

INFORMES

TÉCNICOS

Lineamientos  
generales  
para la  
evaluación de  
sitios contaminados  
y propuesta  
de acciones  
para su  
restauración

M. en I. Cecilia  
Izcapa Treviño

COORDINACIÓN  
DE  
INVESTIGACIÓN

Área de Riesgos Químicos



**SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN**

**Lic. Santiago Creel Miranda**  
Secretario de Gobernación

**Lic. María del Carmen Segura Rangel**  
Coordinadora General de Protección Civil

**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES**

**M. en I. Roberto Quaas Weppen**  
Director General

**Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro**  
Coordinador de Investigación

**M. en I. Enrique Guevara Ortiz**  
Coordinador de Instrumentación

**M. en I. Tomás Alberto Sánchez Pérez**  
Coordinador de Difusión

**Lic. Gloria Luz Ortiz Espejel**  
Coordinadora de Capacitación

**Profra. Carmen Pimentel Amador**  
Secretaria Técnica

1ª edición, diciembre 2001  
CI/RQ-10122001

©SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN  
Abraham González Núm. 48,  
Col. Juárez, Deleg. Cuauhtémoc,  
C.P. 06699, México, D.F.

©CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES  
Av. Delfín Madrigal Núm. 665,  
Col. Pedregal de Santo Domingo,  
Deleg. Coyoacán, C.P.04360, México, D. F.  
Teléfonos:  
(55) 54 24 61 00  
(55) 56 06 98 37  
Fax: (55) 56 06 16 08  
e-mail: [editor@cenapred.unam.mx](mailto:editor@cenapred.unam.mx)  
[www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)

© Autora: M. en I. Cecilia Izcapa Treviño

Edición: Violeta Ramos Radilla  
Diseño: D.G. Demetrio Vázquez y Susana González  
Responsable de la Publicación: M. en I. Tomás Alberto Sánchez Pérez

ISBN: 970-628-605-5

Derechos reservados conforme a la ley  
IMPRESO EN MÉXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LA AUTORA

Sistema Nacional de Protección Civil  
Centro Nacional de Prevención de Desastres

---

LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA EVALUACIÓN  
DE SITIOS CONTAMINADOS Y PROPUESTA DE  
ACCIONES PARA SU RESTAURACIÓN

AUTORA

M. en I. Cecilia Izcapa Treviño

Coordinación de Investigación

Área de Riesgos Químicos

Diciembre, 2001

## RESUMEN

La contaminación del suelo tiene serias consecuencias ambientales, debido a la migración de contaminantes hacia el aire y el agua superficial y subterránea, efectos nocivos sobre la salud humana cuando la población entra en contacto con el suelo contaminado, por ejemplo por la construcción de desarrollos habitacionales o bien por el uso agrícola del suelo contaminado.

Recientemente los casos de contaminación de sitios naturales y urbanos se han presentado de manera creciente en varios países. Esta contaminación se debe principalmente a la mala disposición de materiales peligrosos en terrenos baldíos, patios traseros de las industrias, tiraderos municipales y barrancas, fugas de tanques y contenedores subterráneos, fugas de tuberías y ductos, lixiviación de materiales en sitios de almacenamiento, así como en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto, aguas residuales descargadas sin tratamiento previo, fugas de alcantarillados, aplicación de agroquímicos y derrames accidentales de sustancias químicas durante su transporte.

En este trabajo se proporcionan los lineamientos generales para llevar a cabo la evaluación, el muestreo y análisis de sitios potencialmente contaminados con sustancias químicas que pueden producir efectos adversos en la salud humana y el ambiente. Para evaluar un sitio contaminado se deben coleccionar y estudiar datos sobre el sitio y obtener muestras de los diferentes medios comprendidos en él (suelo, agua, aire y sedimentos) y analizarlos. Con la finalidad de establecer después la necesidad de restaurar el sitio mediante el uso de alguna tecnología de limpieza. Aquí se presenta el resumen de las principales tecnologías de restauración para suelos y agua subterránea contaminados y los criterios de selección de la tecnología más adecuada.

Una vez que se han evaluado diferentes sitios contaminados a nivel de país es conveniente clasificarlos para establecer prioridades de atención y restauración, y de esta manera optimizar los recursos financieros, materiales y humanos de que se dispone en el país. Para ello se presentan los factores que deben tomarse en cuenta para establecer un sistema de clasificación. En este trabajo se propone un sistema de clasificación cualitativo para aplicar en México, basado en la calificación de diez factores de evaluación.

También se describe brevemente en qué consisten las evaluaciones de riesgo a la salud humana y ecológico, empleadas para establecer los criterios o estándares de limpieza para sitios contaminados con materiales peligrosos.

Por último, se presentan los principales aspectos de la actual legislación, con las últimas modificaciones de diciembre de 1996, en materia de contaminación del suelo, así como su análisis y propuesta de algunos puntos que aún deben tomarse en cuenta.

## ABSTRACT

The soil pollution has a serious environmental consequences, because of the migration of pollutants towards the air and superficial water and groundwater, harmful effects to the human health when people get in contact with polluted soil, by example in the construction of housing developments or in the agricultural use of the polluted soil.

Recently, the cases of pollution of natural and urban sites have been principally caused by the bad disposal of hazardous materials in abandoned sites, industrial back lands, municipal dumps, leaks of pipes, generation tanks and containers, leaks of pipes, generation of leachate in storage places and landfills and dumps, wastewater discharged without treatment, leaks of sewage, application of pesticides and fertilizing and accidental spills of chemical substances during their transportation.

In this document are presented the general guidelines to carry out the evaluation, sampling and analysis of potential polluted sites with chemical substances that can produce adverse effects to the human health and the environment. To evaluate a polluted site is necessary collect and study dates about the site and obtain samples of different mediums (soil, water, air and sediments) and analyze them. With the object to establish after the necessity to restore the site by means of use of some clean up technology. This document has an abstract of the main restoration technologies for soil and groundwater polluted and the selection criterion of the technology more appropriate.

After a country has been evaluated different polluted sites is advisable to classify them to establish priorities of attention and restoration, and thus to optimize the financial, material and human resources available in the country. In this document are presented the factors that should take into account to establish a classification system. In this paper is proposed a qualitative classification system to apply in Mexico, base on in the qualification of the ten evaluation factors.

Also, here is described shortly the ecological and human health risk assessment, used to established standards and criterion to clean up polluted sites with hazardous materials.

Finally, are presented the principal aspects of actual legislation including the last modifications of December, 1996 about soil pollution, thus its analysis and are proposed some points that is necessary to consider.

# CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	1
1.3 OBJETIVOS .....	2
<b>CAPÍTULO 2 ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO</b> .....	3
<b>CAPÍTULO 3 CRITERIOS PARA EVALUAR SITIOS CONTAMINADOS CON SUSTANCIAS QUÍMICAS</b> .....	7
<b>3.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	7
<b>3.2 EVALUACIÓN DEL SITIO</b> .....	8
3.2.1 Evaluación Preliminar del Sitio .....	8
3.2.2 Evaluación Detallada del Sitio .....	11
3.2.2.1 <i>Revisión de Información Disponible</i> .....	12
3.2.2.2 <i>Organización del Grupo de Trabajo y Desarrollo de los Diversos Planes</i> .....	12
3.2.2.3 <i>Trabajo de Campo</i> .....	15
3.2.2.4 <i>Evaluación de Datos</i> .....	16
<b>3.3 PLANEACIÓN DEL MUESTREO</b> .....	16
3.3.1 Objetivos de Calidad de los Datos .....	17
3.3.2 Importancia del Aseguramiento de Calidad/Control de Calidad QA/QC .....	17
3.3.3 Variabilidad de la Muestra.....	20
3.3.4 Rutas de Migración.....	22
3.3.5 Informe de los Datos de Laboratorio .....	23
<b>3.4 MUESTREO</b> .....	24
3.4.1 Principios Generales del Muestreo .....	25
3.4.2 Análisis no Intrusivo e Intrusivo .....	26
3.4.3 Localización de los Sitios de Muestreo.....	27
3.4.4 Esquemas de Muestreo.....	28
3.4.5 Muestreo en Pilas de Materiales .....	28
3.4.6 Profundidad de Muestreo en Suelo .....	28
3.4.7 Tamaño de las Muestras .....	29
3.4.8 Número de Muestras .....	29
3.4.9 Selección de los Sitios de Control .....	30
3.4.10 Protocolos de Muestreo .....	31
<b>3.5 MÉTODOS DE MUESTREO</b> .....	31
3.5.1 Muestreo de Suelo .....	31
3.5.1.1 <i>Muestreo Representativo de Suelo</i> .....	32
3.5.1.2 <i>Selección de los Sitios de Muestreo</i> .....	34
3.5.1.3 <i>Selección del Equipo de Muestreo</i> .....	34
3.5.1.4 <i>Preservación y Almacenamiento de la Muestra</i> .....	36
3.5.1.5 <i>Preparación de la Muestra</i> .....	37
3.5.2 Muestreo de Agua.....	38

3.5.2.1	Muestreo Representativo de Agua.....	39
3.5.2.2	Selección de los Sitios de Muestreo.....	42
3.5.2.3	Selección del Equipo de Muestreo.....	43
3.5.2.4	Preservación y Almacenamiento de la muestra.....	44
3.5.3	Muestreo de Sedimentos.....	46
3.5.3.1	Muestreo Representativo de Sedimentos.....	46
3.5.3.2	Selección de los Sitios de Muestreo.....	47
3.5.3.3	Selección del Equipo de Muestreo.....	48
3.5.3.4	Preservación y Almacenamiento de la Muestra.....	51
3.5.4	Muestreo de Aire.....	51
3.5.4.1	Selección del Equipo de Muestreo.....	52
3.5.4.2	Preservación y Almacenamiento de la Muestra.....	54
 <b>CAPÍTULO 4 CLASIFICACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS .....</b>		<b>55</b>
4.1	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN.....	55
4.2	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN CUALITATIVO.....	64
 <b>CAPÍTULO 5 PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CRITERIOS DE LIMPIEZA .....</b>		<b>71</b>
5.1	FUNDAMENTOS DE LOS CRITERIOS DE LIMPIEZA.....	71
5.1.1	Canadá.....	74
5.1.2	Estados Unidos de Norteamérica.....	74
5.2	DESARROLLO DE LOS CRITERIOS DE LIMPIEZA.....	75
5.2.1	Destino y Transporte de Contaminantes.....	75
5.2.2	Evaluación del Riesgo.....	78
5.2.2.1	Evaluación del Riesgo a la Salud Humana.....	80
5.2.2.2	Evaluación del Riesgo Específico para un Sitio.....	81
5.2.2.3	Evaluación del Riesgo Ecológico.....	83
5.2.2.4	Incertidumbre Asociada a la Evaluación del Riesgo.....	86
 <b>CAPÍTULO 6 TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS CONTAMINADOS .....</b>		<b>87</b>
6.1	RESTAURACIÓN DEL SITIO.....	87
6.2	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO.....	87
6.2.1	Efecto de la Adición de Residuos Peligrosos en las Propiedades Físicas del Suelo.....	90
6.2.2	Efecto de la Adición de Residuos Peligrosos en las Propiedades Químicas del Suelo.....	91
6.3	PROCESOS FISICOQUÍMICOS QUE OCURREN EN EL SUELO.....	93
6.4	FACTORES DE CARACTERIZACIÓN PARA LA RESTAURACIÓN DEL SUELO.....	94
6.4.1	Estudios de Tratabilidad.....	96
6.4.2	Medición e Interpretación de la Efectividad del Tratamiento.....	96
6.5	CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN.....	97
6.6	TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN PARA SUELOS.....	98
6.6.1	Incineración.....	99
6.6.2	Establización/Solidificación.....	100
6.6.3	Vitrificación.....	101
6.6.4	Biorrestauración.....	102
6.6.5	Lavado de Suelo.....	103
6.6.6	Extracción con Vapor.....	104
6.6.7	Cubierta.....	105
6.6.8	Desorción Térmica.....	105
6.6.9	Tratamientos Químicos.....	106

<b>6.7 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO PARA AGUA SUBTERRÁNEA</b> .....	107
6.7.1 Tratamiento Biológico.....	108
6.7.2 Adsorción con Carbón Activado.....	109
6.7.3 Sistemas de Filtración.....	110
6.7.4 Sistemas de Precipitación.....	110
6.7.5 Sistemas de Flotación.....	110
6.7.6 Extracción con Aire.....	111
<b>6.8 MÉTODOS DE DISPOSICIÓN</b> .....	111
6.8.1 Confinamientos.....	112
6.8.2 Formaciones Geológicas.....	112
<b>6.9 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE RESTAURACIÓN</b> .....	113
<b>6.10 INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN</b> .....	115
<b>CAPÍTULO 7 ASPECTOS LEGALES SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN MÉXICO</b> .....	117
7.1 LEGISLACIÓN AMBIENTAL MEXICANA SOBRE CONTAMINACIÓN DEL SUELO.....	117
7.2 LEGISLACIÓN AMBIENTAL MEXICANA SOBRE RESIDUOS PELIGROSOS.....	123
7.3 ANÁLISIS SOBRE LA LEGISLACIÓN EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN DEL SUELO.....	125
<b>CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES</b> .....	127
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	130

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

En años recientes los casos de contaminación de sitios naturales y urbanos se han presentado de manera creciente en numerosos países. Esta situación se genera principalmente por actividades industriales, las cuales han llevado al vertido accidental o intencional de productos contaminantes sobre el suelo y las aguas, y en muchos casos, a emisiones a la atmósfera y a la disposición de productos y residuos tóxicos en sitios sin control.

En México se estima que se generan al año aproximadamente ocho millones de toneladas de residuos peligrosos de origen industrial, sin incluir los jales mineros, residuos que también pueden ser peligrosos y que se producen en grandes cantidades estimadas entre 300,000 y 500,000 toneladas diarias (SEMARNAP/INE, 1996)

La infraestructura existente en México para el manejo de residuos peligrosos es muy limitada, insuficiente para procesar las ocho millones de toneladas que se generan cada año. Se estima que sólo el 12% de los residuos generados en México se controla adecuadamente (SEMARNAP/INE, 1996), lo cual significa que el resto de los residuos peligrosos se disponen de manera inadecuada en diferentes sitios sin control.

Por otra parte, en el periodo comprendido entre 1993 y 1996 se tienen registrados 921 accidentes con sustancias peligrosas que han impactado directamente el suelo por derrames y en muchas ocasiones también el agua superficial y subterránea, de acuerdo con los reportes de accidentes que involucran sustancias químicas de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

En la mayoría de los casos, los suelos se contaminan por la mala disposición de residuos y materiales peligrosos y por el derrame accidental de sustancias químicas, en especial durante su transporte. Esta contaminación genera serios problemas de salud a la población y daños al ambiente por la posible transferencia de sustancias químicas a los diferentes medios, tales como agua superficial y subterránea, sedimentos y aire; así como la imposibilidad de usar el suelo de acuerdo con los fines a los que está destinado.

### 1.2 JUSTIFICACIÓN

Hasta el momento en nuestro país, no se han realizado estudios globales que cuantifiquen y ubiquen los sitios donde se encuentran residuos industriales depositados de manera clandestina, o lugares donde ha habido derrames accidentales de sustancias químicas que hayan contaminado los suelos, los cuales sirvan para establecer mecanismos de control y restauración con la finalidad de evitar problemas de salud en la población y daños al ambiente.

En México, no existen niveles de limpieza para suelos contaminados y se conoce poco sobre el criterio de limpieza obtenido a partir de los resultados del análisis de riesgo a la salud humana y ecológico. Es importante que se desarrollen estos criterios en nuestro país o bien que se adopte el proceso de análisis de riesgo para definir éstos, ya que si un país no cuenta con una estrategia de toma de decisión consistente para determinar cuál propuesta se debe usar para establecer estándares de limpieza para sitios contaminados con sustancias peligrosas, la falta de esta propuesta da por resultado requerimientos de limpieza estrictos o poco protectores en algunos sitios y el desarrollo de estándares ineficientes en otros. Asimismo, no existe en el país un proceso de evaluación de los sitios que actualmente están contaminados, ni está definido un procedimiento para su restauración.

Por lo tanto, para solucionar el problema de suelos contaminados se necesita en un principio ubicar y cuantificar los sitios contaminados y proceder a su estudio y caracterización, para después seleccionar y aplicar técnicas de limpieza para la restauración de los sitios.

Con el presente trabajo, se proponen los lineamientos para la evaluación de sitios contaminados, los cuales podrían usarse para desarrollar los procedimientos y métodos para la caracterización de la contaminación presente en un sitio, así como para su restauración, con la finalidad de elaborar una guía para los responsables de llevar a cabo dicha evaluación y restauración y de esta manera homologar los procedimientos que habrán de aplicarse.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### Objetivo general

Establecer los criterios técnicos y metodológicos para la evaluación y restauración de sitios contaminados con materiales peligrosos.

#### Objetivos específicos

- ♦ Plantear los principios fundamentales que deben tomarse en consideración durante la planeación del muestreo de un sitio contaminado mediante el análisis de la información recopilada.
- ♦ Establecer un sistema de clasificación de suelos contaminados considerando las principales características del sitio, del contaminante y sus impactos.
- ♦ Definir los fundamentos que deben considerarse para el establecimiento de los criterios de limpieza de suelos, a partir de los conceptos de análisis de riesgo.

