

20

La Norma Voluntaria sobre Metales Pesados y Otros, indica el método técnico general para realizar estudios acerca de la contaminación del suelo y determinar el alcance de los tratamientos requeridos. Dicha norma considera nueve contaminantes con los mismos límites máximos fijados por la Norma Oficial Ambiental:

<i>BPC's</i>	<i>Cadmio</i>	<i>Cianuro</i>	<i>Cromo hexavalente</i>
<i>Arsénico</i>	<i>Mercurio total</i>	<i>Mercurio alquilico</i>	<i>Plomo Selenio</i>

A través del método de lixiviación se determina la magnitud de la contaminación y la posibilidad de encontrar afectación del subsuelo. En la selección de los tratamientos de suelos contaminados, se toman en consideración tanto las condiciones naturales como sociales. Los parámetros en los que se basa la selección de la técnica de restauración se encuentra su efectividad, así como el control adecuado de las instalaciones de tratamiento. Las técnicas empleadas en la restauración de sitios incluye, entre otros:

- Impermeabilización.
- Técnica mixta que utiliza muros subterráneos y geomembranas.
- Técnica mixta que emplea tablaestaca de acero y arcilla.

21

La Norma Voluntaria Provisional sobre Compuestos Orgánicos Clorados, considera los 10 tipos de compuesto que lo contienen y los 5 tipos de insecticidas siguientes:

1) Compuestos orgánicos clorados

- Diclorometano
- Tetracloruro de carbono
- 1,2-dicloroetano
- 1,1-dicloroetileno
- Cis-1,2-dicloroetileno
- 1,1,1-tricloroetano
- 1,1,2-tricloroetano
- Tricloroetileno
- Tetracloroetileno
- Benceno

2) Insecticidas Agrícolas

- Fósforo orgánico (paratión, metil-paratión, metil-zimeton, EPN)
- 1,3-dicloropropeno
- Tiuram (disulfuro de tetrametiltiuram)
- Simazina (2-Cloro-4,6,bis(etilenamino)-S-Triazina)

22

3) Método de estudio para los gases del subsuelo.

Los métodos empleados para la determinación de gases en el subsuelo considerados en la norma provisional comprenden:

- Tubos detectores
- Cromatografía de gases (equipo portátil)
- Fijación por hexano
- Adsorción en carbón activado / desorción por calentamiento electromagnético /espectrómetro de masas.
- Adsorción / desorción por calentamiento / cromatógrafo de gases
- Aspiración de gases del subsuelo
- Extracción de aguas subterráneas

El control de la contaminación del suelo en zonas urbanas se centran en dos aspectos.

1. La prevención, evitando la descarga de materiales peligrosos
- 2 El tratamiento, estudiando cada caso para la restauración del suelo contaminado y la purificación de las aguas subterráneas

Entre las medidas legales de tipo preventivo se encuentran

- El control de las aguas negras y la prohibición de la penetración al subsuelo de las que contienen sustancias peligrosas (mediante la aplicación de la Ley sobre Control de la Contaminación del Agua)
- El control de emisiones (mediante la Ley sobre Control de la Contaminación del Aire)
- El control de los residuos (mediante la Ley sobre Tratamiento de Residuos)

23

Un problema particular en el Japón, deriva del hecho de que la mayor parte de las áreas urbanas contaminadas se encuentran dentro de propiedades privadas, sobre todo pertenecientes a empresas, y la ausencia de instrumentos legales que permitan al gobierno ejercer su autoridad para que las limpien, dado lo cual se ha creado un sistema de incentivos financieros consistentes en créditos a 20 años con bajos réditos para fomentar actividades de restauración.

Cuando las concentraciones de los contaminantes rebasan los límites que se indican en el cuadro siguiente, se aplicarán tratamientos químicos o solidificantes. En caso de que los contaminantes sigan sobrepasando los niveles anteriores después de aplicarse el tratamiento citado, se confinan con un muro de concreto.

Concentraciones límites de contaminantes en suelos que requieren la aplicación de tratamientos químicos o solidificantes en Japón.

TIPO DE CONTAMINANTE	LIMITE PERMISIBLE
Cadmio	0.3 mg/l
Cianuro	No detectado
Plomo	1 mg/l
Cromo hexavalente	1.5 mg/l
Arsénico	0.3 mg/l
Mercurio total	0.005 mg/l
Mercurio alquílico	No detectado
BPC's	0.03 mg/l
Selenio	0.3 mg/l

24

☞ Situación general de la contaminación de suelos en México.

Hace aproximadamente diez años, los trabajos de prospección del subsuelo realizados para la extracción de agua potable revelaron su contaminación debido a la presencia de hidrocarburos, poniendo de relieve que la contaminación del suelo es un factor significativo desde diversos puntos de vista (ecológico, económico, social, etc.).

Actualmente, es por todos conocido que la contaminación de suelos y cuerpos de agua es provocada por diversas actividades antropogénicas, entre las que se encuentran las que a continuación se esbozan.

25

☞ Minería.

Más de cuatrocientos años de actividades mineras, en muchos casos ininterrumpidas, han dejado tras de sí montañas de residuos mineros conteniendo diversos materiales potencialmente tóxicos, a los cuales se exponen las poblaciones, la flora y la fauna, a través del suelo, aire, de las aguas contaminadas o de las cadenas alimentarias en cuyos eslabones se bioacumulan.

Ejemplo de este último tipo de situación, es lo que puede ocurrir con el mercurio.

Dos de los contaminantes más frecuentes en las zonas mineras del país son el arsénico y el plomo, a los cuales se suma el cadmio en algunas de ellas; estos contaminantes si se encuentran biodisponibles y se movilizan hacia las poblaciones vecinas pueden ocasionar problemas severos de intoxicación.

26

☞ Explotación del petróleo.

Las intensas actividades petroleras y de obtención de los derivados del petróleo en diversas regiones del país, de alta vulnerabilidad ecológica, han contribuido a una severa contaminación por hidrocarburos y otro tipo de sustancias potencialmente tóxicas, que han penetrado al suelo y contaminado cuerpos de agua.

Cabe señalar que los hidrocarburos están constituidos por una gran diversidad de compuestos, cuya estabilidad, movilidad, biodisponibilidad y toxicidad varía; lo cual implica que las decisiones acerca de la limpieza de los sitios contaminados con ellos, requiere tomar en cuenta tanto su composición y características, como la vulnerabilidad del sitio en el que se encuentran y de las poblaciones y ecosistemas que puedan resultar afectados.

27

☞ Actividades agrícolas.

El empleo de plaguicidas en las actividades agropecuarias, frecuentemente mediante prácticas inadecuadas, constituye una de las formas de contaminación difusa más importantes (sobre todo cuando se aplican por vía aérea), que impactan no sólo los suelos de las áreas en donde se usan, sino que llegan a través de los ríos hasta las zonas costeras afectando las especies marinas.

Existen zonas como el Valle de San Quintín, en Baja California, y el Valle del Yaqui, en Sonora, que son causa de conflictos sociales por el elevado número de trabajadores del campo intoxicados por plaguicidas, con un alto índice de mortalidad, así como también por la sospecha de efectos adversos sobre la salud de las comunidades vecinas, la flora y la fauna.

28

☞ Curtidurías.

La generación y liberación al ambiente de residuos de toda índole, representa un serio problema en aquellos lugares donde tiene lugar, ejemplo de lo anterior es la magnitud de la contaminación en la cuenca del río Turbio y en la presa Silva, en Guanajuato, entre otros, ocasionada por el vertimiento de aguas residuales con cromo, sulfuros y material orgánico de las curtidurías (en el estado se encuentra ubicada el 60% de la industria curtidora del país) y donde ocurrió la muerte de más de veinte mil aves migratorias.

En dichas aves, cuya muerte se atribuyó a un episodio de botulismo, se encontraron concentraciones elevadas del plaguicida endosulfán (insecticida-acaricida del grupo de los hidrocarburos halogenados), y de varios metales tóxicos, lo que llevó a establecer un amplio programa de remediación y la implantación de medidas preventivas y correctivas en los procesos de curtido para minimizar y dar un manejo adecuado a los residuos de este sector.

29

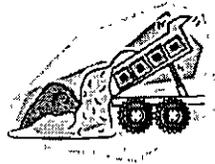
☞ Uso de aguas residuales en irrigación de campos agrícolas.

El empleo de aguas residuales para riego de cultivos agrícolas por su alto contenido de materia orgánica que actúa como fertilizante, implica el riesgo de que los suelos y los cultivos se contaminen con los residuos químicos provenientes de descargas industriales, además de que los cultivos que se consumen crudos puedan contaminarse con organismos patógenos como las amibas o las bacterias que producen el cólera (razón por la que se estableció una norma oficial mexicana a este último respecto).

30

☞ Basureros a cielo abierto.

La disposición inadecuada de los residuos sólidos municipales, que pueden contener residuos peligrosos, representa una seria amenaza de contaminación a los suelos y cuerpos de agua; a lo cual se suma el hecho de que en ellos se generan procesos de fermentación de la materia orgánica que además de provocar fenómenos de lixiviación o de incendio de los basureros, contribuyen a la liberación de metano que es uno de los gases que se considera contribuyen al efecto de invernadero y al cambio climático global.



31

☞ Contaminación de suelos en instalaciones de empresas.

Se han acumulado las evidencias de graves problemas de contaminación de suelos que conllevan el riesgo de contaminación de acuíferos, por fugas en contenedores de materiales peligrosos, así como por derrames continuos de lubricantes, solventes orgánicos y otro tipo de sustancias, por prácticas inadecuadas en su manejo, en empresas como las que se mencionan a continuación:

- Estaciones de servicio de gasolina.
- Talleres de reparación de auto transportes.
- Estaciones e instalaciones de ferrocarriles.
- Terminales de autobuses.
- Aeropuertos.
- Industrias diversas.

32

↘ Relación industria y medio ambiente.

33

↘ Relación industria y medio ambiente.

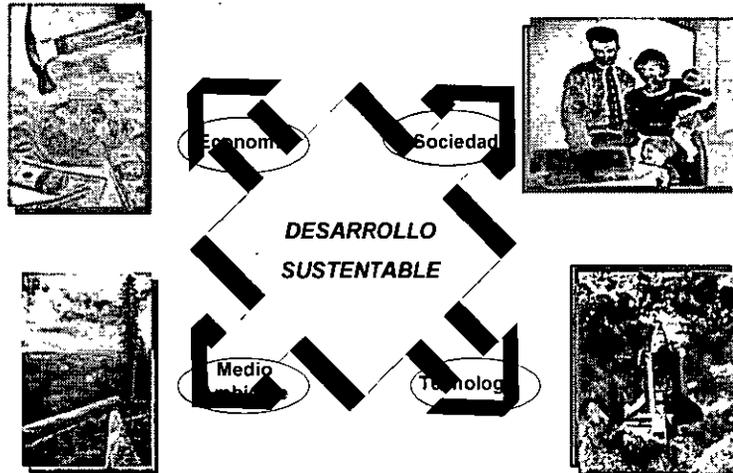
↪ Antecedentes.

En 1983 se creó la Comisión Mundial Sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, que en 1987 presentó su informe final, en donde se propuso la adopción de un nuevo modelo que incorporara la dimensión ambiental, al que se denominó:

“Desarrollo Sustentable”

El cual es un proceso evaluable mediante criterios e indicadores de carácter ambiental, económico y social que tiende a mejorar la calidad de vida y la productividad de las personas, fundamentado en medidas apropiadas de preservación de equilibrio ecológico, protección al ambiente y aprovechamiento de recursos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras.

34



35

Daño.

Quien realice obras o actividades que afecten o puedan dañar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como asumir los costos que dicha afectación implique.

De igual forma debe de incentivarse a quien proteja al ambiente y aproveche de manera sustentable los recursos naturales. (LGEEPA Art. 15, f. IV)

36

Peligro

Es la propiedad intrínseca o inherente los materiales y residuos que les confiere la posibilidad de ocasionar efectos adversos en la salud humana y en el ambiente, por sus características o propiedades CRETIB.



37

Riesgo

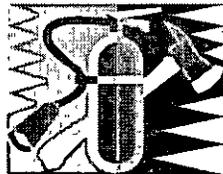
Se define como la probabilidad de que se produzca un efecto adverso o dañino en función de la exposición, dependiendo de la cantidad de ellos que entra en contacto con los posible receptores, de la dosis que alcanzan dentro de los organismos vivos, del tiempo que dura dicha exposición y de la frecuencia con que se repita.



38

Prevención y reducción de riesgos

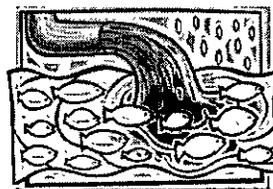
Se define como la serie de medidas que se adoptan para evitar o disminuir la probabilidad de que el manejo de los materiales o residuos peligrosos puedan ocasionar efectos adversos en el ambiente, los ecosistemas y la salud humana.



39

Minimización

Se define como el proceso de adopción de medidas operativas que permiten prevenir o disminuir, hasta niveles económica y técnicamente factibles, la generación de residuos de toda índole.

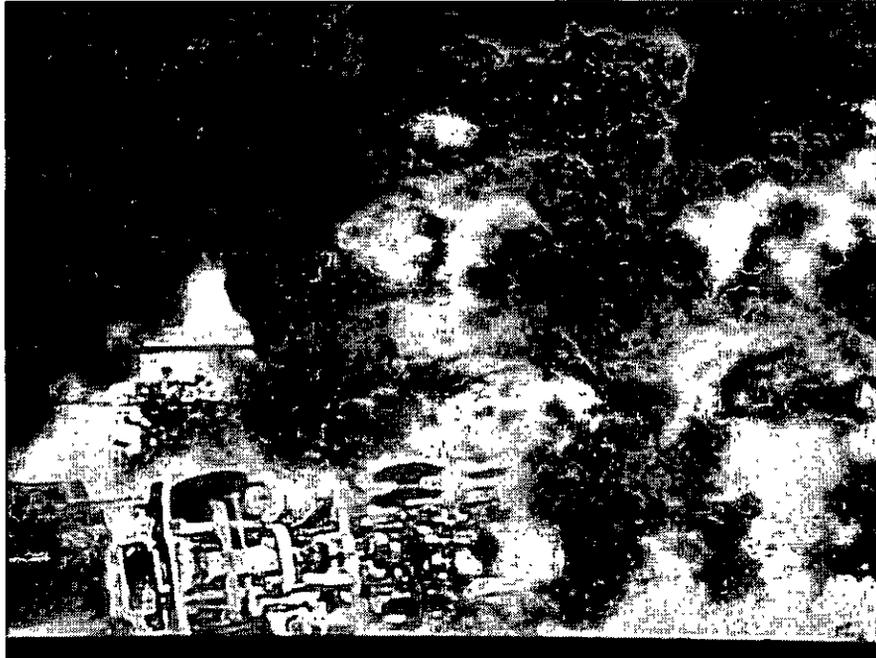


40





ELABORÓ: Ing. Fernando Santiago Gómez Martínez



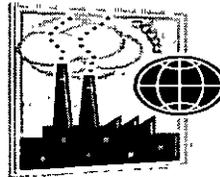
Algunas de las actividades que contribuyen al daño ambiental son, entre otras:

- Contaminantes a la atmósfera.
- Descargas de aguas residuales.
- Generación de residuos peligrosos.
- Generación de residuos no peligrosos.
- Asentamientos irregulares en áreas con diferentes riesgos.

☞ Relación industria y medio ambiente.

La industria es la principal promotora de urbanización, la creación de servicios, y es en la actualidad uno de los elementos dinamizadores del desarrollo.

Sin embargo, en términos generales se encuentra rezagada, teniendo como principales problemas los siguientes:



47

- >Apertura externa.
- >Comercio internacional.
- >Demandas sociales por un ambiente y una economía sana.
- >Sostener niveles de bienestar crecientes.
- >Actualizarse tecnológicamente.
- >Mayores exigencias gubernamentales.
- >Cambios de reglas continuos.

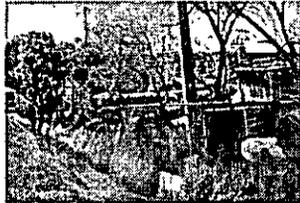
La industria utiliza diversas materias primas, energía, capital y trabajo humano para generar bienes.

Sin embargo, al realizar estas actividades se arrojan al ambiente subproductos indeseables para los cuales no hay por lo regular, precios positivos ni mercados.

48

Lo anterior ha generado diferentes emisiones de contaminantes tales como:

- Contaminantes a la atmósfera.
- Descargas de aguas residuales.
- Generación de residuos peligrosos.
- Generación de residuos no peligrosos.



49

☛ Tendencias internacionales

En las etapas incipientes de industrialización, el volumen de generación de residuos peligrosos es pequeño, permitiendo la asimilación dentro de las capacidades de cargas de suelos, cuerpos de agua, y drenajes urbanos.

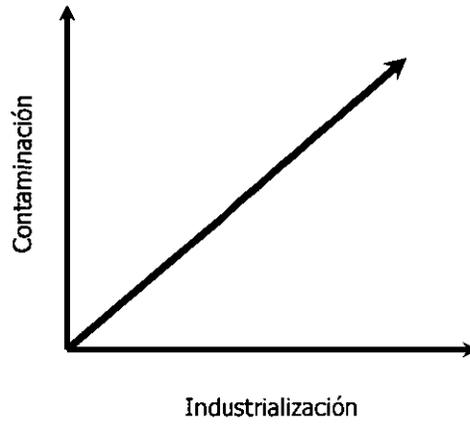
Pero al avanzar los procesos el volumen desborda las capacidades biofísicas de asimilación y manejo, generando un reto de gestión y de política ambiental.

El crecimiento industrial desde 1950 hasta aproximadamente 1980 careció de controles ambientales, generando con esto un rápido crecimiento a los índices de contaminación.

Como consecuencia de esta situación se calcula que existe un alto nivel de pasivos ambientales acumulados.

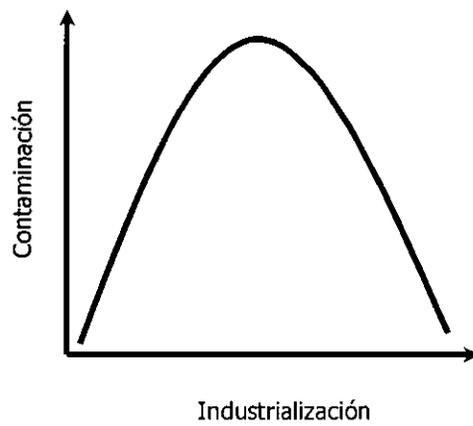
50

Modelo de crecimiento lineal.



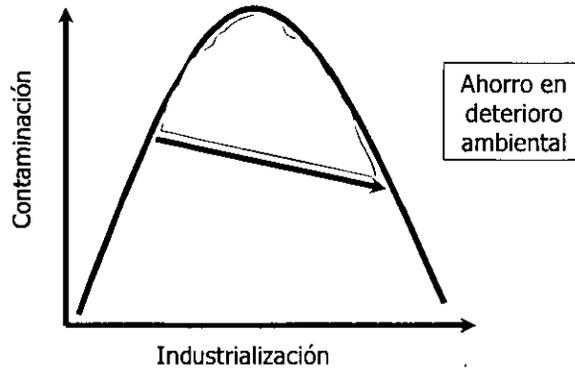
51

Modelo de la "U" invertida.



52

Modelo ecoeficiente.



En el presente se cuenta con un desarrollo tecnológico que hace posible una industrialización basada en el uso de tecnología limpia y procesos ecoeficientes, evitando así el paso por la etapa intermedia de mayor contaminación.

53

Empresas con mayor índice de emisiones de contaminantes y de mayor riesgo:



- Derivados del petróleo.
- Generación de energía eléctrica.
- Química.
- Fibras sintéticas.
- Resinas.
- Fertilizantes.
- Plásticos.

- Pinturas y pigmentos.
- Gases industriales.
- Papel.
- Hule.
- Metalmecánica.
- Cemento.
- Producción de maquinaria.
- Autotransporte.

54

Convenios y tratados internacionales.

Estos tratados han sido importantes para el desarrollo de programas y acciones para prevenir los riesgos en el manejo de materiales peligrosos, y controlar el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos.

Algunos de los tratados internacionales que se encuentran vigentes en México son:

- Convenio de La Paz y Programa Frontera XXI.
 - Convenio de Basilea.
 - Agenda XXI de Las Naciones Unidas.
- Políticas de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE).
 - Protocolo de Kyoto (por confirmar).
- Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (TLCAN).

55

Política Ambiental del Gobierno Federal.

Son todas aquellas acciones en las que el gobierno supone, 1° las decisiones de prestar atención y 2° la elaboración y la selección de su definición y las opciones de acción.

En este contexto el cuidado del medio ambiente se ha incrementado en nuestro país.

Planes y Programas

- Plan Nacional de Desarrollo 1983-1988
- Programa Nacional de ecología 1984-1988
- Programa Nacional de ecología 1989-1994
- Programa Nacional para la Protección del Medio Ambiente 1990-1994, y Bases para una Política Nacional de Residuos Peligrosos
- Plan Nacional de Desarrollo 1995-2000, 2000-2005
- Programa de Medio Ambiente 1995-2000, 2000-2005

56

☛ Tendencias Nacionales.

Históricamente la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales es la única que se encuentra en los tres gabinetes del gobierno.

De esta forma se ha estado dando cada vez mayor importancia al medio ambiente, tomando como base a acciones voluntarias de primera intención y apuntando hacia normas, reglamentos y leyes cada vez más estrictos.

En términos generales las aplicaciones de normas voluntarias en breve se tornan en obligatorias.

Tal fue el caso del Programa de Verificación para vehículos en el D.F., el cual empezó como propuesta y es ahora un programa obligatorio, con sanciones y normatividad específica.

57

Desde la perspectiva ambiental, las tendencias internacionales han influido en la estructura de la industria mexicana.

Principalmente a las empresas grandes y medianas, sin que esto limite o justifique a las pequeñas empresas, cuyo mercado está cada vez más ligado a las anteriores por conceptos de calidad

Actualmente las empresas que adquieren compromisos de cuidado al medio ambiente ya no consideran a esto como un gasto, sino como una fuente de competitividad y ahorro.

Se pueden plantear 5 tipologías de empresas mexicanas de acuerdo a su preocupación ambiental, vinculadas al mercado internacional con las respectivas exigencias en cuanto al medio ambiente, y por otro lado a su capacidad económica y financiera.

58

● Tipo 1

Un segmento de empresas, por lo general transnacionales o altamente exportadoras, que tienen una alta preocupación por innovar procesos y buscar cumplir con su responsabilidad ambiental más allá de lo que la normatividad exige

● Tipo 2

Otro segmento, en general conformado por grandes empresas orientadas al mercado interno, aprovechando las oportunidades de ahorro y negocios que plantea el cuidado ambiental

● Tipo 3

Un tercer segmento de empresas comprende a las medianas y altamente exportadoras, que buscan tener un desempeño ambiental que no merme su competitividad internacional, pero con problemas frecuentes de índole financiera.

59

● Tipo 4

Un cuarto segmento de empresas conformadas por grandes y medianas, orientadas en general al mercado interno o a bienes básicos, que reconocen oportunidades de ahorro y eficiencia por medio de inversiones enfocadas a mejoras ambientales; pero sin recursos para llevar a cabo las acciones.

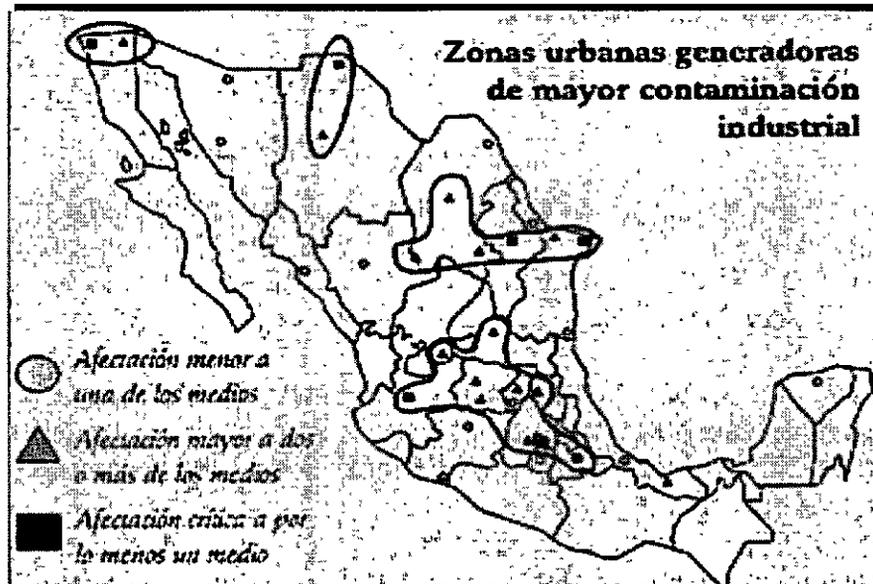
● Tipo 5

Un quinto segmento que carece de interés o recursos, integrado en su mayoría por pequeñas y microempresas, sin exceptuar a algunas empresas grandes y medianas.

Éstas empresas representan a la mayoría del país, aproximadamente el 70%.

60

Tendencias Nacionales



➤ Sustento legal de la protección del suelo y su remediación.

➤ Sustento legal de la protección del suelo y su remediación.

☞ Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)

La regulación para la prevención y control de la contaminación de los suelos, así como su remediación, se presenta de manera muy general y sin proporcionar el debido y adecuado sustento para las acciones de control y de limpieza, en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), como aparece enunciado en los siguientes artículos:

63

Artículo 134.- Para la prevención y control de la contaminación del suelo se considerarán los siguientes criterios:

Corresponde al estado y a la sociedad prevenir la contaminación del suelo.

Deben ser controlados los residuos en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos.

Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes.

La utilización de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, debe ser compatible con el equilibrio de los ecosistemas y considerar efectos sobre la salud humana a fin de prevenir los daños que pudieran ocasionar.

En los suelos contaminados por la presencia de materiales o residuos peligrosos, deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable.

64

Artículo 135.- Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo, se considerarán en los siguientes casos.

La ordenación y regulación del desarrollo urbano.

La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios

La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos, industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen.

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

La contaminación del suelo.

Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos.

Las alteraciones en el suelo que perjudiquen su aprovechamiento, uso o explotación.

Los riesgos y problemas de salud.

65

Artículo 139.- Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta LGEEPA, la Ley de Aguas Contaminación y Remediación de Suelos Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las Normas Oficiales Mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

Artículo 140.- La generación, manejo y disposición final de los residuos de lenta degradación deberá sujetarse a lo que se establezca en las Normas Oficiales Mexicanas que al respecto expida la Secretaría en coordinación con la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

Artículo 141.- La Secretaría en coordinación con las Secretarías de Comercio y Fomento Industrial y de Salud, expedirán Normas Oficiales Mexicanas para la fabricación y utilización de empaques y envases para todo tipo de productos, cuyos materiales permitan reducir la generación de residuos sólidos.

66

Artículo 142.- En ningún caso podrá autorizarse la importación de residuos para su derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en el territorio nacional o en las zonas en que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

Artículo 143.- Los plaguicidas, fertilizantes y demás materiales peligrosos, quedarán sujetos a las Normas Oficiales Mexicanas que expidan en el ámbito de sus respectivas competencias, la Secretaría y las Secretarías de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, de Salud y de Comercio y Fomento Industrial. El reglamento de esta LGEEPA incluirá la regulación, que dentro del mismo marco de coordinación, deba observarse en actividades relacionadas con dichos materiales, incluyendo la disposición final de sus residuos, empaques y envases vacíos, medidas para evitar efectos adversos en los ecosistemas y procedimientos para el otorgamiento de las autorizaciones correspondientes.

67

Artículo 152 bis.- Cuando la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos, produzca contaminación del suelo, los responsables de dichas operaciones deberá llevar a cabo las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo, con el propósito de que ésta pueda ser destinado a alguna de las actividades previstas en el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable, para el predio o zona respectiva.

68

➤ Métodos de muestreo de suelos.

69

Muestreo de suelos.

Introducción.

La determinación de la idoneidad de un emplazamiento para el establecimiento sobre su superficie de un determinado uso pasa ineludiblemente, allí donde exista sospecha de contaminación, por la evaluación de la calidad del suelo. Los riesgos que una alteración grave de la calidad del suelo puede suponer para la salud pública, los ecosistemas, la productividad de las explotaciones y la integridad de edificaciones e infraestructuras, alcanzan en ocasiones una magnitud tal que constituyen razón suficiente para restringir los usos actuales y futuros del terreno.

70

- **Investigación Exploratoria.** Es la fase de investigación cuyo objetivo es confirmar, por un lado, la existencia de niveles de contaminación que supongan o puedan suponer un riesgo inaceptable para la salud humana y los ecosistemas y, por otro, la hipótesis de distribución espacial de la contaminación. Los datos obtenidos en esta fase deben permitir el diseño óptimo de la fase de investigación Detallada.
- **Investigación Detallada.** Es la fase de investigación cuyo objeto reside en recabar toda la información (caracterización espacial -horizontal y vertical- y temporal de la contaminación, receptores potenciales, etc.) que sea necesaria para acometer la evaluación de los riesgos presentes y futuros derivados de la contaminación detectada. La evaluación de riesgos es un elemento esencial de la Investigación Detallada de cara a tomar decisiones sobre posteriores medidas a implantar en el emplazamiento.
- **Valores Indicativos de Evaluación (VIE).** Los Valores Indicativos de Evaluación son niveles cuantitativos de la calidad del suelo que permiten la evaluación genérica de los emplazamientos en relación con el riesgo que su alteración supone para los objetos protegidos (salud humana y ecosistemas).
- **Valor VIE-A o nivel de referencia.** El nivel de referencia es el valor indicativo de evaluación por debajo del cuál es posible afirmar que el suelo no se encuentra afectado por la contaminación y, en consecuencia, el riesgo es nulo o despreciable. Contrariamente al resto de los valores indicativos de evaluación, cuya derivación se hace en base a criterios de riesgos, el nivel de referencia representa el límite superior del intervalo de concentraciones del contaminante en cuestión que se encuentran en los suelos naturales no antropizados.
- **Valor VIE-B.** Este valor indicativo de evaluación marca el límite inferior de aceptabilidad del riesgo. Concentraciones del contaminante por debajo de este valor pero superiores a VIE-A implican riesgos aceptables, mientras que contenidos mayores que VIE-B pueden llevar asociado, dependiendo de las condiciones locales del emplazamiento, un riesgo inaceptable. Los VIE-B derivados para proteger la salud humana están definidos en función de los usos del emplazamiento.
- **Valor VIE-C o de máximo riesgo tolerable.** Este valor de calidad representa el límite superior de aceptabilidad del riesgo. Su superación implica un peligro grave para el funcionamiento de los ecosistemas. Por su propia definición, la superación de este valor conduce a la necesidad de adoptar medidas que eliminen el riesgo, ya que este se habría visto incrementado de una manera inaceptable. Sólo existen valores VIE-C para la protección de los ecosistemas.

75

- **Riesgo.** En el marco de la investigación de suelos contaminados, se define el riesgo en función de la probabilidad de que un suceso adverso ocurra como resultado de la exposición a la contaminación del suelo, y de la magnitud de las consecuencias o impacto de dicho suceso sobre los objetos de protección (salud humana, ecosistemas, otros compartimentos ambientales, explotaciones agrícolas y forestales, infraestructuras, etc.).
- **Modelo conceptual de riesgo.** En el contexto de la evaluación de riesgos, el modelo conceptual es un esquema del emplazamiento y su entorno que incluya de forma cualitativa los posibles focos de contaminación y su naturaleza, así como las potenciales rutas de exposición y/o dispersión para cada uno de los receptores identificados.
- **Evaluación de riesgos.** La evaluación de riesgos constituye un proceso racional de identificación, medida y comparación de diversos parámetros mediante el cual se identifican y evalúan los riesgos potenciales y reales que la presencia de un suelo contaminado comporta para los objetos protegidos. La evaluación de riesgos es la herramienta clave para tomar decisiones sobre la aceptabilidad del riesgo y las consecuentes medidas a adoptar.
- **Medidas de prevención.** Se incluyen dentro de este grupo todas aquellas medidas dirigidas bien a evitar la aparición de fuentes de contaminación, bien a controlar las actividades que pudieran llegar a producir una alteración de la calidad del suelo.
- **Medidas de defensa.** Ante la presencia de una fuente potencial de contaminación del suelo, las medidas de defensa tienen por objeto eliminar o restringir la magnitud de la afección que esta produce sobre el suelo.
- **Medidas de recuperación.** El objetivo de las medidas de recuperación es la eliminación o minimización del riesgo que supone la alteración del suelo, bien a través de la reducción de las concentraciones de sustancias contaminantes en el medio (medidas de descontaminación) o bien mediante la limitación de la exposición o de las vías de dispersión (medidas de seguridad).
- **Medidas de control y seguimiento.** La adopción de este tipo de medidas supone el seguimiento continuado en el tiempo de las concentraciones de contaminantes tanto en el suelo como en otros medios de contacto. Emplazamientos sometidos a fuentes de contaminación difusa o progresiva (por ejemplo, deposición atmosférica), suelos en los que se han implantado medidas de defensa o terrenos ya recuperados representan algunas situaciones en las que se pueden aplicar estas medidas.