## CAPÍTULO 2

### ORIGEN DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Durante años, la disposición irresponsable e inadecuada de residuos peligrosos en múltiples lugares sin control ha ocasionado un grave problema de contaminación de suelos. Los lugares donde más frecuentemente se depositan estos residuos son terrenos baldíos, patios traseros de las industrias, tiraderos municipales, barrancas, derechos de vía de carreteras, drenajes municipales y cuerpos de agua, lo cual provoca también el deterioro del aire y del agua superficial y subterránea como consecuencia de la migración de los contaminantes desde el suelo hacia estos medios.

Las prácticas más comúnmente usadas durante décadas para disponer los residuos químicos industriales consisten en colocarlos en tambos y enterrarlos, abandonar los residuos en tanques y contenedores, vaciarlos directamente en el suelo o disponerlos en cuerpos de agua, produciendo todo esto contaminación en los suelos, porque los tambos, tanques y contenedores se corroen y su contenido se fuga al ambiente. Otras formas de contaminación son los tanques de almacenamiento subterráneo con fugas, lixiviación de pilas de materiales, conductos desgastados o rotos y accidentes que involucran derrame de sustancias químicas.

Los problemas relacionados con la contaminación del suelo recientemente han adquirido más relevancia porque ha surgido mayor conocimiento del riesgo potencial que representa para la salud pública y el ambiente, así como por el tamaño del problema y del costo que implica su restauración.

La mayoría de los materiales y residuos peligrosos se pueden clasificar en cuatro categorías generales: hidrocarburos de petróleo, compuestos orgánicos volátiles, compuestos inorgánicos y elementos inorgánicos.

Algunos de los contaminantes más comunes en el suelo son los hidrocarburos de petróleo derramados o depositados durante las operaciones de extracción, refinación, transferencia y comercialización de estos productos, razón por la cual frecuentemente se encuentran suelos contaminados con petróleo, combustóleo, gasolinas, diesel y turbosina.

Otra forma común de contaminación del suelo es por compuestos orgánicos volátiles (COV's), debido a que la mayoría de los procesos de manufactura, desde las industrias de tecnología avanzada hasta los talleres de reparación y establecimientos de limpieza en seco, utilizan algún tipo de solvente halogenado, en especial clorado, con propósitos de lavado o desengrasado.

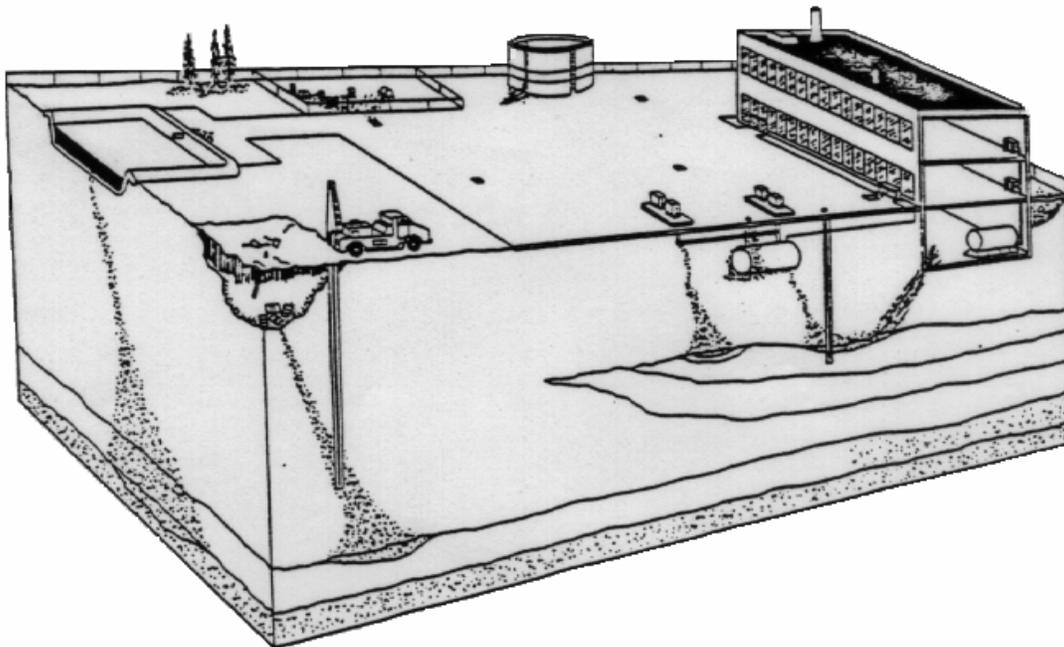
La disposición de compuestos inorgánicos en los suelos, es otro caso de contaminación por desechos peligrosos y actividades específicas como la minería y el recubrimiento de metales.

Las principales causas de contaminación del suelo son:

- ◆ Disposición inadecuada de residuos peligrosos en terrenos baldíos y patios traseros de las industrias
- ◆ Fugas de tanques y contenedores subterráneos
- ◆ Fugas de tuberías y ductos
- ◆ Lixiviación de materiales en sitios de almacenamiento

- ◆ Derrames accidentales de sustancias químicas, en especial durante su transporte
- ◆ Aplicación de sustancias en el suelo, tales como agroquímicos (plaguicidas y fertilizantes)
- ◆ Aguas residuales descargadas sin tratamiento previo
- ◆ Lixiviación de rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto
- ◆ Fugas de alcantarillados

A continuación se presentan a manera de ejemplo, en la figura 2.1, las diferentes formas de contaminación del suelo y del agua subterránea a consecuencia de la actividad industrial.



**Figura 2.1. Diferentes formas de contaminación del suelo y del agua subterránea**

La contaminación del suelo tiene serias consecuencias ambientales. Los efectos a la salud humana ocurren cuando la tierra contaminada se vuelve a utilizar, especialmente si los nuevos usuarios no tienen conocimiento de que el sitio está contaminado y, por ejemplo, se hacen desarrollos habitacionales o la población está en contacto con este suelo de manera accidental. El uso agrícola de suelo contaminado también ocasiona problemas a la salud si los contaminantes se transfieren a los cultivos y al ganado, entrando de esta manera a la cadena alimenticia, produciendo diferentes efectos al organismo dependiendo de las sustancias químicas involucradas.

La contaminación del suelo también tiene impactos ecológicos, por ejemplo; los metales además de sus posibles efectos a la salud humana ocasionan impactos adversos sobre las comunidades de microorganismos y hongos en el suelo. Asimismo, varios contaminantes son capaces de dañar los cimientos de las construcciones.

El lixiviado de sustancias químicas a partir de sitios de almacenamiento y tiraderos de basura, hacia el agua subterránea es una consecuencia muy seria de la contaminación del suelo, ya que provoca la contaminación del agua potable y en ocasiones se disemina a considerables distancias entrando de esta manera en contacto con el hombre.

El suelo debe protegerse para evitar su erosión y contaminación; sin embargo, cuando esta última ocurre debe realizarse, en lo posible, su restauración, dado que es un recurso natural no renovable. El suelo es de vital importancia para sustentar la vida terrestre y entre sus principales funciones se encuentran las siguientes:

- ◆ Actúa como filtro regulador durante la recarga de acuíferos y protección de éstos
- ◆ Es un medio para la producción de alimentos agrícolas y pecuarios
- ◆ Es un productor de recursos forestales
- ◆ Constituye un hábitat biológico y reserva para la preservación de especies
- ◆ Es el lugar donde se llevan a cabo los ciclos biológicos, biogeoquímicos, y de la red trófica.
- ◆ Es la base física para la construcción de edificaciones y servicios

Los problemas de contaminación del suelo en su mayoría ocurren por descuido, negligencia o falta de conciencia y el problema aumenta debido a la creciente industrialización y al uso de sustancias químicas y materiales cuya estructura es cada vez más compleja.

Actualmente, son pocos los países que reconocen y estudian la contaminación del suelo como lo hacen con la contaminación del aire o del agua. Algunos de ellos han empezado a hacer estudios, pero se han estancado en muchos casos por falta de registros históricos sobre el uso del suelo (I&E, 1993).

Sin embargo, debe reconocerse que aunque se ha puesto énfasis en establecer medidas preventivas y reguladoras con el fin de reducir o eliminar la descarga y disposición de materiales y residuos potencialmente peligrosos a la salud y al ambiente, debe evaluarse y dar tratamiento a la contaminación ya existente, y a la que probablemente continuará presentándose. Resaltando la importancia de continuar los esfuerzos para evitar que se siga contaminando el suelo en la misma proporción, ya que para su restauración se requieren complejas y costosas técnicas de limpieza.

## CAPÍTULO 3

### CRITERIOS PARA EVALUAR SITIOS CONTAMINADOS CON SUSTANCIAS QUÍMICAS

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Los suelos se contaminan principalmente a través de las actividades industriales y agrícolas (plaguicidas), por prácticas ambientalmente inadecuadas de disposición de residuos y por derrames accidentales de sustancias químicas. Cuando los contaminantes se acumulan durante un largo tiempo, a velocidad relativamente lenta, los efectos tienden a quedar incluidos dentro de los cambios ambientales generales que tienen lugar con el tiempo en cualquier área. De esta manera, la contaminación que puede aparecer después de muchos años tiene poco impacto discernible en el ambiente local, el cual se ha adaptado a la presencia de contaminantes. La evidencia de efectos directos debido a la presencia de contaminantes en estos casos puede ser difícil de obtener en tales circunstancias.

En cambio, aparentemente es más fácil determinar el impacto que pueden tener los sitios contaminados por las industrias que operaron recientemente.

En el presente capítulo se proporcionan los lineamientos para llevar a cabo la evaluación, el muestreo y el análisis de sitios potencialmente contaminados con sustancias químicas que pueden producir efectos adversos en la salud humana y el ambiente. Sin embargo, debe reconocerse que el procedimiento de evaluación y restauración de un sitio contaminado es altamente específico para cada sitio en particular, por lo que no es factible establecer un conjunto de lineamientos que sea capaz de cubrir todas las situaciones. En esta sección se proponen los principios que deben tomarse en cuenta para realizar la evaluación de los sitios bajo estudio.

Para evaluar un sitio contaminado y establecer la necesidad de restaurarlo es necesario coleccionar, clasificar y evaluar datos sobre el sitio y obtener muestras de los diferentes medios comprendidos en él (suelo, agua, aire y sedimentos). Todo esto requiere de una planeación de actividades adecuada para cumplir con los objetivos del estudio. Estas actividades comprenden la colección de datos, identificación de los principales efectos sobre las personas y el ambiente, diseño de programas de muestreo y análisis, colección y análisis de muestras y el reporte y evaluación de resultados.

La evaluación de un sitio se realiza para:

- Determinar el grado de contaminación
- Establecer medidas de seguridad
- Determinar el nivel de limpieza al que debe llegarse según el análisis de riesgo y el uso del suelo
- Con base en lo anterior establecer las medidas de restauración que mejor convengan de acuerdo con el diagnóstico.

## 3.2 EVALUACIÓN DEL SITIO

La evaluación de un sitio se puede definir como la secuencia planeada y organizada de actividades llevadas a cabo para determinar la naturaleza y distribución de contaminantes sobre y abajo de la superficie del sitio que se ha identificado como potencialmente contaminado (Hobson, D. M, 1993).

La evaluación del sitio es un término ampliamente usado y frecuentemente se emplea para describir la exploración física del sitio. Quizá por esta razón muchas investigaciones terminan o constituyen solamente el examen de un número de puntos no relacionados, sin estrategia coherente o medios de interpretación.

El propósito de la evaluación de un sitio consiste en:

- ◆ Determinar si existe o no liberación de sustancias peligrosas al ambiente, a las personas o a las instalaciones.
- ◆ Identificar y establecer la distribución y concentración de los contaminantes presentes.
- ◆ Desarrollar el programa de restauración del sitio.

Para lograr los propósitos de la investigación se deben definir sus objetivos, determinar el nivel de información requerida y planear apropiadamente las etapas necesarias; con la finalidad de satisfacer las necesidades específicas del proyecto.

El proceso de evaluación del sitio debe empezar con su descubrimiento o con la notificación a la dependencia oficial correspondiente, de la posible liberación de sustancias peligrosas. Todos los lugares se deben anotar en un inventario de sitios con residuos potencialmente peligrosos para tener un control de los reportes. Después se deben evaluar por medio de una investigación en dos etapas: la evaluación preliminar y la detallada.

La evaluación preliminar es el proceso sistemático de análisis de la información, mapas y documentos existentes proporcionados por individuos usuarios o radicados en el sitio o tomados de archivos, para determinar si una propiedad está o puede estar sujeta a contaminación y para determinar la probable naturaleza y localización de la posible contaminación. Esta fase no involucra muestreo ni análisis y consta de dos partes: el estudio del material de documentación y el reconocimiento del sitio (MOEE, 1995 y EPA/540, 1992).

La evaluación detallada es el proceso para confirmar si se sospecha que existe contaminación, y definir la naturaleza y grado de contaminación a través de un programa de muestreo y análisis. Consiste de una etapa de planeación, una de muestreo y análisis químico y otra de interpretación y evaluación de los resultados (MOEE, 1995 y EPA/540, 1992).

### 3.2.1 Evaluación Preliminar del Sitio

El primer paso en el proceso de evaluación de un sitio, generalmente involucra la colección sistemática de información para identificar la contaminación potencial y las posibles fuentes de contaminación. Esta fase es una recopilación de información fácilmente disponible, relativamente rápida y de bajo costo acerca del sitio y sus alrededores. Incluye el reconocimiento del lugar y su ambiente circundante, pero no se lleva a cabo el muestreo:

Esta evaluación incluye las siguientes actividades (MOEE, 1995 y HWSRM, 1994):

- ◆ Análisis de la historia del terreno a través de fotografías del lugar y aéreas, mapas históricos y actuales, mapas de uso de suelo.
- ◆ Descripción detallada de las actividades, procesos de manufactura, materias primas, productos, subproductos y residuos.
- ◆ Conocimiento de las actividades previas a través de información registrada en archivos locales o dependencias reguladoras.
- ◆ Realización de entrevistas con los ocupantes del lugar presentes y pasados, funcionarios de gobierno y vecinos.
- ◆ Realización de visitas para inspeccionar el manejo de los materiales y residuos, de las prácticas de almacenamiento y para localizar el almacenamiento de combustible en instalaciones en operación.
- ◆ Localización de construcciones, tuberías de desagüe, alcantarillas, drenaje y tanques de almacenamiento.
- ◆ Realización de visitas para familiarizarse con la topografía general, condiciones y principales rasgos del lugar y del suelo circundante.
- ◆ Establecimiento de las características geológicas naturales del área a partir de mapas.
- ◆ Revisión de información hidrogeológica del área y localización de acuíferos y suministros de agua.
- ◆ Obtención de datos meteorológicos (clima y pronóstico del tiempo, vientos prevalecientes, niveles de precipitación, perfiles de temperatura).
- ◆ Ubicación de centros de población cercanos y caracterización de la población expuesta al riesgo.
- ◆ Obtención de información sobre especies amenazadas o en peligro de extinción.

Es esencial conocer el proceso y los aspectos químicos de cualquier actividad de manufactura que se haya llevado a cabo o se realice en el lugar, para determinar reactivos, productos, subproductos y residuos que pudieron haber estado involucrados. Esto no incluye sólo actividades de producción directa sino todas aquellas que involucren sustancias químicas que se pudieron haber usado durante la historia del sitio, como podrían ser:

- Programas de mantenimiento.- uso intensivo de detergentes, solventes, lubricantes, ácidos, álcalis, productos de asbesto y sales metálicas.
- Disposición de residuos.- entierro, incineración, concentración de metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos.
- Disposición ilegal en el sitio.- sustancias químicas diversas y otros residuos.

A través de estas actividades, la evaluación preliminar proporciona información respecto a (EPA/540, 1992):

- Generación histórica de residuos y prácticas de disposición de los mismos
- Sustancias peligrosas asociadas con el sitio
- Fuentes potenciales de sustancias peligrosas
- Rutas de migración de contaminantes importantes y medios afectados
- Estudio sobre los receptores sujetos a contaminación
- Localizaciones críticas para toma de muestras en la etapa posterior

En lo posible el recorrido debe hacerse a pie y es mejor caminar primero alrededor del perímetro del terreno antes de inspeccionar el área central y los puntos de interés. Durante el reconocimiento del sitio se deben llevar a cabo las siguientes actividades y tomar nota de (HWSRM, 1994 y Hobson, D. M, 1993):

- ◆ Desarrollar un mapa preliminar, localizando construcciones, contenedores, hoyos, estanques, tanques y pozos de monitoreo de agua subterránea.
- ◆ Confirmar las fotografías aéreas históricas y actuales, tomando nota de:
  - La desaparición de depresiones naturales, hoyos y tierras húmedas
  - Variaciones en la reforestación de áreas dañadas
  - Cambios en la vegetación alrededor de las construcciones
- ◆ Signos de calentamiento o combustión
- ◆ Apariencia del agua superficial
- ◆ Cualquier indicador biológico, tal como animales muertos, vegetación dañada o falta de animales y vegetación propia de la zona
- ◆ Condiciones anormales, tales como vapores, manchas, lugares con aceite u otras sustancias
- ◆ Colores, humos y olores extraños y contaminación obvia
- ◆ Observar la condición y apariencia superficial de los materiales
- ◆ Materiales expuestos en excavaciones y pendientes
- ◆ Observar la presencia de tanques, tambores y otros contenedores y registrar los detalles de cualquier marca, identificación y signos de fuga, derrame o deterioro
- ◆ Ubicar lagos, lagunas, pozos, áreas pantanosas, depresiones
- ◆ Localizar drenajes, caídas de agua, corrientes y cursos de agua, zanjas de irrigación
- ◆ Determinar las rutas de acceso al sitio para investigaciones exploratorias futuras
- ◆ Hacer diagramas de flujo de los procesos y mapas de las áreas de disposición de residuos

Es muy importante la recopilación exacta y amplia de la información histórica del sitio, ya que normalmente es la que dirige cualquier actividad posterior de investigación.

Con la evaluación preliminar se establece la necesidad de investigación posterior y el tipo de muestreo y análisis requerido, o bien sirve para confirmar que el sitio y/o las construcciones están libres de contaminación y que no es necesaria una investigación adicional más detallada.

El reconocimiento del sitio es una actividad que se lleva a cabo para corroborar la información obtenida de la evidencia documental y para añadir más detalles y complementar la información. Esta actividad es muy útil para evaluar las condiciones generales del lugar, las áreas de posible contaminación, para desarrollar el plan de muestreo y prever los peligros potenciales asociados a éste.

### **3.2.2 Evaluación Detallada del Sitio**

La segunda etapa en el proceso de evaluación del sitio consiste en confirmar y describir la contaminación presente a través de un programa de muestreo y análisis de diferentes medios y de los residuos.

Una evaluación detallada debe caracterizar el tipo y extensión de la contaminación en el lugar o confirmar que el contaminante que se sospechaba no está presente. Esta etapa involucra la colección de nueva información por medio de observación visual y muestreo, y tiene como propósitos:

- 1.- Identificar las unidades e instalaciones que no tienen problemas
- 2.- Colectar evidencias de liberaciones de contaminantes
- 3.- Establecer prioridad en las instalaciones para su investigación posterior
- 4.- Identificar el objetivo de acciones correctivas inmediatas o investigación de restauración subsecuente

En esta etapa, los puntos de muestreo deben planearse estratégicamente para identificar los contaminantes presentes, y determinar si estas sustancias peligrosas han impactado objetivos específicos vía agua superficial, agua subterránea, aire y suelo.

Durante la evaluación preliminar surgen recomendaciones para realizar una investigación adicional, las cuales se basan en una sospecha sin sustentación analítica, ya que en esta etapa no se toman muestras de campo. Si después del muestreo para probar las hipótesis de la evaluación preliminar se encuentra que el sitio no presenta amenazas significativas a la salud humana o al ambiente, la evaluación detallada sirve como una segunda investigación para descartar el lugar.

La evaluación detallada consiste en cuatro actividades principales (EPA/540, 1992):

- 1.- Revisión de la información disponible, incluyendo datos analíticos.
- 2.- Organización del grupo de trabajo, y desarrollo de los planes de trabajo, de muestreo, de higiene y seguridad, y de manejo de los residuos generados durante la investigación.
- 3.- Trabajo de campo para inspeccionar visualmente el sitio y coleccionar y analizar muestras.
- 4.- Evaluación e interpretación de todos los datos y preparación del reporte.

El tipo, número y localización de las actividades de muestreo y análisis son específicos del sitio y no se pueden listar genéricamente. La recomendación es llevar a cabo el estudio en las áreas donde se identificó una posible contaminación durante la evaluación preliminar.

### **3.2.2.1 Revisión de Información Disponible**

Antes de desarrollar los planes de la evaluación detallada, el investigador debe revisar los resultados obtenidos a partir de investigaciones previas, particularmente de datos analíticos. Estos datos pueden ayudar a guiar el muestreo adicional, probar las hipótesis sobre el sitio y evaluar amenazas de contaminación en (EPA/540, 1992):

- Pozos de agua potable, por migración de sustancias peligrosas al agua subterránea
- Tomas de agua potable, por migración de sustancias peligrosas al agua superficial
- Piscicultura y ambientes sensibles, por migración de sustancias tóxicas a las aguas superficiales
- Residentes y ambientes sensibles a la contaminación del suelo, y
- Poblaciones y ambientes sensibles, por migración de sustancias peligrosas al aire

### **3.2.2.2 Organización del Grupo de Trabajo y Desarrollo de los Diversos Planes**

Después de revisar los datos que se obtuvieron sobre el sitio, se debe organizar el grupo de trabajo, el cual podría consistir de personal administrativo, científico, técnico y de campo con responsabilidades específicas contenidas en los diferentes planes.

El personal mínimo recomendable para conformar el equipo incluye: el director del proyecto o investigador, el personal de muestreo de campo, el responsable de higiene y seguridad, un químico, un geólogo y un administrador. Sus principales funciones se presentan en la Tabla 3.2.2.2. Es importante señalar que esto es sólo una propuesta para realizar el trabajo de manera más conveniente; sin embargo, tomando en cuenta las posibilidades económicas de México no siempre se podría organizar de esta manera.

Después de evaluar los resultados previos y toda la información pertinente, el director del proyecto debe preparar cuatro planes claros y concisos para documentar los procedimientos de la evaluación detallada del sitio y de esta manera, ayudar a depurar los objetivos de las investigaciones y asegurar que las actividades de la evaluación proceden segura y eficientemente, y deben elaborarse antes de empezar las actividades de campo, estos planes son:

- De trabajo
- De muestreo
- De higiene y seguridad
- De manejo de los residuos generados durante la investigación

Estos planes documentan los procedimientos que van a usarse, los recursos necesarios y los fundamentos detrás de las tareas. El plan de trabajo principalmente cubre las actividades administrativas, mientras que los otros cubren las actividades de campo y pueden ser secciones dentro del plan de trabajo o bien documentos separados. El plan de muestreo contiene la justificación de los sitios de muestreo propuestos y las instrucciones explícitas para la colección de muestras. El de higiene y seguridad describe las acciones para proteger a los trabajadores de acuerdo a procedimientos de operación estándares específicos.

**Tabla 3.2.2.2 Principales funciones del grupo de trabajo (Elaborada a partir de información de EPA/540-R-92-021)**

Personal	Funciones
Director del proyecto	Coordinar todas las actividades del proyecto. Incluye dirigir las actividades de planeación, manejo diario de las diferentes tareas y asegurar que todas las actividades estén documentadas.
Personal de campo	Apoyar durante el desarrollo del plan antes de realizar el trabajo en el sitio, así como realizar las actividades de reconocimiento y preparación del terreno. Debe documentar todas las actividades de campo.
Responsable de higiene y seguridad	Preparar el plan de higiene y seguridad y monitorear estos procedimientos durante la evaluación del sitio, asegurar la certificación del personal y revisar las listas de inspección del equipo de seguridad.
Químico	Realizar la selección de campo, recomendar los trabajos analíticos e interpretar y validar los datos analíticos.
Geólogo	Evaluar la información hidrogeológica, interpretar datos geológicos y supervisar las actividades geofísicas.
Administrador	Preparar las licitaciones para especificaciones y procedimientos, programas de servicios analíticos especiales y operaciones de perforación.

#### Plan de Trabajo (EPA/540, 1992)

En él se especifican los requerimientos administrativos y logísticos, su propósito es programar los recursos tales como personal, equipo y servicios de laboratorio. Para su preparación se requiere un entendimiento global del sitio, sus alrededores y la naturaleza de la posible contaminación y los peligros que puede implicar.

En general, los planes de trabajo incluyen:

- Un resumen de la información previa sobre el sitio, enfatizando de qué manera puede ayudar ésta a identificar los objetivos de la evaluación detallada.
- Objetivos
- Programa de actividades
- Descripción del personal, necesidades de entrenamiento especial, organización de grupos de trabajo, requerimientos de equipo y contratos de servicios.
- Este plan debe tomar en cuenta las condiciones generales y específicas del sitio, tales como:
  - Peligros: Físicos y químicos que pueden encontrarse y cómo afectan éstos los requerimientos de tiempo, gastos, personal o equipo.
  - Ubicación: Facilidad de acceso al sitio, distancia al laboratorio u oficina y forma de envío de las muestras al laboratorio.

- Calendarización: Posibilidad de muestrear en el sitio en la época del año que se planea hacer el estudio o existen limitaciones por pocas horas de luz al día. Afectación por períodos recientes de lluvias o de sequía en los niveles de agua o en la creación de condiciones pantanosas. Presencia de público en ciertas épocas del año.
- Equipos: Requerimientos de tiempo y equipo que necesite llevarse a campo.

#### Plan de Muestreo (EPA/540, 1992)

Durante la evaluación detallada, las hipótesis y suposiciones de la evaluación preliminar, y la información de investigaciones previas ayudan a identificar las áreas específicas que requieren muestreo o datos adicionales. El plan de muestreo especifica los sitios, tipos y número de muestras y los procedimientos analíticos; asimismo, delinea el grupo de recursos humanos con que se cuenta, las necesidades de equipo y el programa de actividades. En la tabla 3.2.2.2.1 se presentan las principales actividades que describe este plan.

#### Plan de Higiene y Seguridad

El propósito de este plan es establecer los requerimientos y procedimientos para proteger la salud y la seguridad del personal de investigación y del público cercano al sitio. Debe especificar los niveles de protección necesarios para cada actividad de campo, proporcionar instrucciones detalladas sobre operaciones de rutina y respuesta en situaciones de emergencia, listar el personal de seguridad clave y describir los requerimientos de monitoreo de salud y seguridad.

#### Plan de Manejo de los residuos generados durante la evaluación

El plan de manejo de los residuos generados durante la evaluación detallada presenta las opciones para este manejo y para cumplir con las regulaciones generales. Estos residuos incluyen cortes de suelo, lodos de perforación, agua subterránea purgada, fluidos de descontaminación (agua y otros fluidos), equipo de muestreo y de protección personal. El director debe dirigir estas actividades y describir los métodos costo-beneficio para el manejo de los residuos peligrosos y no peligrosos con el fin de:

- Minimizar la cantidad de residuos generados
- Dejar un sitio en condiciones similares a las encontradas antes de la investigación
- Remover los residuos que presentan amenaza inmediata a la salud humana o al ambiente
- Cumplir con los requerimientos federales y estatales aplicables en el lugar de estudio

**Tabla 3.2.2.2.1 Descripción de las principales actividades de un plan de muestreo**

Actividad	Descripción
Operaciones de campo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Establecer la secuencia de las actividades de campo</li> <li>- Definir los datos que se toman in situ, como pH</li> <li>- Identificar las funciones de cada trabajador</li> <li>- Definir quién tomará las muestras</li> <li>- Supervisar los procedimientos de custodia de las muestras</li> <li>- Mantener la bitácora de campo</li> <li>- Monitorear el sitio para evitar peligros potenciales</li> </ul>
Selección de sitios de muestreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar la ubicación de cada muestra sobre un mapa del sitio</li> <li>- Explicar los fundamentos para cada localización</li> <li>- Especificar el tipo (suelo, agua, sedimento), volumen y número de muestras</li> </ul>
Control de calidad en campo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar el número, ubicación y tipo de muestras blanco y duplicados</li> </ul>
Descontaminación del equipo de muestreo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar los procedimientos de descontaminación del equipo de muestreo, incluyendo soluciones de descontaminación y cualquier manejo especial</li> </ul>
Requerimientos analíticos y manejo de las muestras	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar los parámetros de análisis específicos (compuestos orgánicos, metales, dioxinas) para cada muestra</li> <li>- Identificar las técnicas de conservación y los reactivos para cada muestra</li> <li>- Especificar si las muestras se van a filtrar y explicar por qué</li> <li>- Identificar el equipo, aparatos de muestreo y tipo de contenedores usados para cada muestreo</li> </ul>
Suministro de muestras	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar dónde se entregan las muestras para embarque o análisis</li> <li>- Especificar condiciones de almacenamiento especial o los requerimientos de transporte</li> </ul>

### 3.2.2.3 Trabajo de Campo

El trabajo de campo involucra el reconocimiento del sitio, las observaciones en campo y el muestreo de los diferentes medios.

El reconocimiento del sitio se realiza antes de empezar el trabajo de campo para estudiar el lugar y las condiciones de las fuentes de contaminación y para verificar los puntos de muestreo. Los análisis de las muestras deben programarse antes de empezar los trabajos de campo.

Las actividades típicas que incluye el trabajo de campo son: (EPA/540, 1992):

- 1.- Completar las observaciones de campo y ubicar exactamente los puntos de muestreo
- 2.- Localización y medición de distancias a los receptores
- 3.- Ubicación de poblaciones cercanas al sitio
- 4.- Colección de muestras de materiales y residuos presentes en el lugar
- 5.- Completar los procedimientos de descontaminación
- 6.- Muestreo de suelo superficial y sub-superficial, de agua superficial y subterránea, de vapores y de sedimento

7.- Empacar y enviar las muestras al laboratorio para su análisis

8.- Análisis geomagnéticos, geofísicos o equivalentes

El tiempo que toma el trabajo de campo es variable dependiendo por ejemplo del tamaño del sitio, si existen varias fuentes de contaminación o si se requiere instalación de pozos de monitoreo de agua subterránea.

#### **3.2.2.4 Evaluación de Datos**

El director del proyecto debe reunir y resumir todos los datos para evaluarlos. Los resultados de las muestras deben permitir evaluar (EPA/540, 1992):

- Las características del sitio y de la fuente
- La presencia de contaminación en diferentes medios (agua superficial, agua subterránea, aire, suelo)
- Receptores actuales o potencialmente expuestos a la contaminación

También debe preparar un reporte de los hallazgos más significativos incluyendo la naturaleza y la historia del manejo de los residuos en el sitio, las sustancias peligrosas detectadas, las rutas de migración de estas sustancias y el impacto sobre los seres humanos y el ambiente.

Los datos colectados durante la evaluación detallada se deben comparar con criterios o valores establecidos como máximos permisibles para suelo, sedimento y agua superficial y subterránea. Esta comparación proporcionará una indicación inicial de si existe contaminación en el sitio y el grado de restauración requerido (MOEE,1995).

Con base en las conclusiones de la evaluación del sitio, la dependencia ambiental correspondiente debe tomar una de las siguientes decisiones:

- La evaluación está concluida
- Se requiere investigación adicional
- Es necesario llevar a cabo la restauración

### **3.3 PLANEACIÓN DEL MUESTREO**

El muestreo se realiza para colectar información, caracterizar la contaminación, identificar y confirmar las rutas de exposición y plantear acciones de restauración. El plan de muestreo generalmente se prepara junto con un plan de seguridad y uno de aseguramiento de la calidad, QA (por sus siglas en inglés, Quality Assurance), los cuales se incluyen como apéndices.

Un plan de muestreo correctamente preparado e implementado permite cumplir con los objetivos del muestreo, ayuda a evitar errores y confusión en el campo, preserva la salud y la seguridad de los trabajadores y ahorra tiempo y dinero.

Cuando el muestreo es limitado, se incrementa la probabilidad de falsos negativos en las muestras. "Falso negativo" significa que una sustancia peligrosa está presente pero no se detecta, esto subraya la importancia de un plan de muestreo bien diseñado, ya que si se elaboran conclusiones con base en ellos se pueden tomar decisiones que no protegen la salud humana y el ambiente. Las muestras de falsos positivos también son indeseables, "Falso positivo" es cuando una sustancia se

detecta pero no está presente en el sitio, su frecuencia normalmente está influenciada por los procedimientos analíticos y de muestreo, y no por el tipo de muestreo (EPA/540, 1992).

### **3.3.1 Objetivos de Calidad de los Datos (CCME, 1993)**

Los objetivos de calidad de los datos OCD (en inglés, Data Quality Objectives, DQO) son un aspecto importante para el aseguramiento de calidad (QA) del proceso completo, desde la colección y análisis de muestras hasta el procesamiento y reporte de los datos. Estos objetivos son estatutos que proporcionan definiciones críticas de la confianza requerida para llegar a conclusiones a partir de todos los datos del proyecto y determinarán el grado de variabilidad total (incertidumbre o error) que puede tolerarse. Los límites de variabilidad deben incorporarse dentro del plan de muestreo y análisis y se logran usando protocolos detallados de muestreo y análisis. Los objetivos de calidad de los datos y de las mediciones (precisión y exactitud) difieren en que los primeros son límites para la incertidumbre total de los resultados y los segundos son sólo límites para la incertidumbre de mediciones específicas.

Los OCDs pueden ser cualitativos o cuantitativos. Los primeros son descripciones específicas de acciones que deben tomarse si una respuesta no satisface el resultado deseado. Ellos no contienen términos cuantitativos pero reflejan decisiones generales que deben hacerse. Los segundos contienen términos cuantitativos específicos que incluyen desviaciones estándar, diferencia de porcentaje relativo y concentración. De esta manera, los OCDs son el grupo de restricciones necesarias para diseñar un estudio.

Los OCDs deben compararse contra los costos de muestreo y análisis para establecer principios más realistas. El costo de muestreo está influenciado por tres factores: la localización del sitio y la accesibilidad a los puntos de muestreo; el número, tipo, complejidad y tamaño de las muestras a coleccionar; y la frecuencia del muestreo. El grado en el cual influyen el costo estos factores depende de los aspectos particulares de cada proyecto de muestreo.

### **3.3.2 Importancia del Aseguramiento de Calidad/Control de Calidad QA/QC (CCME, 1993)**

El objetivo en la colección de muestras para análisis es obtener una porción pequeña y representativa del medio bajo estudio y se espera que puedan reflejar adecuadamente las propiedades de interés. Sin embargo, algunas veces se necesitan muestras no representativas, por ejemplo en una mancha particular de un suelo contaminado, pero las muestras que se tomen de la mancha deben ser representativas. Si las muestras individual o colectivamente no pueden proporcionar información representativa, rara vez valen la pena el tiempo y los gastos de análisis invertidos. Por esta razón, la planeación del muestreo debe ser una parte integral de cualquier estudio.