76

Emplazamientos o lugares contaminados que requieren de investigación.

Las acciones que han podido ocasionar la alteración de las características del suelo provocando su contaminación son variadas. Entre ellas cabe destacar las siguientes:

- almacenamiento y transporte de materias primas, productos elaborados y/o residuos
- deposición de residuos sólidos, líquidos y pastosos
- vertidos accidentales
- derrames, escapes o fugas producidos durante la operación habitual de instalaciones industriales
- aplicación de lodos de depuración
- deposición atmosférica
- aplicación de pesticidas, abonos y fertilizantes en la agricultura

En todo caso, la mera instalación sobre el terreno de determinadas actividades (industriales en su mayor parte) constituye una sospecha suficientemente fundada para considerar el emplazamiento como suelo potencialmente contaminado.

77

Las circunstancias que habitualmente llevan a la identificación de un emplazamiento como suelo potencialmente contaminado son muy diversas, siendo las más frecuentes las siguientes:

- su inclusión en el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo*
- una evaluación medioambiental realizada en el marco de una operación de compraventa
- la inspección de terrenos sometidos a planes de desarrollo urbanístico
- el descubrimiento de materiales sospechosos durante trabajos de demolición y construcción
- denuncias o quejas
- las inspecciones de rutina en instalaciones productoras de residuos industriales
- la inspección de instalaciones industriales sometidas a auditorías ambientales o que hayan recibido denuncias por algún tipo de accidente o vertido
- la inspección de terrenos en los que se localicen efectos ambientales sin causa aparente

Sin detrimento de las otras circunstancias mencionadas anteriormente, la inclusión de un emplazamiento en el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* es la principal referencia para considerar a aquél como un suelo potencialmente contaminado y, en consecuencia, justificar el inicio del proceso de investigación del mismo.

El *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* se ha planteado como una recopilación de información sobre aquellos suelos que, debido a los usos a los que han sido sometidos a lo largo del tiempo, pudieran haber visto afectada su calidad hasta extremos en los que los usos potenciales del emplazamiento puedan estar condicionados debido a los riesgos para la salud humana, el medio ambiente, las infraestructuras o la propia productividad del terreno

78

Principales aspectos a considerar en muestreos de suelos contaminados.

- identificación de emplazamientos que pudieran estar contaminados y que, en consecuencia, requirieran una investigación de la calidad del suelo;
- recopilación de la información existente relativa al emplazamiento, a través de la realización de un estudio histórico, visitas de inspección y un análisis del medio físico;
- diseño de la estrategia de muestreo y del programa de análisis químico;
- toma, preservación y análisis de las muestras;
- realización de ensayos para la determinación de parámetros característicos del medio físico.
- evaluación de los datos obtenidos en el proceso de investigación.
- evaluación de los riesgos derivados de la situación de contaminación;
- elaboración de los informes de la investigación;
- realización de investigaciones complementarias con carácter previo al diseño detallado de las medidas de recuperación y/o de control y seguimiento.

73

Definiciones.

- **Suelo.** Se entiende por suelo la parte sólida de la corteza terrestre, desde la roca madre hasta la superficie, que incluye tanto sus fases líquida y gaseosa como los organismos que habitan en él, con la capacidad de desempeñar funciones tanto naturales como de uso del mismo.
- **Suelo potencialmente contaminado.** Un suelo será catalogado como potencialmente contaminado cuando, o bien aparezca incluido en el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* o bien, a pesar de no haber sido inventariado, existan indicios razonables que señalen una posible alteración de su calidad.
- **Suelo sospechoso.** Un suelo será considerado como sospechoso de estar contaminado cuando los resultados de la recopilación de información (estudio histórico, visita de campo y análisis del medio físico) indiquen que existen indicios razonables de una potencial alteración de la calidad del suelo, siendo necesario efectuar una investigación con muestreo y análisis químico dirigida a confirmar o desechar esta hipótesis.
- **Suelo alterado.** Se define como aquél que presente alguna alteración significativa de sus características químicas que pueda suponer algún condicionante o limitación a las funciones del mismo, siempre y cuando tal circunstancia no conlleve riesgos inaceptables para los usos previstos.
- **Suelo contaminado.** Se define como aquél que presente una alteración de sus características químicas incompatible con sus funciones, debido a que supongan un riesgo inaceptable para la salud pública o el medio ambiente.

74

- **Investigación Exploratoria** Es la fase de investigación cuyo objetivo es confirmar, por un lado, la existencia de niveles de contaminación que supongan o puedan suponer un riesgo inaceptable para la salud humana y los ecosistemas y, por otro, la hipótesis de distribución espacial de la contaminación. Los datos obtenidos en esta fase deben permitir el diseño óptimo de la fase de investigación Detallada.
- **Investigación Detallada** Es la fase de investigación cuyo objeto reside en recabar toda la información (caracterización espacial -horizontal y vertical- y temporal de la contaminación, receptores potenciales, etc.) que sea necesaria para acometer la evaluación de los riesgos presentes y futuros derivados de la contaminación detectada. La evaluación de riesgos es un elemento esencial de la Investigación Detallada de cara a tomar decisiones sobre posteriores medidas a implantar en el emplazamiento.
- **Valores Indicativos de Evaluación (VIE)** Los Valores Indicativos de Evaluación son niveles cuantitativos de la calidad del suelo que permiten la evaluación genérica de los emplazamientos en relación con el riesgo que su alteración supone para los objetos protegidos (salud humana y ecosistemas).
- **Valor VIE-A o nivel de referencia** El nivel de referencia es el valor indicativo de evaluación por debajo del cual es posible afirmar que el suelo no se encuentra afectado por la contaminación y, en consecuencia, el riesgo es nulo o despreciable. Contrariamente al resto de los valores indicativos de evaluación, cuya derivación se hace en base a criterios de riesgos, el nivel de referencia representa el límite superior del intervalo de concentraciones del contaminante en cuestión que se encuentran en los suelos naturales no antropizados.
- **Valor VIE-B** Este valor indicativo de evaluación marca el límite inferior de aceptabilidad del riesgo. Concentraciones del contaminante por debajo de este valor pero superiores a VIE-A implican riesgos aceptables, mientras que contenidos mayores que VIE-B pueden llevar asociado, dependiendo de las condiciones locales del emplazamiento un riesgo inaceptable. Los VIE-B derivados para proteger la salud humana están definidos en función de los usos del emplazamiento.
- **Valor VIE-C o de máximo riesgo tolerable**. Este valor de calidad representa el límite superior de aceptabilidad del riesgo. Su superación implica un peligro grave para el funcionamiento de los ecosistemas. Por su propia definición, la superación de este valor conduce a la necesidad de adoptar medidas que eliminen el riesgo, ya que este se habrá visto incrementado de una manera inaceptable. Sólo existen valores VIE-C para la protección de los ecosistemas.

75

- **Riesgo** En el marco de la investigación de suelos contaminados, se define el riesgo en función de la probabilidad de que un suceso adverso ocurra como resultado de la exposición a la contaminación del suelo, y de la magnitud de las consecuencias o impacto de dicho suceso sobre los objetos de protección (salud humana, ecosistemas, otros compartimentos ambientales, explotaciones agrícolas y forestales, infraestructuras, etc.)
- **Modelo conceptual de riesgo** En el contexto de la evaluación de riesgos, el modelo conceptual es un esquema del emplazamiento y su entorno que incluya de forma cualitativa los posibles focos de contaminación y su naturaleza, así como las potenciales rutas de exposición y/o dispersión para cada uno de los receptores identificados.
- **Evaluación de riesgos** La evaluación de riesgos constituye un proceso racional de identificación, medida y comparación de diversos parámetros mediante el cual se identifican y evalúan los riesgos potenciales y reales que la presencia de un suelo contaminado comporta para los objetos protegidos. La evaluación de riesgos es la herramienta clave para tomar decisiones sobre la aceptabilidad del riesgo y las consecuentes medidas a adoptar.
- **Medidas de prevención**. Se incluyen dentro de este grupo todas aquellas medidas dirigidas bien a evitar la aparición de fuentes de contaminación, bien a controlar las actividades que pudieran llegar a producir una alteración de la calidad del suelo.
- **Medidas de defensa**. Ante la presencia de una fuente potencial de contaminación del suelo, las medidas de defensa tienen por objeto eliminar o restringir la magnitud de la afección que esta produce sobre el suelo.
- **Medidas de recuperación**. El objetivo de las medidas de recuperación es la eliminación o minimización del riesgo que supone la alteración del suelo, bien a través de la reducción de las concentraciones de sustancias contaminantes en el medio (medidas de descontaminación) o bien mediante la limitación de la exposición o de las vías de dispersión (medidas de seguridad).
- **Medidas de control y seguimiento**. La adopción de este tipo de medidas supone el seguimiento continuado en el tiempo de las concentraciones de contaminantes tanto en el suelo como en otros medios de contacto. Emplazamientos sometidos a fuentes de contaminación difusa o progresiva (por ejemplo, deposición atmosférica) suelos en los que se han implantado medidas de defensa o terrenos ya recuperados, representan algunas situaciones en las que se pueden aplicar estas medidas.

76

Emplazamientos o lugares contaminados que requieren de investigación.

Las acciones que han podido ocasionar la alteración de las características del suelo provocando su contaminación son variadas. Entre ellas cabe destacar las siguientes:

- almacenamiento y transporte de materias primas, productos elaborados y/o residuos
- deposición de residuos sólidos, líquidos y pastosos
- vertidos accidentales
- derrames, escapes o fugas producidos durante la operación habitual de instalaciones industriales
- aplicación de lodos de depuración
- deposición atmosférica
- aplicación de pesticidas, abonos y fertilizantes en la agricultura

En todo caso, la mera instalación sobre el terreno de determinadas actividades (industriales en su mayor parte) constituye una sospecha suficientemente fundada para considerar el emplazamiento como suelo potencialmente contaminado.

77

Las circunstancias que habitualmente llevan a la identificación de un emplazamiento como suelo potencialmente contaminado son muy diversas, siendo las más frecuentes las siguientes:

- su inclusión en el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo*
- una evaluación medioambiental realizada en el marco de una operación de compraventa
- la inspección de terrenos sometidos a planes de desarrollo urbanístico
- el descubrimiento de materiales sospechosos durante trabajos de demolición y construcción
- denuncias o quejas
- las inspecciones de rutina en instalaciones productoras de residuos industriales
- la inspección de instalaciones industriales sometidas a auditorías ambientales o que hayan recibido denuncias por algún tipo de accidente o vertido
- la inspección de terrenos en los que se localicen efectos ambientales sin causa aparente

Sin detrimento de las otras circunstancias mencionadas anteriormente, la inclusión de un emplazamiento en el *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* es la principal referencia para considerar a aquél como un suelo potencialmente contaminado y, en consecuencia, justifica el inicio del proceso de investigación del mismo.

El *Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo* se ha planteado como una recopilación de información sobre aquellos suelos que, debido a los usos a los que han sido sometidos a lo largo del tiempo, pudieran haber visto afectada su calidad hasta extremos en los que los usos potenciales del emplazamiento puedan estar condicionados debido a los riesgos para la salud humana, el medio ambiente, las infraestructuras o la propia productividad del terreno

78

Uno de los puntos de partida para la elaboración del Inventario ha sido la confección de un listado de actividades potencialmente contaminantes del suelo, que incluye las actividades e instalaciones que se mencionan en el siguiente cuadro

Actividades e instalaciones potencialmente contaminantes del suelo	
1	Extracción de minerales metálicos
2	Lavado, desengrasado, blanqueo y tintado de fibras textiles
3	Preparación: curtido y acabado del cuero
4	Preparación industrial de la madera
5	Refino de petróleo
6	Coquerías
7	Plantas asfálticas
8	Industria química
9	Metalmurgia
9.1	Fabricación de productos básicos de hierro, acero y ferroaleaciones
9.2	Producción y primera transformación de metales no férricos
9.3	Fundición de metales
10	Fabricación de productos metálicos: maquinaria y equipo mecánico incluyendo la forja, estampación, embutición, tratamiento y revestimiento de metales
11	Fabricación de armas y municiones
12	Fabricación de material y maquinaria eléctrica y electrónica
13	Fabricación de material de transporte
14	Mantenimiento y reparación de material de transporte
15	Gasolineras
16	Instalaciones de gestión ambiental, incluyendo vertederos
17	Comercio al por mayor de minerales, metales, productos químicos, chatarra y residuos
18	Deposito y almacenamiento de mercancías peligrosas
19	Generación de energía: Centrales térmicas

79

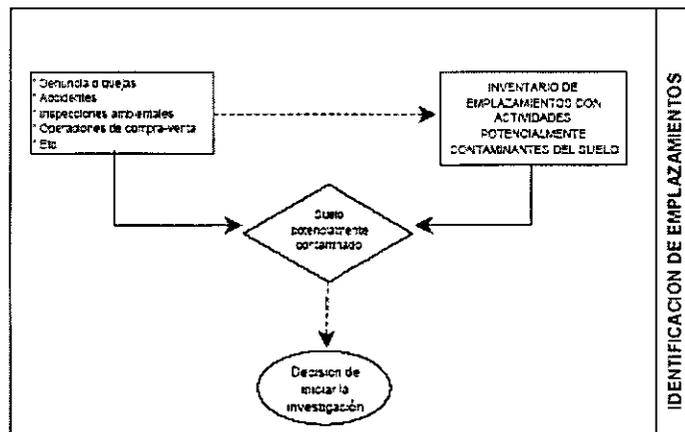


Figura 2: Proceso de identificación de emplazamientos potencialmente contaminados

80

Proceso de investigación de suelos contaminados.

Como se ha indicado anteriormente, la identificación de un suelo como potencialmente contaminado constituye la antesala del proceso de investigación propiamente dicho, cuyo objetivo último es la evaluación de los riesgos que plantea el emplazamiento para la salud humana y el medio ambiente, con vistas a tomar las decisiones oportunas sobre las medidas a implantar.

Son tres los factores principales que condicionan la estrategia de investigación de un emplazamiento potencialmente contaminado:

- el objetivo de la investigación;
- la información previa existente sobre el emplazamiento;
- los recursos disponibles (tiempo y dinero) para llevar a cabo la investigación

La experiencia ha demostrado que la adopción de un esquema de investigación progresiva (por fases) permite optimizar los resultados del conjunto del proceso en relación con los recursos que se le asignan. El esquema de investigación progresiva se apoya en el principio de que la evaluación de los resultados obtenidos en cada una de sus fases debe permitir una toma fundada de decisiones acerca de las actuaciones posteriores, sean éstas de acometer investigaciones más amplias o de implantar medidas de prevención, defensa, recuperación o control y seguimiento del emplazamiento.

81

Proceso de investigación de suelos contaminados.

La Figura 3 muestra las etapas que, en general, marcan la actuación sobre un suelo potencialmente contaminado, desde su identificación como tal, hasta la intervención en el mismo a través de la implantación de las medidas oportunas, pasando por su investigación. En lo referente a ésta, el esquema adoptado refleja un enfoque progresivo articulado en dos fases:

- La Investigación Exploratoria
- La Investigación Detallada

La figura indica las principales actividades y tareas a desarrollar en cada fase de investigación, así como la calificación del emplazamiento a lo largo del proceso y los criterios adoptados, cuya aplicación determina el paso de una fase a otra.

Un elemento clave de este proceso es la caracterización de la contaminación del suelo, para lo cual se requiere, en aras de la optimización del resultado, de un diseño de muestreo específico y adecuado al caso en estudio, fijando para cada etapa de la investigación un objetivo concreto.

82

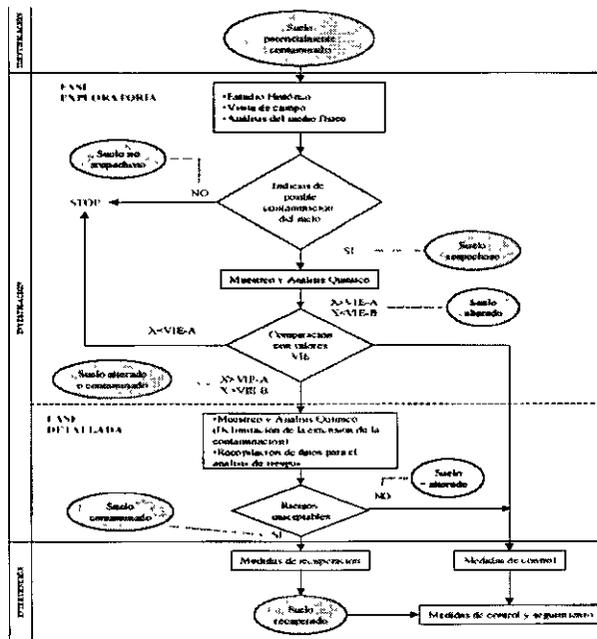


Figura 3: 1 esquema general de las etapas de acciones en suelos contaminados

Proceso de investigación exploratoria.

En primer lugar, se encuentran los trabajos dirigidos a confirmar o desechar los indicios de una posible contaminación del suelo en el emplazamiento. En esencia, dichos trabajos comprenden la obtención de datos históricos sobre las actividades desarrolladas en el emplazamiento, así como de datos sobre las características relevantes del medio físico en que se ubica aquél. La obtención de la información antes señalada requiere además una visita al emplazamiento. Como resultado de estas tareas se debe elaborar un modelo conceptual inicial de la problemática del emplazamiento que incluya, entre otras cuestiones, una hipótesis preliminar acerca de los posibles contaminantes presentes y su distribución espacial.

La evaluación de los resultados de estos trabajos puede conducir a la conclusión de que no existen indicios fundados de una posible afección del suelo. En tal caso, se paralizará el proceso de investigación, clasificando el emplazamiento como no sospechoso de estar contaminado.

No obstante, en la mayor parte de los emplazamientos será necesario recurrir a la toma de muestras y a su análisis para poder obtener resultados concluyentes acerca de la calidad del suelo. Estos trabajos (que en algunos casos puede ser necesario complementar con otros tendientes a determinar características básicas del medio físico que condicionan las posibilidades de migración de la contaminación) persiguen, por una parte, confirmar la hipótesis de presencia y distribución de la contaminación y, por otra, obtener datos suficientes para permitir el diseño óptimo de la siguiente fase de investigación, en los casos que se revele necesaria

Los resultados de los análisis efectuados en las muestras de suelo tomadas en el emplazamiento son determinantes para la evaluación en esta fase. Así, como norma general, si ninguna de las concentraciones de las sustancias o grupos de sustancias investigadas como posibles contaminantes supera el nivel de referencia VIE-A (ver documento *Calidad del suelo Valores Indicativos de Evaluación. VIE-A, VIE-B, VIE-C*), el proceso de investigación se da por finalizado, clasificando el emplazamiento como no sospechoso.

Si, por el contrario, la concentración de alguna de las sustancias superase el nivel VIE-A pero ninguna superase el nivel VIE-B, entonces sería necesario implantar medidas de defensa para prevenir una ulterior contaminación, así como, en algunos casos, medidas de control para hacer un seguimiento de la evolución de la misma.

En caso de que los resultados de esta fase confirmasen la existencia de un posible riesgo significativo para la salud humana o los ecosistemas (manifestado por concentraciones de alguna sustancia superiores a VIE-B), se deberá proceder a ejecutar la siguiente fase de investigación (Investigación Detallada).

85

Objetivos de la Investigación Exploratoria
<ul style="list-style-type: none">● Recopilar datos históricos que proporcionen indicios fundados sobre la alteración de la calidad del suelo● Elaborar un modelo conceptual inicial de la problemática del emplazamiento, incluyendo una hipótesis sobre posibles contaminantes y su distribución espacial● Confirmar la presencia de contaminación, acorando la lista de contaminantes sospechosos y su posible distribución● Distinguir subáreas o estratos diferenciables dentro de la zona de estudio

86

El objetivo de la Investigación Detallada es recabar información suficiente para realizar la evaluación de los riesgos actuales y futuros derivados de la contaminación detectada en el emplazamiento. Algunos de los aspectos esenciales a este respecto son la caracterización espacial (horizontal y vertical) y temporal de la contaminación y la evaluación de las posibilidades de migración de la misma dentro y fuera del emplazamiento

La toma de muestras de suelos y aguas (así como de otros medios cuando se estime preciso) y su posterior análisis constituyen actividades fundamentales de esta fase de investigación, que es la más intensa a este respecto

La evaluación de riesgos se configura como la herramienta clave dentro de la Investigación Detallada de cara a tomar decisiones sobre las actuaciones que es preciso acometer en el emplazamiento investigado.

Si las conclusiones de dicha evaluación determinan la existencia de riesgos inaceptables, será necesario implantar medidas de recuperación tendentes a reducir los riesgos hasta niveles aceptables. El tipo de medidas, así como la urgencia de su ejecución, se decidirán teniendo en cuenta factores de índole socioeconómica y las mejores tecnologías disponibles. En general, las medidas de recuperación irán acompañadas de otras de control y seguimiento de la efectividad de aquéllas.

87

Si, como consecuencia de la evaluación, los riesgos son considerados aceptables, será necesario implantar, en todo caso, medidas de defensa y cuando se estime preciso, medidas de control y seguimiento de los niveles de contaminación.

No obstante lo anterior, la superación por parte de algún contaminante del valor VIE-C establecido para la protección de los ecosistemas, es motivo suficiente para justificar la necesidad de adoptar medidas de recuperación en el emplazamiento.

Objetivos de la Investigación Detallada
<ul style="list-style-type: none">● Caracterizar la naturaleza, concentración y extensión de la contaminación en el emplazamiento● Ajustar el modelo conceptual previo del emplazamiento● Recabar los datos precisos para efectuar la evaluación de riesgos● Evaluar los riesgos que plantea el emplazamiento y el tipo de medidas que en consecuencia, haya que adoptar

88

Principios generales de los trabajos de investigación.

La experiencia acumulada en estudios de investigación de la calidad del suelo ha dado lugar al actual esquema de estrategia de investigación, que contempla dos fases (la Investigación Exploratoria y la Investigación Detallada), cuya ejecución secuencial permite un acercamiento gradual a la problemática de cada emplazamiento, garantizando la optimización de los recursos (materiales y humanos) asignados a cada caso.

En general, los trabajos de investigación de la contaminación del suelo abarcan un conjunto de tareas, algunas de las cuales son comunes, al menos en su concepto, a las dos fases de investigación mencionadas, mientras que otras son específicas de cada una de ellas. El presente capítulo desarrolla los principios que deben regir la ejecución de las tareas comunes a ambas fases de investigación, que se concretan en las siguientes:

- Diseño de la estrategia de investigación
- Preparación de los trabajos de campo
- Toma de muestras para análisis en laboratorio
- Ejecución de análisis in situ
- Ejecución de otras investigaciones y ensayos
- Realización de análisis en laboratorio

89

Diseño de la estrategia de investigación.

Antes de iniciar cualquier trabajo de investigación en un emplazamiento es necesario definir de la forma más precisa posible la estrategia de investigación a seguir. El diseño de una estrategia de investigación acorde con los objetivos de la misma y con las características del emplazamiento constituye un elemento esencial para optimizar los recursos asignados a la investigación en relación con los resultados de la misma.

La estrategia de investigación comprende una serie de aspectos que pueden agruparse en los siguientes:

- Estrategia de muestreo de los medios a investigar
- Programa de análisis químico de las muestras obtenidas
- Plan de seguridad, con la definición de las medidas que permitan gestionar anticipadamente los riesgos inherentes a todo trabajo de investigación

90

Diseño de la estrategia de muestreo.

El objetivo del diseño del muestreo es asegurar la obtención de información relevante de acuerdo con los objetivos de cada fase de investigación y con una fiabilidad conocida. Dicha información se referirá, en primer lugar, a la existencia y concentración en el emplazamiento de determinados contaminantes y, en segundo lugar, a la delimitación de las subáreas que puedan diferenciarse en función del tipo y grado de contaminación esperado.

La rentabilización de la investigación (coste mínimo con fiabilidad máxima) y la aproximación por etapas, determinan que la información previa disponible juegue un papel preponderante en la optimización del diseño, de ahí la necesidad de hacer especial hincapié en la obtención de esta información.

No existe una única fórmula para el diseño del programa de muestreo, ya que la diversidad de emplazamientos determina la necesidad de ajustar a cada caso la estrategia a seguir. Será el modelo conceptual esbozado con la información obtenida a la finalización de las primeras tareas de la Investigación Exploratoria (estudio histórico, análisis del medio físico y visita de campo) el que sirva para la optimización del diseño del muestreo en lo que se refiere a sus aspectos esenciales.

91

Principios generales.

Los elementos que se deben contemplar en el diseño de toda estrategia de muestreo son los mencionados en el cuadro adjunto.

Factores a considerar en el diseño de la estrategia de muestreo
a) Medios a muestrear
b) Número de etapas de muestreo
c) Localización de los puntos de muestreo (modelo de distribución)
d) Número de puntos de muestreo
e) Profundidad de muestreo
f) Número de muestras por punto de muestreo
g) Tamaño de la muestra
h) Técnicas de muestreo

A continuación se desarrollan los aspectos del diseño de la estrategia de muestreo que, por su carácter genérico, son aplicables a cualquier medio y fase de investigación.

92

a. Medios a muestrear. Considerando que para la evaluación de riesgos (objetivo final de la investigación de emplazamientos contaminados) se precisan no sólo datos relativos a la concentración de contaminantes en el suelo sino también en los medios de contacto y dispersión de los contaminantes y en los receptores del riesgo, puede ser necesario muestrear todos o algunos de los siguientes medios:

- suelo y polvo
- aguas superficiales
- agua del suelo (zona no saturada) y subterránea
- fases líquidas no acuosas (por ejemplo, hidrocarburos)
- aire (del suelo o de la atmósfera general del emplazamiento)
- vegetación y fauna (incluyendo especies de aprovechamiento agrícola y ganadero)
- población humana (sangre, orina, cabello, dientes, etc.)

Los usos del emplazamiento y los objetos a cuya protección se dirija la investigación determinarán los medios a muestrear en cada caso.

93

b. Numero de etapas de muestreo. El número de etapas de muestreo a ejecutar en cada fase de investigación dependerá fundamentalmente de los resultados de las etapas precedentes, de la exactitud con que se haya fijado la estrategia de investigación y de la disponibilidad de tiempo para llevar a cabo el estudio. Básicamente existen dos formas de afrontar el muestreo:

- **Muestreo en una etapa.** Esta aproximación es adecuada para aquellos casos en los que el objetivo de la investigación está perfectamente definido, no existiendo posibilidad de modificaciones en función de los resultados que se van obteniendo. Es la estrategia que, en general, se aplica en la Investigación Exploratoria.
- **Muestreo en etapas sucesivas.** Esta aproximación permite modificar el diseño del muestreo en función de los resultados obtenidos en las etapas anteriores incluidas dentro de la misma fase de investigación. La flexibilidad que proporciona el muestreo en etapas sucesivas, junto con el grado de ajuste a los objetivos que permite, hacen que ésta sea la aproximación más adecuada en muchos casos. Es la estrategia que, en general, se aplica en la Investigación Detallada.

Por otra parte, en algunos casos (como, por ejemplo, terrenos que generan lixiviados o emiten gases tóxicos o inflamables) puede ser necesario efectuar tomas de muestras a intervalos de tiempo regulares durante los cuales pueden producirse variaciones en las concentraciones de contaminantes.

94

c. Localización de los puntos de muestreo. La localización de los puntos de muestreo depende en gran medida tanto del medio a muestrear como de los objetivos particulares de la fase de investigación en la que se va a producir la toma de muestras. Por tanto, las recomendaciones al respecto se desarrollan en epígrafes posteriores.

d. Número de puntos de muestreo. El número de puntos de muestreo está determinado fundamentalmente por el objetivo de la investigación, dependiendo en su conjunto de factores como el tamaño del emplazamiento, la calidad de la información previa disponible, la hipótesis de distribución espacial de la contaminación y el grado de confianza requerido. Así mismo, para una fase de investigación dada, el número de puntos de muestreo varía mucho, en general, en función del medio que se pretende muestrear.

En ocasiones, pueden presentarse restricciones de carácter económico o temporal que obliguen a reducir el número de puntos de muestreo en uno o varios de los medios objeto de investigación. En tal caso, se recomienda adoptar propuestas razonables elaboradas en base al juicio experto o, si es posible, diseñar un muestreo flexible por etapas que facilite la incorporación de modificaciones en función de los resultados previos obtenidos.

95

f. Número de muestras por cada punto de muestreo. Resulta difícil establecer *a priori* el número de muestras que habrán de tomarse en cada punto de muestreo para caracterizar la contaminación en el sentido vertical. Una vez más, dependerá del medio concreto a muestrear y de la movilidad en el mismo de los contaminantes implicados. En epígrafes posteriores se proporcionan algunas recomendaciones a este respecto, en particular para el suelo y las aguas subterráneas.

g. Tamaño de la muestra. El tamaño de la muestra vendrá determinado por dos factores: en primer lugar, deberá ser el necesario para considerarse representativo de la composición del medio en el que ha sido tomada; en segundo lugar, deberá satisfacer las exigencias del análisis específico, para lo que habrá que consultar al analista.

Como norma general, se considera necesario tomar un volumen de muestra superior al estrictamente necesario, en previsión de que la evolución de la investigación exigiera la realización de determinaciones analíticas adicionales a las inicialmente previstas (análisis de contraste, análisis de muestras individuales integrantes de muestras mixtas, etc.). A este respecto, conviene recordar que siempre es más barato tomar una cantidad de muestra en exceso que volver a ejecutar la toma de muestras por disponer de insuficiente cantidad para realizar análisis adicionales.

96

h. Técnicas de muestreo. La elección de las técnicas de perforación y de toma de muestras vendrá determinada por los siguientes aspectos:

- accesibilidad y orografía del terreno
- medios a muestrear
- tipo de terreno y materiales a muestrear
- columna estratigráfica, litológica y profundidad del nivel freático
- presencia de soleras de hormigón
- tamaño de la muestra
- necesidad de instalación de pozos de control
- naturaleza de los compuestos a investigar

97

Para una campaña de muestreo dada, enmarcada en una determinada fase de investigación de un emplazamiento, el plan de muestreo debe incluir, al menos, los aspectos que se citan en el cuadro adjunto.

Contenido mínimo del plan de muestreo de un emplazamiento contaminado
- Descripción del objetivo de la campaña de muestreo
- Medios a muestrear
- Localización de los puntos de muestreo en un mapa del emplazamiento a escala adecuada, proporcionando una estimación de la profundidad de muestreo
- Número estimado de muestras y profundidad aproximada de cada una, incluyendo muestras tomadas fuera del emplazamiento (para determinar el grado de dispersión o el nivel de fondo local), duplicados y blancos (de limpieza, de viaje, etc.)
- Tamaño de las muestras
- Técnicas de muestreo a utilizar

98

Estrategia de muestreo del suelo.

La estrategia de muestreo del suelo se encuentra estrechamente relacionada con la hipótesis elaborada acerca de la distribución de la contaminación y, por tanto, es específica para cada fase de investigación. En todo caso, la estrategia a seguir debe asegurar la obtención de información que permita confirmar o matizar dicha hipótesis, así como determinar la existencia y concentración de los contaminantes implicados.