Desde el inicio del muestreo debe existir documentación clara y precisa que establezca los lineamientos y principios de aseguramiento de calidad (QA) que cubren todos los aspectos de la colección de datos. La tabla 3.3.2.1 lista la documentación mínima necesaria que debe especificarse durante el muestreo.

**Tabla 3.3.2.1 Requerimientos mínimos para documentar el muestreo (CCME, 1993)**

- 
- Fecha del muestreo
  - Hora del muestreo
  - Número de identificación de la muestra
  - Nombre del muestreador
  - Sitio de muestreo
  - Condiciones del muestreo o tipo de muestra
  - Equipo de muestreo
  - Preservación utilizada
  - Tiempo de preservación
  - Observaciones relevantes del sitio de muestreo (datos auxiliares)
- 

Otra consideración importante en la planeación del muestreo y análisis de sitios contaminados es la colección y análisis de muestras para control de calidad (QC) por sus siglas en inglés: quality control. Durante el muestreo y análisis se presentan numerosas oportunidades de errores que contribuyen a la incertidumbre de los resultados analíticos. Las muestras QC de campo ayudan a evaluar los resultados analíticos y los métodos de campo. Estas muestras se deben coleccionar, almacenar, transportar y analizar en la misma forma que las muestras del sitio, y el laboratorio que realiza los análisis no debe saber cuáles son las muestras QC. Estas prácticas aseguran que los resultados reflejan el procedimiento de rutina e indican confiablemente la calidad de los métodos de campo, los métodos analíticos y los datos de las muestras del sitio.

Existen diferentes clases de muestras para el control de calidad, y cada una desempeña una función específica, sirviendo para:

- Estimar el sesgo
- Estimar la precisión
- Determinar diferentes fuentes de error del muestreo
- Determinar diferentes fuentes de error del laboratorio o de los métodos analíticos

Es muy importante seleccionar los tipos correctos de muestras QC para cumplir con los DQOs o de otra manera se desperdicia el tiempo y dinero gastados coleccionando las muestras, obteniendo datos de calidad desconocida (pueden ser buenos, malos o mediocres pero no se sabrá la verdadera calidad). Actualmente hay disponibles programas de cómputo para ayudar a seleccionar los tipos apropiados de muestras QC y aconsejar sobre los usos específicos de éstas.

En la Tabla 3.3.2.2 se resumen los tipos de muestras de campo para control de calidad apropiadas para la evaluación detallada de un sitio.

**Tabla 3.3.2.2 Muestras QC de campo típicas para la evaluación detallada del sitio (Modificada de EPA/540-R-92-021)**

Tipo de muestra	Descripción	Propósito
Duplicado en campo	Son dos muestras colectadas en el mismo lugar y tiempo	Estimar la homogeneidad del medio y la precisión del muestreo
Blanco de campo	Muestras del medio libres de contaminantes que se transfieren de un contenedor a otro en el campo o se exponen a las condiciones de campo	Estimar el sesgo causado por la contaminación introducida durante el muestreo y análisis en el laboratorio; comparar con los blancos de laboratorio y así determinar la fuente de la contaminación
Blanco de transporte	Las muestras se preparan a partir de un medio libre de contaminantes antes de la evaluación del sitio, se colocan en contenedores extra y se mantienen sin abrir durante toda la investigación de campo	Estimar el sesgo debido a la contaminación por migración de compuestos orgánicos volátiles dentro de la muestra durante el transporte desde el campo y durante el almacenamiento en el laboratorio
Replicas o cuarteos	Son muestras divididas que se envían al mismo o a diferente laboratorio para su análisis	Estimar la precisión y exactitud de los instrumentos de análisis del laboratorio
Blancos de enjuague	Son muestras de agua desionizada (o la solución de descontaminación) que se lanza en chorro a través del equipo de muestreo después de la descontaminación y antes de remuestrear	Estimar el sesgo causado por la contaminación del equipo de muestreo; indicar la contaminación cruzada, procedimientos pobres de descontaminación y contaminación potencial debido a los dispositivos de muestreo

Cuando las muestras llegan al laboratorio, se debe cumplir con otro grupo de procedimientos de control de calidad (QC) como parte del protocolo de Aseguramiento de la Calidad (QA) del laboratorio. La documentación completa de todos los registros asociados con los análisis es parte importante de los procedimientos QC del laboratorio. En la tabla 3.3.2.3 se presentan los requerimientos mínimos para documentar el trabajo de laboratorio.

**Tabla 3.3.2.3 Requerimientos mínimos para documentar el trabajo de laboratorio (CCME, 1993)**

- Método de Análisis
- Fecha del análisis
- Nombre del Analista y del Laboratorio
- Cartas de calibración y otras cartas de mediciones
- Límites de detección del método
- Límites de confianza
- Registro de cálculos
- Resultados analíticos

Después de concluir los análisis, inicia la fase de manejo y reporte de los datos, que junto con los programas de QA sirven para producir datos exactos, precisos, completos y representativos. Los procesos involucrados se resumen en la tabla 3.3.2.4.

**Tabla 3.3.2.4 Procesos involucrados en el manejo de los datos (CCME, 1993)**

- 
- Registro y documentación de datos
  - Transmisión, custodia y transferencia
  - Validación
  - Verificación
  - Análisis
  - Manejo
  - Informe
- 

No todos los factores que tienen influencia en la confiabilidad y representatividad de los datos son medibles. Aquellos que sí lo son generalmente se encontrarán si se siguen los procesos de manejo de los datos señalados en la tabla 3.3.2.4. Sin embargo, existen muchos factores que no se pueden medir, los cuales pueden sesgar severamente los datos y no necesariamente se identifican rápido aún con buenos procedimientos de manejo de datos. Algunos de estos factores se presentan en la tabla 3.3.2.5.

**Tabla 3.3.2.5 Ejemplos de factores no medibles (CCME, 1993)**

- 
- Muestreo sesgado
  - Muestrear el área equivocada
  - Muestrear la matriz equivocada
  - No etiquetar los contenedores de las muestras
  - Incorrecto pesado o toma de alícuotas
  - Preservación incorrecta
  - Incorrecta dilución o concentración de las muestras
  - Incorrecta documentación de cualquier procedimiento
  - No reconocer las interferencias específicas de la matriz
  - Usar el método de análisis equivocado
- 

Cuando se han usado buenos procedimientos QA/QC en todo el proceso de muestreo, la información obtenida durante la investigación de un sitio contaminado será confiable y de calidad conocida.

### **3.3.3 Variabilidad de la Muestra (EPA/540, 1992)**

Con el plan de muestreo se minimiza el potencial de errores relacionados con los procedimientos de muestreo; aquellos que resultan de un muestreo inadecuado generalmente son más significativos que los introducidos por los procedimientos analíticos. Para minimizar estos errores, el investigador debe apegarse a los procedimientos de operación estándares; seleccionar el equipo de muestreo, contenedores y conservadores adecuados, así como planear la secuencia y programar la colección de muestras.

Las muestras pueden reflejar la variabilidad en su colección y manejo, o la variabilidad de las sustancias peligrosas con respecto al sitio, el tiempo o el medio.

En la tabla 3.3.3.1 se describe en qué consiste cada tipo de variabilidad y se presentan las recomendaciones que es conveniente seguir para superar esta situación.

**Tabla 3.3.3.1 Tipos de variabilidad de las muestras**

Variabilidad	Características	Recomendaciones
Por manejo y colección de muestras	Pueden cambiar las concentraciones debido a incorrectos procedimientos de muestreo, contaminación cruzada y conservación inadecuada de la muestra. Los problemas de contaminación por aparatos de muestreo, contenedores o materiales de construcción se deben a contaminación cruzada, sorción de sustancias peligrosas y lixiviado de sustancias químicas.	Entrenamiento Realizar todas las actividades de muestreo de acuerdo con los procedimientos de operación. Llevar a cabo una planeación cuidadosa. Verificar la pureza de los conservadores. Determinar el tiempo de almacenamiento dependiendo de la sustancia, la técnica de conservación y el método analítico. Los errores por manejo y colección sólo se pueden corregir con muestreo y análisis adicional.
Variabilidad espacial	Variación de las sustancias y sus concentraciones de un sitio a otro. Depende de la sustancia y las condiciones del sitio. La variabilidad aumenta conforme la fuente se vuelve menos uniforme. En suelos, la variabilidad espacial es significativa. En fuentes homogéneas como líquidos en una fase, esta variabilidad se reduce.	Usar información previa respecto al sitio. Es necesario un buen juicio profesional en la selección de los sitios de muestreo.
Variabilidad temporal	Variación de la concentración de las sustancias con el tiempo. Las concentraciones de las sustancias pueden depender de variables como la hora del día o la estación del año, lo más importante es el clima. Se espera que los niveles de sustancias dependientes del tiempo sigan patrones cíclicos como el clima en un día o en un año.	Identificar la naturaleza cíclica de las concentraciones de las sustancias causadas por la variabilidad temporal. Muestrear cuando se esperan las concentraciones más altas. En algunos casos las variaciones estacionales o los patrones de climas pueden requerir más de un muestreo.
Variabilidad del medio	Los tipos de variabilidad anteriores pueden estar afectados por el medio, éste afecta la sensibilidad, precisión y exactitud de los análisis. - Agua superficial y subterránea: En el agua se produce estratificación de las sustancias. En aguas superficiales profundas se reduce el flujo lo que ocasiona estratificación química y térmica, lo mismo en sitios donde hay mezclado como estuarios o puntos cercanos a la costa. La solubilidad y densidad de las sustancias también puede ocasionar estratificación - Sedimentos y suelos: La variabilidad en las muestras de suelo y sedimento se debe a la heterogeneidad del medio, tamaño y distribución de partículas y el sesgo en el muestreo. La variabilidad es resultado de la heterogeneidad lateral, los horizontes de	Para medios heterogéneos como suelo y agua superficial y subterránea, definir el estrato y especificar las muestras por estrato. No deben compararse muestras de agua superficial con subterránea, agua de influencia de marea con agua dulce, muestras acuosas con muestras de sedimentos, agua de un acuífero de lecho de roca con agua de un acuífero aluvial superficial.  Tomar muestras compuestas verticalmente. Documentar el sitio, profundidad y descripción del suelo como antecedentes para otras muestras. Para poder comparar muestras de diferente profundidad y espesor asegurarse que son del mismo horizonte y tipo de suelo. Cuando existen pendientes en el suelo se debe monitorear dirección y velocidad del

**Tabla 3.3.3.1 Continuación**

Variabilidad del medio	<p>suelo y el tamaño de granos. La principal heterogeneidad en el suelo se debe al material de origen, vegetación, relieve, clima y desgaste por agentes atmosféricos.</p> <p>-Aire: Las concentraciones de las sustancias en el aire varían con las condiciones atmosféricas. Las condiciones que pueden influenciar los resultados son: dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa (que incluye precipitación) y estabilidad atmosférica.</p> <p>- Muestras de tejidos: Existen variaciones en el muestreo de organismos de la cadena alimenticia, porque hay diferencias entre las especies, dentro de una misma especie, movilidad de los organismos y diferenciación de los tejidos.</p> <p>- Material en contenedores: Las muestras a partir de tambores o tanques pueden ser heterogéneas sobre todo estando presentes líquidos que forman capas inmiscibles. Debe tomarse una muestra representativa del líquido a todas profundidades</p>	<p>viento.</p> <p>Monitorear siempre la dirección del viento. La dirección y velocidad del viento pueden necesitarse para establecer el patrón de migración de emisiones de una fuente.</p> <p>Los organismos individuales deben escogerse al azar a partir de una población bien definida.</p> <p>Tomar muestras compuestas a varias profundidades aunque las concentraciones pueden estar subrepresentadas. Si se requieren concentraciones pico deben analizarse varias muestras simples</p>
------------------------	---	---

### 3.3.4 Rutas de Migración

Las rutas de migración son aquéllas por las cuales los contaminantes se mueven o pueden moverse fuera de la fuente de contaminación. Muchas sustancias químicas presentes en un sitio no permanecen estacionarias, sino que migran. Las características físicas de cada matriz, las condiciones meteorológicas, la cantidad y concentración del contaminante presente, la fuente de descarga y la intervención humana afectan la ruta y el destino de la migración.

Las principales rutas de transporte comunes para contaminantes ambientales son viento, lluvia, agua superficial, agua subterránea y las actividades humanas, tales como tránsito vehicular y peatonal, tuberías de agua residual, drenaje y caminos, todo esto provoca que los contaminantes se muevan fuera del área de la fuente.

Los mecanismos de transporte pueden simplificarse en cuatro categorías básicas:

1. Emisión: la liberación o descarga de material contaminado desde una fuente.
2. Advección o convección: la migración normal o el movimiento del contaminante a través del medio (por ejemplo, la corriente de un arroyo, el flujo de aire, la erosión del suelo, arrastre de suelo por corrientes superficiales, etcétera).
3. Dispersión: distribución de contaminantes en un líquido, gas o fase sólida debida a la colisión con el material.
4. Atenuación: la degradación, adsorción o retraso del transporte de un contaminante.

Además de los mecanismos de transporte, las influencias físicas y biológicas también pueden afectar la migración de contaminantes. Las primeras incluyen rasgos topográficos (valles, montañas, pendientes, lagos y ríos) y rasgos geológicos (acuíferos, composición del suelo y composición mineral) las cuales favorecen o impiden la migración de contaminantes. Las influencias biológicas generalmente consisten en rutas alimenticias. La bioacumulación de contaminantes ambientales desde bajas concentraciones en agua, aire y suelo hasta concentraciones más altas a través de las rutas alimenticias de plantas y animales está bien documentada y debe considerarse cuidadosamente cuando se muestrea la biota en sitios contaminados.

A continuación se describen las principales rutas de transporte:

- Rutas hechas por el hombre.- se encuentran presentes en zonas rural y/o urbana y consisten en drenaje sanitario y de lluvia, alcantarillas de drenaje, sistemas de canal de desagüe y caminos.
- Agua superficial. Los contaminantes pueden adsorberse dentro de sedimentos finos, disolverse en agua de desagüe superficial o movilizarse por lixiviados y ser llevados rápidamente por desagüe superficial dentro de zanjas de drenaje, corrientes, ríos, estanques, lagos y tierras húmedas. Cuando se elabora el plan de muestreo de suelo se deben considerar primero las rutas de drenaje superficial.
- Transporte en la zona vadosa. El transporte en la zona vadosa es el movimiento vertical u horizontal del agua y los contaminantes dentro de la zona no saturada del perfil del suelo. Los contaminantes a partir de una fuente superficial o subterránea se pueden percolar a través de la zona vadosa y absorberse dentro del suelo subsuperficial o llegar hasta el agua subterránea y moverse a través de ella.
- Dispersión por viento. Los contaminantes adsorbidos en el suelo pueden migrar desde un sitio con residuos debido al transporte de las partículas por el aire. Dependiendo de su tamaño de partícula y de las velocidades de sedimentación, se pueden depositar viento abajo o permanecer suspendidas, lo que produce contaminación de los suelos superficiales y/o exposición de las poblaciones cercanas. El viento también puede dispersar las sustancias químicas que están en el aire como resultado de la volatilización.
- Actividad humana. El tránsito vehicular y peatonal de los trabajadores de las instalaciones y el personal de muestreo también pueden mover contaminantes fuera de la fuente, aunque en general estas son fuentes menores de migración.

Durante el diseño del esquema de muestreo representativo es importante incorporar las rutas de migración de contaminantes y los mecanismos de transporte para producir buenos planes de muestreo.

### **3.3.5 Informe de los Datos de Laboratorio (CCME, 1993)**

La forma en que se van a presentar los resultados es un área muy controvertida en química analítica ambiental porque afecta la manera en que se reciben los datos y quizá igualmente importante es cómo se perciben y usan por el público.

Las decisiones que establecen la presencia o ausencia de contaminantes son muy importantes cuando las concentraciones de éstos están cercanas a los niveles de detección de los métodos (NDMs).

El nivel de concentración de un NDM se calcula con base en el riesgo de presentar falsos positivos. El nivel de detección del método es la concentración detectable más baja, que representa la concentración a la cual el análisis es confiable.

El NDM y otros cálculos relacionados no son restricciones intrínsecas de la metodología analítica, pero dependen de la precisión que puede lograr un laboratorio específico con una matriz específica cuando usa esta metodología. De esta manera, los NDMs pueden ser muy diversos. Cada laboratorio involucrado en el informe de datos debe evaluar su propia precisión y estimar sus propios valores de NDM para los analitos de interés y para cada tipo de matriz analizada.

Cuando los límites especificados del método están disponibles, una alternativa común y aceptable es verificar que cada instrumento usado puede cumplir o exceder estos límites publicados. Si existe cualquier posibilidad de relación entre la sensibilidad de un método y la habilidad del operador, la verificación del método y el instrumento debe hacerse por cada persona que lo usará.

Los informes de laboratorio deben contener suficientes datos e información de manera que los usuarios de las conclusiones, aún años después, puedan entender las interpretaciones sin tener que hacer las suyas propias a partir de los datos originales. También deben aclarar si algunos resultados se corrigieron por un blanco, citar si se usa una metodología publicada y documentar cualquier modificación que se le haga.

Los formatos de los informes varían, pero en términos generales deben contener lo siguiente:

- Resumen del problema que se está estudiando
- Resumen de los OCDs y si se cumplieron o modificaron
- Descripción del trabajo de toma de muestras, anexando mapas del sitio contaminado donde se señalen los puntos de muestreo
- Descripción de los métodos analíticos con referencias y resumen de cualquier problema analítico que se hubiera presentado
- Resumen de la representatividad de los datos
- Interpretaciones y conclusiones a partir de la información integrada y proporcionada en el informe

### **3.4 MUESTREO**

El primer paso en la planeación del muestreo de un sitio contaminado es definir sus objetivos, los cuales dependerán de la cantidad de datos que ya están disponibles y del propósito de la investigación global (Hobson, D. M., 1993).

El principal objetivo será proporcionar detalles específicos de las condiciones en cada área del sitio, el nivel de contaminación y los datos cuantitativos que permiten un análisis de sus implicaciones.

La investigación del sitio determina si éste está contaminado y a qué nivel, pero también se requiere determinar qué trabajos de restauración y precauciones son necesarios.

El proceso de muestreo debe tender a:

- Identificar los niveles más altos de contaminación
- Describir la distribución de la contaminación espacial y verticalmente

### 3.4.1 Principios Generales del Muestreo (EPA/540, 1992)

Los siguientes principios pueden usarse como base para desarrollar un buen plan de muestreo dependiendo de los objetivos que se persiguen y tomando en cuenta que la aplicación de estos principios puede estar afectada por las circunstancias específicas del sitio, incluyendo clima adverso, problemas del equipo de muestreo, accesibilidad al sitio de muestreo, aspectos de salud y seguridad.

#### - Muestreo para identificar los blancos expuestos a sustancias peligrosas

La identificación de poblaciones o ambientes sensibles expuestos a sustancias peligrosas es una etapa crítica para la protección de la salud pública y el ambiente. La presencia de contaminación en un receptor es muy importante para clasificar un sitio y continuar con acciones de restauración. La ausencia de contaminación en blancos o receptores también es importante porque podría indicar que la salud pública no está amenazada o que no se necesita más investigación. Los receptores son por ejemplo, pozos de agua potable, ambientes sensibles, lugares de pesca.

Como regla general, los puntos de muestreo se deben seleccionar considerando los receptores que pueden estar contaminados por las sustancias peligrosas que están presentes en el sitio. El muestreo debe enfocarse a las rutas de migración y en la dirección de los receptores más cercanos. Se debe evaluar la probabilidad de hallar concentraciones medibles de contaminantes a diferentes distancias a partir de las fuentes del sitio.

#### - Muestreo para identificar sustancias peligrosas presentes en el sitio

El objetivo de muestrear fuentes de contaminación es identificar las sustancias peligrosas presentes en el sitio. Si existen datos previos que documenten los tipos de residuos encontrados en el sitio no es necesario muestrear las fuentes, pero si no hay datos disponibles o confiables es necesario muestrear las fuentes y otros posibles lugares de disposición de residuos.

Si se sospecha que en el sitio están presentes varias sustancias peligrosas, el muestreo debe enfocarse a las sustancias más móviles, las cuales son más fáciles de localizar en un medio específico, particularmente suelo, debido a su gran tendencia a migrar. Hay que considerar que muchas sustancias peligrosas se segregan dentro de uno o más medios debido a sus características físicas y químicas.

#### - Muestreo para demostrar la presencia de una emisión

Si durante la evaluación preliminar se sospecha que existe emisión de una sustancia peligrosa o no está totalmente documentada, el muestreo se debe enfocar a demostrar esta emisión en una ruta.

En ausencia de cualquier otra evidencia, la estrategia de muestreo generalmente debe especificar la colección de al menos dos muestras de cada ruta para demostrar una emisión: una representativa de los niveles naturales y otra gradiente abajo (corriente o viento abajo) de la fuente de contaminación.

#### - Muestreo para discriminar entre fuentes alternativas de contaminación

Si existen múltiples fuentes de contaminación en el área donde está el sitio de estudio, se debe diseñar el muestreo para determinar si éste es al menos parcialmente responsable de la contaminación.

- Muestreo para determinar concentraciones representativas naturales

Para poder determinar si una sustancia peligrosa está presente a una concentración significativamente superior a los niveles existentes naturalmente, es necesario conocer este valor.

El investigador debe considerar si las concentraciones de las sustancias peligrosas están relacionadas a los niveles que existen naturalmente en el sitio o se deben a actividades humanas. Siempre que sea posible se deben emplear los mismos métodos para muestrear y analizar sustancias para determinar concentraciones naturales y actuales.

En algunos casos no es posible coleccionar muestras para determinar condiciones ambientales, por ejemplo en una laguna; en otros casos, las concentraciones naturales no son necesarias o bien las sustancias presentes no existen de manera natural como son los solventes clorados o sustancias radiactivas y por lo tanto, sólo se pueden atribuir a fuentes antropogénicas; si el sitio es la única fuente de estas sustancias los niveles naturales se consideran cero.

- Muestreo para verificar las prácticas de campo y de laboratorio

Las muestras QA/QC ayudan a monitorear cualquier contaminación introducida por los métodos de campo, evaluar resultados analíticos de laboratorio y ayudar a incrementar la seguridad en los resultados analíticos. Las muestras QA están relacionadas con los procedimientos relativos al muestreo, mientras que las muestras QC están relacionadas con los métodos en sí mismos.

### **3.4.2 Análisis no Intrusivo e Intrusivo (OMEE, 1994)**

Para llevar a cabo la evaluación detallada del sitio se puede usar una combinación de técnicas de análisis intrusivo y no intrusivo.

En el análisis no intrusivo se usan aparatos sensores para localizar rasgos bajo la tierra tales como objetos enterrados, lechos de roca o plumas de contaminantes, sin necesidad de excavar. Los principales métodos son los electromagnéticos y los magnéticos. También se puede usar un radar de penetración en la tierra.

Los aparatos electromagnéticos miden cambios en la conductividad de la electricidad. Se pueden usar para detectar estructuras bajo la tierra como tanques de almacenamiento y plumas de contaminantes inorgánicos bien definidas que alteran la conductividad eléctrica. Pero con frecuencia existe un alto grado de interferencia en las lecturas por las estructuras que están arriba de la tierra.

Los aparatos magnéticos miden cambios locales en el campo magnético de la tierra. Pueden detectar estructuras bajo tierra que contienen hierro. Los aparatos magnéticos son más sensibles que los electromagnéticos y no son tan sensibles a la interferencia de las estructuras sobre el suelo.

Los aparatos de radar de penetración en la tierra miden el cambio en la longitud de onda de una señal de radar que resulta por el viaje de la señal a través de la tierra y de regreso al aparato. Este cambio es proporcional a la conductividad eléctrica, la conductividad iónica y el contenido de agua de la tierra. También pueden proporcionar la profundidad al objeto enterrado; sin embargo, en muchos suelos sólo son útiles para detectar objetos cercanos a la superficie y plumas de contaminantes. Ya que la penetración del radar disminuye conforme aumenta el contenido de agua en el suelo, sólo es útil su uso bajo condiciones de suelo relativamente secas.

El muestreo intrusivo es necesario para obtener muestras del medio a partir del cual se pueden hacer las determinaciones analíticas exactas de concentraciones de contaminantes y comparar con los criterios establecidos. Consiste en hacer perforaciones en el suelo para tomar las muestras abajo de la zona de contaminación o del nivel freático hasta donde sea técnicamente posible (al llegar a un lecho de roca). Debe tenerse cuidado para no crear un conducto para la migración vertical de contaminantes, especialmente cuando se perfora a través de capas confinadas. Todas las perforaciones y pozos deben clausurarse correctamente después de que se ha concluido el muestreo y/o el monitoreo.

El estudio de vapores del suelo se puede usar como una técnica de selección de campo para monitorear vapores como indicador de compuestos orgánicos volátiles. Los resultados no se pueden comparar directamente con los criterios establecidos; sin embargo, pueden usarse para ayudar en la determinación del grado de contaminación y para dirigir el muestreo para análisis en el laboratorio. En todos los casos donde se usan estudios de vapor del suelo, se deben realizar análisis de laboratorio confirmatorios para benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), hidrocarburos totales de petróleo (HTP) y otros componentes volátiles que hayan sido determinados de importancia potencial durante la evaluación preliminar.

### **3.4.3 Localización de los Sitios de Muestreo (OMEE, 1994)**

#### **Suelos**

El muestreo debe llevarse a cabo en todas las áreas potencialmente contaminadas que se identificaron durante la evaluación preliminar, estableciendo un número suficiente de puntos de muestreo para delinear claramente cada una de estas áreas, para esto también se necesita muestrear en áreas donde no se sospecha contaminación. La profundidad del muestreo dependerá de la naturaleza de la fuente (subterránea o superficial), la estratigrafía del suelo y textura (arena o arcilla) y el tipo de contaminante (móvil o no móvil), pero el muestreo debe extenderse más allá de la zona contaminada.

#### **Agua superficial y sedimentos**

En lugares donde existen cuerpos de agua superficiales, los puntos de muestreo de sedimentos y agua se deben establecer corriente arriba y abajo en los límites de la propiedad. La localización del muestreo de sedimentos también se debe establecer inmediatamente corriente abajo de cualquier descarga de fuente puntual de la propiedad, dentro de lagunas de tratamiento de aguas residuales y dentro de lagunas y canales que reciben agua de lluvia y agua de desagüe de la propiedad.

#### **Agua subterránea**

Se debe establecer un mínimo de pozos de monitoreo de agua subterránea para cada área que sea fuente potencial de contaminación, aguas arriba y abajo con respecto a la dirección de flujo.

#### **Vapores**

El monitoreo de vapor es necesario sólo cuando se sospecha que están presentes componentes volátiles.

Éstos son sólo requerimientos mínimos propuestos, ya que cada sitio es único y en muchos casos puede requerirse muestreo adicional para determinar apropiadamente la presencia y el grado de contaminación.

### 3.4.4 Esquemas de Muestreo

Con el uso de la información antecedente disponible se puede desarrollar un esquema de muestreo que sea el más apropiado para la situación específica. Un plan de muestreo debe considerar la contaminación original y cómo se han movido los contaminantes con el tiempo. Los principales esquemas de muestreo son:

a) Muestreo simple al azar

Si la intención es interpretar los datos de manera estrictamente estadística se debe adoptar un modelo de muestreo al azar. Desafortunadamente esto tiene varias desventajas porque los puntos de muestreo se distribuyen desigualmente dentro del sitio, se requiere un gran número de muestras para proporcionar un alto nivel de confianza y para ser verdaderamente al azar las muestras deben tomarse de diferentes excavaciones conforme varía la profundidad (Beckett, J.A).

En el muestreo al azar todos los puntos de muestreo tienen igual oportunidad de ser seleccionados.

b) Muestreo de malla

Es el método más ampliamente usado en el que se colectan las muestras con un patrón regular; la localización de los puntos de muestreo se hace sobre una malla, esto tiene la ventaja de igual distribución en todas las partes del segmento y proporciona mejor o más completa cobertura del área que los métodos al azar. Este método se adapta bien a situaciones donde se van a usar métodos geoestadísticos para la interpretación de los datos (Beckett, J.A).

c) Muestreo a juicio

En este tipo de muestreo no existe un patrón organizado y especificado. Los sitios de muestreo se seleccionan únicamente a criterio, siendo entonces que la predisposición o preferencia del muestreador se vuelven dominantes en la selección de puntos. Este método puede ser útil usándolo en conjunto con otros métodos cuando el muestreador tiene excelente conocimiento del sitio y se tiene idea de que hay contaminación significativa presente (OMEE, 1994).

### 3.4.5 Muestreo en Pilas de Materiales

En algunas situaciones es necesario muestrear grandes pilas de materiales. En estos casos pueden presentarse problemas con respecto a la obtención de muestras representativas debido a la dificultad de obtener otras muestras además de las superficiales, y a que algunos materiales se separan en fracciones finas y gruesas cuando están apilados, por lo tanto probablemente las tomadas en la superficie no sean representativas. La mejor manera es tomar muestras compuestas, para ello deben tomarse suficientes muestras a diferentes profundidades para caracterizar el perfil de profundidad y la variación espacial lateral de las sustancias de interés dentro de la pila. Los puntos se seleccionan al azar, con excepción de los puntos en que se sospecha existe la mayor concentración, los cuales sí deben muestrearse (OMEE, 1994).

### 3.4.6 Profundidad de Muestreo en Suelo (Beckett, J.A, 1993)

La profundidad a la cual se deben tomar las muestras depende de la variabilidad de los materiales encontrados y del nivel de detalle requerido. Las perforaciones pueden pasar a través de varias capas individuales de diferente material las cuales representan diferentes segmentos y al menos se debe tomar una muestra de cada segmento encontrado. Los segmentos que se extienden a la misma profundidad requieren varias muestras tomadas a diferentes niveles.

Se recomienda un mínimo de tres muestras en cada excavación, una en la superficie, una a la mayor profundidad y una en un punto al azar entre las dos. Lo más caro de la evaluación es el muestreo a varias profundidades, una vez que se excava hay que tomar suficientes muestras, ya que es relativamente barato el análisis subsecuente comparado con el costo de excavación.

### 3.4.7 Tamaño de las Muestras (CCME, 1993)

Debido a que se usan diversas técnicas analíticas para determinar diferentes sustancias químicas, se deben tomar muestras suficientemente grandes para los múltiples análisis. También es útil tomar muestras grandes porque permite a los laboratorios analizar muestras por duplicado o volver a analizar una muestra si se duda de un resultado, ya que algunas técnicas para ciertos analitos en matrices complejas no están bien desarrolladas.

Cada método analítico requiere un tamaño específico de muestra y la forma apropiada de colectarla. Sin embargo, se puede coleccionar una muestra simple y usarla para determinar diferentes analitos.

### 3.4.8 Número de Muestras (CCME, 1993)

Existen varios factores que influyen en el número de muestras que necesitan tomarse en un sitio contaminado; este número se determina con base en lo siguiente:

- Dependiendo de las distintas áreas que existen dentro del sitio.
- En caso de existir varias áreas se debe evaluar si es necesario tomar muestras de cada una de ellas. Si no existen diferentes áreas, se debe observar qué tan dispersos están los puntos de muestreo dentro del área simple.
- Determinando el número de métodos analíticos que tienen que utilizarse.
- Si son más de uno, evaluar si es necesario aplicar todos los métodos a todos los puntos de muestreo.

Generalmente se necesitan diferentes métodos analíticos para varios tipos de contaminantes orgánicos, por ejemplo compuestos halogenados, no halogenados, volátiles, no volátiles. Lo mismo ocurre para diferentes matrices de muestras, por ejemplo agua superficial o subterránea, residuos sólidos o líquidos, aire o suelo.

- Estableciendo cuántas muestras de control del sitio son necesarias.

Generalmente se necesita una o más muestras de cada tipo de matriz si se está diferenciando entre muestras contaminadas y no contaminadas.

Si todas las muestras contienen concentraciones de contaminantes superiores a los criterios, ya no es necesario tomar muestras de control. También en el caso de residuos sólidos o líquidos heterogéneos, por ejemplo a partir de tambores, no es posible obtener muestras de control.

- Determinando los tipos de muestras necesarias para control de calidad.
- Determinando el número necesario de cada tipo de muestras de control de calidad.

El número depende de aquellas que se especifican en un método particular y/o del número calculado a partir de consideraciones estadísticas para alcanzar los objetivos de calidad de los datos.

- Evaluando si es necesario tomar muestras exploratorias; si es así, establecer el número de muestras a partir de cada punto de muestreo.
- Evaluando la necesidad de muestras suplementarias para realizar posibles análisis posteriores, en tal caso establecer el número de muestras a partir de cada punto de muestreo.
- Considerando los fondos disponibles contra el costo de muestreo estimado.

Tomando en cuenta los puntos anteriores se puede determinar de manera gruesa el número total de muestras necesarias con la siguiente fórmula:

$$\text{Muestras totales} = \text{No. de muestras de prueba} + \text{No. de muestras de control} + \text{No. de muestras Q. C.} + \text{No. de muestras exploratorias} + \text{No. de muestras suplementarias}$$

Donde:

No. de muestras de prueba = No. de métodos X No. de sitios de muestreo X No. de muestras por sitio

No. de muestras de control = No. de matrices en los sitios de muestreo

No. de muestras QC = porcentaje de muestras de prueba o un número calculado estadísticamente

No. de muestras exploratorias = porcentaje de muestras de prueba y suplementarias o un número determinado a juicio

De esta manera, el número de muestras dependerá de los recursos disponibles, el grado de confianza requerido en los datos y los objetivos del estudio.

### **3.4.9 Selección de los Sitios de Control (CCME, 1993)**

Los sitios de control son importantes porque sirven para demostrar si éste está contaminado y/o tiene concentraciones de contaminantes diferentes a las concentraciones naturales. Los sitios de control se deben seleccionar con características comunes a las áreas contaminadas.

Las muestras tomadas en los sitios de control se deben coleccionar y analizar bajo las mismas condiciones de las muestras para el estudio del lugar, para que la concentración de los contaminantes de interés y los efectos de la matriz sobre los análisis se puedan estimar con un grado aceptable de certidumbre. La excepción en la colección de muestras para determinar condiciones naturales es cuando se tienen contenedores o tambores con materiales potencialmente peligrosos; sin embargo, si se sospecha que las sustancias químicas están contaminando el suelo, agua o el aire alrededor de ellos, entonces deben tomarse muestras para analizar condiciones naturales de cada una de estas matrices.

Existen dos tipos de sitios de control: local y de área, la diferencia se basa en la cercanía de éstos con el sitio de estudio.