Se incluyen a continuación algunas consideraciones sobre aquellos factores que necesariamente y de forma específica deben contemplarse en el diseño de la estrategia de muestreo del suelo.

Localización de los puntos de muestreo.

La localización de los puntos de muestreo se basa fundamentalmente en la información previa disponible que permite establecer las hipótesis relativas a la distribución espacial de la contaminación, tanto en sentido horizontal como vertical. Esta información preliminar permitirá definir si el muestreo debe ser simple (es decir, homogéneo en toda la extensión del emplazamiento) o estratificado, con subáreas caracterizadas por hipótesis diferentes de distribución espacial (ver Figura 4).

La localización de los puntos de muestreo del suelo dentro de las diferentes áreas o subáreas se adapta habitualmente a uno de los siguientes modelos (ver Figura 4):

99

- a) **Distribución al azar** de los puntos de muestreo que como su propia denominación indica, localiza los puntos de muestreo mediante la utilización de técnicas que definen posiciones aleatorias en toda la superficie a muestrear.
- b) **Distribución sistemática** de los puntos de muestreo, que a su vez puede subdividirse en:
 - b.1) **Sistemática al azar**. Cuando no existe suficiente información histórica, el emplazamiento puede ser dividido en subáreas de superficie similar, dentro de las cuales se aplica un sistema aleatorio de localización de los puntos de muestreo. Este método combina las ventajas del muestreo al azar y las de las estrategias sistemáticas, por lo que es utilizado en múltiples ocasiones.
 - b.2) **Sistemática regular**. Este método sitúa los puntos de muestreo sobre una malla cuyo espaciado dependerá del tamaño del emplazamiento y del grado de fiabilidad requerido, entre otros factores. Las mallas rectangulares y las alternadas o al tresbolillo son las más habitualmente utilizadas en la caracterización de suelos contaminados.
 - b.3) **Sistemática en gradiente**. Cuando se sospecha una distribución heterogénea en gradiente de la contaminación, se recomienda tomar las muestras de suelo a lo largo de ejes trazados en la dirección de máxima variación de la concentración de los contaminantes.

100

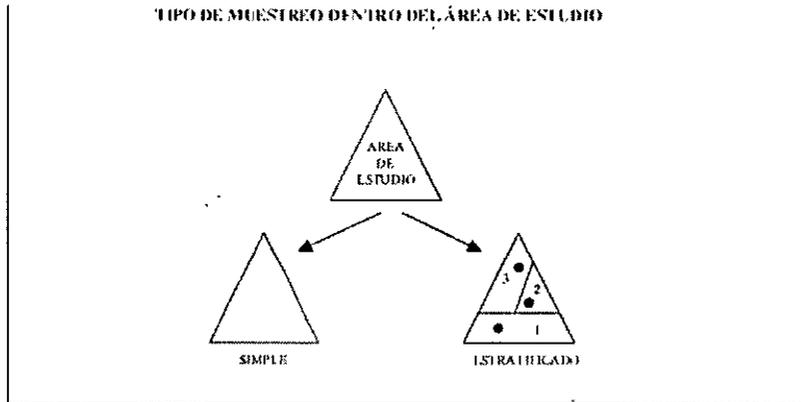


Figura 4: Tipos de muestreo y modelos de localización de puntos de muestro del suelo

101

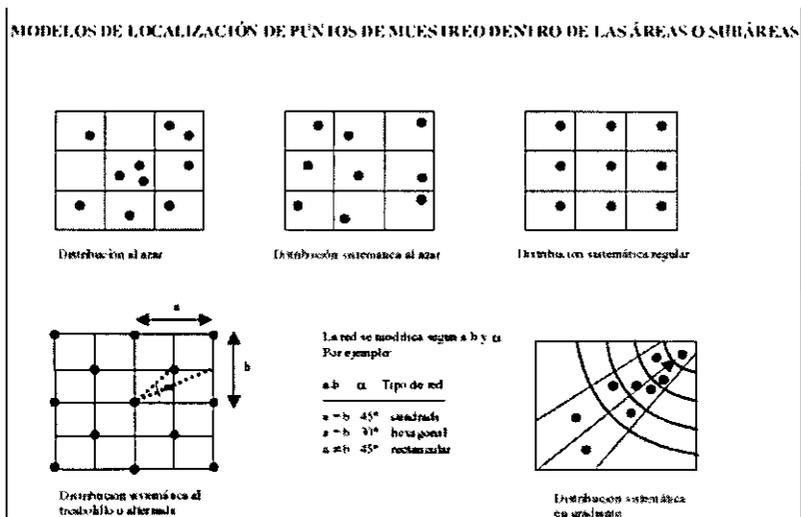


Figura 4: Tipos de muestreo y modelos de localización de puntos de muestro del suelo

102

Profundidad de muestreo.

La elección de las muestras de suelo debe considerar la distribución de los contaminantes tanto el plano horizontal como el vertical. La profundidad de muestreo depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- naturaleza de la contaminación
- tipo de suelo
- objeto de protección
- uso actual o previsto del emplazamiento

En general, resulta complicado establecer a priori la profundidad mínima a alcanzar para garantizar la ausencia de contaminación. No obstante, es posible proporcionar algunas indicaciones partiendo de la información existente sobre el uso del emplazamiento y los objetos de protección, de forma que se puedan obtener resultados significativos para el posterior análisis de riesgos.

Las profundidades de muestreo del suelo recomendadas en relación con el objeto a proteger y el uso del emplazamiento se indican en el cuadro adjunto.

Uso del suelo	Objeto a proteger/Profundidad de muestreo		
	Organismos del suelo 0-max 20 cm	Plantas Horizonte Ap o profundidad de ardo (0-30 cm)	Agua 0-30 cm
Cultivos hortícolas			
Prado eral	Horizonte Ah 0-10 cm	Horizonte Alv 0-10 cm	0-30 cm
Masa arbórea	Horizonte Ah 0-10 cm	Rizosfera (0-30 cm)	0-50 cm
	Ser humano		
Superficies urbanas y de recreo sin vegetación		0-2 cm	
		0-10 cm	
Superficies urbanizadas y de recreo con vegetación		0-5 cm	
		5-10 cm	
Huertas		0-10 cm	

103

Número de muestras por cada punto de muestreo.

Aunque es difícil establecer a priori el número de muestras de suelo que habrán de tomarse en cada punto de muestreo para caracterizar la contaminación en el sentido vertical, puede ser de gran utilidad al respecto la reinterpretación de los datos de cualquier fuente (principalmente información geotécnica). Cuando no se posea esta información es recomendable ejecutar un sondeo de referencia (ligero) que permita describir de forma aproximada la estructura del suelo.

En todo caso, y como norma general, se recomienda tomar al menos dos muestras en cada perforación aunque, siempre que sea posible detectar estratos diferenciados, cada uno de ellos deberá ser muestreado independientemente.

Estrategia de muestreo de las aguas subterráneas.

La investigación de la contaminación del suelo debe considerar sistemáticamente las afecciones que se pueden producir en medios íntimamente relacionados con aquél, como las aguas subterráneas. Para ello, en cada fase de investigación es preciso obtener información suficiente (y acorde con los objetivos de la fase en cuestión) sobre dos aspectos básicos:

- el contexto hidrogeológico del emplazamiento y su entorno;
- la calidad de las aguas subterráneas potencialmente afectadas.

La investigación de la calidad de las aguas subterráneas exige la toma de muestras y análisis de las mismas, que debe realizarse de acuerdo con una estrategia predefinida. En la definición de esta estrategia de muestreo hay que tener en cuenta no sólo las características de los focos de contaminación sino también el previsible comportamiento de los distintos contaminantes implicados en el contexto hidrogeológico del emplazamiento y su entorno.

104

Sondas y mecanismos de muestreo.



Figura N° 1. Sonda de Embudo

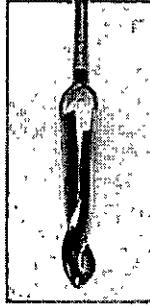


Figura N° 2. Sonda de Bóveda. Fuente: catálogo EpiStump

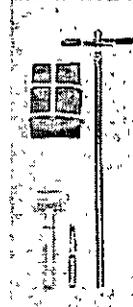


Figura N° 3. Sonda manual de mediana talla. Fuente: catálogo EpiStump

105



Figura N° 4. Sonda manual 'Revolvi'. Fuente: catálogo EpiStump



Figura N° 5. Sonda manual para gravas. Fuente: catálogo EpiStump



Figura N° 6. Sonda manual para arena gruesa. Fuente: catálogo EpiStump

106



Figura N° 7. Sonda de pistón. Fuente: catálogo Eijelkamp



Figura N° 8 Sonda manual helicoidal. Fuente: catálogo Eijelkamp



Figura N° 9 Sonda helicoidal de sondas ligeras. Fuente: catálogo Eijelkamp

107



9

Figura N° 10 Sonda acanalada.



Figura N° 11. Sonda acanalada reforzada. Fuente: catálogo Eijelkamp

108

Obj.

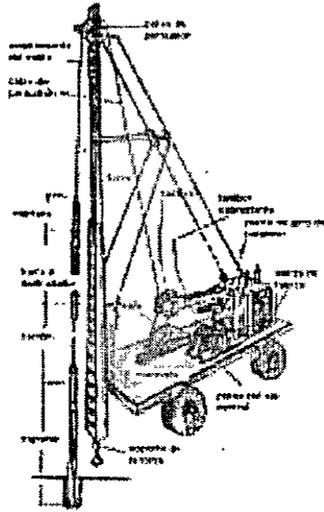


Figura N° 12. Esquema de equipo de perforación a percusión
(CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

109

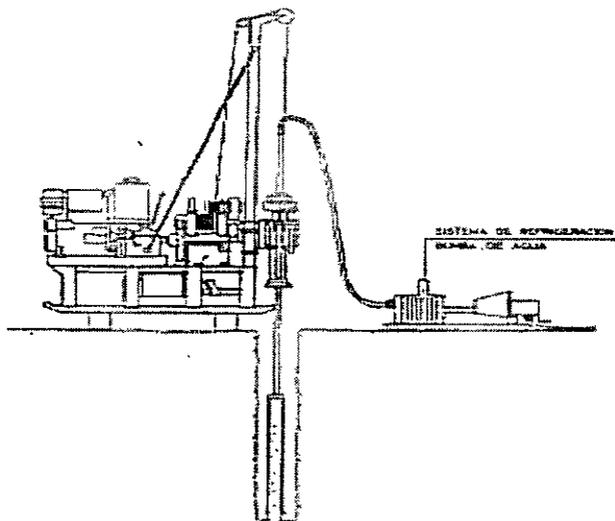


Figura N° 13. Esquema de equipo de rotación con coronas

110

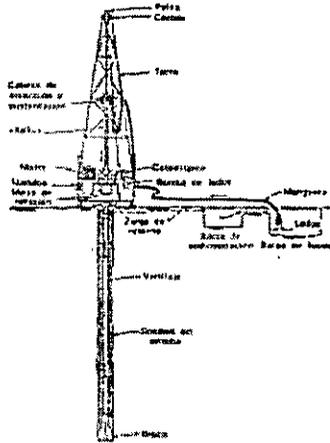


Figura Nº 14 Esquema de equipo de rotación con circulación directa de fluidos (DAVIS Y DE WIEST 1971)

111

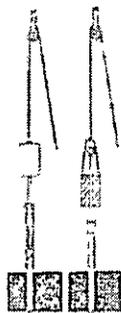


Figura Nº 15 Hincia mecánica de puntas cónicas (GIBSON Y SINGER, 1976)



Figura Nº 17 Soportantes de pared doble (CUSTODIO Y LLAMAS, 1978)

112

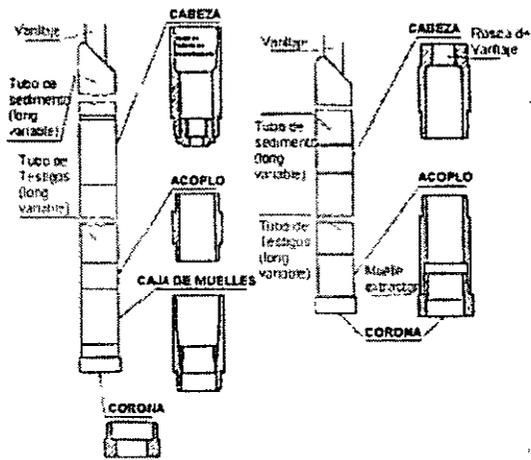


Figura N° 16. Sacatestigos de pared sencilla (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

113



Figura N° 18. Sacatestigos con cabez (ELIZONDO Y ELIZONDO, 1976)

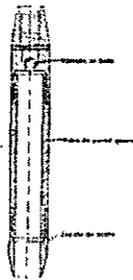


Figura N° 19. Sacatestigos de pared gruesa (T.C.E., 1960)

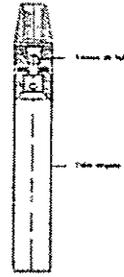


Figura N° 23. Sacatestigos de pared gruesa (I.T.G., 1991)

114



Figura N° 21. Tomamuestras (líquidos) para muestras con bacterias heliobatas (U.S. BUREAU OF RECLAMATION, 1974)

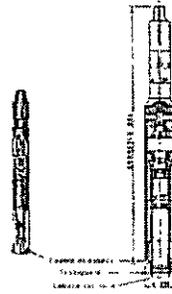


Figura N° 22. Sacamuestras para aguas de pozos (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

115

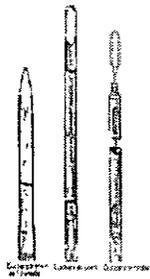


Figura N° 23. Cochinos o resacas de limpieza (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

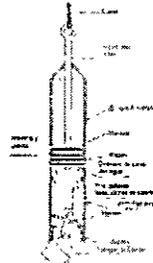


Figura N° 24. Cochinos de pistón (CUSTODIO Y LLAMAS, 1976)

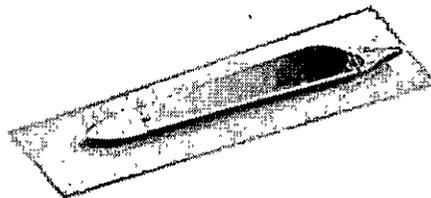


Figura N° 25. Sonda de sedimentos. Fuente: catálogo Ejelkamp

116



Figura N° 26. Sonda Becker. Fuente: catalogo Eijkkamp

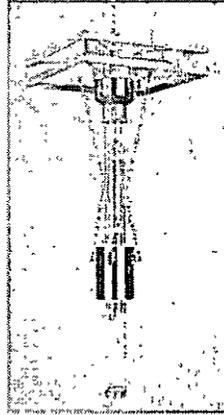


Figura N° 27. Sonda de cubeta libre. Fuente: catalogo Eijkkamp

117

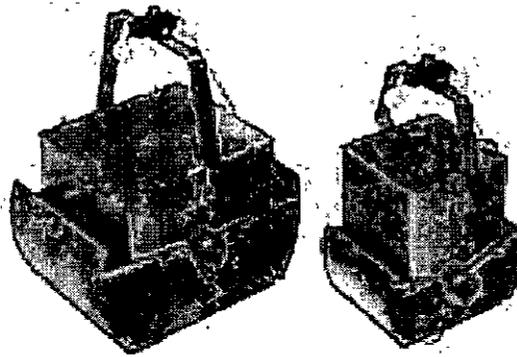


Figura N° 28. Draga Ekman. Fuente: Wildlife Supply Company

118

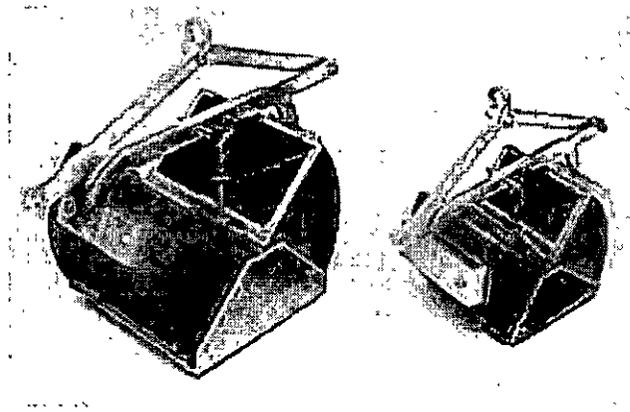


Figura N° 29. Draga Ponar. Fuente: Wildlife Supply Company

119

Contexto hidrogeológico.

En general, el conocimiento del comportamiento hidrogeológico del emplazamiento requiere obtener información sobre los siguientes aspectos

- a. Aspectos geológicos. El reconocimiento geológico tiene por objeto identificar las diferentes unidades estratigráficas presentes en el subsuelo, así como su disposición, con el fin de evaluar la posibilidad de migración de los contaminantes. Los resultados deben ilustrarse en forma gráfica (planta y perfil) a la escala adecuada al caso.
- b. Aspectos hidrogeológicos. Los más destacables son los siguientes.
 - el régimen de flujo regional de las aguas subterráneas, identificando las zonas de recarga y descarga, el comportamiento hidrogeológico básico de cada formación (acuífero, acuífero, etc.) y las posibles relaciones hidráulicas entre los acuíferos identificados y otros sistemas hídricos relacionados (ríos, lagos, embalses, etc.);
 - el régimen local de flujo (velocidad y sentido) de las aguas subterráneas, ilustrado en planta y perfil, para las diferentes unidades hidrogeológicas, incluyendo los coeficientes de permeabilidad (K) y los gradientes hidráulicos;
 - el análisis de la influencia que el foco contaminante (o, en general, cualquier instalación superficial o subsuperficial) puede tener sobre el flujo de las aguas subterráneas;
 - la evaluación de los impactos previsible sobre las aguas superficiales y subterráneas debidos a la migración de la contaminación desde el foco.
- c. Aspectos hidrogeoquímicos. Con vistas a determinar la influencia del emplazamiento investigado en la calidad de las aguas subterráneas, es preciso conocer las características químicas naturales que dichas aguas tienen en la zona, en lo relativo tanto a componentes mayoritarios (amonios, cationes, etc.) como minoritarios. Los valores obtenidos servirán para caracterizar las concentraciones de base, usadas como referencia para la posterior delimitación de las afecciones debidas al emplazamiento

Muestreo de las aguas subterráneas.

El diseño del muestreo de las aguas subterráneas en una determinada fase de investigación debe responder a los objetivos establecidos para la misma y tener en cuenta el contexto hidrogeológico del emplazamiento y su entorno. En todo caso, tal diseño ha de garantizar la representatividad de las muestras, para la cual son determinantes tanto su ubicación como las técnicas y equipos de muestreo a aplicar.

En general, pueden ser objeto de muestreo tanto las aguas subterráneas de la zona no saturada como las de la zona saturada.

El movimiento de los contaminantes en la zona no saturada es de capital importancia en la investigación de la contaminación: por una parte, es en ella dónde los procesos físicos, químicos y biológicos son más activos y, por otra, esta zona constituye la primera barrera a la progresión de la contaminación hacia la zona saturada, pudiendo contener paquetes de materiales de muy baja permeabilidad que juegan un papel primordial en la migración de la contaminación

121

El alcance del muestreo en la zona no saturada depende de las características del emplazamiento, su comportamiento hidrogeológico y los objetivos marcados para la fase de investigación en cuestión. En general, se acomete sólo en investigaciones detalladas o complementarias, con el fin de obtener información adicional a la disponible sobre las afecciones de la zona saturada.

Siendo la delimitación del penacho de contaminación de las aguas subterráneas de la zona saturada uno de los objetivos principales de la investigación de un suelo potencialmente contaminado, el diseño de la estrategia de muestreo de dichas aguas constituye un elemento esencial para garantizar un diagnóstico fiable.

A este respecto, la consecución de muestras representativas de la distribución de los contaminantes en este medio es una condición básica que exige localizar correctamente, en el espacio y en el tiempo, las muestras a partir del conocimiento disponible sobre el flujo de las aguas subterráneas y el comportamiento en las mismas de los contaminantes implicados.

La localización espacial de las muestras tiene dos componentes: ubicación en planta y profundidad de la muestra. Para ambos, los criterios de diseño están fuertemente condicionados, entre otros factores, por los objetivos de la investigación (confirmación de contaminación o delimitación de la misma).

En términos generales, cuando se trate de confirmar presencia o ausencia de contaminantes (objetivo implícito en la fase de Investigación Exploratoria), puede adoptarse un número reducido de puntos de muestreo en pozos con amplia longitud de rejilla (cada muestra es representativa de toda la columna de agua), mientras que en investigaciones de delimitación espacial de la contaminación (Investigación Detallada), el número de puntos de muestreo se incrementará sensiblemente, debiéndose tomar muestras a varias profundidades en cada punto.

122

Estos aspectos condicionan además la posibilidad de aprovechar pozos o piezómetros existentes en el emplazamiento o sus alrededores, así como el diseño de los nuevos pozos de control a instalar y las técnicas y equipos de muestreo apropiados, por lo que es imprescindible un enfoque integrado a la hora de concretar la estrategia.

Un elemento añadido a los anteriores es la variación temporal de la distribución de los contaminantes en las aguas subterráneas, que (sobre todo para la zona saturada) debe considerarse en el diseño de la estrategia de muestreo. En general, será preciso acometer varias campañas de muestreo a lo largo del tiempo para obtener información fiable a este respecto. El número de puntos de muestreo, muestras por punto y frecuencia del muestreo vendrán determinados por las características hidrogeológicas del emplazamiento y su entorno, así como por las características de los contaminantes implicados (movilidad, degradabilidad, etc.).

123

Estrategia de muestreo del aire intersticial del suelo.

La toma de muestras de fase gaseosa abarca tanto el aire intersticial del suelo como el aire ambiente. El muestreo de aire ambiente posee condicionantes y factores específicos, efectuándose en caso de existir fundadas sospechas de afección a la salud humana como consecuencia de la migración de contaminantes en fase gaseosa desde el foco a zonas sensibles (por ejemplo, ambientes interiores de edificios) o en caso de producirse significativas emisiones de contaminantes gaseosos a la atmósfera como consecuencia de reacciones químicas en depósitos incontrolados de ciertos residuos.

En la zona no saturada del suelo, los contaminantes se distribuyen en tres fases: absorbidos en las partículas de suelo, disueltos en el agua y disueltos en el aire intersticial. La distribución entre las fases citadas depende de las características físico-químicas del contaminante en cuestión, así como de las del propio suelo. En los casos donde la contaminación incluye la presencia de sustancias volátiles y/o semivolátiles (por ejemplo hidrocarburos ligeros, disolventes clorados, etc.), buena parte de aquella se aloja en fase gaseosa.

En estos casos, suele incluirse en el programa de investigación el muestreo y análisis del aire intersticial del suelo, ya que ofrece una aproximación a la entidad y distribución de la contaminación del suelo propiamente dicho (e incluso de las aguas subterráneas, si se encuentran próximas a la superficie del terreno). De esta forma se puede optimizar el

124

posterior muestreo del suelo, orientándolo en función de los resultados de la investigación del aire intersticial. No obstante, hay que tener en cuenta que a menudo es difícil establecer buenas correlaciones entre las concentraciones de un contaminante en el aire intersticial y en la fase sólida del suelo, por lo que la información aportada por la investigación del primero debe considerarse como orientativa para desarrollar la del segundo.

En cualquier caso la efectividad de esta técnica depende de las características específicas de los contaminantes implicados y requiere un suelo de suficiente porosidad para permitir la extracción de las muestras.

Un caso particular de investigación del aire intersticial del suelo es el de los vertederos donde se han depositado residuos orgánicos degradables y/o con componentes volátiles. En estos vertederos, la toma de muestras de aire intersticial aporta información útil para acotar las zonas activas y efectuar una evaluación preliminar de las posibilidades de migración de los gases al entorno del emplazamiento, con los consecuentes riesgos de inhalación y/o explosión.

Salvo que existan razones que aconsejen lo contrario, el muestreo del aire intersticial suele diseñarse trazando una malla sensiblemente regular sobre la planta del emplazamiento. Las dimensiones de esta malla dependen de los objetivos concretos de la investigación, la extensión del propio emplazamiento y las características del suelo.

El muestreo del aire intersticial se extiende a profundidades que no suelen superar los 5 metros, aunque los objetivos concretos de la investigación, las características del suelo y de los contaminantes implicados pueden aconsejar limitar el muestreo a profundidades menores (como, por ejemplo, para evaluar las emisiones procedentes de vertederos). En todo caso, no es aconsejable muestrear el aire intersticial a profundidades inferiores a 0,5 metros.

Por lo expuesto anteriormente, el muestreo del aire intersticial suele tener mayor utilidad durante las primeras fases de investigación de un emplazamiento, es decir, dentro de la Investigación Exploratoria.

125

Estrategia de muestreo de otros elementos.

Los medios contemplados en los epígrafes anteriores (suelo, aguas subterráneas y aire intersticial del suelo) son los que habitualmente concentran gran parte de las labores de toma de muestras dentro de la investigación de suelos contaminados. No obstante, en ocasiones es necesario contemplar y diseñar el muestreo de otros elementos, siendo los casos más frecuentes a este respecto los siguientes:

- La investigación de vertederos u otros emplazamientos en los que se han depositado residuos. En estos emplazamientos suele procederse al muestreo de residuos y lixiviados, a fin de obtener datos que permitan caracterizar la fuente del problema. Por su propio objetivo, el muestreo de estos elementos tiene lugar preferentemente en las primeras fases de investigación del emplazamiento.
- La investigación de ruinas industriales, en las cuales pueden estar presentes residuos, materiales o instalaciones abandonadas así como elementos constitutivos de edificios afectados por la contaminación. En este caso, el muestreo de los mismos tiene como finalidad obtener información sobre sus características que permita, por un lado, identificar focos de contaminación y, por otro lado, decidir la posterior gestión de los residuos en el marco de una actuación de recuperación. El cumplimiento del primer objetivo citado (y el muestreo respectivo) corresponde esencialmente a la Investigación Exploratoria, mientras que el segundo se aborda habitualmente durante la Investigación Detallada y las investigaciones complementarias previas a la redacción del proyecto de recuperación.

126

- La investigación de emplazamientos en los que existan indicios suficientes de afección de los ecosistemas y/o de la salud humana a través de la cadena trófica, en cuyo caso se incluirá el muestreo de aquellos elementos (vegetales, pastos, etc.) potencialmente afectados, con el fin de obtener la información necesaria para aplicar la metodología de evaluación de riesgos. En consecuencia, este tipo de muestreo tiene lugar preferentemente en el seno de la Investigación Detallada.

El número de puntos de muestreo y muestras de los elementos señalados, así como la localización de las mismas, dependen en gran medida de las características específicas de cada emplazamiento y fase de investigación. Como principio general para el diseño del muestreo, cabe indicar que debe guiarse por el objetivo de obtener datos suficientemente representativos del objeto a caracterizar, dentro de las limitaciones temporales y presupuestarias inherentes a la investigación.

127

Diseño del programa de análisis químico.

El diseño de un programa de análisis químico en el ámbito de la investigación de la contaminación del suelo debe desarrollarse fundamentalmente de acuerdo a la fase de investigación en curso. El objetivo de la etapa de investigación junto con la información previa disponible determinarán la estrategia analítica, que requiere de la consideración de los siguientes aspectos:

- Selección de los parámetros químicos
- Selección de los métodos analíticos

El programa de análisis químico, en lo que respecta a la selección de los parámetros químicos que han de ser determinados, debe ajustarse al objetivo de cada fase de investigación y efectuarse en base a la información existente así como a las hipótesis establecidas. No así la selección de métodos analíticos que, si bien estará influida por el grado de exactitud requerida por cada etapa de estudio, responde generalmente a la disponibilidad de, por una parte, la normativa adecuada y, por otra parte, el equipamiento exigido para la aplicación de la norma.

De acuerdo a las necesidades prácticas, los procedimientos de medida en materia de análisis químico en emplazamientos contaminados pueden dividirse en los siguientes grupos:

128

a. Medidas de campo

En la mayoría de las investigaciones, las muestras son enviadas al laboratorio pero en algunos casos se recomienda la aplicación de ensayos in-situ, de naturaleza cuantitativa o semicuantitativa, cuyos resultados, no obstante, no pueden ser utilizados para el posterior análisis de riesgos. La determinación y evaluación inicial de contaminantes, propiedades del suelo o el análisis rápido del suelo durante una excavación, son algunos de los casos en los que se pueden efectuar ensayos in-situ.

b. Métodos globales

Los métodos de laboratorio de amplio espectro o globales son aquellos que se utilizan para la determinación de parámetros representativos de un grupo de sustancias que comparten propiedades similares en algún sentido (por ejemplo, aceite mineral, EOX o índice de fenoles). Estos métodos proporcionan una herramienta útil en las primeras fases de la investigación o cuando la información histórica resulta insuficiente para diseñar un programa detallado de análisis. Esta es una manera de determinar el tipo de contaminación presente evitando los altos costes que conllevaría una aproximación al problema en base a la cuantificación de contaminantes individuales. Este tipo de análisis, proporcionan únicamente una información aproximada acerca de la gravedad de la contaminación y no siempre es fácil valorar los resultados obtenidos.

129

c. Métodos para compuestos específicos

A pesar de la indudable utilidad de las medidas de campo y de los métodos globales, son las medidas de laboratorio para compuestos específicos las que aportan una mayor información cuantitativa a la investigación de la calidad del suelo.

En la actualidad existen publicados una gran variedad de métodos analíticos que permiten la determinación de los contaminantes investigados en las matrices de interés. No obstante, antes de seleccionar el método a utilizar habrá que comprobar que cumpla los siguientes requisitos:

- ser capaz de alcanzar un grado aceptable de exactitud y reproducibilidad;
- poseer un límite de detección apropiado para la cuantificación de concentraciones inferiores al nivel de referencia;
- tener una respuesta conocida a posibles especies interferentes;
- ser factible en términos de tiempo de realización y coste.

Para la realización de los análisis químicos, se recomienda aplicar métodos normalizados, aunque es posible la utilización de metodologías no estandarizadas, siempre y cuando hayan sido adecuadamente validadas.

130

Es importante recordar que el empleo de métodos normalizados de análisis no garantiza por sí solo la obtención de resultados de la calidad adecuada, entendida ésta como cercanía al valor verdadero del contenido de analitos buscados. Puesto que los resultados erróneos pueden producirse por multitud de causas (efectos de matriz imprevistos en la muestra, mal funcionamiento y/o calibración del equipo utilizado, errores humanos, etc.) *es recomendable que el 10 % de las muestras sean tomadas por duplicado para un análisis de contraste en un laboratorio acreditado para la cuantificación de los analitos objeto de interés empleando la técnica analítica de referencia.*

Si bien los tres tipos de procedimientos indicados son comúnmente utilizados en la investigación de la contaminación, el alcance y calidad de los resultados determina la aplicabilidad de uno u otro método individual o conjuntamente.

131

Diseño del plan de seguridad.

Los aspectos de seguridad en los trabajos de investigación y recuperación de suelos contaminados pueden y deben gestionarse de forma anticipada y estructurada a través de un enfoque integrado y de una planificación y seguimiento de actuaciones al respecto. A tal fin, se plantean dos instrumentos básicos: el Programa de Seguridad y el Plan de Seguridad. A efectos prácticos es el segundo el que debe elaborarse de forma específica para el programa de trabajo y emplazamiento a investigar y/o recuperar. En él se concretan y adaptan los términos del Programa de Seguridad a la vista de las características de los trabajos a realizar.

Los contenidos mínimos que debe contemplar y desarrollar un Plan de Seguridad se sintetizan en el siguiente cuadro.