Los sitios de control local están adyacentes o muy cerca de los puntos de muestreo y se deben considerar los siguientes principios para su selección:

- Deben estar viento arriba, corriente arriba o pendiente arriba del punto de muestreo
- Cuando sea posible, las muestras del sitio de control local deben tomarse primero para evitar contaminación a partir del lugar de muestreo
- Se deben minimizar los viajes entre los sitios de control y de muestreo para reducir la contaminación potencial causada por las personas, equipo y vehículos

Un sitio de control de área está en la misma zona del punto de muestreo, por ejemplo en la misma ciudad pero no adyacente a él, para su selección se consideran los mismos factores que para los sitios de control local, en general se prefieren estos últimos porque están físicamente cercanos, y los de área sólo se recomiendan cuando no se puede encontrar uno local.

#### **3.4.10 Protocolos de Muestreo (CCME, 1993)**

Los protocolos de muestreo son descripciones escritas de los procedimientos detallados que deben seguirse en la colección, empaque, etiquetado, preservación, transporte, almacenamiento y documentación de las muestras. Estos protocolos deben hacerse durante la planeación del muestreo.

Los protocolos deben identificar los puntos de muestreo e incluir toda la información necesaria para el muestreo: equipos y dispositivos, tipo, número y tamaño de los contenedores, etiquetas, volúmenes de muestras, números y tipos de blancos, , instrucciones de preservación, sucesión de procedimientos de custodia, planes de transporte, cualquier preparación en campo (tal como filtración o ajuste de pH), mediciones en campo (pH, oxígeno disuelto) y el formato de reporte.

También se deben identificar las variables físicas, meteorológicas e hidrológicas que deben registrarse o medirse al momento del muestreo.

La información respecto a los métodos analíticos, los volúmenes mínimos de muestra, los niveles de cuantificación mínimos deseados y el sesgo analítico y los límites de precisión pueden ayudar al personal de muestreo a tomar mejores decisiones cuando se requieren cambios en el protocolo de muestreo por circunstancias imprevistas.

La selección de los métodos analíticos es parte importante del proceso de planeación del muestreo e influye en gran medida en los protocolos de muestreo, también puede afectar la selección de los contenedores de almacenamiento y las técnicas de preservación.. Por ejemplo, la sensibilidad del método analítico influye en el volumen de muestra requerido para medir contaminantes a niveles de detección mínimos.

### **3.5 MÉTODOS DE MUESTREO**

#### **3.5.1 Muestreo de Suelo (CCME, 1993)**

La contaminación presente en un suelo está sujeta a una gran variabilidad como son los tipos de contaminantes, sus propiedades físicas y químicas, el cambio de concentración a lo largo de todo el sitio y el tipo de suelo. Otra característica única de los suelos es la lentitud de migración de los

contaminantes de un sitio a otro; de manera que un sitio puede volverse a muestrear en una hora o más sin que haya ocurrido un cambio significativo en los contaminantes o sus concentraciones.

Los suelos se caracterizan por diferentes tipos de variación, no son una masa homogénea sino un cuerpo heterogéneo de material. Debido a esto se han delineado las unidades de clasificación de suelos que se parecen en homogeneidad entre ellas y que son diferentes a las otras unidades. Las diferencias entre ellas pueden ser grandes o pequeñas dependiendo, entre otras cosas, del efecto de los factores que formaron los suelos.

Sin embargo, sobre este patrón de características de cambio lento se pueden marcar variaciones locales que pueden ser por causas naturales, tales como variaciones abruptas de la vegetación, de la topografía o modificaciones hechas por el hombre.

Las propiedades del suelo varían no sólo de un sitio a otro, sino también los horizontes de un perfil dado. Los límites del horizonte pueden ser más distintivos que los límites superficiales de una unidad de clasificación de suelo. También se encuentran zonas de transición entre horizontes adyacentes. Además, puede existir considerable variación local dentro de un horizonte particular.

Todas estas características deben considerarse cuando se muestrea suelo. La porción de suelo que se va a muestrear debe subdividirse horizontal y verticalmente, dentro del estrato de muestreo que sea lo más homogéneo posible.

Otra característica del muestreo de suelo es el submuestreo. En muchos estudios de suelos es muy útil el submuestreo o muestreo multietapas. Con esta técnica la unidad de muestreo seleccionada se divide en elementos pequeños y la característica bajo consideración se mide en una muestra de estos elementos extraída al azar a partir de la unidad.

La principal ventaja del submuestreo es que permite estimar alguna característica de la unidad de muestreo sin necesidad de medir la unidad completa. De esta manera se reduce considerablemente el costo de la investigación. Sin embargo, al mismo tiempo generalmente disminuye la precisión con la cual se estima la característica. En cada etapa del muestreo se añade una componente adicional de variación al error de muestreo. Por lo tanto, el uso eficiente del submuestreo depende del balance entre el costo y la precisión.

### **3.5.1.1 Muestreo Representativo de Suelo (CCME, 1993)**

Con un muestreo representativo se asegura que una muestra o grupo de ellas refleja exactamente la concentración del parámetro de interés en un tiempo dado. Sin embargo, debido a que los suelos son extremadamente complejos y variables frecuentemente requieren diferentes métodos de muestreo.

El personal de campo debe seleccionar los métodos que se acomoden mejor a las necesidades específicas del muestreo. El colector es el responsable de proporcionar las muestras apropiadas para el análisis en laboratorio, de tamaño adecuado y representativas de la población a evaluar.

La acumulación de contaminantes arrastrados por el viento, especialmente los depositados recientemente, es evidente en la capa superficial de suelo, mientras que los depositados por derrames de líquidos o por acumulación a largo plazo de materiales solubles en agua, se pueden encontrar a varios metros de profundidad. Las plumas que emanan de tanques de residuos peligrosos o fugas de tanques de almacenamiento pueden encontrarse a considerable profundidad.

Debido a la heterogeneidad de la muestra, con frecuencia se presentan problemas de incertidumbre en el suelo y en otras matrices ambientales, porque la representatividad excede mucho a la incertidumbre inherente a la colección y análisis de las muestras y es casi imposible cuantificarla. En este caso se deben explicar claramente las descripciones cualitativas de las incertidumbres debidas a las limitaciones del muestreo y documentar las suposiciones asociadas.

Algunas muestras se colectan deliberadamente sin ser representativas. Los estudios iniciales en un sitio contaminado se pueden enfocar a las áreas obviamente contaminadas. Aunque tales muestras no representarán las condiciones promedio, pueden establecer las concentraciones de los analitos de interés del peor caso. Aún en estas situaciones es importante obtener muestras para determinar condiciones naturales de la matriz de suelo en sitios de control local o de área.

La variabilidad aumenta con la heterogeneidad de los suelos, el tamaño y distribución de las poblaciones de muestreo, y el sesgo de los métodos de muestreo y análisis. Como las muestras de suelo son heterogéneas es mejor seleccionar una muestra de prueba tan grande como práctica para su preparación. Un extracto o solución digerida será más homogénea y proporciona más alícuotas reproducibles que una porción de la muestra más pequeña.

Las muestras compuestas pueden ayudar a superar la falta de homogeneidad en el tiempo o en la distribución de especies químicas. Al mismo tiempo las muestras compuestas pueden diluir los valores pico de interés. Pero si las concentraciones pico de los analitos son importantes, las muestras compuestas se deben reforzar con muestras simples que se toman en sitios y tiempos donde se sospechan los valores más altos.

Las muestras simples son muestras colectadas en un punto específico en un sitio en un periodo de tiempo muy corto (típicamente segundos). Generalmente son más baratas de obtener que las compuestas y se pueden tomar varias muestras simples en el mismo punto en un periodo de tiempo, cuando se desea información relativa a cambios en las concentraciones de analitos con el tiempo (por ejemplo, en corrientes de agua o en muestras de aire).

Las muestras compuestas se obtienen de la combinación de porciones de varias muestras simples. La composición se puede hacer simplemente colectando y combinando muestras simples o usando dispositivos de muestreo automáticos especialmente diseñados.

Las técnicas de muestreo compuesto se emplean para obtener una muestra más representativa de matrices heterogéneas, en las cuales las concentraciones de contaminantes pueden variar en periodos de tiempo cortos. Sin embargo, no siempre es buena opción hacer muestras compuestas, por ejemplo en el caso de agua para análisis de compuestos orgánicos volátiles siempre deben colectarse muestras simples, ya que puede haber pérdida de los compuestos volátiles durante la composición de muestras.

El muestreo compuesto sirve para reducir el costo del análisis cuando se tiene un número grande de muestras. Los costos experimentales disminuyen sustancialmente si se hace muestreo compuesto cuando es baja la frecuencia de muestras individuales que contienen los analitos de interés. En estos experimentos las alícuotas de las muestras individuales se combinan para formar muestras compuestas y cada una de éstas se analiza. Sin embargo, deben considerarse las siguientes limitaciones del muestreo compuesto:

- Cuando se consideran varios analitos en una muestra compuesta, se pierde la información respecto a las relaciones de los analitos en las muestras individuales.

- La composición puede diluir el analito a un nivel abajo del límite de detección produciendo un falso negativo.
- Si los costos de muestreo son mayores que los costos analíticos puede ser mejor analizar cada muestra individualmente.

### 3.5.1.2 Selección de los Sitios de Muestreo (CCME, 1993)

Una vez que se decide el esquema de muestreo el siguiente paso es seleccionar los puntos de muestreo. Para el esquema estadístico, la selección del sitio exacto de cada punto de muestreo es crucial para lograr representatividad, pudiendo influir por ejemplo, la dificultad en la colección de una muestra en un punto dado, la presencia de vegetación o la decoloración del suelo.

Los puntos de muestreo se localizan usando varios métodos. Uno relativamente simple para ubicar puntos al azar consiste en medir con un compás y una cinta métrica o bien a pasos para ubicar estos puntos con respecto a una marca relativamente permanente. Entonces las coordenadas aéreas de los puntos de muestreo se dibujan en un mapa y los puntos de muestreo se marcan para futuras referencias. Cuando el diseño del muestreo demanda un grado de precisión más grande se debe localizar cada punto por medio de estudio. Después de la colección de la muestra en campo, cada punto de muestreo se debe marcar de manera que todos los sitios se puedan encontrar otra vez si es necesario.

Una recomendación para el número de puntos de muestreo en suelo es la siguiente (Hobson, D.M, 1993):

Área (ha)	No. de puntos de muestreo
0.5	15
1.0	25
5.0	85

### 3.5.1.3 Selección del Equipo de Muestreo (CCME, 1993)

Los métodos de muestreo de suelos pueden diferir en detalle, pero todos usan uno de los siguientes tres equipos básicos: pala de mano, taladro, o dispositivo para obtener núcleos.

Se deben tomar en cuenta dos consideraciones principales cuando se selecciona un equipo de muestreo específico: las condiciones del suelo y los contaminantes que se van a analizar a partir del material colectado. Las condiciones del suelo pueden ser extremadamente variables de un sitio a otro. Por ejemplo, los suelos pueden ser húmedos o secos, pedregosos, cohesivos (por ejemplo arcilla) o menos cohesivos (por ejemplo, arena). Similarmente, los contaminantes son muy diversos, variando entre metales los cuales en muchos casos son relativamente inmóviles, a sustancias solubles en agua muy móviles, hasta contaminantes que son volátiles.

El uso y selección inapropiado del equipo de muestreo pueden dar por resultado datos que no son representativos del suelo que se está estudiando. Los resultados basados en experiencia previa o a partir de una prueba equivalente pueden usarse para evaluar y seleccionar el equipo apropiado para un objetivo de muestreo específico. La Tabla 3.5.1.3 proporciona una lista de los equipos de muestreo de suelo comúnmente usados.

El equipo se debe seleccionar después de considerar la profundidad a la que se va a tomar la muestra, las características del suelo y la naturaleza del contaminante (orgánico o inorgánico, volátil o no volátil). El muestreo superficial se recomienda para derrames o contaminación reciente y para velocidades de migración bajas. Si los contaminantes son volátiles o han estado en contacto con el suelo por un largo periodo de tiempo, se recomienda muestrear a mayores profundidades.

Las características del suelo determinarán los patrones de migración de los analitos y también las características de los equipos de muestreo. La naturaleza de los analitos influye en la profundidad del muestreo, el equipo y algunas veces en los materiales de que está construido.

Para muestreo superficial o poco profundo de 15 a 30 cm se pueden usar cucharas o palas, aunque no se obtienen muestras muy similares. Estas herramientas no son recomendables para suelos contaminados con compuestos volátiles, ya que se pueden volatilizar durante el muestreo y obtener muestras no representativas. Generalmente los cucharones y palas deben ser de acero inoxidable para contaminación con compuestos orgánicos, y de polietileno de alta densidad para el caso de especies inorgánicas.

Para obtener muestras reproducibles en suelo superficial o poco profundo, es adecuado usar un punzón o sacabocado u otro dispositivo de tubo de acero de pared delgada, los cuales se introducen dentro del suelo a la profundidad deseada y queda retenida la muestra, después ésta se transfiere a un contenedor o bien algunos muestreadores de tubo están diseñados para transportar en ellos las muestras sellando los extremos del tubo.

El muestreo a profundidades mayores a 30 cm requiere diferentes técnicas y dispositivos. Haciendo trincheras se pueden obtener perfiles de los analitos, pero generalmente es más caro que otras técnicas. Las trincheras se deben excavar aproximadamente a 30 cm más que la profundidad de muestreo deseada. Después se usa un perforador de suelo para excavar lateralmente y obtener la muestra.

Los taladros eléctricos o manuales también son útiles para obtener muestras a mayor profundidad de 30 cm. Existen diferentes tamaños de taladros y las muestras se pueden obtener directamente a partir de los cortes del taladro. Sin embargo, puede presentarse contaminación cruzada entre capas de suelo, contaminación por el material de corte, no reproducibilidad en el tamaño de muestra y pérdida de componentes volátiles. Una técnica más recomendable es llegar hasta la profundidad deseada con un taladro y luego obtener la muestra con una sonda para suelo. Los cortes deben removerse con cuidado después de la perforación para evitar contaminación cruzada entre capas de suelo. Estos equipos se colocan dentro del suelo a la profundidad requerida y retienen la muestra conforme se retiran, después ésta se transfiere a un contenedor y se envía al laboratorio.

**Tabla 3.5.1.3. Equipo para muestreo de suelo (CCME, 1993)**

Equipo	Aplicación	Ventajas y desventajas
Probador (en inglés, Trier)	Suelo superficial suave	Barato; fácil de usar y descontaminar; difícil de usar en suelos con piedras, secos o en arena
Pala o cuchara	Suelo superficial suave	Barato; fácil de usar y descontaminar; deben evitarse cucharas con superficies pintadas
Sembrador de bulbos de tulipán	Suelo suave 0-15 cm	Fácil de usar y descontaminar; diámetro y volumen de muestra uniforme; conserva el núcleo de suelo (adecuado para compuestos orgánicos volátiles y muestras sin alterar) capacidad de profundidad limitada; no es útil para suelos duros
Dispositivo para obtener núcleos de suelo	Suelo suave 0-60 cm	Relativamente fácil de usar; conserva los núcleos de suelo (adecuado para compuestos orgánicos volátiles y muestras sin alterar) capacidad de profundidad limitada; difícil de descontaminar
Muestreador de cuchara	Suelo 0 cm-lecho de roca	Excelente intervalo de profundidad; conserva el núcleo de suelo (adecuado para compuestos volátiles y muestras sin alterar) se puede usar una cubierta de acetato para ayudar a mantener la integridad de las muestras para compuestos volátiles; útil para suelos duros; se puede usar junto con una plataforma de perforación para obtener núcleos más profundos
Muestreador de tubo de pared delgada (tubo shelby)	Suelo suave y duros como arenas y gravas 0 cm-lecho de roca	Excelente intervalo de profundidad; conserva el núcleo de suelo (adecuado para compuestos volátiles y muestras sin alterar); el tubo se puede usar para enviar la muestra al laboratorio sin alterar; se puede usar junto con una plataforma de perforación para obtener núcleos más profundos; no es durable en suelos rocosos
Taladro eléctrico de operación, manual	Suelo 15 cm-5 m	Buen intervalo de profundidad, generalmente se usa junto con un taladro para coleccionar la muestra; destruye el núcleo de suelo (inadecuado para compuestos volátiles y muestras inalteradas); requiere dos o más operadores; puede ser difícil de descontaminar; el motor de gasolina es potencial de contaminación

Durante todo el muestreo y el manejo de las muestras se debe tener cuidado para prevenir contaminación cruzada. También debe tenerse cuidado al ademar y con el lodo residual producto de la perforación para evitar contaminación de las muestras. El equipo se debe limpiar cuidadosamente entre sitios y se deben usar contenedores limpios y apropiados. Es aconsejable avanzar en el muestreo del sitio menos contaminado a los más contaminados para minimizar el potencial de contaminación cruzada.

#### **3.5.1.4 Preservación y Almacenamiento de la Muestra (OMEE, 1994)**

En la tabla 3.5.1.4 se muestran los materiales apropiados de los recipientes para diferentes clases de compuestos, así como algunos procedimientos que deben seguirse.

En general, los contenedores de muestras se deben sellar tan rápido como sea posible después de tomar la muestra, el espacio libre debe minimizarse y refrigerarse inmediatamente. Se recomienda mantener las temperaturas de refrigeración a menos de 4 °C hasta el análisis. Como temperaturas ligeramente superiores a 4 °C por periodos cortos de tiempo son poco probables de afectar significativamente la calidad de la muestra, la máxima temperatura permitida se establece en 10 °C.