Contenidos del Plan de Seguridad	
1.	Antecedentes del emplazamiento relevantes para la seguridad
2.	Descripción del programa de trabajos a realizar
3.	Evaluación de riesgos
4.	Organización del personal en el trabajo
5.	Organización espacial del trabajo
6.	Medidas de seguridad colectiva
7.	Equipos de protección individual
8.	Formación y entrenamiento específico del personal
9.	Procedimientos generales y específicos de trabajo
10.	Instrucciones específicas para el manejo de materiales y equipos
11.	Procedimientos de descontaminación
12.	Control y seguimiento de condiciones ambientales
13.	Plan de actuación en situaciones de emergencia
14.	Programa de revisiones médicas

132

La evaluación de riesgos es uno de los ejes centrales de la gestión de la seguridad en trabajos específicos de investigación y recuperación de suelos contaminados y constituye un elemento esencial de los futuros Planes de Seguridad. El método simplificado de evaluación de riesgos en trabajos de investigación y recuperación de suelos contaminados se estructura en las siguientes etapas:

1. Identificación de situaciones de trabajo
2. Identificación de factores de riesgo relevantes para cada situación de trabajo
3. Identificación de riesgos específicos asociados a cada situación de trabajo
4. Evaluación de riesgos específicos asociados a cada situación de trabajo
5. Elaboración del diagnóstico de seguridad

133

Como consecuencia del diagnóstico de seguridad se deben definir actuaciones relativas a:

- **Aspectos personales y organizativos:** contemplan un conjunto de recomendaciones y requisitos cuyo objetivo es integrar los factores de índole personal (físicos, psicológicos, de formación, etc.) y organizativos (métodos y tipos de trabajo, exigencias temporales y plazos, turnos y ritmo de trabajo) de modo que para cada situación de trabajo el personal implicado sea el más adecuado, minimizando de este modo el riesgo de accidentes. No obstante este tipo de consideraciones tienen un carácter cualitativo y relativamente genérico, dependiendo su puesta en práctica de las características de cada trabajo de investigación.
- **Medidas de seguridad:** están destinadas a la reducción y/o eliminación de los riesgos que los trabajos en el emplazamiento puedan suponer para investigadores y trabajadores como colectividad, así como para terceras personas ajenas a la obra. Dentro de este grupo se contemplarán:
 - medidas generales, como control de acceso al emplazamiento o la organización y distribución de áreas especiales
 - medidas para el uso seguro de equipos y maquinaria
 - medidas a adoptar en actividades específicas
 - medidas ante riesgos específicos
 - procedimientos de descontaminación

134

- **Equipos de protección:** su objetivo es suministrar al usuario protección y/o aislamiento frente a peligros de origen físico, químico y biológico que pueden encontrarse en cualquier tipo de emplazamiento durante la realización de un trabajo de investigación o de recuperación de un suelo contaminado. Los equipos de protección pueden clasificarse en dos grandes grupos:
 - equipos de protección colectiva
 - equipos de protección individual (EPI)

- **Actuación en caso de emergencia:** para combatir eficazmente una situación de este tipo es esencial disponer de un Plan de Emergencia que permita anticiparse, protegiendo la salud de los trabajadores y de las personas ajenas al emplazamiento. En el Plan deben establecerse las pautas y procedimientos para responder a estas situaciones generalmente provocadas por causas relacionadas con los trabajadores o con las condiciones del lugar de trabajo. Es importante que el Plan de Emergencia contemple los siguientes aspectos:
 - personales
 - de formación
 - de comunicación (interna, externa)
 - organizativos (distancias de seguridad y refugios, rutas y procedimientos de evacuación)
 - equipos de emergencia
 - procedimientos de descontaminación de emergencia, etc

135

Preparación de los trabajos de campo.

La ejecución de los trabajos de campo diseñados en toda campaña de investigación de un emplazamiento contaminado requiere contemplar, con carácter previo al inicio de los mismos, una serie de aspectos prácticos esenciales para garantizar la ejecución de aquéllos de forma eficiente.

Se recomienda documentar en lo posible las tareas de preparación de los trabajos de campo, de modo que todos los miembros de los distintos equipos humanos implicados posean la información que precisan para cumplir sus funciones respectivas. Además, dicha documentación se incorporará posteriormente al informe de la investigación.

Aspectos generales.

El documento descriptivo del plan de trabajos de campo debe reflejar sucintamente la forma de llevar a cabo la investigación en el campo y en el laboratorio, incluyendo al menos los siguientes aspectos:

136

- descripción del objetivo de la investigación, en particular del programa de muestreo y análisis
- mapa del área a investigar a escala adecuada
- medios a muestrear
- localización de los puntos de muestreo, incluyendo las profundidades a las que deben tomarse *a priori* las muestras
- técnicas requeridas para la perforación y la toma de muestras
- número estimado de muestras, incluyendo los duplicados y las muestras tomadas en los terrenos colindantes al emplazamiento contaminado
- procedimientos estándar de trabajo previstos, incluyendo el protocolo de limpieza recomendado para el instrumental de perforación y muestreo
- análisis *in situ* y en laboratorio a realizar en las distintas muestras
- otras investigaciones y ensayos a realizar *in situ*
- explicitación de la necesidad de llevar a cabo ensayos específicos de lixiviación, biodisponibilidad o especiación
- discusión general sobre la exactitud y precisión requeridas en el análisis
- descripción de las responsabilidades de investigadores y trabajadores en el campo
- descripción de las principales previsiones del plan de seguridad elaborado para la ejecución de la investigación

137

Preparación de la toma de muestras.

Por su trascendencia, la toma de muestras requiere una preparación específica previa a su inicio. Entre los preparativos a realizar antes del traslado de los equipos al emplazamiento cabe destacar los siguientes.

- **representación de la situación de los puntos de muestreo en un plano a escala adecuada** (mínimo 1:2000), en el que además se indiquen los posibles riesgos y la localización de las redes de servicios (energía eléctrica, agua, saneamiento, gas, teléfono, etc.) en funcionamiento.
- **elaboración de fichas de registro** específicamente diseñadas para la anotación de la descripción del perfil de los testigos y los datos representativos de cada muestra.
- **elaboración de las etiquetas para los recipientes que contendrán las muestras.** Estas etiquetas deberán diseñarse de manera que permitan registrar el código de cada muestra, el cual ha de hacer referencia a su origen, medio muestreado y posición en el emplazamiento, tanto en sentido horizontal como vertical. Un buen diseño del código de muestra permitirá su fácil reconocimiento en mapas, fichas de registro, informes analíticos, etc.:
- **preparación de los recipientes de muestreo.** Los recipientes en los que posteriormente se recogerán las muestras deberán someterse a procedimientos de limpieza acordes con los parámetros a analizar. Si fuera necesario, se introducirán en los recipientes los productos químicos requeridos para la conservación de las muestras (fundamentalmente para muestras de agua).

138

Una vez en el emplazamiento y previamente al inicio de la toma de muestras, habrá que considerar los siguientes aspectos:

- los vehículos y el equipamiento se estacionarán lejos de los puntos de muestreo con el fin de evitar la contaminación del material y recipientes de muestreo con aceite, gasolina u otros compuestos procedentes del tubo de escape;
- allí donde se prevea la realización de perforaciones, se procederá a limpiar el suelo eliminando cualquier resto de residuos, escombros, material de demolición, etc.;
- cada punto de muestreo se indicará de forma visible, marcando en el suelo un código de referencia predefinido. En caso de que se produjeran variaciones en la localización de los puntos de muestreo respecto a la estrategia diseñada, las nuevas localizaciones habrán de ser registradas inmediatamente en el plano.

Información mínima de la etiqueta de los recipientes de muestreo
- Proyecto en el que se enmarcan las muestras
- Naturaleza de la muestra
- Localización del punto de muestreo (horizontal y vertical)
- Fecha y hora de la toma de muestra
- Instrucciones para la manipulación del recipiente
- Indicaciones acerca de cualquier necesidad especial para la conservación o el análisis de la muestra

139

Toma de muestras.

Toma de muestras de matriz sólida.

Las muestras de matriz sólida que más habitualmente se toman durante la investigación de emplazamientos contaminados son las de suelo. Además de ellas, hay que mencionar las de residuos, materiales abandonados y elementos constructivos de edificios, que se toman en la investigación de determinados tipos de emplazamientos.

Toma de muestras de suelo.

Los principales sistemas de tipo intrusivo que permiten la toma de muestras de suelo y que se utilizan en investigaciones de emplazamientos contaminados son las siguientes:

- Calicatas
- Sondeos manuales
- Sondeos ligeros o semimecánicos
- Sondeos mecánicos

La mayor parte de los trabajos de investigación de suelos contaminados se desarrollan en los niveles superficiales/subsuperficiales del terreno (orientativamente, hasta 10-15 m de profundidad), para los cuales pueden ser válidos los sondeos manuales y/o ligeros. Sin embargo, cuando es necesario alcanzar profundidades mayores, se deben utilizar los sondeos mecánicos.

140

Principales sistemas de perforación y toma de muestras de suelo				
Sistema	Aplicabilidad	Ventajas	Limitaciones	Observaciones
Calicatas	Delimitación superficial y horizontal	Costes reducidos, rapidez de investigación	Profundidad (hasta 4-5 m), representatividad de muestras	Utilizada como herramienta previa o complementaria
Sondeos manuales	Suelos cohesivos y no cohesivos	Facilidad manejo, reducido peso, costes bajos	Profundidad (hasta 1 m). Suelos duros	Presentan multitud de diseños ante distintos suelos a muestrear
Sondeos ligeros	Suelos cohesivos y no cohesivos	Costes medios, posibilidad de acceso a zonas difíciles para equipos mecánicos	Profundidad (hasta 8-10 m). Suelos rocosos o arenosos	
Sondeos mecánicos	Todo tipo de suelos	Grandes profundidades, versatilidad, diámetros variables de perforación, instalación de pozos de control	Costes asociados, dificultad en lugares de difícil acceso, personal experimental	Agrupar numerosas técnicas de perforación diferentes, en continua evolución

141

Aunque los sistemas de perforación, debido a sus diferentes características, tienen asociadas distintas técnicas de muestreo, pueden realizarse algunas consideraciones generales para todos ellos. Como norma general, las muestras deben tomarse de forma que se extraiga, de toda la profundidad de muestreo o de toda la potencia del estrato u horizonte objeto de estudio, una porción de suelo representativa, evitando en lo posible la alteración de su estructura y características físicas.

Recomendaciones generales para la toma de muestras de suelo	
-	El orden de la ejecución del muestreo debe seguir en la medida de lo posible la secuencia de puntos de menos a más contaminado para evitar una posible contaminación cruzada
-	Cuando en el perfil de un mismo sondeo se aprecien niveles o estratos bien diferenciados, deberán tomarse muestras separadas representativas de cada estrato;
-	Deberán ser muestreados aparte aquellos estratos en los que se perciba contaminación (color, olor, zonas removidas, etc),
-	El tiempo de contacto de la muestra con el instrumental de perforación ha de ser mínimo.
-	El material que haya permanecido en contacto con el muestreador debe eliminarse con el fin de evitar la contaminación producida por el anastre de materiales desde niveles superiores,
-	La preparación de muestras nexas o compuestas debe realizarse siempre en el laboratorio y no en el campo.
-	Cuando se tome una muestra directamente por debajo de un nivel claramente contaminado, debe colocarse un tubo de revestimiento para evitar que la contaminación progrese en profundidad

142

Toma de muestras de matriz líquida.

Las muestras de matriz líquida que más habitualmente se toman durante la investigación de emplazamientos contaminados son las de aguas, en especial subterráneas. Además de ellas, hay que mencionar las de residuos líquidos y lixiviados, que pueden tener relevancia en la investigación de determinados tipos de emplazamientos.

Toma de muestras de aguas subterráneas.

La toma de muestras de aguas subterráneas va a menudo precedida de la instalación de un pozo de control. El diseño, instalación y desarrollo de los pozos de control se encuentra descrito en la *Guía Metodológica de Toma de Muestras*. A continuación se resumen algunas prácticas imprescindibles para el correcto muestreo de las aguas subterráneas en los pozos de control.

143

- **Preparación y mediciones:** antes de comenzar el muestreo propiamente dicho se debe abrir el sistema de protección del pozo (arquetas, tubos y tapas de cierre, etc.). A continuación se mide el nivel de agua en el pozo y se calcula el volumen de la columna de agua existente en su interior. El nivel de agua se mide desde un punto de referencia (por ejemplo, la boca del pozo), que en caso de no existir, debe ser señalado para futuras mediciones. Se realiza además un croquis indicando la situación del punto de referencia, la altura de la boca del pozo sobre el nivel del suelo, etc.
- **Purgado del pozo:** se realiza con el objetivo de que la muestra sea representativa y consiste en la extracción del agua contenida en el mismo y la inmediatamente adyacente a éste (zona de influencia). Aunque el pozo hubiera sido limpiado tras su instalación, el tiempo transcurrido hasta la toma de muestras aconseja proceder siempre al purgado. El volumen purgado del pozo depende de las condiciones hidrogeológicas del área; como norma general, se considera necesario extraer al menos un volumen de 3 veces la columna de agua contenida en el pozo.

144

Recomendaciones para la toma de muestras de agua subterránea

- Se habrá logrado la limpieza del pozo una vez se establezca el pH y la conductividad eléctrica, parámetros cuya medida se realiza *in situ* con instrumental portátil o analizadores en continuo.
- Siempre que sea posible, la muestra de agua se tomará una vez que el acuífero haya recuperado el equilibrio (aproximadamente una semana después de la limpieza del pozo).
- Para evitar el riesgo de contaminación cruzada, el instrumental que haya permanecido en contacto con la muestra ha de ser limpiado exhaustivamente. Se recomienda la utilización de mangueras de polietileno (PE) o politetrafluoroetileno (PTFE) de un único uso.
- Las muestras de agua subterránea deben ser filtradas en el campo a través de un filtro de 0.45 µm, en condiciones anaerobias.
- Cuando se tome la muestra por medio de bombas, deberá purgarse el dispositivo de extracción con una cantidad de agua dependiente de la permeabilidad de la formación (como mínimo, dos o tres veces el volumen del dispositivo de extracción).
- Cuando vaya a determinarse en las muestras de agua compuestos volátiles, debe reducirse la turbulencia en la medida de lo posible.

145

Toma de muestras de aguas superficiales.

El muestreo de aguas superficiales se realiza normalmente durante la investigación de emplazamientos en los que se sospecha la afección de las mismas por migración de contaminantes procedentes de aquél. Dicha migración puede producirse por diversos mecanismos, siendo los más habituales el arrastre de partículas por la escorrentía superficial o la descarga a cauces superficiales de aguas subterráneas contaminadas.

Toma de muestras de residuos líquidos.

Para el muestreo de residuos líquidos abandonados en bidones y tanques es aconsejable utilizar un tomamuestras tipo "baile" o, en su defecto, un tubo de vidrio que se introduce en el líquido y cuyo extremo superior se cierra, ejerciendo un efecto pipeta. En ocasiones también se emplean muestreadores Colwasa o bombas Bacon.

Siempre es aconsejable emplear equipos de muestreo de un solo uso, no añadir reactivos para evitar riesgos de reacciones imprevistas y extremar las precauciones durante la toma de muestras. Para ello, se deben realizar mediciones con un explosímetro, posponiendo el muestreo en caso de detectarse niveles superiores al 25% del límite inferior de explosividad (LEL), hasta que aquéllos disminuyan por debajo del 10% del LEL.

Toma de muestras de matriz gaseosa.

El muestreo de la matriz gaseosa en las investigaciones de contaminación de emplazamientos puede comprender tanto el muestreo de la fase gaseosa o aire intersticial del suelo como el muestreo del aire ambiente. En los últimos años se han desarrollado numerosos métodos, tanto para la toma de muestras como para la detección y caracterización de gases y vapores.

146

El muestreo de aire ambiente difiere en sus características del muestreo del aire intersticial y suele realizarse al hilo de casuísticas en las que puede existir afección de la salud humana (por ejemplo, en ambientes interiores) como consecuencia de la migración de gases o compuestos volátiles desde el emplazamiento a su entorno.

El objetivo de la toma de muestras de aire intersticial del suelo es obtener muestras representativas de la composición y concentración de los gases presentes a la profundidad del suelo a la que se han tomado las mismas. Para asegurar su representatividad, los equipos de muestreo deben purgarse, recomendándose además extremar las medidas de limpieza de los equipos.

El muestreo del aire intersticial puede llevarse a cabo mediante:

- *Sistemas pasivos*: consistentes fundamentalmente en materiales o medios absorbentes que se insertan en el suelo (usualmente varillas impregnadas de carbón vegetal o de algún elemento absorbente específico) por un periodo de tiempo determinado (desde días a semanas). La varilla o elemento colector es posteriormente recuperado y analizado en laboratorio.
- *Sondas de muestreo*: método consistente en introducir sondas hasta la profundidad del suelo deseada, desde donde se extrae la muestra mediante una bomba para trasvasarla posteriormente a un recipiente o medio absorbente adecuado (tubos Tenax, tubos de carbón activo, bolsas Tedlar, etc.) que se envía al laboratorio o se analiza en campo mediante analizadores o detectores portátiles.

147

Registro de los datos de muestreo.

Toda la información recogida durante la toma de muestras deberá ser registrada correctamente en el campo, anotando en especial los siguientes datos:

- descripción del perfil del sondeo, incluyendo la estructura general del suelo e indicando la profundidad y la potencia de cada estrato, la profundidad a la que se encuentra el agua y la posición de cualquier instalación subterránea que se detecte.
- registro de la posición, horizontal y vertical, a la que se toma cada muestra, incluyendo una descripción detallada de la muestra (color, olor, etc.).
- observaciones generales, incluyendo un reportaje fotográfico con cada una de las perforaciones.

Información mínima sobre las muestras a registrar en el campo
- Código de identificación de la muestra
- Proyecta en el que se enmarca la muestra
- Localización exacta del punto de muestreo
- Fecha y hora del muestreo
- Condiciones meteorológicas
- Parámetros de toma de muestra (profundidad, dimensiones, etc.)
- Referencia del instrumental y método utilizado en el muestreo
- Descripción sumaria (de visu) de la muestra
- Nombres del personal que ha tomado parte en la operación
- Incidentes ocurridos durante el muestreo
- Cualquier otra información relacionada con la muestra o el muestreo

148

Conservación y transporte de muestras sólidas.

A pesar de que las muestras sólidas son en general más estables que las líquidas, es preciso conservarlas de forma que mantengan su integridad química. Teniendo este aspecto en cuenta, el material de envasado se elegirá considerando siempre que las características de las muestras no han de sufrir alteración alguna. Los fenómenos que se pretenden evitar con el envasado correcto de las muestras son los siguientes:

- contaminación de la muestra;
- pérdida de alguno de los contaminantes por difusión a través del material de envasado;
- modificación de algunas características de la muestra debido a la introducción de aire o la alteración de la estructura del suelo.

Como norma general, las muestras en las que se vayan a determinar compuestos inorgánicos deben envasarse en recipientes de material plástico, mientras que aquellas en las que se requiera el análisis de compuestos orgánicos se almacenarán en recipientes de vidrio o metálicos.

Se recomienda transportar las muestras refrigeradas a aproximadamente 4°C, especialmente cuando los compuestos o las propiedades a determinar puedan verse afectadas por la actividad microbiológica (por ejemplo pH, contenido de nitratos, contenido de nitritos, etc.).

149

Conservación y transporte de muestras líquidas.

Las muestras de agua y otros líquidos se deterioran más rápidamente que las sólidas después de haber sido tomadas. Para evitar este deterioro, las muestras deben preservarse adecuadamente. Si el análisis no va a ser inmediato debería ser suficiente, para la conservación de las muestras líquidas, la adición en el campo o en el laboratorio de un agente químico estabilizante. Sin embargo, este tratamiento no siempre es el más adecuado ya que la adición de sustancias extrañas a la solución acuosa puede producir la precipitación de parte de la materia insoluble, forzando de esta forma la necesidad de filtrar la muestra antes del análisis. Además algunos de estos agentes estabilizantes pueden reaccionar con la materia insoluble de la muestra liberando sustancias a la disolución y originando de esta manera probables desviaciones de los resultados analíticos. Por todas estas razones, el procedimiento general más efectivo es el traslado y almacenamiento de las muestras a una temperatura entre 4 y 6° C hasta que se realiza el análisis, cosa que debe hacerse inmediatamente

150

Conservación y transporte de muestras gaseosas.

La detección y caracterización de gases se realiza habitualmente *in situ*. No obstante, los equipamientos disponibles no siempre son capaces de alcanzar los objetivos de identificación requeridos por lo que las muestras deben ser trasladadas a un laboratorio cualificado para su análisis.

Un aspecto fundamental de la manipulación de las muestras gaseosas es la elección del recipiente óptimo para su conservación que elimine cualquier posibilidad de fuga o contaminación. Normalmente se utilizan para la mayoría de los gases y vapores, contenedores metálicos que pueden estar presurizados si se considera necesario. No se recomienda el uso de recipientes de materiales plásticos básicamente por dos razones: son relativamente permeables a muchos gases y además tienen tendencia a absorber vapores.

Cuando los gases han sido tomados en los recipientes adecuados, no se requiere ningún tipo de medidas especiales para su transporte al laboratorio.

151

Control de calidad del proceso de toma y transporte de muestras.

Para asegurar la calidad del proceso de toma de muestras, será necesario tomar las siguientes precauciones:

- el material necesario para la operación debe ser limpiado y comprobado cuidadosamente antes de la salida;
- la localización de los puntos de muestreo debe ser registrada en un plano de forma inequívoca;
- las muestras deben ser extraídas siguiendo rigurosamente el protocolo de muestreo, tanto en los aspectos referentes a la toma en sí, como en lo relativo a la limpieza del material;
- los criterios de eliminación de materiales extraños (piedras, trozos de vidrio, etc.) deberán ser claros y preestablecidos con antelación;
- cualquier operación realizada con la muestra deberá ser rigurosamente documentada, siguiendo los protocolos al efecto:
 - los recipientes que contienen las muestras deben ser etiquetados con claridad y de forma indeleble, con el código de identificación de la muestra,
 - las muestras no son inertes por lo que la demora hasta el momento del análisis debe ser reducida al mínimo;
 - debe comprobarse que todos los materiales utilizados en la toma de muestras no producirán interferencias en el análisis de las mismas. Para ello es preciso emplear blancos de campo (ver cuadro final de este apartado);
 - la información asociada a cada muestra debe ser registrada en el campo.

152

Asimismo, para que el transporte y la manipulación de las muestras se realice de forma que se garantice la posterior identificación y se evite cualquier pérdida o alteración de la misma, se tomarán las precauciones que se enumeran a continuación.

- debe asegurarse el mantenimiento del tratamiento de conservación (refrigeración, aditivos, . . .) durante el tiempo que dura el transporte;
- los envases con las muestras individuales serán introducidos en recipientes mayores estancos y resistentes, preferiblemente de madera o metal,
- dentro de estos recipientes, las muestras serán empaquetadas con un material de relleno aislante que las inmovilice,
- las muestras mantendrán la orientación en la que fueron tomadas;
- los recipientes en los que se realice el traslado deberán estar clara y visiblemente identificados, de forma indeleble:
- cada lote dispondrá de un documento con toda la información referida a las muestras que lo integran;
- deberá mantenerse en todo momento la integridad de la cadena de custodia.
- las condiciones de transporte se evaluarán mediante el empleo de blancos de viaje (ver cuadro adjunto).

153

Tipos de blancos
<ul style="list-style-type: none"> • Blanco de viaje. Este tipo de blanco se utiliza para detectar posibles contaminaciones debidas a las migraciones, fundamentalmente de compuestos orgánicos volátiles que se introducen en la muestra a través del septum o del sello de los viales. El blanco de viaje consiste en una muestra de agua bidestilada envasada de forma similar a las muestras de suelo. El blanco, preparado en el laboratorio, debe transportarse con los frascos de muestra al campo y debe retornarse al laboratorio una vez finalizada la toma de muestras. Las muestras blanco de viaje cuyo código de identificación no debe diferir de las muestras reales no han de abrirse hasta que comencen los análisis. • Blanco de campo. El blanco de campo se utiliza para asegurar que los procedimientos de toma de muestras y de limpieza del material de campo no producen una contaminación cruzada de las muestras. Como el blanco de viaje, el blanco de campo es una muestra de agua bidestilada que se transporta al campo y es analizada con el resto de las muestras. El blanco de campo, sin embargo, se abre una vez en el campo y se manipula como se haría con una muestra real (por ejemplo, se vierte sobre el equipo de muestreo previamente limpiado o se trasvasa de frasco a frasco). • Blanco de calibración o comprobación. Este tipo de blanco se utiliza para detectar posibles contaminaciones del instrumental de medida o del agua bidestilada, que se inyecta directamente sin haber sido tratada con los reactivos empleados en el análisis de las muestras reales. • Blanco de reactivos o de método. Este blanco consiste en el tratamiento de agua destilada mediante el procedimiento al que se someten las muestras de suelo. Resultados positivos en el análisis de este blanco indican o bien la contaminación de los reactivos o bien la contaminación del material de vidrio.

154

Análisis In Situ

Introducción.

En la mayoría de las investigaciones, las muestras tomadas se envían al laboratorio para someterlas al programa de análisis diseñado previamente. Sin embargo, en algunas circunstancias puede tener interés complementar los análisis de laboratorio con determinaciones realizadas *in situ* con la ayuda de equipos portátiles. Estas determinaciones, de naturaleza cualitativa, semicuantitativa, o cuantitativa, se orientan con mayor frecuencia a las siguientes cuestiones:

- determinación y evaluación inicial de contaminantes (como gases tóxicos o inflamables) detectados durante la visita de reconocimiento y que pueden suponer un riesgo para los trabajos que posteriormente se realicen sobre el emplazamiento;
- determinación de propiedades del suelo o concentraciones de contaminantes que cambien rápidamente en el tiempo una vez que la muestra ha sido tomada, como pueden ser el pH, el oxígeno disuelto o la turbidez de las muestras líquidas;
- análisis rápido de suelo o materiales de relleno excavados durante la recuperación de un emplazamiento, con objeto de determinar su destino final.

Sea cual sea su finalidad, estos análisis son muy útiles, ya que permiten obtener resultados y tomar decisiones en un breve plazo. No obstante, dado el bajo grado de resolución que normalmente ofrecen, deben entenderse como técnicas auxiliares y complementarias de las determinaciones de laboratorio

155

Análisis In Situ de muestras sólidas.

Las muestras sólidas son, en general, más estables que las líquidas, lo que implica que los análisis *in situ* de este tipo de matrices se llevarán a cabo normalmente en aquellos casos en que se pretende obtener rápidamente resultados acerca del material. En muchos casos el análisis *in situ* de muestras sólidas se realiza con el fin de optimizar las determinaciones analíticas de laboratorio, seleccionando las muestras que se envían al mismo por ser más probable encontrar en ellas los contaminantes objeto de estudio.

Para estas determinaciones in-situ se suelen utilizar los siguientes equipos:

- Detectores de metales por espectroscopia de fluorescencia por rayos X (XRF).
- Detectores de fotoionización (PID) o detectores de ionización por llama (FID), que pueden detectar compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles.
- Tubos de detección.

En el cuadro adjunto se resumen las principales características, aplicaciones, ventajas e inconvenientes de cada uno de estos equipos.

156

Equipos más frecuentes de análisis <i>in situ</i> de muestras sólidas					
Instrumento de medida	Principio de funcionamiento	Aplicación	Tipo de determinación	Ventajas	Limitaciones
XRF	Espectroscopia de fluorescencia por rayos X	Metales pesados	Cuantitativa	Gran número de muestras/día (100-400)	No aplicable a Hg y Be Límite de detección variable según modelo, compuesto, interferencias, densidad de la matriz, etc.
PID	Fotocionización	Orgánicos volátiles, vapores inorgánicos	Cualitativa o semicuantitativa	Gran número de muestras/día No destruye la muestra Precisa poca cantidad de muestra	No identifica compuestos individuales. No detecta gases tóxicos (CCl ₄ , HCN, etc.) Coste del equipo elevado
FID	Ionización de llama	Orgánicos volátiles Hidrocarburos de bajo peso molecular Gases tóxicos (CCl ₄ , HCN)	Cualitativa o semicuantitativa	Rango amplio de compuestos en concentraciones que varían en función del compuesto (0,1-2000 ppm) No se ve afectado por vapor de agua Algunos modelos pueden funcionar en modo cromatográfico de gases	Destruye la muestra Coste del equipo elevado
Tubos de detección	Inmunoensayo	Compuestos orgánicos (PAH's, pesticidas, PCB's, herbicidas, hidrocarburos derivados del petróleo) Hg Metales	Semicuantitativa	Auto rendimiento (30 ensayos/hora) Facil aprendizaje Costes reducidos El equipo más utilizado	Tiempo de vida media de los anticuerpos limitado Alta especificidad de las determinaciones

157

Análisis *In Situ* de muestras líquidas.

Para el análisis *in situ* de muestras líquidas cabe distinguir, por una parte, las determinaciones de carácter general y, por otra, las determinaciones específicas de contaminantes o grupos de contaminantes.

Respecto a la caracterización general, se utilizan habitualmente analizadores portátiles de lectura directa, basados generalmente en propiedades electroquímicas. Estos equipos pueden ser utilizados para cuantificar algunas propiedades que cambian rápidamente una vez la muestra ha sido extraída y expuesta a la atmósfera. Entre las propiedades que se determinan de esta manera se encuentran el pH, la conductividad, la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto y la concentración de amonio. Los instrumentos de medida (conductímetro, pHímetro, oxímetro, etc.) son de diversa índole y complejidad, existiendo equipos capaces de determinar varios de estos parámetros simultáneamente.

Al contrario de lo que ocurre con la medición de gases *in situ*, en este caso los resultados obtenidos mediante estas técnicas pueden llegar a ser más exactos que los obtenidos para muestras que han sido estabilizadas *in situ* para ser posteriormente analizadas en el laboratorio, siempre que se preste una especial atención a la selección y al uso del equipo. En consecuencia, estas determinaciones deberán realizarse *in situ* siempre que sea posible.

158

Respecto a la detección de contaminantes o grupos de contaminantes, también es posible la realización de análisis *in situ* de muestras líquidas, utilizando para ello los instrumentos descritos en el apartado anterior.

Los equipos empleados para realizar este tipo de mediciones son los mismos que para el análisis *in situ* de muestras sólidas. Mediante espectroscopia de fluorescencia por rayos X (XRF), es posible detectar metales pesados en líquidos (por ejemplo, plomo en gasolina), elementos ligeros (por ejemplo fósforo, azufre, cloro en soluciones orgánicas), metales pesados en efluentes líquidos industriales, PCBs en aceites de transformadores, etc. Su mayor limitación es que requiere normalmente la preconcentración de la muestra.

Mediante los detectores de fotoionización (PID) e ionización por llama (FID) es posible detectar compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles de manera cualitativa y semicuantitativa.

159

Análisis In Situ de gases y vapores.

Debe concederse una atención especial a la determinación *in situ* de la composición gaseosa, tanto de la atmósfera general como del propio aire del suelo, haciendo uso de instrumentación portátil. Los análisis *in situ* de gases o vapores también pueden dirigirse a la detección de compuestos con especiales características de peligrosidad.

Estas técnicas permiten detectar diferentes tipos de gases, tales como el sulfhídrico, metano o vapores explosivos, y proporcionan información que puede aplicarse al diseño del programa de muestreo de suelos y aguas. Esta práctica es la más comúnmente utilizada aunque, cuando se requiera la medida y monitorización en lugar de únicamente la detección, también es posible analizar gases *in situ* desplazando hasta el emplazamiento un laboratorio móvil.

Los instrumentos más comúnmente utilizados para el análisis *in situ* de gases y vapores son los que se indican en la siguiente tabla, en la que se resumen las principales características, aplicaciones, ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

160

Equipos más frecuentes de análisis in situ de gases y vapores					
Instrumento de medida	Principio de funcionamiento	Aplicación	Tipo de determinación	Ventajas	Limitaciones
Explosímetro	Sensor catalítico	CO, SH ₂ , NO ₂ , SO ₂ , Cl ₂ , CH ₄ , O ₂ y N ₂	Cualitativa	Versátil y de fácil uso Respuesta inmediata	Detección selectiva de compuestos según los sensores seleccionados
Detector de gas de vertedero	Absorción en el espectro infrarrojo	Gases de vertedero (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , N ₂)	Cualitativa	Medidas instantáneas Fácil uso y reducido tamaño.	Detección selectiva de compuestos según los sensores seleccionados
Cromatógrafo de gases	Cromatografía de gases	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, pesticidas, PCB s, herbicidas, hidrocarburos derivados del petróleo	Cuantitativa	Límites de detección bajos (hasta ppb)	Costes elevados Requiere personal especializado No totalmente portátil.
Tubos colorimétricos	Adsorción	Compuestos volátiles y semivolátiles	Cualitativa	Zonas amplias de estudio en tiempos reducidos	Detección limitada de compuestos según tubos empleados

161

Recomendaciones para la toma de muestras de aire intersticial y análisis in-situ de gases
<ul style="list-style-type: none"> • Prestar especial atención a la afección que las condiciones ambientales (humedad del suelo, temperaturas extremas, etc.) u otros factores (presencia de campos eléctricos, interferencias de ondas de FM) puedan provocar sobre los detectores. • Llevar a cabo rigurosamente la calibración de los instrumentos mediante los procedimientos estándar de calibración para cada instrumento • Conocer las interacciones y limitaciones que presenta cada técnica, ya que los contaminantes pueden verse absorbidos por compuestos inorgánicos del suelo o disueltos en los componentes orgánicos de éste • Limpiar la sonda de muestreo con regularidad. Un problema frecuente es la obstrucción de la sonda, que es detectable por el cambio en el sonido de la bomba de extracción de la muestra

162

Otras investigaciones y ensayos.

Además de las descritas en los epígrafes anteriores, existen otras investigaciones y ensayos que, en mayor o menor medida, suelen formar parte de los trabajos de campo diseñados para diagnosticar la problemática de un emplazamiento contaminado. Entre ellas, cabe diferenciar dos grandes grupos:

- Las investigaciones basadas en técnicas geofísicas
- Los ensayos para determinar parámetros hidrodinámicos

Investigaciones geofísicas.

Los métodos de investigación geofísica agrupan un conjunto de técnicas no intrusivas que miden diferencias en propiedades físicas tales como la conductividad eléctrica, la densidad o la velocidad de las ondas sísmicas, por lo que pueden ser utilizadas para detectar superficies límites (vertederos, depósitos o bidones enterrados, etc.) cuando se produce un cambio claro en la propiedad física medida a ambos lados de la anomalía.

163

Las más utilizadas son la sísmica de refracción, la resistividad eléctrica y la magnetometría, siendo frecuentes también la prospección electromagnética y el radar penetrante o georadar. No siempre es posible detectar la superficie límite debido a que a menudo, las propiedades físicas varían gradualmente en una zona de transición y no en un punto determinado. Los mejores resultados se obtienen cuando las condiciones del suelo de cada formación son uniformes, existiendo a la vez grandes variaciones en las propiedades físicas de las diferentes formaciones.

Por estas razones, los métodos geofísicos poseen un valor limitado en la investigación de suelos contaminados, recomendándose en general su utilización como método complementario de investigación. No obstante, en determinadas circunstancias pueden proporcionar información muy valiosa a un coste reducido en comparación con otras técnicas.

En la tabla adjunta se reflejan los principales métodos de investigación geofísica utilizados en la investigación de emplazamientos contaminados, indicando sus principales aplicaciones, ventajas e inconvenientes.

164

Principales técnicas de prospección geofísica para la investigación de emplazamientos contaminados				
Método	Fundamento	Aplicación	Ventajas	Inconvenientes
Reflexión y/o refracción sísmica	Determina cambios en la velocidad de propagación de ondas sísmicas debidos a la litología del subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> Evaluación de recursos hídricos subterráneos Perfiles geotécnicos Perfiles estratigráficos del subsuelo 	<ul style="list-style-type: none"> Fácil accesibilidad Gran capacidad (profundidad) de penetración Cubre áreas de forma rápida 	<ul style="list-style-type: none"> Baja resolución en estratos muy estratificados Sensible al ruido en zonas urbanas Dificultades de penetración en ambientes fríos Aplicación limitada en ambientes húmedos
Resistividad eléctrica	Determina cambios de resistividad debidos a la litología, presencia de agua subterránea y cambios de la calidad de las aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> Profundidad del nivel freático Perfiles estratigráficos del subsuelo Evaluación de recursos hídricos subterráneos Estudio de acuíferos Estudio de vertederos 	<ul style="list-style-type: none"> Cubre áreas de forma rápida Gran capacidad de penetración (150-300 m) Movilidad alta Resultados aproximados en campo 	<ul style="list-style-type: none"> Sensible a interferencias eléctricas naturales y artificiales Aplicación limitada en ambientes húmedos y zonas urbanas Dificultad de reflejar la heterogeneidad lateral
Prospección electromagnética	Determina cambios de conductividad debidos a la litología y calidad de las aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> Perfiles estratigráficos del subsuelo Evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas Estudio de vertederos Evaluación de recursos hídricos subterráneos Detección de instalaciones enterradas 	<ul style="list-style-type: none"> Gran movilidad Rápida resolución e interpretación de resultados Fácil accesibilidad Efectividad en el análisis de resistividades muy altas Equipos fácilmente accesibles 	<ul style="list-style-type: none"> Resultados menos refinados que la resistividad Inadecuado en zonas con instalaciones eléctricas enterradas Menor resolución vertical que otros métodos (hasta unos 30 m) Aplicación limitada en ambientes húmedos

165

Principales técnicas de prospección geofísica para la investigación de emplazamientos contaminados				
Método	Fundamento	Aplicación	Ventajas	Inconvenientes
Radar penetrante	Proporciona perfiles "visuales" comunes de los niveles superiores del subsuelo	<ul style="list-style-type: none"> Detección de objetos enterrados Delimitación de la estructura y situación de vestros rocosos Detección de formaciones y cavidades cársticas Evaluación de la integridad física de estructuras artificiales de tierra 	<ul style="list-style-type: none"> Puede cubrir grandes áreas Alta resolución vertical en terrenos adecuados (arenosos y no saturados) Representación "visual" de resultados 	<ul style="list-style-type: none"> Limitada profundidad de penetración (1.5-25 m) Accesibilidad limitada por el tamaño de los equipos Discutible interpretación de resultados en algunos casos Aplicación limitada en ambientes húmedos
Magnetometría	Detecta la presencia de objetos metálicos enterrados	<ul style="list-style-type: none"> Localización de objetos ferrosos enterrados Detección de los límites de vertederos que contengan objetos ferrosos Localización de estratos rocosos con minerales ferrosos 	<ul style="list-style-type: none"> Gran movilidad Posible interpretación de resultados en campo Puede cubrir áreas de forma rápida 	<ul style="list-style-type: none"> La detección depende del tamaño y contenido en hierro del objeto enterrado Difícil resolución de resultados en zonas urbanas Aplicación limitada en ambientes húmedos Complicada interpretación de resultados en zonas con corrientes magnéticas naturales Profundidad de penetración limitada a unos 20 m

166

Ensayos para determinar parámetros hidrodinámicos.

La evaluación de la movilidad de los contaminantes a través de los flujos de aguas subterráneas es determinante de las posibilidades de migración de la contaminación desde el foco de origen hacia su entorno. Para poder realizar cualquier estimación a este respecto, es preciso disponer de datos sobre los parámetros hidrodinámicos que caracterizan al medio subterráneo en cuestión. Entre dichos parámetros destacan el gradiente hidráulico, la permeabilidad, la transmisividad, el coeficiente de almacenamiento, etc.

La investigación hidrogeológica ha puesto a punto diversos ensayos de campo que permiten la obtención de datos a partir de los cuales pueden derivarse los citados parámetros. Entre dichos ensayos, los más frecuentemente utilizados son los de permeabilidad y los de bombeo.

167

Ensayos de permeabilidad.

Al hilo de la ejecución de sondeos para muestreo y/o instalación de pozos de control de las aguas subterráneas, es posible llevar a cabo ensayos que proporcionen información acerca de las características hidráulicas de las formaciones atravesadas.

Ensayos de bombeo.

Los pozos de control de las aguas subterráneas instalados durante la investigación de campo, junto con otros preexistentes (si es el caso), se pueden aprovechar para realizar ensayos de bombeo, dirigidos a determinar los parámetros hidrodinámicos de las formaciones presentes en el emplazamiento (coeficientes de permeabilidad, de almacenamiento, transmisividad) y la interrelación hidráulica entre las mismas.

Normalmente, los ensayos de bombeo se realizan de forma escalonada, procediendo a bombear agua en un pozo de referencia y observando la evolución de los niveles piezométricos en los demás pozos/puntos de observación. Durante los ensayos de bombeo se registran datos relativos a caudales de agua bombeados, tiempos de bombeo, niveles piezométricos, etc.

168

Aspectos específicos de la Investigación Exploratoria.

La Investigación Exploratoria constituye la primera fase dentro del proceso de caracterización de la contaminación en el suelo, y tiene como objetivos principales:

- Confirmar niveles de contaminación que supongan o puedan suponer un riesgo inaceptable para la salud humana y los ecosistemas
- Confirmar la hipótesis de distribución espacial de la contaminación y la obtención de datos relevantes que permitan el diseño óptimo de la siguiente fase.

Para la consecución de los objetivos definidos en esta fase de investigación, se han de llevar a cabo dos tipos de actividades, diferenciadas tanto por su naturaleza como por su ámbito de desarrollo:

- en primer lugar, aquellas dirigidas a recopilar toda la información relativa al emplazamiento que pudiera ser de interés para la confirmación de los indicios de contaminación,
- en segundo lugar, las actividades que implican la toma y el análisis de las muestras recogidas en el emplazamiento.

Puesto que estas últimas pueden resultar costosas, es necesario en todos los casos realizar una buena recopilación de aquellos datos relevantes acerca del emplazamiento en estudio, siendo recomendable realizar un esfuerzo considerable en la recopilación y evaluación de la información disponible. En casos excepcionales, estos resultados pueden conducir a la paralización de la investigación y en consecuencia a la clasificación del emplazamiento como no sospechoso de estar contaminado cuando no se hayan detectado indicios fundados de una potencial afección al suelo.

Por otro lado la calidad y el éxito de la caracterización de un determinado emplazamiento, tiene como elemento clave la definición de una estrategia de muestreo clara en cuanto a su alcance (numero de puntos de muestreo, ubicación y medios a muestrear) y objetivos (obtención de información fidedigna acerca de la existencia y concentración de determinados compuestos o elementos químicos)

169

Recopilación previa de información.

Ya se ha mencionado la importancia que las actividades iniciales de recopilación de información tienen sobre la marcha y resultados de las sucesivas fases de investigación. En todo proceso de recopilación de información tres son los grupos de tareas que deben llevarse a cabo:

- estudio histórico dirigido a la recopilación de datos históricos del emplazamiento a través de consulta en diversas fuentes de información (mapas, fotografías, archivos, entrevistas, etc.)
- análisis del medio físico que permitirá obtener una primera visión de las posibles vías de dispersión de la contaminación a considerar en la elaboración de un modelo conceptual del emplazamiento en lo que a riesgos de exposición y dispersión se refiere
- visita de campo con el fin de confirmar y/o completar la información recopilada e inspeccionar la situación actual del emplazamiento.

El desarrollo de las tareas mencionadas debe permitir cumplir con los objetivos genéricos de toda fase de recopilación de información que a continuación se indican:

- comprobar y confirmar los indicios que definieron al emplazamiento como potencialmente contaminado, indicando en la medida de lo posible la naturaleza y distribución de la contaminación,
- proporcionar la información necesaria para diseñar correctamente la estrategia de muestreo y análisis de la siguiente fase de investigación,
- identificar aquellas circunstancias que puedan poner en peligro la salud y la seguridad de investigadores, trabajadores y terceras personas ajenas a la investigación con el fin de determinar los procedimientos y precauciones especiales durante las operaciones a desarrollar en el emplazamiento.

170

Estudio histórico.

El estudio histórico constituye, sin duda alguna, una tarea fundamental dentro del proceso de investigación de la calidad de suelo ya que va a marcar desde un principio la calidad de los resultados finales de la investigación. Por ello, resulta de extrema importancia planificar adecuadamente al inicio de esta etapa de la fase de investigación exploratoria, la dedicación que será necesaria para la obtención de la mayor cantidad posible de información relativa a la evolución histórica de los usos habidos en el emplazamiento objeto de estudio.

El estudio histórico persigue conocer en profundidad la evolución cronológica de los usos del suelo hasta el momento de inicio de la investigación y su interrelación con las posibles alteraciones de la calidad del mismo con el objetivo de:

- Confirmar los indicios previos que convierten al emplazamiento en sospechoso de estar contaminado
- Acotar las zonas a investigar en aras a dirigir más certeramente el diseño de muestreo
- Definir en la medida de lo posible la naturaleza de la contaminación simplificando la tarea de decidir sobre los contaminantes a analizar de las muestras extraídas
- Realizar una primera aproximación a los problemas que pueden representar la contaminación del suelo

Antes de dirigirse a las diferentes fuentes de información que se indican más adelante, es necesario reflexionar y plantearse claramente la estrategia a seguir en el estudio histórico, que dependerá en gran medida del tipo de emplazamiento a investigar (emplazamientos industriales, vertederos y puntos de vertido, tanques de almacenamiento subterráneo, ruinas industriales, etc.), considerando en cada caso los aspectos específicos de cada uno de ellos. La figura adjunta indica la información que se considera necesario recopilar para cada tipo de emplazamiento a fin de afrontar con garantías el estudio histórico.

171



Figura 5: Aspectos generales a recopilar según el tipo de emplazamiento en estudio

172

Antecedentes generales
<ul style="list-style-type: none"> - Ubicación geográfica - Orografía anterior a la implantación de la actividad - Superficie (libre y edificada) - Usos anteriores del solar y de las zonas adyacentes - Detalles de propietarios y usuarios - Actividades productivas - Permisos/licencias de vertidos o relleno - Usos previstos del emplazamiento - Inventario de surgencias (manantiales) y pozos de abastecimiento - Usos de las aguas subterráneas y superficiales - Estudio geotécnico del proyecto de construcción de las instalaciones (si existe)
Distribución del emplazamiento (tanto a nivel superficial como subterráneo)
<ul style="list-style-type: none"> - Localización cronológica de edificios, instalaciones, canalizaciones, tanques subterráneos, etc., tanto actuales como ya inexistentes - Localización de los procesos productivos - Identificación de áreas diferenciadas de especial importancia en cuanto a la contaminación del suelo (subestaciones eléctricas, zonas de depósito de residuos, áreas de trasvase de materiales, etc.)
Sucesos relevantes
<ul style="list-style-type: none"> - Accidentes e incidentes (fugas, incendios, emanaciones de gases, etc.) - Zonas de almacenamiento temporal - Paradas forzadas de la producción - Denuncias e inspecciones
Procesos productivos
<ul style="list-style-type: none"> - Análisis del proceso productivo - Características principales, composición química y cantidades de materias primas, reactivos, productos elaborados y residuos - Naturaleza de las emisiones gaseosas - Gestión de los residuos procedentes de la actividad productiva

173

Fuentes de información más importantes para la realización del Estudio Histórico
<ul style="list-style-type: none"> - Inventario de Emplazamientos con Actividades Potencialmente Contaminantes del Suelo - Catastro - Registro de la propiedad - Registro mercantil - Cámaras de Comercio y Navegación - Archivos municipales - Registro industrial - Servicios cartográficos (mapas y fotografías multitemporales, aéreas y terrestres) - Documentación propia de las empresas - Hemerotecas - Inventarios y censos de vertederos - Documentación administrativa - Entrevistas directas

174

Análisis del medio físico.

El objetivo principal del conjunto de tareas enmarcadas dentro del "análisis del medio físico" es recopilar información de naturaleza diversa (geológica, hidrogeológica, usos del agua, usos del suelo, vegetación, parámetros climatológicos, etc.) que permita alcanzar un conocimiento óptimo del emplazamiento y sus alrededores, con el fin de elaborar un "modelo conceptual" que recoja a nivel cualitativo el comportamiento de los potenciales contaminantes definidos en el Estudio Histórico.

La elaboración del modelo conceptual para el análisis de riesgos requiere la recopilación de datos generales relativos a diversos aspectos con incidencia directa sobre los medios preferenciales de dispersión de la contaminación así como sobre las rutas de exposición. En este sentido no es posible definir de forma concisa la información a recopilar, pues las características de cada emplazamiento (intrínsecas y derivadas de las actuaciones realizadas en el mismo) determinan el enfoque que ha de darse, incidiendo de forma particular en aquellos aspectos estrechamente relacionados con las vías preferenciales de dispersión.

Datos relevantes del análisis del medio físico
- Geología regional y local a escala adecuada
- Geomorfología
- Hidrogeología
- Meteorología local
- Vegetación
- Edafología (mapas de suelos de la Comunidad Autónoma del País Vasco)
- Localización de áreas de interés paisajístico y naturalístico o especialmente protegidas
- Geografía (usos del territorio, asentamientos, etc.)

175

Visita de campo.

Antes de comenzar con el diseño del trabajo de campo es esencial que el personal encargado de la investigación se familiarice con el emplazamiento, para lo que se requiere una visita de inspección cuyo alcance y objetivos son los siguientes:

- confirmación de la información obtenida en el estudio histórico y análisis del medio físico;
- registro de aquellos datos no contemplados en las mencionadas tareas;
- actualización de las condiciones del emplazamiento;
- evaluación «in situ» de la situación con el fin de comprobar si el estado real del emplazamiento constituye un riesgo inminente para la salud pública o el medio ambiente;
- identificación de posibles fuentes de contaminación en el entorno del emplazamiento;
- reconocimiento de las rutas de acceso y otras características, para el posterior diseño de la investigación;
- identificación de posibles puntos de muestreo de acuerdo a los propuestos en el modelo conceptual y consideración de otros adicionales;
- obtención de datos semicuantitativos sobre contaminantes volátiles, radioactividad y explosividad dirigidos al diseño de las medidas de seguridad para investigadores, trabajadores y terceras personas.

176

Procedimiento general de la visita de campo
<ul style="list-style-type: none"> • Planificar previamente, sobre los planos y mapas disponibles, la ruta a seguir durante la visita que se hará en su integridad y siempre que sea posible, a pie • Anotar en la ficha de campo todos los aspectos relevantes <ul style="list-style-type: none"> - Afección a los medios (estado del suelo, afección a las aguas, presencia de olores significativos, alteración de la vegetación, etc) - Estado de las estructuras y edificaciones superficiales y subterráneas - Presencia de materiales de relleno, residuos y maquinaria abandonada - Ubicación y estado de funcionamiento de los servicios (telefónicos, eléctricos, aguas, etc.) - Cualquier modificación con relación a la información recopilada en el estudio histórico • Localizar las vías de acceso al emplazamiento para la posterior investigación • Localizar un área apropiada para el establecimiento temporal de las instalaciones durante la investigación y la recuperación del suelo • Localizar un punto de abastecimiento de agua apropiado • Registrar el teléfono y los servicios de emergencia más cercanos

177

Datos generales de la Ficha de Suelos
<ul style="list-style-type: none"> - Características del suelo en estudio (pavimentación, color, textura, . .) - Estado de edificaciones, instalaciones y accesos - Presencia de residuos, materiales y maquinaria abandonada - Estudio de conservación de canalizaciones y desagües - Posibles rutas de exposición - Alteraciones de las propiedades del suelo - Alteración de la vegetación - Calidad de las aguas superficiales - Calidad de las aguas subterráneas (surgencias)

178

Estrategia de muestreo del suelo en la Investigación Exploratoria	
Medios a muestrear	Suelo, agua subterránea, aire del suelo y residuos
Número de etapas de muestreo	Una
Localización de los puntos de muestreo	Según el caso de hipótesis de distribución espacial de la contaminación
Números de puntos de muestreo	Según el caso de hipótesis de distribución espacial de la contaminación
Profundidad mínima de muestreo	Profundidad estimada de alcance de la contaminación
Número de muestras por punto de muestreo	Una por estrato contaminado

179

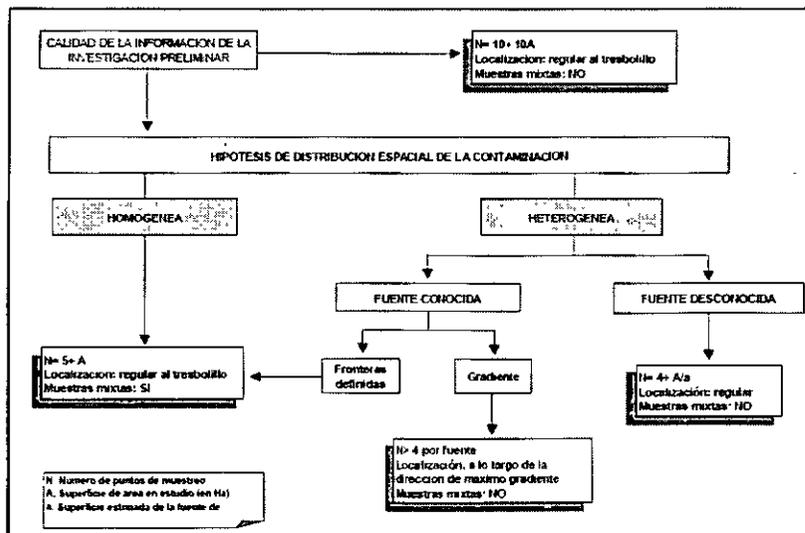


Figura 6: Parámetros básicos para el diseño del muestreo del suelo en la Investigación Exploratoria

180

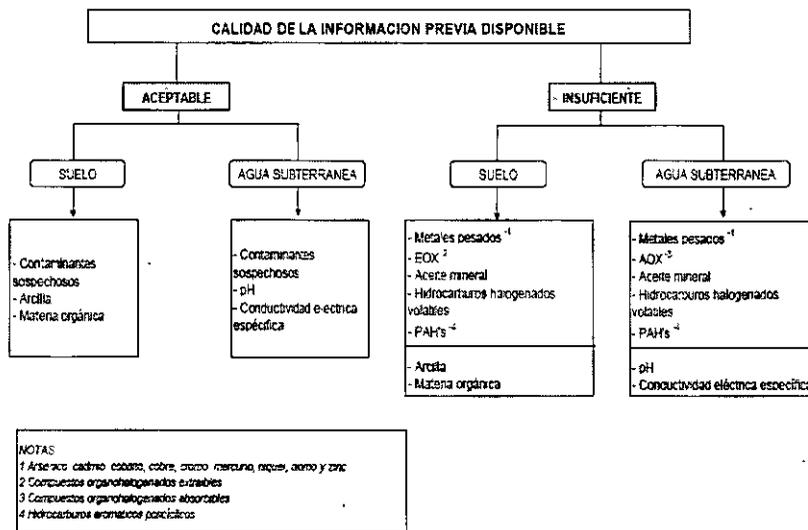


Figura 7: Selección de los parámetros a determinar en la Investigación Exploratoria

181

Sector industrial, emplazamientos tipo y contaminantes probables del suelo		
Industria	Ejemplos de emplazamientos	Contaminantes probables ¹
Química	Fabricación de ácidos/bases Fabricación de tintes Fabricación de fertilizantes y pesticidas Fabricación de productos farmacéuticos Fabricación de pinturas Tratamiento de la madera	Ácidos/bases; metales; disolventes (e.g. tolueno, benceno); fenoles, compuestos orgánicos específicos
Petroquímica	Refinerías de petróleo Pantones de tanques Depositos de almacenamiento de combustibles Destilerías de alquitran	Hidrocarburos, fenoles, ácidos, bases y asbestos
Producción y transformación de metales	Primería producción de hierro Fabricación de acero Fundiciones Anodizado y galvanizado Construcción y desguace de barcos Chatarrerías	Metales, especialmente Fe, Cu, Ni, Cr, Zn, Cd y Pb; asbestos
Transporte	Garajes, fabricas de vehículos y talleres de mantenimiento Cocheras del ferrocarril	Combustibles, hidrocarburos, asbestos
Energía	Fabricas de gas Estaciones eléctricas	Combustibles (ej. carbon y polvo de coque); fenoles, cianuros, compuestos de azufre; asbestos
Extracción de minerales	Minas	Metales (e.g. Cu, Zn, Pb); gases (e.g. metano), lixiviados
Varios	Pneitos, muelles y embarcaderos Cuidurías Fabricas de caucho	Metales; compuestos orgánicos; metano; sustancias tóxicas, inflamables o explosivas

Nota: Pueden considerarse como contaminantes típicos los hidrocarburos, policlorobifenilos (PCB), asbestos, tintes y aguas; metales usados en pigmentos y recubrimientos. Estos pueden estar presentes en la mayor parte de los emplazamientos.

182

Relación entre algunos posibles usos del suelo y contaminantes a analizar		
Usos del suelo	Riesgo (nota 1)	Análisis propuestos
Jardines domésticos, áreas recreativas	Ingestión directa de suelo contaminado (niños)	- arsénico - cadmio - cromo - mercurio - cianuro libre - PAHs - fenoles - sulfato
Jardines domésticos huertas y suelo agrícola	Absorción de contaminantes por los cultivos (nota 2)	- cadmio (nota 3) - plomo (nota 3)
Cualquier uso que permita el cultivo	Fitotoxicidad (notas 2 y 3)	- cobre - níquel - zinc
Áreas residenciales, edificios comerciales e industriales	Ataque a materiales de construcción e infraestructuras	- sulfato - sulfuro - cloruro - sustancias oleaginosas y bituminosas - fenoles - aceites minerales - amoníaco
Cualquier uso relacionado con la construcción de edificios	Fuego y explosión	- metano - azufre - materiales potencialmente combustibles (polvo de carbón, aceite, alquitran, brea)
Peligros a corto plazo a investigadores y trabajadores en el emplazamiento	Contacto con los contaminantes durante los trabajos de demolición, limpieza y construcción	- PAHs - fenoles - asbestos - sustancias oleaginosas y bituminosas - materiales radiactivos
Cualquier uso que pueda producir la contaminación del agua	Contaminación de agua superficial y subterránea (nota 2)	- fenoles - cianuro - sulfato - metales solubles

Nota 1 Los peligros listados no son excluyentes mutuamente. Pueden ser necesario tener en cuenta otras las combinaciones o valores de ellos.

Nota 2 Debe medirse el pH del suelo, ya que afecta a la urgencia de estos peligros

Nota 3 La absorción de metales pesados o fitotóxicos para las plantas depende de la forma en que estén presentes estos elementos en el suelo. Puede ser necesario determinar las formas específicas si las concentraciones totales presentes indican la existencia de un problema

183

Interpretación de resultados.

Los resultados obtenidos en la fase de Investigación Exploratoria deben ser interpretados con el fin de confirmar las hipótesis formuladas en base a la recopilación previa de información en relación a las siguientes cuestiones:

- la presencia de contaminación en el suelo del emplazamiento
- el tipo y la distribución espacial de la contaminación.

La Investigación Exploratoria, tal y como se diseña en cuanto al número de muestras tomadas y analizadas, permite confirmar o desechar la hipótesis de existencia de contaminación en el suelo. Sin embargo, pueden producirse casos que requieran una *investigación suplementaria* si se desea probar la hipótesis de distribución espacial de la contaminación con un grado de fiabilidad aceptable.

En esta fase de investigación, la interpretación y evaluación de los resultados correspondientes a las muestras de suelo se realiza exclusivamente por comparación de éstos con los Valores Indicativos de Evaluación (ver *Anexo I*), cuya superación conduce a la necesidad de tomar diferentes acciones.

- Exceder el valor VIE-A (valor de referencia) conlleva la confirmación de la presencia de contaminación en el suelo.
- Exceder el valor VIE-B correspondiente al uso considerado, implica la posibilidad de que el estado del suelo suponga un riesgo inaceptable para la salud pública o el medio ambiente por lo que en este caso será perceptivo la realización de una Investigación Detallada.
- Exceder el valor VIE-C supone la existencia de un riesgo inaceptable para el funcionamiento de los ecosistemas. En consecuencia habrá de elaborarse un proyecto de recuperación

184

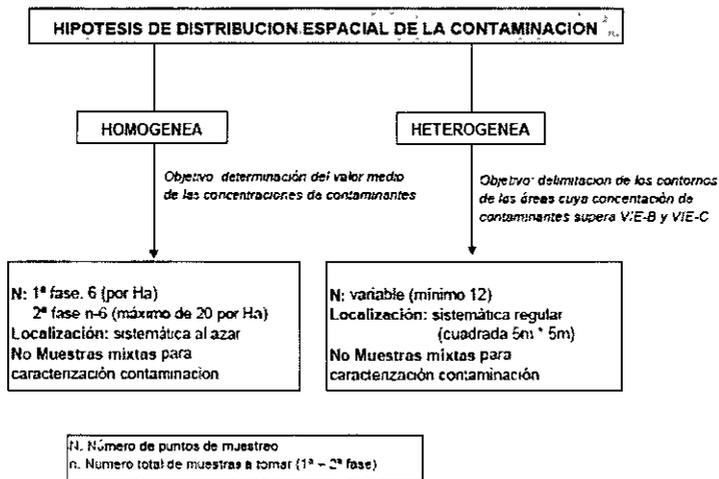


Figura 8: Parámetros básicos para el diseño de muestreo de la Investigación Detallada

185

Conceptos generales del diseño de muestreo en la Investigación Detallada	
<i>Medios a muestrear:</i>	todos los indicados en el modelo conceptual de riesgos
<i>Número de etapas de muestreo:</i>	múltiples
<i>Localización de los puntos de muestreo:</i>	dependiente del caso
<i>Número de puntos de muestreo:</i>	dependiente del caso
<i>Profundidad mínima de muestreo:</i>	al menos 1 m por debajo de la profundidad estimada de la contaminación
<i>Número de muestras por punto de muestreo:</i>	una por metro o por estrato apreciable, contaminado o no

Criterio STOP	<p>En el plano horizontal finaliza el muestreo cuando desde el centro de la contaminación hacia afuera, se encuentran dos filas de muestras con concentraciones inferiores al nivel VIE-B</p> <p>En el plano vertical, finaliza el muestreo cuando se encuentran dos muestras de 1 m de profundidad cada una con concentraciones inferiores al nivel VIE-B</p>
Reglas de muestreo	
Plano horizontal:	<p>En círculo, alrededor de los puntos de muestreo en los que se detectó contaminación en la fase de investigación exploratoria.</p> <p>En línea dentro de la malla: si la concentración en un punto supera el nivel VIE-B se muestrearán, en la dirección de la malla, los dos puntos de intersección siguientes. Si no se supera el nivel VIE-B se muestreará un único punto</p> <p>En las diagonales: cuando la concentración en una muestra supere el nivel VIE-B, se muestrearán las intersecciones de la malla, más próximas en diagonal.</p>
Plano vertical	<p>Cada perforación debe extenderse hasta que dos muestras consecutivas, de 1 m de profundidad, presenten concentraciones inferiores al nivel VIE-B</p>

186

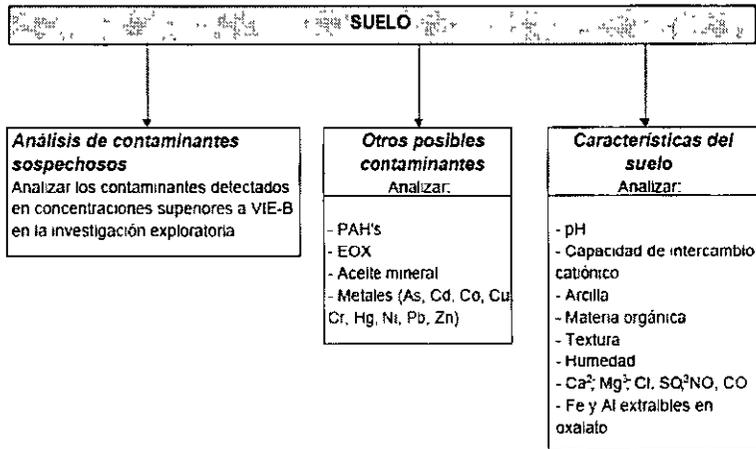


Figura 9: Esquema del programa de análisis químico para muestras de suelo en la Investigación Detallada

187

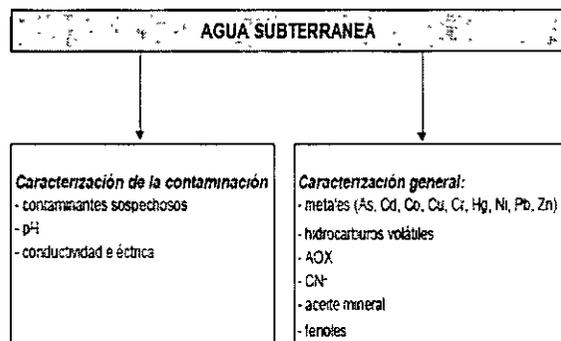


Figura 10: Esquema del programa de análisis químico para muestras de aguas subterráneas en la fase de Investigación Detallada

188

Evaluación de riesgos.