Los análisis de compuestos orgánicos deben hacerse lo más rápido posible después de coleccionar la muestra. Las muestras no se pueden almacenar indefinidamente para el análisis de estos compuestos.

**Tabla 3.5.1.4 Contenedores para muestras de suelo (OMEE, 1994)**

Grupo de compuestos	Contenedor	comentarios
Inorgánicos	plástico, vidrio	
Compuestos orgánicos volátiles	vidrio, de preferencia viales con tapas de septum de teflón	Mantener frío (<4 °C) en campo.
Hidrocarburos poliaromáticos y nitrosaminas	vidrio color ámbar, enjuagado con solvente, tapas forradas de teflón u hoja de metal	En campo mantener frío a <10 °C y no exponer a la luz. Refrigerar para almacenar
Ftalatos	vidrio enjuagado con solvente, tapas forradas de teflón	En campo mantener frío a <10 °C y no exponer a la luz. Refrigerar para almacenar. No poner en contacto con plásticos durante el muestreo
Otros compuestos orgánicos	vidrio enjuagado con solvente, tapas forradas de teflón	En campo mantener frío a <10 °C y no exponer a la luz. Refrigerar para almacenar

Si se requiere extracción o digestión con ácido se debe hacer lo antes posible, después los extractos o soluciones digeridas se pueden guardar los tiempos de almacenamiento prescritos. Las muestras de corazones enteros o porciones grandes de ellos se deben enviar al laboratorio envueltas en papel aluminio lavado con solvente y seco o selladas en botellas de vidrio. Para muestras de corazones son útiles las botellas de medio litro de boca ancha.

Los cambios más frecuentes en muestras de suelo, sedimento y agua son pérdida de compuestos volátiles, biodegradación, oxidación y reducción. Las temperaturas bajas reducen la biodegradación y algunas veces la pérdida de compuestos volátiles, pero el congelamiento en muestras de suelo que contienen agua puede causar pérdida de gases, fractura de la muestra o separación de una fase ligeramente inmiscible. Las muestras en condiciones anaerobias no se deben exponer al aire. El secado con aire es apropiado para metales y otros analitos no volátiles, pero puede haber pérdida de compuestos orgánicos volátiles si están presentes en el suelo y éste se somete a secado con aire.

### **3.5.1.5 Preparación de la Muestra (OMEE, 1994)**

#### Para análisis de compuestos inorgánicos

Las muestras se deben esparcir en charolas no metálicas en ambiente libre de polvo y secarse al aire por 48 horas o hasta que no haya signos evidentes de humedad. Alternativamente se puede tomar una submuestra de una muestra bien mezclada y determinar su humedad por secado en horno para reportar los resultados en peso base seca. Después la muestra se disgrega con un mortero y se tamiza a través de un tamiz de 2 mm. La fracción mayor a 2 mm se desecha. Después se muele una fracción de la submuestra de menos de 2 mm hasta que pasa toda por un tamiz de 355 mm. La fracción menor de 355 mm se usa para todos los análisis inorgánicos excepto para la relación de

adsorción de sodio, conductividad eléctrica y boro extraído con agua caliente, para los cuales se usa la fracción menor de 2 mm.

Los materiales parecidos al suelo se tratan igual, excepto que la muestra completa se muele para pasar por una malla de 355 mm y todas las pruebas se hacen con la fracción menor de 355 mm.

Las rocas y materiales parecidos a las rocas se deben moler o triturar para pasar por una malla de 2 mm y se toma una submuestra a partir de la muestra bien mezclada para análisis.

#### Para análisis de compuestos orgánicos

Para análisis de compuestos orgánicos el suelo ni se tamiza ni se seca, ya que estas operaciones podrían ocasionar la pérdida o remoción de algunos compuestos de interés. En lugar de esto se toma una submuestra de la muestra bien mezclada y se determina su humedad. Este valor se usa para calcular los resultados analíticos en peso base seca. Al tomar una submuestra para análisis de compuestos orgánicos se debe evitar incluir piedras o material de cascajo, porque podría sesgar los resultados debido a su desproporcionado peso en la pequeña submuestra.

Las muestras para análisis de compuestos orgánicos volátiles deben permanecer selladas y enfriadas a  $< 4$  °C hasta que se analicen. Si se requiere molienda porque se sospecha que hay esquistos que contienen compuestos orgánicos volátiles (COV's) se debe volver a resellar inmediatamente después de molerla.

### **3.5.2 Muestreo de Agua (CCME, 1993)**

Existen diferentes tipos de aguas que pueden muestrearse, las cuales requieren distinto equipo de muestreo, pero una vez que se colectan muchas de ellas se tratan de manera similar.

Los tipos de agua más comunes para muestreo en todos los sitios son aguas superficiales (ríos, lagos, embalses artificiales, escurrimientos, etc.) aguas subterráneas y agua de manantial, aguas residuales (drenajes de minas, lixiviados de rellenos sanitarios, efluentes industriales, etc.) y hielo. Otros tipos de agua que se muestrean con menos frecuencia son aguas salinas, aguas de estuarios y agua de mar, aguas que resultan de la precipitación y condensación atmosférica (lluvia, nieve, niebla y rocío) aguas de procesos, agua potable y vapor.

Las aguas generalmente son muy heterogéneas tanto espacial como temporalmente, lo que hace difícil obtener muestras verdaderamente representativas. Los sólidos con gravedades específicas ligeramente mayores que la del agua normalmente son sustancias inorgánicas, las cuales permanecen suspendidas en el flujo y forman estratos en canales que fluyen lentamente. Los aceites y sólidos más ligeros que el agua (generalmente compuestos orgánicos) flotan sobre o cerca de la superficie. Algunos líquidos, tal como compuestos orgánicos halogenados son más pesados que el agua y se hunden quedando en el fondo. La composición química de lagos y lagunas también varía significativamente dependiendo de la estación del año. La composición de las aguas que fluyen como corrientes depende del flujo y de la profundidad.

La estratificación dentro de algunos cuerpos de agua es común. En lagos con profundidad menor de 5 m la acción del viento generalmente ocasiona mezclado, de manera que no es probable que se presente estratificación térmica ni química por periodos prolongados; sin embargo, ambos fenómenos pueden existir en lagos más profundos. Ríos poco profundos de cauce rápido no muestran estratificación química o térmica, pero los ríos profundos pueden exhibir ambas. La estratificación

también puede existir en lugares donde se unen dos corrientes, como el punto donde un efluente entra en un río.

La estratificación también es un problema del muestreo de océanos; varias especies se pueden estratificar a diferentes profundidades. Además, generalmente la composición de las aguas cerca de la costa difiere bastante de las aguas alejadas de ésta. El muestreo estuarino es aún más complejo porque las estratificaciones varían desigualmente.

La contaminación de muestras de agua siempre es un problema, y aumenta en importancia conforme los niveles de concentración del analito disminuyen. Las fuentes de contaminación de alguna manera pueden depender del cuerpo de agua que se está muestreando. Por ejemplo, en el monitoreo de agua subterránea, la contaminación a partir de los materiales de construcción del pozo puede ser significativa. Sin embargo, muchas fuentes potenciales de contaminación son comunes a todas las muestras de agua.

La vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación está afectada por la profundidad del agua, la rapidez de recarga, la composición del suelo y la topografía (inclinación), así como por la volatilidad y persistencia de los analitos que se están determinando. En la planeación de las estrategias de muestreo del agua subterránea es necesario el conocimiento de las características físicas y químicas del sistema del acuífero. Las aguas subterráneas presentan especiales retos para obtener muestras representativas.

### **3.5.2.1 Muestreo Representativo de Agua (CCME, 1993)**

Las siguientes recomendaciones son de aplicación general para la colección de muestras representativas de agua:

- No incluir partículas grandes no homogéneas en la muestra, tal como hojas y detritus.
- En aguas que fluyen, colocar el aparato de muestreo corriente arriba para evitar contaminación y para que el personal de muestreo pueda observar si viene algún material flotando que pueda contaminar la muestra.
- Colectar un volumen suficiente de agua para permitir repetir los análisis y pruebas de control de calidad. Si no está especificado, el volumen básico requerido es la suma de los volúmenes para los análisis de todos los parámetros de interés.

Para sitios abandonados o inactivos puede ser más apropiado coleccionar muestras de sedimentos que muestras acuosas.

#### **a) Colección de muestras representativas a partir de Ríos y Corrientes**

Para evaluar la contaminación del agua superficial antes de identificar los sitios de muestreo, los investigadores deben determinar si el drenaje por tierra o la descarga de agua subterránea al agua superficial puede contaminar un cuerpo de agua superficial. Generalmente, si no existen aguas superficiales dentro de 3 200 m (2 millas) (EPA, 1992) del sitio no es necesario evaluar la contaminación del agua superficial.

Para desarrollar el plan de muestreo de agua superficial deben considerarse los tipos y ubicación de los cuerpos de agua cercanos al sitio y la persistencia de las sustancias peligrosas y la

rapidez de flujo, ya que flujos de alto volumen tienden a dispersar y diluir sustancias peligrosas más rápido que flujos de bajo volumen.

Para sitios de muestreo de agua localizados en una extensión homogénea de un río o corriente es adecuado coleccionar muestras simples a profundidad. Para corrientes pequeñas se toma una muestra simple en el centroide del flujo y se debe colocar aproximadamente al 60 % de la profundidad de la corriente en un área de máxima turbulencia.

Para sitios de muestreo localizados en una extensión de un río o una corriente no homogénea es necesario muestrear la sección transversal del canal en un número específico de puntos y profundidades. El número y tipo de muestras dependerá de la profundidad, ancho y descarga; la cantidad de sedimento suspendido que se está transportando; y la vida acuática presente. Generalmente, entre más puntos se muestren a lo largo de la sección transversal más representativa será la muestra compuesta. Normalmente son suficientes de 3 a 5 puntos de muestreo vertical y son necesarios menos para corrientes angostas y poco profundas.

#### b) Colección de muestras representativas de agua subterránea

Para coleccionar muestras representativas de agua subterránea se necesitan considerar factores estacionales, tales como la época del año en que se hará el muestreo, si se muestrea antes o después de la estación de lluvia, o si el muestreo se hace después de períodos de alto uso de productos químicos agrícolas.

Los pozos de monitoreo no deben instalarse a menos que sea necesario, esto es sólo si durante la evaluación preliminar existe potencial de contaminación del agua subterránea. Antes de decidir instalar pozos, se debe considerar lo siguiente (EPA/540, 1992):

- Profundidad al acuífero y tipo de materiales geológicos
- Probabilidad de detectar contaminación en los pozos de monitoreo
- Costos de la instalación
- Importancia de la salud pública

El objetivo principal de instalar pozos es coleccionar datos del agua subterránea que pueden usarse para demostrar que ha habido una emisión de contaminantes. Otros objetivos pueden ser delinear la pluma de la sustancia peligrosa o trazar el movimiento de una sustancia (EPA/540, 1992).

La perforación puede crear interconexiones entre acuíferos kársticos, la instalación de pozos en estos acuíferos generalmente no se recomienda debido a la alta probabilidad de introducir sustancias peligrosas dentro de ellos (EPA/540, 1992).

En la construcción y uso de pozos de monitoreo se debe minimizar la alteración del agua que se muestrea, cuidando durante el proceso de perforación de no producir contaminación cruzada de los acuíferos con la capa superior de suelo que está suelta, posiblemente contaminada con sustancias químicas o agrícolas. También la construcción de pozos y los materiales empleados pueden influenciar la composición química de las muestras.

Antes de coleccionar las muestras se purgan los pozos para eliminar el agua estancada. El método y la rapidez de purga, el tiempo entre la purga y el muestreo, y el muestreo en sí, dependerán del diámetro, profundidad y rapidez de recarga del pozo. En cada pozo se debe probar la presión o bombeo para determinar la conductividad hidráulica de la formación y estimar la cantidad y rapidez de purga antes del muestreo.

Algunas veces es útil monitorear cambios en el pH, temperatura o conductancia en muestras consecutivas para determinar el momento en que la muestra es representativa, esto es cuando los valores dejan de cambiar.

No deben compararse muestras de un acuífero de lecho de roca con un acuífero aluvial superficial aunque los dos están hidrogeológicamente conectados.

El material de construcción del pozo debe seleccionarse cuidadosamente. El cemento usado para unir tubería de cloruro de polivinilo (PVC) puede lixiviar dentro de las muestras en los pozos, lo cual se puede evitar usando tubería enroscada. El equipo para construir pozos de monitoreo debe ser de acero inoxidable u otro material inerte.

Los dispositivos de muestreo y los contenedores de la muestra siempre son probables fuentes de contaminación por lixiviación de contaminantes, por ejemplo el PVC que contiene zinc, hierro, antimonio y cobre puede lixiviar estos metales dentro de las muestras de agua. El PVC flexible y otros plásticos pueden lixiviar ésteres de ftalato que enmascaran otros contaminantes. El polietileno que contiene antimonio, también puede lixiviarlo. Los restos de muestras que quedan en el muestreador deben evitarse al tomar la siguiente muestra. La Tabla 3.5.2.1 muestra los tipos de contaminantes generados por los materiales usados en los dispositivos de muestreo y en la construcción de pozos de monitoreo. El plomo y el estaño son contaminantes comunes del agua que se transporta a través de tubería soldada. El agua que contiene altos niveles de calcio tiende a extraer plomo, mientras que el estaño se remueve en pequeñas cantidades a lo largo de muchos años.

Durante la evaluación de la contaminación del agua subterránea se deben incluir muestras de blancos de equipo, campo y condiciones naturales. La selección se debe hacer considerando todas las probables fuentes de contaminación para cada situación específica.

**Tabla 3.5.2.1 Contaminantes potenciales debido a los dispositivos de muestreo y al revestimiento de los pozos (CCME, 1993)**

Material	Contaminantes
PVC rígido con uniones roscadas	Cloroformo
PVC rígido con uniones cementadas	Metil etil cetona, tolueno, acetona, cloruro de metileno, benceno, compuestos orgánicos de estaño, tetrahidrofurano, acetato de etilo, ciclohexanona, cloruro de vinilo
Tubería de teflón rígida o flexible	No detectable
Tubería de polipropileno rígida o flexible	No detectable
Tubería de PVC flexible	Esteres de ftalato y otros plastificantes
Tubos soldados	Estaño y plomo
Contenedores de acero inoxidable	Cromo, hierro, níquel y molibdeno
Contenedores de vidrio	Boro y silicón

Otro problema común es la sorción del analito en los materiales de construcción de los contenedores y muestreadores, el PVC y otros plásticos tienden a adsorber compuestos orgánicos y lixiviar plastificantes y otras sustancias químicas usadas en su manufactura. Algunos plaguicidas y compuestos halogenados se adsorben fuertemente en vidrio. En el laboratorio es importante enjuagar los contenedores de muestra con solvente de extracción antes de transferir la muestra de agua cuantitativamente dentro del aparato de extracción.

Los materiales termoplásticos (por ejemplo, polipropileno) absorben muchos analitos orgánicos, por lo tanto se debe evitar su uso en dispositivos de muestreo.

La sorción de metales a bajas concentraciones en las paredes del contenedor depende de la especie metálica, su concentración, pH, tiempo de contacto, composición de la muestra y el contenedor, y la presencia de compuestos orgánicos disueltos y agentes complejantes. Este problema normalmente se evita preservando las muestras con ácido.

### **3.5.2.2 Selección de los Sitios de Muestreo (CCME, 1993)**

Para obtener muestras de agua representativas es importante el uso de técnicas de muestreo apropiadas y un buen juicio, ya que en campo existen varias situaciones que requieren diferentes técnicas de muestreo. Por ejemplo, los casos en que el agua es poco profunda se manejan de manera y con aparatos diferentes que los usados en sitios con agua profunda.

#### Ríos y Corrientes

Las características fluviales de una estación de muestreo pueden cambiar con la época del año. Cuando se establece una estación de muestreo sobre un río o corriente deben considerarse los flujos anuales mínimo y máximo y la accesibilidad durante todo el año.

Las variaciones en la calidad del agua con el tiempo requieren que se colecten las muestras en ríos y corrientes con la frecuencia y en la hora del día apropiadas para asegurar que los resultados sean representativos de las variaciones.

La accesibilidad a las estaciones de muestreo algunas veces puede ser difícil; por lo que es común colectar muestras de agua y/o sedimento desde puentes. El principal sitio de muestreo generalmente debe estar en el centro del puente con sitios de muestreo adicionales cercanos cuando existen discontinuidades espaciales.

Aunque el muestreo desde puentes presenta algunas ventajas obvias, también pueden existir algunos problemas de contaminación, ya que muchas de estas estructuras están hechas de metales, concreto o madera con creosota se debe tener cuidado para evitar contaminación por metales pesados, iones y compuestos orgánicos. Además, debido al tráfico vehicular pesado en estas estructuras, existe la posibilidad de contaminación de las muestras por combustibles con plomo.

Para evitar la contaminación de las muestras, el muestreo desde un puente debe hacerse del lado corriente arriba de la estructura.

### Agua subterránea

El muestreo de agua subterránea y de pozos municipales y domésticos debe hacerse antes de cualquier proceso de purificación o tratamiento. Esto determina con más exactitud qué contaminantes están en el acuífero. La cloración, filtración, eliminación de dureza y otros tratamientos pueden alterar químicamente o absorber los analitos de interés. El conocimiento del uso de sustancias químicas en o cerca de los pozos proporciona información valiosa, como es el uso de blanqueador en los pozos domésticos como desinfectante.