De acuerdo con la estrategia de investigación descrita en el presente Manual Práctico, la evaluación de riesgos constituye la culminación de la Investigación Detallada de cualquier emplazamiento, por lo que se convierte en la herramienta clave para la toma de decisiones acerca de las medidas a adoptar en el mismo.

En el marco de la investigación de un suelo contaminado, se define la evaluación de riesgos como un proceso de identificación, medida y comparación de diversos parámetros mediante el cual se identifican y evalúan los riesgos potenciales y reales que la presencia de ese suelo puede suponer para los objetos protegidos.

Los objetos protegidos a considerar sistemáticamente son la población humana (en la medida que pueda ver afectada su salud) y los elementos de los ecosistemas (particularmente flora y fauna). En ciertos emplazamientos puede tener además relevancia la evaluación de los riesgos sobre la productividad de explotaciones agrícolas y forestales y/o sobre infraestructuras y cimentaciones de edificios.

En el contexto mencionado, el riesgo se define en función de la probabilidad de que un suceso adverso ocurra como resultado de la exposición a la contaminación del suelo y de la magnitud de las consecuencias o impacto de dicho suceso sobre los objetos a proteger.

El objetivo de la evaluación de riesgos es proporcionar, a partir de la estimación cuantitativa o cualitativa de los riesgos que la presencia de un suelo contaminado comporta para los objetos protegidos, la información y útiles necesarios para evaluar la probabilidad de ocurrencia de los efectos previsible, teniendo en cuenta criterios tanto sociales (niveles de protección admitidos o exigidos) como económicos y tecnológicos. Dicho proceso de evaluación ha de servir de base para la toma de decisiones sobre la aceptabilidad del riesgo y las medidas a adoptar, lo que comúnmente se conoce como gestión del riesgo.

189

Protocolo general de evaluación de riesgos.

Los elementos básicos que conforman cualquier protocolo o proceso de evaluación de riesgos se pueden resumir en tres:

- definición del modelo conceptual que describe el emplazamiento en términos de riesgo, elaborado a partir de la información existente sobre el mismo
- identificación de los receptores de riesgo, medios y vías de exposición
- evaluación de los riesgos y toma de decisiones

190

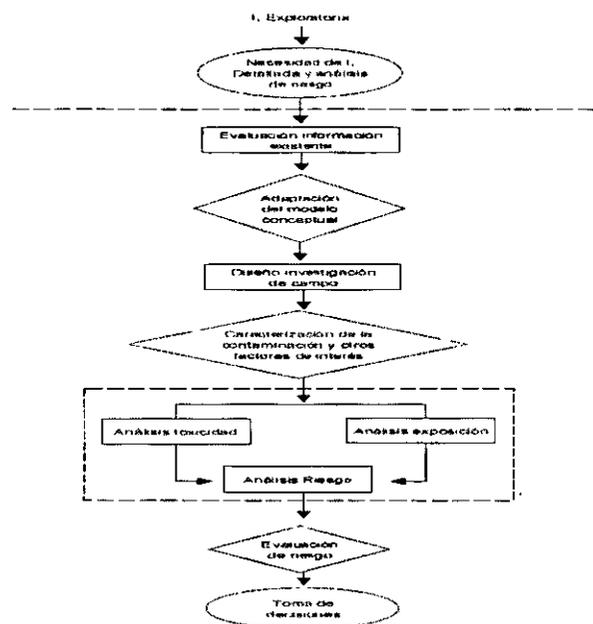


Figura 1. Esquema general del protocolo de evaluación de riesgos.

Características de los contaminantes referidas a su comportamiento ambiental y toxicológico utilizadas en el análisis de la peligrosidad o toxicidad	
a	Movilidad <ul style="list-style-type: none"> - estado físico - coeficiente de solubilidad - coeficiente de partición octanol-agua - constante de Henry - presión de vapor - coeficiente de difusión en aire - constantes ácido-base - constantes de complejación - constantes de oxidación-reducción - coeficientes de permeación a través de distintos materiales
b	Persistencia/degradabilidad <ul style="list-style-type: none"> - vida media (fotodegradación, degradación química y degradación microbiana) - factores de transferencia, eliminación o bioconcentración en los medios biológicos
c	Toxicidad <ul style="list-style-type: none"> - datos toxicológicos para humanos - toxicidad para especies no humanas: valores NOAEC(L), LOAEC(L), EC50, para parámetros relacionados con la reproducción, crecimiento y productividad
d	Ataque a materiales <ul style="list-style-type: none"> - índice de corrosividad - índice de inflamabilidad

Análisis de la toxicidad para los receptores identificados		
Receptor	Objetivo	Aspectos a considerar
Salud humana	Ponderar las evidencias disponibles en relación al potencial de los compuestos de causar efectos adversos	<ul style="list-style-type: none"> - Identificación del peligro (tipo de efecto adverso asociado a cada sustancia y tipo de población expuesta) - Establecimiento de las relaciones dosis-respuesta - Identificación de las incertidumbres asociadas a los anteriores componentes
Ecosistemas	Identificación de los posibles efectos ecológicos sobre los componentes de un ecosistema derivados de la acción de potenciales estresores (*)	<ul style="list-style-type: none"> - Recopilación de datos relativos a los efectos del estresor - Evaluación de los datos respecto a los parámetros de evaluación y medida definidos - Elaboración del perfil de respuesta al estresor: (o de efectos ecológicos)

193

Caracterización del escenario de exposición. Su objetivo es la evaluación cualitativa de la exposición a la contaminación de las poblaciones en el lugar y del entorno, procediéndose a la identificación de las poblaciones expuestas y en especial las subpoblaciones especialmente sensibles (guarderías, escuelas, hospitales, huertas propias, etc) y caracterización de los condicionantes físicos del emplazamiento que influyen en la exposición, entre los que hay que considerar (clima, meteorología, geología, vegetación, tipo de suelo, hidrología de las aguas subterráneas y aguas superficiales).

El escenario de exposición queda caracterizado con la determinación de los usos del suelo (actuales y futuros) y la identificación de las actividades asociadas a cada uno de ellos, para los que se determinarán los correspondientes patrones de actividad, periodos de exposición, lugar de desarrollo de los trabajos, cambios de actividad estacionales, hábitos alimenticios de la población, etc., (Ver Figura 12).

194

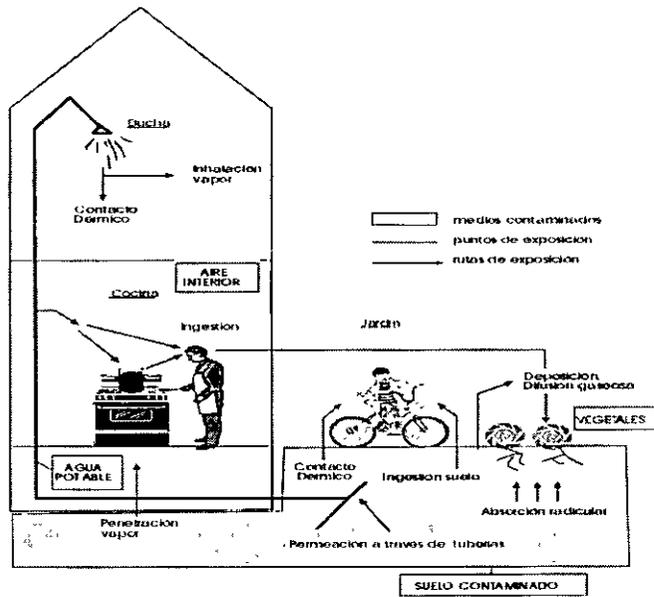


Figura 12: Ejemplos de escenarios de exposición

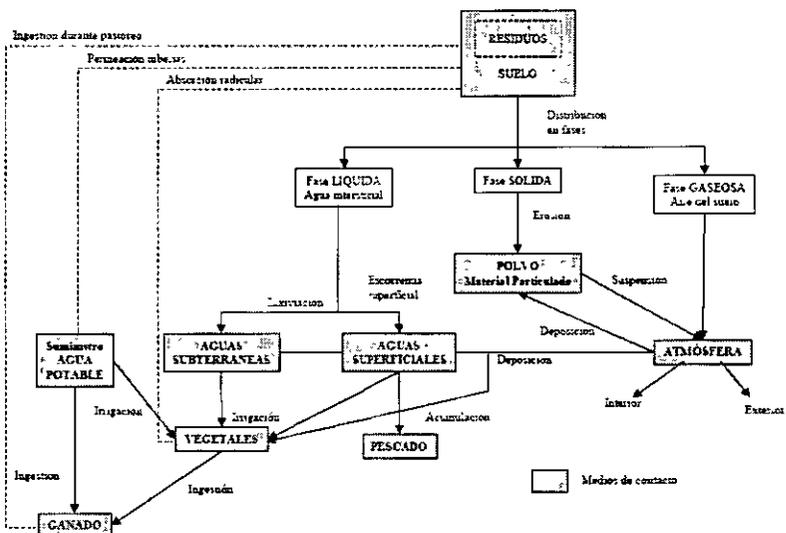


Figura 13: Medios potencialmente afectados por la contaminación del suelo

Vías de exposición
<ul style="list-style-type: none"> - Ingestión de suelo - Inhalación de polvo en el exterior/interior - Contacto dérmico con el suelo (exterior) /polvo (interior) - Inhalación de vapor en el exterior - Inhalación de vapor en el interior - Ingestión de alimentos contaminados - Ingestión de agua contaminada como bebida - Contacto dérmico con agua contaminada - Inhalación de vapores que emanan del agua contaminada - Ingestión de agua contaminada durante el baño recreativo - Contacto dérmico con el agua contaminada durante el baño recreativo

Análisis del riesgo para salud humana		
Tipo compuesto	Criterio de evaluación	Cuantificación del riesgo
Compuesto cancerígeno	Incremento de la probabilidad de que un individuo por cada 10 ⁵ individuos desarrolle un cáncer a lo largo de su vida	<ul style="list-style-type: none"> - Para un riesgo de concentración bajo la relación dosis-respuesta es lineal y el riesgo directamente proporcional a la ingesta - $R_i = IDE_i \cdot F_p$ - $R_i = \text{Riesgo}$ - $IDE = \text{ingesta diaria estimada}$ - $F_p = \text{factor de pendiente}$
Compuesto no cancerígeno	Comparación de la dosis ingerida a lo largo de un tiempo de exposición global con el 100% de la referencia toxicológica empleada	<ul style="list-style-type: none"> - Para dosis inferiores a la de referencia no se espera efectos para la salud - $R_i = IDE/R_{tox}$ - $R_i = \text{Riesgo}$ - $IDE = \text{ingesta diaria estimada}$ - $R_{tox} = \text{Referencia toxicológica (para el contaminante y ruta de exposición considerada)}$

F_p : Factor de pendiente (para el contaminante y ruta de exposición considerados)
 R_{tox} : referencia toxicológica (para el contaminante y ruta de exposición considerados)

197

Métodos para estimación del riesgo para ecosistemas		
Método de estimación	Campo de aplicación	Cuantificación del riesgo
Comparación de las concentraciones de exposición con dosis referidas a efectos aislados para especies concretas	Poblaciones o componentes específicos del ecosistema	Se obtiene un valor fijo que refleja la máxima probabilidad de que dicho componente sufra efectos adversos por exposición a ese estresor Se trata de una estimación puntual del riesgo
Comparación de la distribución de efectos /distribución de exposiciones	Poblaciones o componentes específicos del sistema	Se obtiene una estimación probabilística del riesgo, que se cuantifica como el grado de solapamiento entre las funciones de distribución de efectos y exposición
Empleo de un modelo de extrapolación de efectos	Poblaciones completas de un sistema	Se obtiene un porcentaje de especies afectadas por la presencia de un determinado nivel de contaminante o estresor, y por tanto de riesgo para el funcionamiento del ecosistema

198

Informe de la investigación detallada.

El informe de la Investigación Detallada debe contener, al menos, la siguiente información:

- a. Descripción de los objetivos de la Investigación Detallada.
- b. Resumen y evaluación de los resultados de la Investigación Exploratoria y explicación de la utilización que se va a hacer de estos datos;
- c. Descripción de la estrategia de investigación diseñada y ejecutada para caracterizar el emplazamiento en relación a la naturaleza, concentración y extensión de la contaminación. Cuando la estrategia de muestreo o análisis químico difiera de lo recomendado en las correspondientes guías metodológicas, se explicarán las razones que justifiquen la desviación.
- d. Modelo conceptual utilizado para el diseño de la estrategia de muestreo y análisis en medios diferentes al suelo (agua superficial, agua subterránea, vegetales, etc.)
- e. Descripción detallada del funcionamiento hidrogeológico en el emplazamiento.

199

- f. Resultados de la investigación incluyendo:
 - mapa del emplazamiento a escala adecuada (mínimo 1:2000) en el que se representen claramente los puntos de muestreo;
 - resultados de las observaciones sensoriales;
 - descripción del perfil del suelo en cada uno de los sondeos;
 - descripción de la morfología del suelo;
 - identificación de las muestras en relación a la posición exacta y profundidad de los puntos de muestreo;
 - listado de las muestras analizadas incluyendo las determinaciones llevadas a cabo en cada una de ellas;
 - resultados de los análisis físicos y químicos realizados;
 - lista de los valores de calidad del suelo y otros medios utilizados para la interpretación de los resultados;
 - representación cartográfica de la extensión de la contaminación (líneas de isoconcentración).

200

- g. Interpretación de los resultados, que debe incluir:
 - interpretación de los resultados relativos al suelo por comparación con los estándares de calidad existente (valores indicativos de evaluación y otros);
 - interpretación de los resultados relativos a otros medios analizados por comparación con los estándares de calidad existentes (estándares de calidad de aguas subterráneas y superficiales, regulaciones alimentarias, etc.);
 - interpretación de los resultados de las investigaciones geológicas e hidrogeológicas realizadas;
 - evaluación de la dispersión potencial de la contaminación
- h. Evaluación de riesgos e interpretación de sus resultados
- i. Conclusiones y recomendaciones.
- j. Resumen del estudio.

201

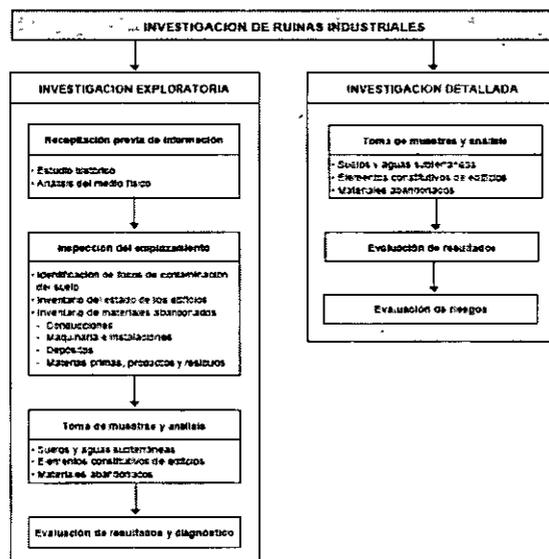


Figura 14: Particularidades de la investigación de ruinas industriales

202

▼ Tecnologías de remediación para suelos contaminados.

203

▼ Tecnologías de remediación para suelos contaminados.

☞ Introducción.

Se presenta a continuación una revisión de las principales tecnologías para el tratamiento de suelos contaminados, así como los datos que deben tomarse en cuenta para la selección de la tecnología más adecuada de acuerdo con las características del sitio a tratar, las propiedades del suelo y el tipo de contaminante. Se presentan y definen las principales tecnologías de remediación de suelos utilizadas en Estados Unidos de América y se hace un recuento de las tecnologías más comúnmente empleadas en México.

Las tecnologías de remediación para suelos fueron divididas con base en su principio de acción o tipo de tratamiento: biológicas, fisicoquímicas y térmicas.

Adicionalmente, se presentan los costos y tiempos estimados para la remediación de un sitio contaminado. Algunas de las conclusiones más importantes de esta obra acerca del uso de tecnologías de remediación para sitios contaminados son:

204

En México existe actualmente una gran cantidad de sitios contaminados con diferentes tipos de compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, debido principalmente a las actividades de la industria minera y petroquímica, además de la disposición clandestina y derrames de residuos peligrosos.

✓ Antes de considerar el uso de una tecnología de remediación para un sitio en particular, es indispensable contar con información del sitio y llevar a cabo su caracterización, así como la del contaminante a tratar.

✓ Posteriormente, la tecnología puede elegirse con base en sus costos y a la disponibilidad de materiales y equipo para realizar el tratamiento.

✓ Resultados acerca del tipo de contaminantes tratados en sitios contaminados en Estados Unidos de América, indican que más del 80% de los proyectos de remediación están dirigidos hacia contaminantes orgánicos (EPA 2001).

205

✓ En México, al igual que en EE.UU., la mayor parte de los suelos contaminados están sometidos a tratamientos de remediación in situ (~88%), más que tratamientos ex situ (~12%).

✓ Del total de las empresas autorizadas para remediar suelos en México, más de la mitad emplean métodos biológicos, siendo los más utilizados el composteo y la biolabranza.

✓ El lavado de suelos, la oxidación química y la separación física constituyen otra parte importante de las tecnologías de remediación más empleadas.

✓ Ninguna empresa ofrece servicios para la remediación de suelos contaminados con metales.

206

☛ Datos requeridos para la remediación de suelos contaminados.

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

➤ El tipo de contaminante y sus características físicas y químicas determinan si un sitio requiere ser remediado y la manera en la que el contaminante debe tratarse. Además, dichas propiedades determinan cómo puede ser el movimiento del contaminante y si éste es o no persistente en el ambiente. La estructura química de un contaminante determina su toxicidad y por consiguiente permite fijar ciertos criterios para establecer los límites de limpieza.

➤ La localización y las características del sitio, así como el uso de suelo (industrial, residencial o agrícola), fundamentalmente afectan la meta de la limpieza y los métodos que pueden emplearse para alcanzarla.

207

➤ Las características naturales de los suelos, sedimentos y cuerpos de agua, a menudo determinan las particularidades de los sistemas de tratamiento. Para suelos o lodos, el manejo del material a tratar (conversión del contaminante a una forma en la que pueda tratarse y/o transportarse desde la fuente de la contaminación hasta el lugar de tratamiento), es el paso crítico en la mayoría de los procesos de tratamiento. Los pretratamientos para modificar las características naturales de un suelo contaminado pueden ser componentes muy caros en un proceso de remediación.

➤ Las capacidades de las tecnologías de remediación pueden variar ampliamente en función de las condiciones específicas del sitio.

➤ Las tecnologías de remediación pueden actuar conteniendo la contaminación, separando el contaminante del suelo o destruyendo el contaminante. El uso de una tecnología en particular depende, además de los factores mencionados, de su disponibilidad, fiabilidad (demostrada o proyectada), estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo.

208

☛ Factores que inciden en la eficiencia de una tecnología de remediación.

El comportamiento de un contaminante en el suelo, así como la efectividad de una tecnología de remediación, están determinados por una variedad de factores que interactúan de manera compleja y que dependen de las características propias del contaminante así como de las del suelo (figura 1).

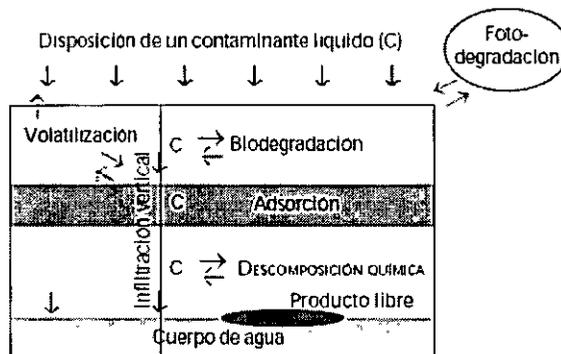
Por consiguiente, para la selección adecuada de una tecnología de remediación con buenas perspectivas de éxito, es indispensable considerar tanto las propiedades del contaminante como las del sitio contaminado.

En general, dentro de los factores a considerar se encuentran los siguientes:

- (i) procesos químicos (reacciones de hidrólisis, oxidación, reducción, fotólisis);
- (ii) procesos físicos o de transporte (sorción, advección, dispersión, difusión, volatilización y solubilización); y
- (iii) procesos biológicos (biodegradación, biotransformación y toxicidad).

209

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



FUENTE: Eweis *et al.* 1998.

210

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

- ✓ Ubicación geográfica y uso del suelo afectado.
- ✓ Tipo de instalación que dio origen a la contaminación.
- ✓ Magnitud y distribución de la mancha.
- ✓ Formas de acceso al sitio, ubicación de poblaciones y cuerpos de agua.
- ✓ Tipo de vegetación, clima y topografía del sitio.
- ✓ Características ecológicas.
- ✓ Características hidrogeológicas (formaciones geológicas, ciclo hidrológico y flujo de cuerpos de agua).

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

211

➤ Caracterización del contaminante

Los compuestos químicos pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos.

Los primeros, se componen básicamente de átomos de carbono, y pueden ser de origen antropogénico o natural.

Los compuestos inorgánicos en cambio, generalmente no contienen átomos de carbono e incluyen a los metales. Para los fines de este trabajo los contaminantes orgánicos se han dividido a su vez en seis grupos:

- (i) compuestos orgánicos volátiles (COV) no halogenados;
- (ii) COV halogenados;
- (iii) compuestos orgánicos semivolátiles (COS) no halogenados;
- (iv) COS halogenados;
- (v) combustibles y
- (vi) explosivos

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

212

Para cualquier acción de remediación, ya sea en fase de investigación o de limpieza, es importante definir los perfiles horizontal y vertical de los contaminantes, tanto como sea posible.

La información acerca del rango y diversidad de la contaminación en todo el sitio, también es crítica para la elección de una tecnología de tratamiento.

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

213

Estructura del contaminante.

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

Concentración.

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

214

Toxicidad.

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

Solubilidad.

Es la cantidad de un compuesto que puede disolverse en agua, es decir, define la disponibilidad potencial de los compuestos en la fase líquida. En general, la solubilidad disminuye al aumentar el tamaño de la molécula, y los compuestos polares son más solubles que los no polares. Por otra parte, para que la transformación biológica de un compuesto se lleve a cabo, es necesario que éste se encuentre en solución, por lo tanto la biodegradabilidad de un compuesto depende de su solubilidad.

215

Coefficiente de partición octanol/agua (KOW).

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

Polaridad y carga iónica.

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

216

Difusión.

La velocidad de movimiento de un contaminante a través del suelo, es proporcional a su concentración y a su coeficiente de difusión. La difusión de un contaminante hacia dentro y fuera de los poros del suelo controla su degradación. Es uno de los procesos abióticos que compite más efectivamente con los microorganismos por el sustrato.

Sorción.

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

217

Volatilización.

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

Densidad

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

Biodegradabilidad.

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

Reacciones de oxidación-reducción.

Este tipo de reacciones pueden degradar compuestos orgánicos, o bien, convertir compuestos metálicos a formas que son más o menos solubles que la forma original del contaminante

218

☛ Caracterización del suelo.

El suelo constituye un recurso natural que desempeña diversas funciones en la superficie de la Tierra, proporcionando un soporte mecánico así como nutrientes para el crecimiento de plantas y micro-organismos. La matriz del suelo está formada por cinco componentes principales: minerales, aire, agua, materia orgánica y organismos vivos.

Los materiales minerales son los principales componentes estructurales y constituyen más del 50% del volumen total del suelo. El aire y el agua juntos ocupan el volumen de los espacios, y usualmente conforman de 25% a 50% del volumen total. La proporción relativa de aire/ agua fluctúa considerablemente con el contenido de humedad del suelo. El material orgánico ocupa entre 3% y 6% del volumen promedio, mientras que los organismos vivos constituyen menos del 1%.

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

219

Tamaño de partícula.

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

Heterogeneidad.

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

Densidad aparente.

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

220

Permeabilidad

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

pH.

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

Humedad

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

Materia orgánica

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

221

☛ Fuentes de contaminación en México.

Como consecuencia de varios siglos de actividad minera en México y posteriormente, debido a la industria de la química básica, petroquímica y de refinación del petróleo, se han producido cantidades muy grandes, pero muy difíciles de cuantificar de residuos peligrosos. Aunado a lo anterior, la intensa actividad de otras industrias, junto con accidentes durante el almacenamiento, transporte o trasvase de sustancias (fugas, derrames, incendios) y la disposición clandestina e incontrolada de residuos, contribuyen en gran medida a la contaminación de suelos (SEMARNAT 2002).

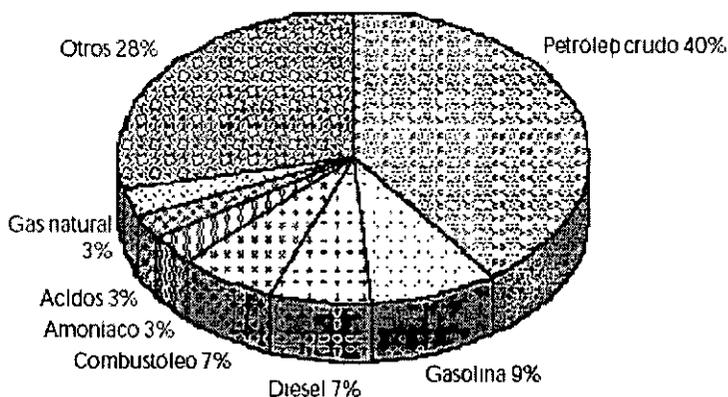
El número de sitios contaminados, aún en las estimaciones más conservadoras, asciende a varios miles de lugares cuyo riesgo potencial es desconocido. De acuerdo con datos publicados por el INEGI (2000), la superficie de suelo degradado por causas de contaminación en 1999 fue de 25,967 km².

Todos los eventos en los que se encuentran involucradas sustancias que implican algún riesgo para el ambiente o la población y que puedan generar la contaminación de suelos y cuerpos de agua, son conocidos como emergencias ambientales. De acuerdo con estadísticas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), cada año se presentan en México un promedio de 550 emergencias ambientales asociadas con materiales y residuos peligrosos.

Dentro de los compuestos peligrosos más comúnmente involucrados en emergencias ambientales, se encuentran el petróleo y sus derivados (gasolinas, combustóleo, diesel), agroquímicos, gas LP y natural, entre otros (figura 2).

222

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



FUENTE: PROFEPA 2002.

223

Dentro de los contaminantes que se consideran prioritarios en México debido a su alta toxicidad y a su persistencia en el ambiente, se encuentran los siguientes:

dioxinas, furanos, hexaclorobenceno, bifenilos policlorados (BPC), plaguicidas organoclorados, mercurio, plomo, cromo, cadmio, compuestos tóxicos atmosféricos e hidrocarburos poliaromáticos (HAP).

De éstos, compuestos como los BPC se han almacenado en tambores que, en muchas ocasiones, han sido dispuestos clandestinamente. Por su parte, los HAP se encuentran como componentes de los hidrocarburos totales del petróleo (HTP)

Como se mencionó, en todo el país existen problemas de contaminación aún no cuantificados con precisión. Sin embargo, pueden mencionarse de manera cualitativa los problemas de contaminación generados por el uso de agroquímicos, tanto fertilizantes (en especial los nitrogenados) como de pesticidas (fungicidas, herbicidas e insecticidas);

los que son consecuencia del derrame y fugas de combustibles (petróleo y derivados), así como los ligados a actividades mineras, en sus etapas de extracción como en las de procesamiento de los materiales obtenidos (INEGI-SEMARNAP 1997).

A continuación se mencionan algunas de las principales fuentes de contaminación de suelos en México.

224

☛ Industria petroquímica.

La industria petroquímica en México se ha desarrollado aceleradamente, generando diversos satisfactores económicos. Sin embargo, su expansión y desarrollo también ha dado origen a graves problemas ambientales, derivados de emergencias ambientales, con graves repercusiones a la salud de la población y al equilibrio ecológico de los ecosistemas (Quadri 1994, PROFEPA 2000).

Entre las causas que han generado este deterioro ambiental por la contaminación de cuerpos de agua y suelos a lo largo de todo el país, se encuentran las siguientes.

1. manejo inadecuado y abandono de materiales y residuos peligrosos;
2. mantenimiento inadecuado o falta de éste en instalaciones petroleras;
3. explosiones en instalaciones de alto riesgo,
4. fugas en líneas de conducción y
5. derrames de hidrocarburos (CENAPRED 2001, PROFEPA 2002).

En el inventario de residuos peligrosos de PEMEX en el 2001 reportan la generación de más de 270 mil toneladas de residuos peligrosos.

Aproximadamente el 86% del volumen total de estos residuos, corresponde a lodos y recortes de perforación (72%), lodos aceitosos (8%) y aceites gastados (6%).

225

Con respecto a los derrames y fugas de hidrocarburos, PEMEX reporta que durante el año 2001 hubo un total de 8,031 toneladas de hidrocarburos (crudo, diesel y gasolina) derramados en su mayoría en tierra, en los cuatro sectores de ductos del país (PEMEX 2001). Más los derrames recientes que se han estado produciendo debido a la falta de mantenimiento y de prácticas de operación.

Esta última cifra es importante, ya que de esta manera puede estimarse la magnitud de la contaminación en los sitios cercanos a los derrames.

Uno de los estados con mayor incidencia de sitios contaminados por actividades petroleras es Veracruz. De acuerdo con información de PEMEX, dos de los lugares más contaminados por hidrocarburos a nivel nacional son la refinería Lázaro Cárdenas y el pantano de Santa Alejandrina, ambos ubicados en el sureste de México.

226

➤ Industria minera

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, que contribuye en gran medida con el desarrollo económico del país, suministrando insumos a una serie de industrias (construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica).

De acuerdo con información de la Dirección General de Minas, la industria minera nacional es mayoritariamente metálica, y se dedica principalmente a la producción de cobre, zinc, plata y plomo. Debido al desarrollo y modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en México ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país.

La producción minera en México, se concentra en doce entidades:

Chihuahua, Michoacán, Zacatecas, Durango, Sonora, Coahuila, Guanajuato, San Luis Potosí, Hidalgo, Sinaloa, Colima y Jalisco. En el cuadro 1 se resumen las etapas de los procesos mineros y su relación en cuanto a impacto al ambiente.

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

227

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

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

228

☞ Agroquímicos.

El uso excesivo de agroquímicos, así como el inadecuado manejo y disposición de sus envases, ha sido un problema generalizado en México. Muchos de los plaguicidas empleados en el país hasta la fecha, se han prohibido en otros países por su toxicidad. Sin embargo, el número de plaguicidas se incrementa a razón de 10% al año

Esto ha permitido que el número de productos que entran en contacto con la población, se incremente en más de seis veces (CICLOPLAFEST 2000).

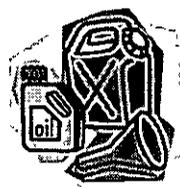
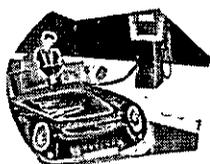
Los plaguicidas son el nombre genérico que recibe cualquier sustancia o mezcla de sustancias que se utiliza para controlar plagas que atacan los cultivos o insectos que son vectores de enfermedades. Según su composición química se clasifican en insecticidas (organoclorados, organofosforados, piretroides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

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

229

☞ Estaciones de servicio.

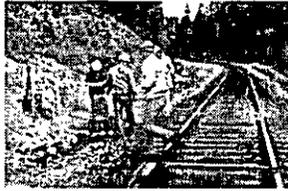
Los productos combustibles como gasolina, diesel, combustóleo, gasóleo, gas avión y gas LP, son producidos y distribuidos en México por PEMEX. La distribución al menudeo de gasolina y diesel, se lleva a cabo en estaciones de servicio (gasolineras). Uno de los riesgos ambientales que involucra el manejo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



230

☞ Ferrocarriles.

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



231

☞ Disposición de residuos peligrosos.

Debido al creciente volumen de residuos peligrosos generados en nuestro país y a las capacidades existentes para su manejo, frecuentemente se presenta la disposición clandestina de éstos en diversos sitios (tiraderos municipales, terrenos baldíos, patios de empresas, drenajes), ocasionando así un aumento de sitios contaminados con sustancias peligrosas de naturaleza tanto orgánica como inorgánica.

Por ejemplo, en 1980 en la mina Rosicler (Nuevo Mercurio, Zacatecas), se encontraron abandonados cientos de tambores que contenían residuos peligrosos como cloruro de mercurio, mezclas de químicos y BPC.

Se tiene información de que el contenido de varios de los tambores se ha derramado accidental o deliberadamente. En el cuadro 2 se muestra una relación de sitios ilegales y/o abandonados, que se detectaron por la PROFEPA en el periodo 1995-1997, en donde se han desechado residuos peligrosos provenientes de diversas industrias (Kreiner 2002)

232

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

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

233

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

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

* No se mencionan los residuos biológico-infecciosos.

* FUENTE: PROFEPA 1998.

234

Alerta por agua contaminada con arsénico

+Habitantes de Zimapán, Hidalgo, ignoran la gravedad del problema



Por Hanna Novell

Zimapán, Hidalgo, 20 de agosto de 2003.- En esta comunidad ubicada en una zona minera habitan alrededor de 37 mil personas, quienes, desde hace años, saben que las aguas de los pozos de su comunidad están contaminadas con arsénico.

El secretario general del municipio, Arturo Ortiz Trejo, explica que la presencia del metaloide en el agua "nos genera ciertos problemas de salud, según lo que nos informa la Jurisdicción Sanitaria; principalmente manchas en la piel o problemas de cuadros gripales severos".

Hace diez años fue clausurado el principal pozo de Zimapán por presentar un alto grado de arsénico.

La contaminación por arsénico es gradual, sus secuelas se observan a largo plazo, por lo cual la población no cree que esté enferma, aunque las nuevas generaciones podrían presentar ya ciertos daños en su salud.

Los especialistas afirman que el problema sí es grave: "Como la gente no ve una afectación inmediata a la salud, no se hace nada", y tampoco las autoridades han tomado las riendas del caso, refiere Ramiro Rodríguez Castillo, investigador de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Vivir con arsénico: la realidad de un pueblo... Y a pesar de los innumerables estudios realizados por científicos, parece que los habitantes de Zimapán se han acostumbrado a vivir con arsénico.



Foto: FIA

Alerta en Zacatecas por contaminación por mercurio

+Daño sanitario en municipio de Guadalupe

Zacatecas, Zacatecas, 8 de noviembre de 2002 (FIA).- Son preocupantes los niveles de contaminación por mercurio en esta entidad del noreste de México.

Investigadores canadienses buscan detectar los índices en el municipio de Guadalupe, donde las autoridades municipales reconocen que este metal ha causado un gran daño en la salud de la población.

Con base en tecnología de punta, especialistas monitorean los niveles de metales pesados en el medio ambiente de esta región.



Monitorean niveles de metales pesados (FIA)

Sin control el manejo de residuos peligrosos

+Simplificarán trámites administrativos
+Se buscará reducir los costos

México, D.F., 21 de enero de 2002 (FIA).- De un total de 100 mil empresas mexicanas, sólo un 30 por ciento maneja sus residuos peligrosos de manera adecuada, denunció Carlos Pérez Torres, director de Residuos Peligrosos y Actividades Altamente Riesgosas de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

Durante el seminario Responsabilidad Ambiental y Social de los Empresarios en México, organizado por la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Pérez Torres afirmó que las grandes industrias, que generan el 80 por ciento de los residuos, están reguladas, pero hace falta "identificar" al resto de las empresas.

El funcionario federal agregó que para lograr solucionar el problema, simplificarán todos los trámites administrativos y buscarán reducir los costos.

"A pesar de que las cifras no son alentadoras se redujo la cantidad de basureros clandestinos y empresas que derraman sus desechos a los ríos y mares, debido a la mayor vigilancia de las autoridades pero también por la mayor conciencia que existe al respecto en la sociedad", sostuvo Pérez.

Y concluyó: "En general se ha controlado el manejo de los residuos peligrosos en el país, pero no ha sido fácil por la renuencia existente en el sector, principalmente en la mediana, pequeña y microindustria".



Necesario regular en la materia (FIA)

En el periodo de 1995 a 1997, se detectaron 161 sitios abandonados contaminados con residuos peligrosos en 18 estados de la República.

Sin embargo, se estima que el número de sitios de este tipo que contienen residuos peligrosos, es mucho mayor y se desconoce su ubicación. Desde 1988, más de 27 mil empresas han cumplido con la obligación de informar acerca de la generación de residuos peligrosos.

Sin embargo, se desconoce el universo de empresas generadoras que no informan y desechan sus residuos clandestinamente, y se estima que el universo potencial es mayor a 100,000 (Mosler 2002).

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



237

☞ Tecnologías de remediación.

El término «tecnología de tratamiento» implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA 2001).

Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente.

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

238

☞ Clasificación de tecnologías de remediación.

Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios:

- (i) estrategia de remediación;
- (ii) lugar en que se realiza el proceso de remediación, y
- (iii) tipo de tratamiento.

Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación. A continuación se describen con más detalle las clasificaciones anteriores (Van Deuren et al. 1997, Sellers 1999, EPA 2001).

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

239

Destrucción o modificación de los contaminantes

Este tipo de tecnologías busca alterar la estructura química del contaminante

Extracción o separación. Los contaminantes se extraen y/o separan del medio contaminado, aprovechando sus propiedades físicas o químicas (volatilización, solubilidad, carga eléctrica).

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

Lugar de realización del proceso de remediación

En general, se distinguen dos tipos de tecnología

In situ. Son las aplicaciones en las que el suelo contaminado es tratado, o bien, los contaminantes son removidos del suelo contaminado, sin necesidad de excavar el sitio. Es decir, se realizan en el mismo sitio en donde se encuentra la contaminación.

Ex situ. La realización de este tipo de tecnologías, requiere de excavación, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (on site) o fuera de él (off site)

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

240

CUADRO 3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNOLOGIAS DE REMEDIACION *IN SITU* Y *EX SITU*

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

241

Tipo de tratamiento.

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

Tratamientos biológicos (biorremediación). Utilizan las actividades metabólicas de ciertos organismos (plantas, hongos, bacterias) para degradar (destrucción), transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos inocuos.

Tratamientos fisicoquímicos. Este tipo de tratamientos, utiliza las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación.

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

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

242

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

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

243

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

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

Tecnologías innovadoras Son tecnologías propuestas más recientemente, que pueden encontrarse en diferentes etapas de desarrollo (investigación, escala piloto o gran escala).

Su limitado número de aplicaciones genera la falta de datos acerca de sus costos y eficiencias. En general, una tecnología de tratamiento se considera novedosa si su aplicación a gran escala ha sido limitada.

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

244

☛ Tecnologías de remediación biológicas (biorremediación)

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

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

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

245

☛ Tecnologías in situ.

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

Bioventeo

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

Aplicaciones. Se utiliza para tratar compuestos orgánicos biodegradables semivolátiles (COS) o no volátiles. Además de favorecer la degradación de contaminantes adsorbidos, pueden degradarse COV, por medio de su movimiento a través del suelo biológicamente activo (Eweis et al. 1998). Se ha utilizado con éxito para remediar suelos contaminados con HTP, solventes no clorados, pesticidas y conservadores de la madera, entre algunos otros químicos (Van Deuren et al. 1997).

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

Costos y tiempos de remediación. Es una tecnología en la que los tiempos de limpieza pueden variar desde algunos meses hasta varios años, y sus costos de operación varían entre 10 y 70 USD/m³. Esta tecnología no requiere de equipo caro, pero los costos pueden variar en función de la permeabilidad del suelo, espacio disponible, número de pozos y velocidad de bombeo (Van Deuren et al. 1997).

246

Bioestimulación.

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

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

Limitaciones. Esta tecnología no es recomendable para suelos arcillosos, altamente estratificados o demasiado heterogéneos, ya que pueden provocar limitaciones en la transferencia de O₂. Otros factores que pueden limitar su aplicación, incluyen:

- (i) que el tipo del suelo no favorezca el crecimiento microbiano;
- (ii) incremento en la movilidad de los contaminantes,
- (iii) obstrucción en los pozos de inyección provocada por el crecimiento microbiano.

Costos y tiempos de remediación. La limpieza de una pluma de contaminación, puede tomar varios años. Su costo oscila entre 30 y 100 USD/m³. La naturaleza y profundidad de los contaminantes y el uso de bioaumentación puede aumentar sus costos (Van Deuren et al 1997).

247

Bioaumentación.

Esta tecnología se utiliza cuando se requiere el tratamiento inmediato de un sitio contaminado, o cuando la microflora autóctona es insuficiente en número o capacidad degradadora.

Consiste en la adición de microorganismos vivos, que tengan la capacidad para degradar el contaminante en cuestión, para promover su biodegradación o su biotransformación. El tamaño del inóculo a utilizar, depende del tamaño de la zona contaminada, de la dispersión de los contaminantes y de la velocidad de crecimiento de los microorganismos degradadores (Riser-Roberts 1998).

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

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

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

248

Biolabranza

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

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

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

Costos y tiempos de remediación. Es una tecnología de mediano a largo plazo. El costo para su aplicación en desechos peligrosos oscila entre 30 y 70 USD/ m³ (Van Deuren et al. 1997, Reiser-Roberts 1998).

249

Fitorremediación.

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

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

La fitodegradación consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación.

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

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

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

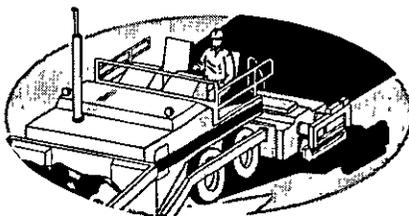
250

☛Tecnologías ex situ.

Los procesos de biorremediación ex situ, incluyen:

(i) Procesos de biodegradación en fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes; y

(ii) De biodegradación en fase sólida, en donde los suelos colocan en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biolabranza), en donde se agrega agua y nutrientes (EPA 2001).



251

Biorremediación en fase sólida (composteo)

El composteo es un proceso biológico controlado, por el cual pueden tratarse suelos y sedimentos contaminados con compuestos orgánicos biodegradables, para obtener subproductos inocuos estables. El material contaminado se mezcla con agentes de volumen (paja, aserrín, estiércol, desechos agrícolas), que son sustancias orgánicas sólidas biodegradables, adicionadas para mejorar el balance de nutrientes, así como para asegurar una mejor aireación y la generación del calor durante el proceso. Los sistemas de composteo incluyen tambores rotatorios, tanques circulares, recipientes abiertos y biopilas (Alexander 1994, Eweis et al 1998, Semple et al 2001)

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

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

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

Costos y tiempos de remediación. El costo del composteo está en función de (i) la cantidad y fracción de suelo a tratar, (ii) disponibilidad de agentes de volumen, (iii) tipo de contaminantes y proceso, (v) necesidad de tratamientos previos y/o posteriores y (vi) necesidad de equipos para el control de COV. Es una tecnología que puede llevar desde algunas semanas hasta varios meses. Los costos típicos se encuentran entre 130 y 260 USD/m³ (Riser-Roberts 1998)

252

Biorremediación en fase de lodos (biorreactores).

Los biorreactores pueden usarse para tratar suelos heterogéneos y poco permeables, o cuando es necesario disminuir el tiempo de tratamiento, ya que es posible combinar controlada y eficientemente, procesos químicos, físicos y biológicos, que mejoren y aceleren la biodegradación (Reiser-Roberts 1998).

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

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

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

Costos y tiempos de remediación. Los biorreactores de lodos pueden clasificarse como una tecnología de corto a mediano plazo. El uso de biorreactores de lodos oscila entre 130 y 200 USD/m³.

253

☞ Tecnologías de remediación fisicoquímicas.

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

Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de biorremediación. Sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación en las que los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición (Van Deuren et al. 1997).

Mientras que las tecnologías de biorremediación son principalmente métodos destructivos, las fisicoquímicas incluyen las tres estrategias básicas de acción sobre el contaminante (destrucción, separación e inmovilización).

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

254

Remediación electrocinética (RE)

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

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

Aplicaciones. Pueden tratarse contaminantes orgánicos polares y metales pesados. Se ha utilizado a nivel piloto para tratar contaminantes inorgánicos como Pb, Ni, Hg, As, Cu, Zn y Cr; además de orgánicos como BTX. Es una tecnología que puede emplearse para mejorar otras tecnologías de remediación como la biorremediación y la remoción de contaminantes no solubles (Sellers 1999).

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

Costos. Los costos varían en función de la cantidad de suelo a tratar, su conductividad, tipo de contaminante y tipo de proceso. Los costos netos son cercanos a 50 USD/m³.

255

Lavado de suelos, extracción por solvente e inundación de suelos

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

Lavado de suelos. Los contaminantes sorbidos en las partículas finas del suelo son removidos con el uso de soluciones acuosas en un suelo excavado. De esta manera se reduce el volumen del material contaminado, ya que las partículas finas son extraídas del resto del suelo.

Extracción por solventes. Este tipo de procesos, utiliza solventes orgánicos para disolver los contaminantes y así removerlos del suelo.

Inundación del suelo. Grandes cantidades de agua, en ocasiones con algún aditivo, se aplican al suelo o se inyectan en cuerpos de agua cercanos, para aumentar el nivel del agua en la zona contaminada, favoreciendo así el paso de los contaminantes del suelo hacia el cuerpo de agua. Un sistema de inundación, debe incluir la extracción y tratamiento del agua contaminada (Sellers 1999, EPA 2001).

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

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

Costos y tiempos de remediación. La inundación y el lavado son tecnologías de corto a mediano plazo. Los costos para la inundación oscilan entre 20 y 200 USD/m³, y para el lavado el costo promedio es de 150 USD/m³.

256

Extracción de vapores (EV).

La EV, también conocida como ventilación del suelo, vaporización y volatilización, es una tecnología en la que se aplica un vacío al suelo, para inducir un flujo controlado y continuo de aire, y remover así contaminantes volátiles y semivolátiles del suelo. La EV usualmente se lleva a cabo in situ

Sin embargo, en algunos casos, puede usarse como una tecnología ex situ (Riser-Roberts 1998, EPA 2001) La efectividad del sistema de EV depende principalmente de la volatilidad de los contaminantes y de la permeabilidad y homogeneidad del suelo (Sellers 1999).

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

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

Costos. Los costos de operación de la EV se encuentran entre 10 y 50 USD/m³

257

Solidificación/estabilización (S/E)

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

La S/E puede realizarse tanto in situ como ex situ. Para la S/E ex situ, el material a tratar debe excavar para tratarse, de manera que el material resultante sea dispuesto. En la S/E in situ pueden utilizarse sistemas para cubrir los suelos contaminados sin necesidad de excavar, de manera que el material se deja en el mismo sitio (EPA 2001)

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

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

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

258

Tratamiento químico.

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

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

Limitaciones. Puede ocurrir una oxidación incompleta o formación de compuestos intermediarios, dependiendo del contaminante y el agente oxidante usado; la presencia de aceites y grasas disminuye la eficiencia y los costos se incrementan para altas concentraciones de contaminantes.

Costos y tiempos de remediación. Es una tecnología de corto a mediano plazo, cuyos costos oscilan entre 190 y 600 USD/m³ (Van Deuren et al. 1997).

259

Separación física

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

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

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

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

260

☛ Tecnologías de remediación térmicas.

Los tratamientos térmicos ofrecen tiempos muy rápidos de limpieza, pero son generalmente los más caros. Sin embargo, estas diferencias son menores en las aplicaciones ex situ que in situ. Los altos costos se deben a los costos propios para energía y equipos, además de ser intensivos en mano de obra.

Al igual que las tecnologías fisicoquímicas y a diferencia de las biológicas, los procesos térmicos incluyen la destrucción, separación e inmovilización de contaminantes. Los procesos térmicos utilizan la temperatura para incrementar la volatilidad (separación), quemado, descomposición (destrucción) o fundición de los contaminantes (inmovilización).

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

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

261

Desorción térmica (DT)

Los procesos de DT consisten en calentar (90 a 540 °C) el suelo contaminado con contaminantes orgánicos, con el fin de vaporizarlos y por consiguiente separarlos del suelo. El calor acelera la liberación y el transporte de contaminantes a través del suelo, para posteriormente ser dirigidos hasta un sistema de tratamiento de gases con el uso de un gas acarreador o un sistema de vacío. Es un proceso de separación física no destructivo. Con base en la temperatura de operación, la DT puede clasificarse en dos grupos (EPA 2001):

Desorción térmica de alta temperatura (DTAT). Es una tecnología a gran escala en la cual los desechos son calentados a temperaturas que varían entre los 320 y los 560 °C. Frecuentemente se utiliza en combinación con la incineración o S/E, dependiendo de las condiciones específicas.

Desorción térmica de baja temperatura (DTBT). Los desechos se calientan a temperaturas entre 90 y 320 °C. Es una tecnología a gran escala que se ha probado con éxito en el tratamiento de varios tipos de suelos contaminados con HTP. La DT puede implementarse por (i) inyección a presión de aire caliente, (ii) inyección de vapor y (iii) calentamiento del suelo por ondas de radio (radio frecuencia) que producen energía que se transforma en energía térmica.

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

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

Costos. La limpieza de suelos contaminados con hidrocarburos por DT varía entre 50 y 350 USD/m³. En términos generales, la DT con uso de vapor puede costar más de 400 USD/m³.

262

Incineración

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

Combustión de lecho circulante (CLC). Utilizan altas velocidades en la entrada de aire, lo que provoca la circulación de los sólidos, creando una zona de combustión turbulenta favoreciendo la destrucción de hidrocarburos tóxicos. Los incineradores de CLC operan a temperaturas menores que los incineradores convencionales (790 a 880 °C).

Lecho fluidizado. Utiliza aire a alta velocidad para provocar la circulación de las partículas contaminadas y opera a temperaturas mayores a 870 °C.

Tambor rotatorio. La mayoría de los incineradores comerciales son de este tipo, y están equipados con un «dispositivo de postcombustión», un extintor y un sistema para el control de emisiones. Son cilindros rotatorios con una ligera inclinación que opera a temperaturas por arriba de los 980 °C.

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

Limitaciones. Es necesario tratar los gases de combustión (dioxinas y furanos); para el tratamiento de BPC y dioxinas, deben emplearse incineradores fuera del sitio, los metales pesados pueden producir cenizas que requieren estabilización, para tratar metales volátiles (Pb, Cd, Hg y As) se necesitan sistemas de limpieza de gases, los metales pueden reaccionar con otros compuestos formando compuestos más volátiles y tóxicos.

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

263

Vitrificación.

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

Durante el proceso, las altas temperaturas, provocan la destrucción o remoción de los materiales orgánicos (EPA 2001).

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

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

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

264

Pirólisis.

La pirólisis es la descomposición química de materiales orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. El proceso normalmente se realiza a presión y temperaturas de operación mayores a 430 °C. Los hornos y equipos utilizados para la pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperaturas menores en ausencia de aire. Los productos primarios formados de la pirólisis de materiales orgánicos, en diferentes proporciones de acuerdo con las condiciones del proceso, son:

- (i) gases residuales (metano, etano y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros),
- (ii) condensados acuosos y aceitosos y
- (iii) Residuos sólidos carbonosos (coque) que pueden usarse como combustible (Riser-Roberts 1998, Kreiner 2002).

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

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

265

☛ Trenes de tratamientos.

En algunos casos, dos o más tecnologías innovadoras o tradicionales pueden usarse juntas en lo que se conoce como «trenes de tratamiento». Estos trenes de tratamiento son procesos integrados o bien, una serie de tratamientos que se combinan en una secuencia para proporcionar el tratamiento necesario. En general, los trenes de tratamiento se emplean cuando no todos los contaminantes en un medio particular, pueden tratarse con una sola tecnología.

Por ejemplo, un suelo contaminado con compuestos orgánicos y metales puede tratarse primero por biorremediación para eliminar los compuestos orgánicos y después por S/E para reducir la lixiviación de los metales.

En otros casos, un tren de tratamientos puede usarse para:

- (i) hacer un medio más fácilmente tratable por una tecnología subsecuente;
- (ii) para reducir la cantidad de desechos que necesitan un tratamiento posterior con una tecnología subsecuente y más costosa;
- (iii) para disminuir el costo total del tratamiento (EPA 2001).

266

➤ Selección de una tecnología de remediación.

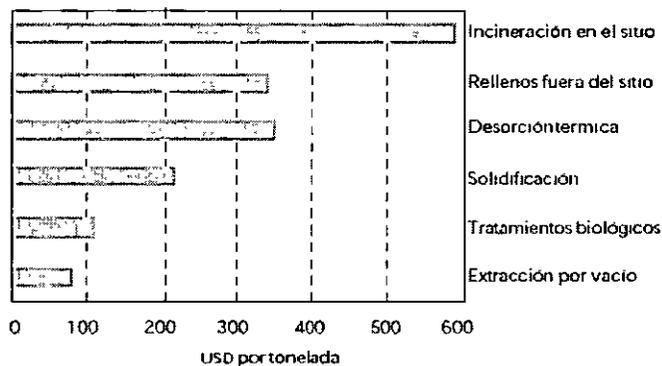
De acuerdo con la información antes presentada, puede decirse que la selección de una tecnología de remediación para un suelo con características particulares, contaminado con uno o más contaminantes en particular, básicamente depende de los siguientes criterios:

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

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

267

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



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

268

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

Puede verse que la principal tecnología empleada en EE.UU. Para el tratamiento de COV, COV halogenados y BTEX, es la extracción de vapores. Mientras que los COS y HAP se tratan generalmente por biorremediación. Para el tratamiento de BPC y COS halogenados, unade las tecnologías más usadas ha sido la incineración. Los metales, en cambio, son casi exclusivamente tratados por S/E (EPA 2001)

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

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

269

CUADRO 5 TIPOS DE CONTAMINANTES TRATADOS POR DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN

TECNOLOGÍA	COV	COV-H	COS	COS-H	BTEX	HAP	H/P	BPC	METALES	TOTAL
<i>Biologicas</i>										
Biorremediación	25	10	39	9	38	42	28	1	2*	202
Fitorremediación	0	3	0	0	2	0	1	0	1	7
<i>Fisicoquímicas</i>										
TO	2	3	0	4	1	1	3	3	0*	25
RE	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Aireación	0	4	0	1	1	0	0	0	0	6
Inundación	5	8	5	4	6	3	1	0	4	36
EV	31	171	25	24	91	12	2	2	0	358
Lavado	0	0	1	1	0	1	1	1	3	8
S/E	11	15	13	35	7	11	12	30	165	269
ES	1	2	1	3	0	1	0	3	0	11
<i>Térmicas</i>										
DT	12	29	13	20	20	14	9	12	0	129
incineración	23	48	37	63	29	22	32	38	2*	294
Vitrificación	0	2	0	2	1	0	0	1	0	6
Total de proyectos	110	305	134	165	106	107	89	97	175	

TO: tratamiento térmico; RE: remediación electrocinética; EV: extracción de vapores; S/E: solidificación/estabilización; ES: extracción por solventes; DT: desorción térmica.
 COV: compuestos orgánicos volátiles; COV-H: COV halogenados; COS: compuestos orgánicos semi-volátiles; COS-H: COS halogenados; BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos; HAP: hidrocarburos aromáticos policíclicos; H/P: herbicidas y pesticidas orgánicos; BPC: bifenilos policlorados.
 * Biorremediación de cromo hexavalente: reducción del Cr (VI) a Cr (III)
 * Reducción química de Cr (VI) a Cr (III)
 * Incineración de compuestos orgánicos (alta temperatura), con recuperación de metales de Pb o Hg

Fuente: EPA2001

270

☛Tecnologías de remediación utilizadas en México.

En el mercado ambiental de nuestro país, actualmente existen una gran cantidad de empresas que ofrece diferentes tipos de tecnologías para la remediación de sitios contaminados. Sin embargo, no fue hasta 1997, que las autoridades ambientales establecieron un programa de verificación y certificación de estas empresas.

Actualmente para poder realizar un trabajo de remediación es necesario contar con permisos específicos, como la Licencia ambiental única (LAU). Esta disposición oficial, ha permitido un mayor control acerca de las tecnologías que se ofrecen para remediar suelos y de las posibilidades reales de éxito que estas permiten.

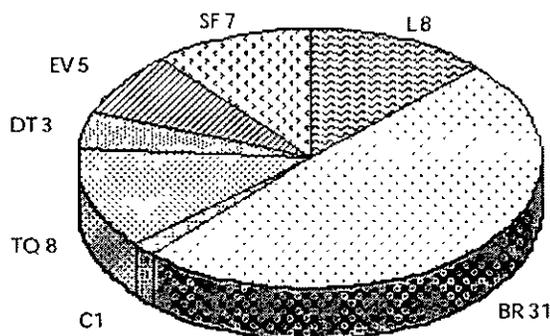
De acuerdo con datos proporcionados por la SEMARNAT (2002) todas las tecnologías que ofrecen las empresas que cuentan con permisos para remediar suelos contaminados, están enfocadas exclusivamente a la remediación de sitios contaminados con compuestos orgánicos.

De un total de 57 empresas autorizadas, ninguna ofrece servicios para la restauración de suelos contaminados con metales. Dentro de los contaminantes tratados, principalmente se encuentran los hidrocarburos (HTP, HAP), lodos aceitosos, lodos de perforación y recortes de perforación.

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

271

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



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

FUENTE: SEMARNAT 2002.

272

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

Por otra parte, la PROFEPA cuenta con datos acerca de los accidentes (emergencias ambientales) en los que han estado involucradas sustancias peligrosas.

A continuación se resumen los principales accidentes ocurridos entre 1993 y 1999 en México, relacionados directamente con la contaminación de suelos, así como las acciones de remediación que se han llevado a cabo en función del tipo de contaminante involucrado (PROFEPA 2002).

273

☛ A Compuestos orgánicos volátiles.

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

Gasolinas.

Entre las tecnologías más empleadas en México para la remediación de sitios contaminados con gasolinas se encuentran:

- (i) La biorremediación (in situ y ex situ), incluyendo el uso de biopilas y composteo;
- (ii) la EV;
- (iii) la aireación forzada y
- (iv) el TQ

Estos datos nuevamente confirman que la biorremediación in situ ha sido la tecnología más aplicada para este fin. Entre enero de 1997 y noviembre de 1999, se concluyeron un total de 18 trabajos de remediación de sitios contaminados con gasolinas, actualmente 5 se encuentran en proceso y 8 más por iniciar.

274

Benceno, tolueno y xilenos (BTX)

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

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

Metano.

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

275

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

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

FUENTE: PROFEPA 2002.

276

☞B. Compuestos orgánicos semivolátiles.

Acrilonitrilo.

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

277

☞C. Ácidos y bases

Acido nítrico.

Entre 1993 y 1999 se presentaron 12 emergencias ambientales relacionadas con ácido nítrico. De los 12 eventos, 5 ocurrieron durante la transportación, provocando la contaminación de los sitios en donde se derramó la sustancia.

Por ser un ácido inorgánico fuerte, el ácido nítrico puede tratarse químicamente por reacciones de neutralización, que implican la adición de bases fuertes o débiles al suelo afectado, hasta alcanzar un pH neutro.

El área afectada también puede neutralizarse con cal, carbonato de calcio o bicarbonato de sodio.

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

278

➤Conclusiones y perspectivas

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

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

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

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

279

Aunque existe información disponible acerca de las tecnologías de remediación más utilizadas en México, ésta es aún escasa.

Por los datos presentados en este documento, puede pensarse que algunas de las razones que han provocado esta escasez de información pueden ser:

- (i) Muchas de las tecnologías de remediación se encuentran aún poco desarrolladas en el país;
- (ii) La obligación para la obtención de permisos para empresas remediadoras de suelos contaminados es relativamente reciente, lo que en general se tienen pocas estadísticas;
- (iii) La falta de legislación respecto de las prácticas adecuadas y límites de limpieza para sitios contaminados con hidrocarburos y metales;
- (iv) Se estima que existe un gran número (desconocido) de empresas generadoras de residuos peligrosos, de los cuales, se cree que una buena parte son dispuestos en tiraderos clandestinos;
- (v) Se desconoce el número real de sitios contaminados históricamente por la actividad minera y petroquímica.

280

➤ Experiencias nacionales de remediación de suelos.

281

➤ Experiencias nacionales de remediación de suelos.

☞ Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos.

Identificación de las fuentes contaminantes:

Uno de los principales problemas con los cuales se han encontrado quienes realizan este tipo de restauraciones, es la identificación de las fuentes que han causado la contaminación, lo cual implica ubicar dónde se encuentran las líneas de tuberías subterráneas; los drenajes aceitosos y de aguas negras, con sus respectivos registros y cárcamos; los tanques de almacenamiento; los incineradores de desfogue y los lugares de depósito de los residuos; así como conocer cuál es la historia de las fugas y derrames subterráneos o de los accidentes.

282

Selección de contaminantes y parámetros a considerar:

Los parámetros que suelen recomendarse como indicadores de la contaminación del suelo y agua subterránea por hidrocarburos son los hidrocarburos totales (TPHs), los compuestos orgánicos volátiles (VOCs), los BTEX's (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos) y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs).

Cuando se trata de derrames de gasolina, se considera apropiado evaluar preferentemente BTEX, plomo, metilterbutileter (MTBE), alcanos como el 3-Metilpentano, aromáticos como el 1,2,3-Trimetilbenceno y Naftaleno; a la vez, cuando se trata de diesel se propone como indicadores los PAHs. Sin embargo, con frecuencia ocurre que sólo se consideran las mediciones en campo de las concentraciones de TPHs y VOCs, que no permiten caracterizar la magnitud de la contaminación, sobre todo cuando se trata de un proceso antiguo

La determinación de compuestos orgánicos por barrido de masas ofrece, por el contrario, la oportunidad de identificar además de los 60 orgánicos volátiles incluidos en un análisis de VOCs, hidrocarburos lineales y ramificados, cíclicos, aromáticos derivados del benceno, y algunos alcoholes, lo cual es conveniente si se sospecha contaminación por mezclas de combustibles.

Aunado a lo anterior, se recomienda determinar el riesgo de explosividad; aunque a este respecto se señala la ausencia de normas que establezcan procedimientos de calibración de los equipos y permitan reducir las incertidumbres en este tipo de mediciones.

283

Caracterización del subsuelo e hidrología en los sitios contaminados:

Este es un paso crucial pues dependiendo de los resultados se podrá diseñar el esquema de muestreo de los contaminantes y determinar el riesgo de movilización de los mismos hacia posibles receptores.

Entre los principales parámetros a considerar se encuentran: la estratigrafía del sitio, la permeabilidad y porosidad de suelo, la profundidad del nivel estático, el tipo y profundidad del acuífero subyacente.

Este tipo de datos, junto con los de las propiedades físicas y químicas de los contaminantes (solubilidad en agua, presión de vapor, constante de la ley de Henry y coeficiente de partición octanol/agua), permiten evaluar la probabilidad de migración de estos últimos y de exposición de posibles receptores, ya sea seres humanos, flora o fauna.

284

Estrategia de muestreo:

Del muestreo depende la relevancia y pertinencia de los datos sobre los niveles de contaminantes y la extensión contaminada.

En particular, es preciso definir el tipo de muestreo (agua, suelo, vapores); ubicación de los puntos de muestreo y número de los puntos de muestreo. Cabe señalar que la metodología de evaluación de riesgos está centrada en la determinación de la exposición de la exposición vía agua y suelo, mas no de la liberación de vapores.

El muestreo y análisis de contaminantes constituye una de las fases más caras de los proyectos de caracterización de sitios contaminados para su restauración, por lo cual siempre se trata de reducir al mínimo (por ejemplo, sólo a determinar TPHs cuyo costo por muestra en suelos, sin embargo, es equivalente a 575 dólares aproximadamente); al reducir costos no se debe perder confiabilidad en el diagnóstico.

285

Definición de niveles de limpieza:

La ausencia en México de criterios ecológicos y de normatividad en materia de suelos contaminados, dificultan la decisión sobre qué tanto debe de limpiarse un sitio contaminado.

La evaluación de los riesgos asociados a los niveles detectados de contaminantes, puede suplir esta deficiencia al indicar la probabilidad de que ocurran efectos adversos; sin embargo, también en este caso se enfrentan dificultades ya que no se han establecidos los criterios de riesgo a seguir en función de los usos presentes y futuros de los suelos restaurados.

A lo anterior se suma el hecho de que la mayoría de las evaluaciones de riesgos se centran sólo en riesgos a la salud (utilizándose como referencia patrones de alimentación y hábitos de individuos de otros países que no necesariamente aplican a México) y no consideran los riesgos para ecosistemas frágiles o especies amenazadas.

Asimismo, se suele desconocer el hecho de que la geología de nuestro país no es necesariamente similar a la de los sitios de otros países cuyos niveles de limpieza se toman como referencia.

286

Tecnologías aplicables a la restauración:

Entre las tecnologías más utilizadas en los trabajos referidos en la literatura para el tratamiento de sitios contaminados con hidrocarburos, se encuentran:

- ✓ Venteo y extracción de vapor.
- ✓ Flujo y lavado del suelo con soluciones surfactantes.
- ✓ Contención o aislamiento.
- ✓ Microencapsulamiento.
- ✓ Extracción del agua subterránea y tratamiento.
- ✓ Biodegradación en el suelo y /o en el agua subterránea (bioremediación).
- ✓ Utilización de metales de valencia cero.
- ✓ Liberación de oxígeno

La experiencia muestra que la decisión de la tecnología más adecuada requiere del conocimiento previo del suelo o del acuífero a restaurar y de los niveles de concentración y tipos de contaminantes. Se sabe, además, que la mayoría de las técnicas consideradas exitosas aplican sólo en suelos de permeabilidad alta y media pero no son adecuadas para suelos arcillosos o limo arcillosos. Existe a este respecto un vacío de conocimiento sobre cómo se comportan estas tecnologías en las zonas del país en las que las permeabilidades son muy bajas y donde las condiciones climáticas difieren de los sitios en los que se han aplicado exitosamente

287

Hay casos en los que se ha visto que la aplicación de técnicas de venteo y extracción de vapor no han dado buenos resultados, pues después de un tiempo se vuelven a incrementar las concentraciones de contaminantes en los sitios restaurados.

También se ha observado que en estados como Tabasco, la técnica de micro encapsulado no ha sido efectiva para contener a los TPHs.

A lo anterior se suma la dificultad de aplicar tecnologías que requieren del empleo de equipos complicados y de técnicos altamente especializados.

De ahí la importancia de asegurar que las tecnologías cumplan con lo indicado en la publicidad y en la bibliografía, en las condiciones y en suelos con las características que privan en el país, en ensayos piloto.

288

☞ Experiencias diversas.

a) Casos de contingencias.

La falta de especificaciones oficiales sobre tipo de productos y de tecnologías que pueden considerarse apropiadas para atender un derrame accidental de materiales peligrosos, ha traído consigo decisiones inadecuadas que lejos de contener el problema lo ha agravado.

A ello se suma el hecho de que, en algunos casos, se ha requerido la realización de una evaluación de impacto ambiental y de un estudio de riesgo antes de adoptar medidas de atención, retardándose el control del derrame, con lo cual problemas agudos de contaminación se han convertido en problemas crónicos.

289

b) Proyectos de demostración para la neutralización de los residuos peligrosos en suelos y sitios contaminados.

Existen experiencias que muestran la posibilidad de utilizar enfoques tecnológicos planteados en el país para atender situaciones de contaminación de suelos que ponen en riesgo la salud.

Tal es el caso de la propuesta de fabricar ladrillos mediante un proceso en el cual se reduce el cromo VI contaminante de un sitio, en cromo III y en el cual se hace intervenir otros dos desechos industriales como son corrientes de ácidos residuales con alto contenido de hierro (II) y ácido sulfúrico, así como corrientes con calcio carbónico residual.

290

c) Bioremediación.

Entre los retos identificados en la aplicación de la bioremediación en México se encuentra demostrar que funciona en el suelo que pretende ser tratado y que consiste en tecnologías ambientalmente seguras. Sin embargo, se plantea la necesidad de establecer políticas que revisen aspectos tales como

- ✓ Descripción detallada de la tecnología,
- ✓ Resultados de experiencias previas en otros sitios donde se hayan tratado contaminantes de composición química similar,
- ✓ Perfil del personal técnico que será responsable del proyecto y dominio de la tecnología,
- ✓ Revisión de los resultados de la caracterización del sitio,
- ✓ Resultados de las pruebas de biofactibilidad realizadas para el problema específico a ser tratado,
- ✓ Justificación del uso de productos microbianos y de aditivos,
- ✓ Parámetros por analizar durante la aplicación de la tecnología en cualquier escala,
- ✓ Hoja descriptiva y de seguridad de los productos a utilizar,
- ✓ Seguridad ambiental en el sitio de tratamiento y sus alrededores.

En particular, se recomienda realizar pruebas piloto en campo antes de operar a escala real.

291

☞ Restauración de sitios contaminados en el Distrito Federal.

Las fugas y derrames subterráneos en estaciones de servicio, autoconsumo y centros de distribución de combustibles en el Distrito Federal, han traído consigo problemas de contaminación del suelo y subsuelo con hidrocarburos, a ello se suman los procesos de contaminación provocados por el inadecuado manejo y disposición de residuos sólidos municipales e industriales, la infiltración de aguas residuales a partir de la red de drenaje y alcantarillado; el vertido de aguas residuales en zonas agrícolas; el inadecuado manejo y disposición de lodos residuales, la aplicación de plaguicidas y fertilizantes en zonas agrícolas, así como el inadecuado manejo y disposición de materiales y residuos peligrosos.

La Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, en 1997, reportó el establecimiento de programas tendientes a prevenir y controlar la contaminación del suelo en 391 estaciones de servicio de combustibles, a la vez que ha establecido prioridades para la atención de la contaminación del suelo por hidrocarburos por diversas fuentes; ha elaborado lineamientos técnicos normativos para este tipo de restauraciones; integrada una Red de Laboratorios Ambientales en Materia de Contaminación de Suelos, creado un Comité de Verificación de Estaciones de Servicio DF-PEMEX e intensificado el programa de verificación, aunado a ello desarrolla acciones de mantenimiento y ampliación de la infraestructura de manejo y disposición de residuos sólidos; de rehabilitación y ampliación del sistema de drenaje y alcantarillado; de entubamiento y revestimiento de canales a cielo abierto; de construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, y de evaluación del proceso de tratamiento y disposición de lodos residuales.

292

☞ Elementos para sustentar la política ambiental para la protección de suelos y su remediación.

El establecimiento de una política ambiental para la protección de los suelos en México es un elemento fundamental para enmarcar y poner en práctica las disposiciones de la LGEEPA.

Esta política deberá definir los arreglos institucionales que permitan proteger los suelos, entender la problemática relacionada con su contaminación, así como plantear las medidas preventivas y las relativas a su remediación.

Para ello, es necesario que los diferentes actores involucrados consideren la naturaleza de los contaminantes, su toxicidad, las concentraciones observadas, la vulnerabilidad de las poblaciones y ecosistemas potencialmente expuestos a dichos contaminantes, además del ordenamiento ecológico o programas de desarrollo urbano que resulten aplicables, a fin de definir los criterios que se deberán aplicar caso por caso, para limpiar los sitios contaminados hasta disminuir los riesgos que representan a un nivel socialmente aceptable y de manera costo-efectiva y ambientalmente adecuada.

293

☞ Actores a involucrar en el diseño e instrumentación de la política.

Las autoridades ambientales de los tres órdenes de gobierno: federal, estatal y municipal.

➤ Dueños de sitios sobre los cuales se desarrollan o desarrollaron actividades industriales, comerciales y/o agropecuarias.

➤ Propietarios o responsables de industrias, comercios y/o empresas agropecuarias.

➤ Instituciones financieras responsables de otorgar préstamos a particulares o a empresas que involucren las actividades mencionadas anteriormente.

➤ Empresas prestadoras de servicios ambientales.

294

☞ Objetivo general de la política de protección y remediación de suelos.

Contribuir a proteger el suelo a través de medidas tendentes a evitar su contaminación por materiales y residuos peligrosos, residuos sólidos municipales e industriales no peligrosos y promover su remediación, a fin de evitar o reducir los riesgos al ambiente, los ecosistemas y la salud humana.

295

☞ Objetivos particulares.

Desarrollar y de ser el caso actualizar, las propuestas de políticas, así como los instrumentos jurídicos y técnicos que sustenten la protección del suelo en las actividades que involucren el manejo de materiales y residuos peligrosos, residuos sólidos municipales e industriales no peligrosos, así como su remediación y valorización.

➤ Desarrollar las bases técnicas para el establecimiento de las Normas Oficiales Mexicanas y Normas Mexicanas que definan los procedimientos involucrados en la remediación de suelos contaminados, fomentando y garantizando el uso de los suelos remediados, considerando la protección a la salud pública y al ambiente, así como los programas de ordenamiento ecológico o desarrollo urbano que resulten aplicables (uso del suelo remediado con restricciones).

➤ Desarrollar, difundir y promover la aplicación de metodologías para evaluar los riesgos al ambiente, los ecosistemas y la salud humana, derivados de la contaminación de suelos con materiales y residuos peligrosos, residuos sólidos municipales e industriales no peligrosos, a fin de orientar el establecimiento de prioridades y las acciones de remediación orientadas a la disminución de dichos riesgos.

296

- Elaborar un inventario de suelos y/o sitios contaminados utilizando una metodología de evaluación de riesgos estandarizada promoviendo de manera prioritaria, la remediación de aquellos suelos que presenten riesgos significativos al ambiente y a la salud pública.
- Fomentar el establecimiento de infraestructuras (tecnologías) de remediación eficientes, limpias y costo efectivas.
- Fortalecer la gestión de los suelos contaminados por medio de convenios internacionales y mediante la cooperación interinstitucional.
- Fortalecer la participación de la sociedad en el marco de cumplimiento de la LGEEPA.
- Desarrollar sistemas de información en la materia para su difusión al público.
- Promover el fortalecimiento de las capacidades nacionales en la educación e investigación en la materia.

297

☞ Principios de la política.

De los principios considerados en la conceptualización del desarrollo sustentable, en particular, cuatro son aplicables a la protección de los suelos y a su remediación:

El principio de prevención: que en este caso particular se interpreta como la necesidad de evitar que los suelos se contaminen, dado que es más costoso remediar que prevenir.

Sobre todo, si se toma en consideración que se estima que existen aproximadamente 76,000 km² de suelos contaminados los cuales no podrán ser utilizados sin alguna limitación por las generaciones futuras.

De ahí que la aplicación del principio de prevención tienda a impedir que este tipo de situaciones se repita en el futuro y tiene como meta preservar la integridad de los suelos con el fin de salvaguardar sus funciones y garantizar el pleno uso de este recurso en la actualidad y en el futuro. Uno de los mecanismos más importantes para prevenir la contaminación de los suelos y cuerpos de agua consiste en la implantación de programas tendentes a evitar la generación y lograr el manejo integral de los residuos de toda índole.

298

El principio de remediación – valoración: a través de cuya aplicación se busca el aprovechamiento de los suelos remediados, con las restricciones requeridas de acuerdo con los niveles de limpieza que haya sido posible alcanzar. Mediante un enfoque de esta índole, se pueden además recuperar las inversiones hechas para limpiar sitios contaminados.

El principio de “el que contamina paga”: tiene como propósito responsabilizar al que contaminó y asegurar el que los suelos vuelvan, en la medida de lo posible, a sus funciones originales. De no aplicar este principio, la sociedad se amesga a enfrentarse a cientos de suelos contaminados dispersos en todo el territorio nacional, los cuales deberá tomar a su cargo, para asegurar la protección del público y de los elementos naturales.

El principio de equidad: que puede ser interpretado de las siguientes maneras,

a) la remediación de un suelo contaminado debe ser garantizada en un primer término por los que sacan o han sacado provecho del mismo, al no haberlo protegido,

b) un individuo o una empresa que aplica de buena fe las políticas y directrices dictadas por la autoridad competente para prevenir la contaminación del suelo o llevar a cabo su remediación, no debe estar en desventaja con relación a aquél que no lo hace. Esto significa que las acciones solicitadas para un grupo de propietarios y/o responsables que tienen los mismos problemas, deben ser similares y aplicarse a todos de igual forma, de manera que ninguno tenga ventajas en relación con sus competidores, y

c) los sitios contaminados que requieran ser remediados, deben de limpiarse de igual manera, indistintamente del tipo de comunidades que vivan en su entorno, de su condición social o de otras circunstancias que las diferencien.

299

☛ Estrategias de política.

a) Establecimiento de prioridades.

Ante la dimensión del problema de la contaminación provocada en el territorio nacional por cientos de años de disposición inadecuadas de todo tipo de residuos, es indispensable contar con metodologías o procedimientos sistemáticos que permitan establecer prioridades de limpieza y donde dos criterios pueden ser fundamentales: el criterio de riesgo y el criterio de oportunidad.

El criterio de riesgo: permite determinar qué sitios requieren atención prioritaria con fines de limpieza, en función de que representan una probabilidad o posibilidad elevada de que como consecuencia de ello, ocurran efectos adversos en las poblaciones y ecosistemas vecinos a ellos. En este caso, los riesgos pueden estar asociados a eventos accidentales que involucraron el derrame de materiales o residuos peligrosos, así como a sucesos de contaminación paulatina a lo largo de los años, la cual ha alcanzado un nivel o condiciones que representan un riesgo inminente a la salud o al ambiente.

El criterio de oportunidad: plantea que si están dadas las condiciones para que un sitio se limpie de manera costo-efectiva y rápida, a pesar de que no exista un riesgo inminente, se debe aprovechar tal circunstancia para llevar a cabo la limpieza

300

b) Visión sistemática.

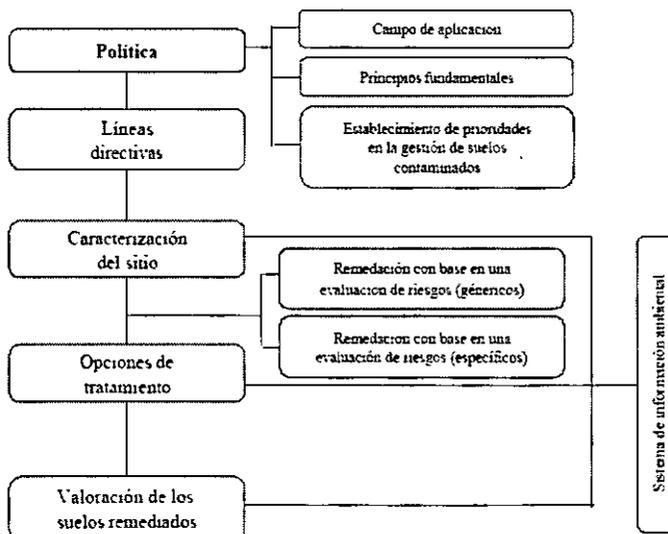
En la figura siguiente se plantean en forma diagramática los diferentes elementos a considerar para hacer frente a la grave problemática de contaminación de suelos con un enfoque metódico y sistémico, que parte de la definición de una política ambiental en la materia, enmarcada en el concepto de desarrollo sustentable, así como por los objetivos y principios que han sido enunciados previamente.

El eje central de la aplicación de la política relativa a la gestión de los suelos contaminados, es la caracterización de los mismos, lo cual requiere contar con diversos datos del sitio en estudio, que incluyen aspectos como:

- Información histórica del sitio (actividades industriales, procesos, materiales y residuos y eventos que pudieran haber contaminado el sitio, entre otros).
- Geología e hidrología.
- Características ambientales (clima, flora y fauna presente, etcétera).
- Propiedades físicas y químicas del suelo y los contaminantes.
- Otros estudios que permitan determinar la naturaleza exacta y la extensión del problema en el sitio.

301

Diagrama de la política de la gestión de suelos contaminados.



302

Límites de limpieza genéricos:

La primera alternativa consiste en realizar una comparación entre la concentración registrada y los límites máximos permisibles fijados como generales, que se deben alcanzar con la remediación, y que han sido establecidos con base en los riesgos determinados en otros países para los contaminantes en cuestión. En este primer caso, se tiene como ventaja la rapidez con la cual se puede determinar qué tanto limpiar un sitio, pero se puede incurrir en costos considerables e injustificados si los límites de limpieza son muy conservadores y no reflejan el riesgo real en el sitio.

Límites de limpieza específicos:

La segunda alternativa consiste en definir los límites máximos permisibles específicos del sitio mediante la realización de una evaluación de riesgo toxicológico y, de ser posible, ecotoxicológico. En este caso, se tiene que invertir en realizar los estudios para determinar el riesgo y esperar sus resultados, pero se obtiene como ventaja que la remediación se realice de manera más realista, evitando posiblemente costos excesivos e injustificados.

305

Internacionalmente se reconoce que la evaluación cuantitativa del riesgo se inicia y tiene su mayor desarrollo en Estados Unidos de América, principalmente porque la Agencia de Protección Ambiental (EPA), de ese país, decidió adoptar esta metodología para remediar los sitios contaminados dentro del programa de limpieza llamado Superfund, poniendo más interés en la protección de la salud humana.

En 1989, la EPA publica el documento denominado "Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Volumen I –Human Health Evaluation Manual, Part A" donde se establecen las ecuaciones básicas para calcular el riesgo y las concentraciones de limpieza correspondientes a un valor predeterminado de riesgo, para compuestos cancerígenos y no cancerígenos, por vía de exposición (digestión, inhalación o contacto dérmico).

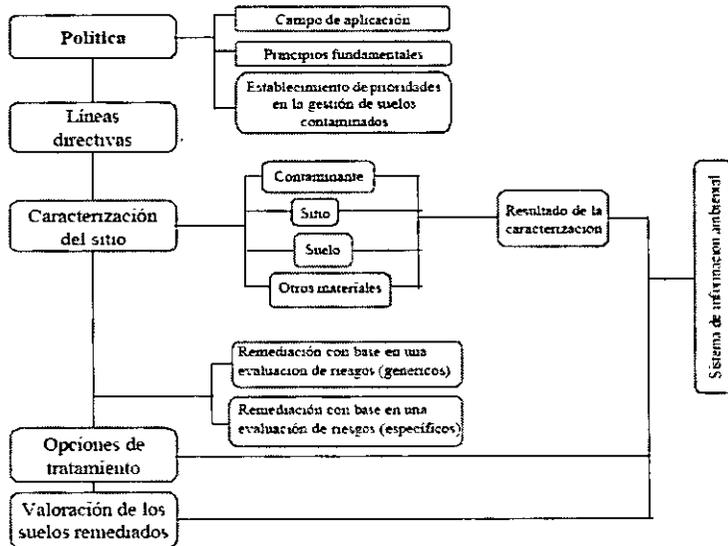
Posteriormente, la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) establece un marco de trabajo denominado Acciones Correctivas con Base en Riesgo (RBCA) con el cual se calculan las concentraciones de limpieza basadas en riesgo para sitios contaminados por hidrocarburos, hacia 1998, dicho marco de trabajo se amplía a todo tipo de compuestos (no sólo los derivados del petróleo)

Asimismo, en 1996 la EPA publica la guía para establecer niveles de cribado, denominada "Soil Screening Guidance User's Guide". Ambos marcos de trabajo emplean las mismas fórmulas establecidas por EPA, con algunas variantes que incluyen factores de volatilización, lixiviación y emisión de partículas, a fin de hacer más completo el cálculo

El riesgo de la contaminación de los suelos depende grandemente de los usos que se den a éstos, pues ello condiciona el número de personas que pasan más tiempo en los sitios con problemas o en su vecindad, así como pueden ser los niños, las mujeres embarazadas o los ancianos. Por las razones antes expuestas, se han determinado distintos niveles de riesgo o criterios de limpieza, de acuerdo a que los suelos sean industriales, agrícolas o residenciales

306

Diagrama de la caracterización de un sitio contaminado.



307

El procedimiento de evaluación de riesgos comprende:

1. La identificación del problema,
2. La evaluación de la exposición,
3. La evaluación de la toxicidad y
4. La caracterización o cuantificación del riesgo.

La información que se requiere para realizar la evaluación de riesgos a la salud o al ambiente incluye, entre otras, la siguiente:

- Estudio de las actividades que se han llevado a cabo en el suelo o el sitio en cuestión que pudieran haber sido fuente de contaminación, así como los posibles materiales o residuos tóxicos presentes o que contaminaron el suelo o el sitio como consecuencia de dichas actividades.
- Los resultados de la caracterización del suelo y de los materiales o residuos tóxicos contaminantes.

308

➤ La información sobre los usos del suelo en el sitio contaminado, de tal manera que después de remediado, puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el ordenamiento ecológico y el programa de desarrollo urbano que resulte aplicable.

➤ Los datos acerca de la toxicidad de los materiales o residuos contaminantes estimada para seres humanos, así como la relación entre las dosis y tales efectos tóxicos.

➤ La concentración de los contaminantes en los distintos medios ambientales y, de ser posible, en los tejidos o fluidos corporales de los individuos expuestos.

➤ La identificación de las principales rutas y vías de exposición de los receptores humanos a las sustancias tóxicas, así como la estimación de la magnitud de la exposición potencial.

➤ Los resultados de la caracterización del riesgo, dada la relación entre la dosis y el efecto de los materiales o residuos tóxicos considerados y la magnitud de la exposición potencial a ellos por parte de los receptores humanos.

309

La evaluación de riesgo ecotoxicológico puede ser definida "como el proceso que evalúa la probabilidad de que efectos ecológicos adversos puedan ocurrir o estén ocurriendo como resultado de la exposición a sustancias tóxicas".

Los pasos principales de la evaluación de riesgos ecotoxicológicos incluyen:

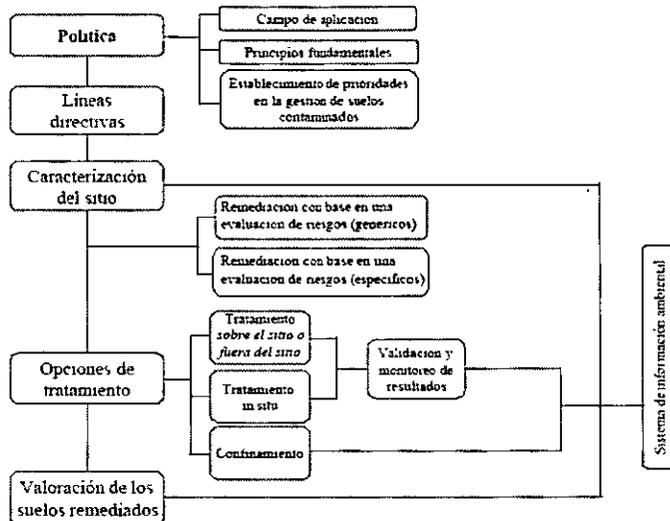
- La formulación del problema.
- La caracterización de la exposición.
- La caracterización de los efectos ecológicos.
- La caracterización del riesgo.

Es importante mencionar que en muchos casos es necesario llevar a cabo las evaluaciones de riesgo tanto toxicológicas como ecotoxicológicas en un mismo sitio, por la exposición, tanto de seres humanos como de sistemas ecológicos a agentes tóxicos. En la actualidad, el establecimiento de límites máximos permisibles con base en criterios ecológicos se encuentra en fase de desarrollo, por lo que se usan como referencia los criterios de protección a la salud humana.

En el diagrama de Opciones de Tratamiento, se muestra el diagrama para la gestión de los sitios contaminados, resaltando la selección de las opciones de tratamiento en función de la política.

310

Opciones de Tratamiento.



311

Para seleccionar las opciones tecnológicas viables para remediar un sitio contaminado, se deben definir primero los objetivos de la remediación (por ejemplo, los niveles de limpieza a los que se debe llegar), en dichos objetivos se debe considerar el uso del suelo

Entre las opciones tecnológicas disponibles, se encuentran las que se mencionan a continuación. Estas se encuentran clasificadas en tres grupos:

a) Biológicas

- Bioremediación
- Fitoremediación.

b) Químicas/físicas

- Extracción de vapores del suelo y aspersión de aire
- Lavado del suelo
- Extracción con disolventes
- Deshalogenación
- Solidificación/estabilización.

c) Térmicos

- Desorción térmica
- Incineración
- Vitrificación

312

Algunos criterios que deben ser considerados para elegir la(s) tecnología(s) más viable(s), se consideran en un proceso que consta de 3 etapas:

a) Exploración inicial de alternativas

- ✓ Costo.
- ✓ Efectos de las alternativas
- ✓ Prácticas de ingeniería aceptables.

b) Análisis detallado de las alternativas

- ✓ Especificación a detalle.
- ✓ Uso de alternativas.
- ✓ Costos detallados
- ✓ Posibilidades de construcción.
- ✓ Efectividad de una tecnología en comparación con otras tecnologías.
- ✓ Análisis de impactos adversos.

c) Comparación entre tecnologías

- ✓ Menor costo.
- ✓ Viabilidad y confiabilidad.
- ✓ Disminución (mitigación) de la contaminación con un daño mínimo.

313

➤ Gestión de suelos contaminados

Como se mencionó previamente, uno de los objetivos de llevar a cabo la remediación de un suelo contaminado, es devolverle (con aquellas restricciones necesarias) al suelo su valor ecológico y/o económico, evitando al máximo que los suelos y otros materiales tratados tengan como destino final el confinamiento. El uso final que se le vaya a dar a los suelos tratados debe ser especificado, teniéndose como opciones más viables las que se mencionan a continuación.

➤ El regreso de los suelos tratados a su lugar de origen, siempre y cuando éstos no generen un impacto al ambiente y tampoco representen un riesgo para la salud y los ecosistemas.

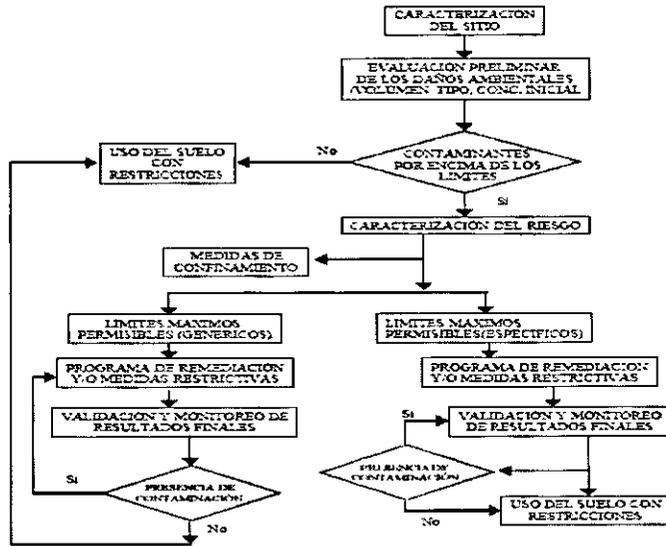
➤ El uso de estos suelos en lugares donde se desarrollen actividades industriales y/o comerciales.

➤ El uso como material de construcción.

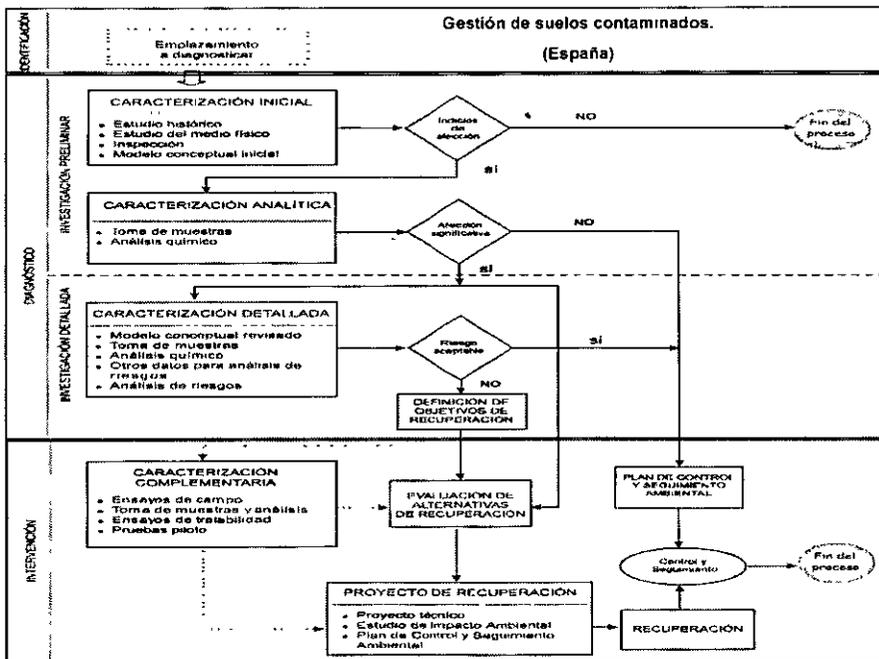
El diagrama general para la Gestión de Suelos Contaminados considera criterios genéricos o específicos de limpieza basados en la evaluación de riesgos. Este es un campo en pleno desarrollo, en el cual México tiene la oportunidad de definir esquemas y estrategias innovadoras y que se ajusten a su realidad.

314

Gestión de Suelos Contaminados (México).



315



☛ Conclusiones.

✓ En México, si bien la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, establece que quien contamine el suelo debe de restaurarlo y señala entre las principales causas de la contaminación del suelo a la disposición de los residuos de toda índole y el uso y eliminación inadecuados de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas, no plantea ninguna disposición con carácter normativo, ni define quién y cómo habrá de regularse esta materia

✓ Tampoco se ha definido ninguna política que, de manera expresa, señale cómo abordar este problema y cuáles serían los instrumentos en que se apoyarían las autoridades para ponerla en práctica.

✓ A pesar de los vacíos normativos en este campo, son muchos los sitios contaminados que han sido remediados, acumulándose una importante experiencia acerca de los alcances y limitaciones de diversas tecnologías, así como de la falta de certidumbre jurídica para quienes están involucrados en estas actividades respecto de la forma en que deben de operar y en su caso ser autorizados para ello.

✓ Tampoco se han desarrollado los procedimientos para evaluar los riesgos a la salud y a los ecosistemas derivados de la contaminación de los suelos o que pueden, incluso, ocurrir con el empleo de ciertas tecnologías empleadas en la remediación de sitios contaminados. Sin embargo, se han constituido grupos de trabajo y organizado diversas reuniones nacionales e internacionales, que han ido constituyendo una base de conocimiento que será muy útil para avanzar en la definición de un marco regulatorio en la materia, sobre todo tendente a prevenir la contaminación de los suelos, como también a lograr su remediación y revalorización.

317

Bibliografía

- ☞ Manual de evaluación y administración de riesgos, V. Kolluru Rao, McGraw-Hill, México, 1998
- ☞ Manual de evaluación y administración de riesgos, V. Kolluru Rao, McGraw-Hill, México, 1998 Parte 1 Panorama general y enlaces.
- ☞ Manual de evaluación y administración de riesgos, V. Kolluru Rao, McGraw-Hill, México, 1998 P
- ☞ Manual de evaluación y administración de riesgos, V. Kolluru Rao, McGraw-Hill, México, 1998 arte 2 Salud.
- ☞ Manual de evaluación y administración de riesgos, V. Kolluru Rao, McGraw-Hill, México, 1998 Parte 3 Seguridad
- ☞ Manual de evaluación y administración de riesgos, V. Kolluru Rao, McGraw-Hill, México, 1998 Parte 4 Ecología.
- ☞ Elementos a considerar para integrar las bases de política para la prevención de la contaminación del suelo y su remediación, PRIMERA EDICIÓN Diciembre de 2001, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental, ISBN: 968-817-495-5, México
- ☞ Tecnologías de remediación para suelos contaminados, Tania Volke Sepúlveda y Juan Antonio Velasco, México: INE-SEMARNAT, 2002, México
- ☞ Investigación de la contaminación del suelo. Guía Metodológica. Toma de muestras IHOBE S.A., Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Departamento de Ordenación del Territorio y Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco
- ☞ Perry's Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, 1999

318