Los pozos en sitios contaminados se deben perforar aguas arriba y abajo del lugar donde se sospecha la contaminación. Cuando se trata de sitios de disposición de residuos peligrosos no es recomendable llevar a cabo la perforación dentro de los residuos porque existe la posibilidad de encontrarse con situaciones desconocidas y potencialmente peligrosas, y crear conductos por donde viajen los contaminantes y lleguen directamente al acuífero. Una malla similar a la usada para muestreo de suelos se puede emplear para coleccionar muestras en el sitio.

### Lagos

El muestreo de agua de lagos tiene menos variación temporal pero mayor variación espacial que el muestreo de un río o una corriente. Esta observación favorece el uso de lagos para evaluar tendencias a largo plazo, reduciendo los costos del monitoreo. Como regla general, las estaciones de muestreo de agua y sedimento en lagos se deben localizar cerca del centro, a la mayor profundidad, para evitar efectos de contorno o borde. La profundidad del lago debe ser al menos de 10 m para tener condiciones térmicas estables. Debe evitarse el muestreo en lagos pantanosos y en lagos que se alimentan de grandes entradas, porque es posible que dominen las características de la corriente.

Las estaciones de muestreo se deben localizar en los sitios más elevados del estanque (laguna, represa, cuenca de un río) lejos de tierras agrícolas y áreas urbanas, para evitar efectos locales por acumulación atmosférica.

Las muestras de lagos generalmente se coleccionan usando lanchas de aluminio, balsas de plástico y ocasionalmente helicópteros. Se debe hacer un proyecto específico para el uso de estos medios de transporte poniendo énfasis en los analitos a determinar. Por ejemplo, si los metales pesados son el principal interés se debe usar una lancha de plástico, mientras que es más adecuado una lancha de aluminio para muestrear compuestos orgánicos tóxicos. Sin hacer caso del tipo de embarcación que se use, las muestras nunca deben tomarse en la popa del bote, donde flota aceite y gasolina del motor fuera de borda que pueden contaminar las muestras.

#### **3.5.2.3 Selección del Equipo de Muestreo (CCME, 1993)**

Los dispositivos de muestreo deben ser de materiales compatibles con la matriz y los analitos de interés. Las partes metálicas deben ser de acero inoxidable, no deben usarse metales pintados o con recubrimientos. Es importante tomar los blancos del equipo (enjuagues) usando agua bi o tridestilada para enjuagar el equipo de muestreo antes de usarlo.

El uso de plástico de silicón grado médico en las bombas peristálticas evita la contaminación de la muestra con peróxidos orgánicos que se usan para fabricar el plástico de silicón grado convencional, si se coleccionan especies orgánicas el resto de la tubería debe ser de teflón. Cuando se muestrea para determinar los parámetros de calidad del agua (pH, color, oxígeno disuelto) se debe

usar tubería de PVC calidad grado alimenticio para evitar contaminación de las muestras con compuestos fenólicos.

Si el dispositivo adsorbe el analito en estudio o produce interferencia analítica significativa, las muestras no son válidas y debe usarse otro medio de muestreo.

En cuerpos de agua grandes las muestras se colectan en forma manual, generalmente los muestreadores automáticos se usan para tomar muestras de corrientes y descargas de agua residual. El factor más importante para el uso de muestreadores automáticos es la destreza del usuario.

Los muestreadores están diseñados para coleccionar muestras discretas o compuestas y muchos son capaces de acumular muestras en intervalos de tiempo o muestras proporcionales al flujo. Existen varios diseños de muestreadores automáticos y su selección depende del uso que se le quiera dar, siendo los factores más significativos los siguientes:

- Velocidad de entrada
- Hermeticidad
- Calidad eléctrica o aislamiento
- Calidad a prueba de explosión
- Facilidad de operación y reparación en campo

Las muestras de agua para analizar compuestos orgánicos volátiles siempre son simples y se usan viales de vidrio con tapas forradas con teflón sin dejar espacio libre. Cuando los analitos de interés son metales, las muestras se colectan en contenedores de plástico (generalmente polipropileno) o de vidrio añadiendo ácido nítrico para su estabilidad.

Los muestreadores discretos pueden tomar muestras individuales a intervalos de tiempo uniformes y retenerlas en contenedores separados para su análisis. Existen dos modos de operación opcionales, los intervalos de tiempo no uniformes y el muestreo proporcional al flujo sin considerar el tiempo. Los intervalos de tiempo no uniformes dan la opción de programar diferentes tiempos entre muestras, son útiles cuando existen variaciones en el flujo o en las concentraciones del analito.

Los muestreadores compuestos mezclan las muestras en un contenedor simple, su ventaja es que se pueden tomar muchas muestras frecuentes y obtener una muestra en un tiempo promedio. Para obtener una muestra proporcional al flujo se colectan pequeñas alícuotas a pequeños incrementos de flujo.

#### **3.5.2.4 Preservación y Almacenamiento de la Muestra (CCME, 1993)**

Los conservadores se deben preparar con reactivos de alta pureza y cuidando de no contaminar la muestra de agua con impurezas contenidas en el conservador que se añade. Se debe fortalecer la práctica de añadir agua destilada ultrapura a las botellas para blancos de campo en el laboratorio antes de iniciar el viaje al campo. La preservación de los blancos puede hacerse en el campo.

La estabilidad de los analitos de interés depende de qué tan bien se preserven las muestras. Las instrucciones de preservación deben especificar los contenedores apropiados, pH, protección a la luz, ausencia de espacio libre, adición de sustancias químicas y control de la temperatura. Se deben considerar las propiedades químicas de todos los analitos y reconocer que ciertas reacciones como hidrólisis pueden ocurrir aún bajo condiciones de preservación recomendadas.

Los tiempos de almacenamiento varían con el analito, la técnica de preservación y la metodología analítica empleada. Generalmente, cada método de análisis especifica los tiempos máximos de almacenamiento.

Las muestras de agua están en un estado químicamente dinámico y en el momento en que se remueven del sitio de muestreo pueden tener lugar procesos químicos, físicos y biológicos que cambian su composición. Las concentraciones de los analitos se pueden alterar debido a volatilización, adsorción, difusión, precipitación, hidrólisis, oxidación y efectos fotoquímicos y microbiológicos.

Los compuestos orgánicos presentes en aguas residuales pueden cambiar debido a la actividad microbiológica. Estas muestras y las que contienen analitos orgánicos se deben enfriar inmediatamente, almacenar y enviar al laboratorio a bajas temperaturas (4 °C).

Los analitos también pueden formar sales que precipitan, lo más común es la precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos debido a que los iones metálicos reaccionan con el oxígeno. Esta precipitación se previene adicionando ácido nítrico; la combinación de pH bajo (menor de 2) y iones nitrato mantiene muchos metales en solución. En especial los ácidos clorhídrico y sulfúrico pueden causar precipitación de sales insolubles y/o interferencias analíticas.

El cloro libre en una muestra puede reaccionar con compuestos orgánicos y formar productos clorados; para remover el cloro se añade tiosulfato de sodio.

A las aguas que contienen cianuros o sulfuros se les añade hidróxido de sodio para asegurar que no se forme cianuro de hidrógeno o sulfuro de hidrógeno. Las aguas con amoníaco se preservan adicionando ácido sulfúrico; sin embargo, pueden precipitar otros cationes, especialmente metales, por lo que se requiere separar las muestras cuando los analitos de interés son cianuros, sulfuros o amoníaco.

Existen situaciones para las cuales se requiere filtrar la muestra antes del análisis y en algunos casos no debe filtrarse. La filtración puede afectar la composición química de la muestra por la remoción del material particulado, la pérdida de compuestos volátiles y la oxigenación de la muestra que ocasiona precipitación y remoción de metales en solución.

Las necesidades de filtración se obtienen del laboratorio y están en función de la necesidad de eliminar la interferencia causada por la presencia de partículas en las muestras de agua, en algunos casos los componentes disueltos pueden ser el único interés de la muestra.

Generalmente se recomienda que las muestras de agua subterránea de pozos de monitoreo para análisis de metales se filtren a presión en campo antes de su preservación y análisis. Las muestras colectadas para determinar metales normalmente se acidifican; la acidificación de muestras sin filtrar puede llevar a la disolución de minerales a partir de arcillas suspendidas. Las muestras para análisis de compuestos orgánicos nunca se filtran.

Las muestras de agua deben estar bien tapadas y empacadas para evitar que se derramen o se rompan. Las muestras de un mismo sitio deben mantenerse juntas. Se deben poner etiquetas de identificación en cada contenedor e indicar los datos del embarque y el modo de transporte en la hoja de muestreo en campo.

### **3.5.3 Muestreo de Sedimentos (CCME, 1993)**

El muestreo de sedimentos sólo deberá realizarse si la evaluación preliminar del sitio indica que existe potencial de contaminación de éstos. Como ya se mencionó, en el caso de sitios abandonados resulta más apropiado coleccionar muestras de sedimentos que muestras de agua.

Los sedimentos comprenden desde la arena hasta las partículas de arcilla que están bajo el agua, y pueden ubicarse abajo de una corriente de flujo o en la profundidad del fondo del océano. En el contexto de los sitios con suelo contaminado están en el fondo de lagunas, lagos y corrientes.

El acceso al área de muestreo juega un papel importante en la estrategia de muestreo, la logística y la selección del equipo, debido a la dificultad de muestrear en áreas ocultas bajo el agua. Existen básicamente dos opciones para la colección de muestras de sedimentos del fondo: el muestreo desde una plataforma y el muestreo mediante buceo. Las plataformas de muestreo pueden ser un barco, un helicóptero, etcétera. El muestreo por medio de buceo generalmente ofrece muestras de mejor calidad en particular los corazones de sedimentos, aunque es más costoso y difícil que el muestreo desde una plataforma. En áreas sin caminos de acceso los sedimentos se pueden coleccionar desde una pequeña avioneta o desde un helicóptero, para estos medios deben considerarse los factores de disponibilidad y los costos.

El paso inicial en el diseño de un programa de muestreo de sedimentos es la revisión de datos históricos para caracterizar los sedimentos en términos de su tipo y de las concentraciones potenciales de contaminantes e identificar cualquier falta de datos. Cuando no existe información histórica es conveniente intentar un estudio preliminar para ayudar a planear el programa de muestreo detallado, que requiera un mínimo de tiempo y esfuerzo (OMEE, 1994).

Los datos de estudios de reconocimiento regionales algunas veces pueden proporcionar información, tal como concentraciones pronosticadas a partir del conocimiento geológico y mineralógico del área, geoquímica de los sedimentos, concentraciones previas generales o concentraciones de diferentes sustancias químicas en el suelo, las cuales mediante desgaste por agentes atmosféricos o erosión contribuyen con material a los sedimentos. Este material puede entrar desde una cuenca o vertiente en forma disuelta o asociada con materiales de suelo erosionado y puede incluir por ejemplo plaguicidas o fertilizantes de las actividades agrícolas, residuos de minería o materiales excavados o efluentes y subproductos de procesos industriales o mineros.

#### **3.5.3.1 Muestreo Representativo de Sedimentos (CCME, 1993)**

Además de los impedimentos físicos en la colección de muestras representativas de sedimentos, también deben considerarse los procedimientos y dispositivos de muestreo que dependen del tipo de sedimentos que se están muestreando, esto es, si son suspendidos o de fondo.

Las muestras de sedimentos suspendidos se coleccionan para determinar la cantidad y las características físicas y químicas de los sedimentos en suspensión. Los sedimentos de fondo se muestrean para proporcionar las características físicas y químicas de aquellas partículas que componen el lecho del sistema que se estudia en sitios específicos.

Es muy complejo medir la exactitud en el muestreo de sedimentos, los cuales en muchos casos son heterogéneos. Se pueden usar dos técnicas para el control de calidad en el muestreo de sedimentos; la primera consiste en la colección de más de una muestra de sedimento en los sitios de muestreo seleccionados usando igual equipo de muestreo e iguales procedimientos de submuestreo en

campo, prácticas de manejo y almacenamiento y métodos de análisis. Los resultados mostrarán variaciones debido a las técnicas de muestreo y submuestreo, pero la heterogeneidad del sedimento en el sitio de muestreo afectará la prueba.

En la segunda técnica de control de calidad, la muestra colectada se divide en pocas submuestras y cada una de éstas se trata como una muestra individual. Los resultados de los análisis geoquímicos de todas las submuestras indicarán la variabilidad debido a las técnicas de muestreo y analíticas y a la heterogeneidad del sedimento dentro de una muestra simple colectada.

Deben incluirse pocos sitios de control en un programa de muestreo para estudio de contaminación de sedimentos, los cuales se seleccionan en áreas donde es más probable que el sedimento no esté contaminado. Los datos que se obtienen de los sitios de control son importantes como concentraciones naturales cuando se hace la representación gráfica de la distribución y los gradientes de concentración de contaminantes. La contaminación que pueden sufrir las muestras de sedimento durante la colección y el manejo también afectará la representatividad de las muestras y el sesgo de los análisis positiva y negativamente con respecto a la detección de contaminantes, así como sus concentraciones en las muestras.

Las muestras de sedimentos se pueden contaminar con pedazos de metal pintado o escorias de la corrosión superficial de los muestreadores o del equipo usado para su operación. Los muestreadores con partes metálicas pintadas con pinturas de cadmio o plomo no son adecuados para coleccionar sedimentos y determinar concentraciones de metales. El equipo de muestreo o las piezas del equipo en contacto con la muestra fabricados con materiales plásticos pueden ser fuente de contaminación de compuestos orgánicos. También debe evitarse el uso de aceite o grasa en los muestreadores. Las muestras de sedimento para la determinación cuantitativa de metales o contaminantes orgánicos siempre se deben obtener del centro del muestreador.

### **3.5.3.2 Selección de los Sitios de Muestreo (CCME, 1993)**

El número y ubicación de las estaciones de muestreo deben diseñarse cuidadosamente. El objetivo de la selección de sitios de muestreo es maximizar la probabilidad de detección de las áreas con las concentraciones más grandes de contaminantes o al contrario minimizar el costo de colección de muestras inadecuadas o las pérdidas al no coleccionar muestras. No existe una fórmula para diseñar un patrón de muestreo de sedimentos que sea aplicable a todos los programas de muestreo.

Cuando se definen las posiciones y número de estaciones de muestreo deben considerarse los siguientes factores:

- Propósito del muestreo
- Objetivos del estudio
- Datos históricos y otra información disponible
- Dinámica del fondo en el área de muestreo
- Tamaño del área de muestreo
- Fondos disponibles contra costo (real) estimado del proyecto

En general, la ubicación de las estaciones debe permitir la repetición rápida y confiable del muestreo en el futuro sin dificultad. Es muy importante que cada estación de muestreo esté bien referenciada en una malla de análisis sobre un mapa y etiquetada.

Para seleccionar las estaciones de muestreo se debe tener al menos conocimiento básico de la dinámica de los fondos en el área del proyecto. Idealmente, se debe mapear la distribución del tamaño de partícula del sedimento antes de seleccionar los sitios de muestreo. La distribución de sedimentos en el fondo de un lago, río u océano está afectada por los procesos controladores de energía. De esta manera, arena, grava y pedregón son las unidades de sedimentos en el fondo de un río de flujo rápido, mientras que los sedimentos de grano fino como cieno y arcilla pueden acumularse en áreas de baja energía, tal como bahías o en el lado interno del canal de un río con meandros. Los depósitos de sedimento en lagos grandes, aunque están muy influenciados por las características del material fuente, reflejan los cambios de varios procesos controladores de energía, tal como la acción de olas, circulación de corrientes, etcétera.

El número y espaciamiento de las estaciones de muestreo también dependen del tamaño físico del área del proyecto, y de qué tan grande es el área que representa cada muestra. La densidad de estaciones está en función de la variabilidad o gradientes en los procesos que controlan la distribución de las variaciones del parámetro o propiedad en estudio.

Cuando la distribución de los parámetros del sedimento es relativamente homogénea, las estaciones pueden estar muy espaciadas; si la distribución de los parámetros es heterogénea se requerirá una malla de muestreo más densa. En proyectos de áreas relativamente pequeñas, tal como sitios contaminados, las estaciones de muestreo necesitan localizarse más cerca, en particular en áreas con distribución heterogénea de diferentes unidades de sedimentos y muchas fuentes contaminantes.

Deben evitarse sitios de muestreo en lugares donde confluyen corrientes, ya que pueden estar sometidos a fenómenos contracorriente. En corrientes demasiado profundas para poder sumergirse en ellas, los sitios de muestreo deben localizarse abajo de puentes, seleccionando el lado corriente arriba y evitando el muestreo en áreas de alta turbulencia cerca de los muelles.

### **3.5.3.3. Selección del Equipo de Muestreo (CCME, 1993)**

Como ya se mencionó, existen dos tipos de sedimentos: de fondo y suspendidos. Los sedimentos de fondo contienen dos zonas primarias de interés en estudios de contaminación: la superficial o superior de 10 a 15 cm y las capas más profundas.

El muestreo de la capa superficial proporciona información sobre la distribución horizontal de las propiedades de interés para el material recientemente depositado, tal como distribución del tamaño de partícula o composición geoquímica del sedimento.

Para estudiar los cambios históricos en los parámetros de estudio o para definir zonas de contaminación se colecta una columna de sedimento que incluye la capa de sedimento superficial (10 a 15 cm) y el sedimento debajo de esta capa. El perfil geoquímico típico muestra un decremento exponencial de las concentraciones de contaminante con la profundidad del sedimento, esto se debe a que muchos compuestos químicos de interés ambiental son de origen reciente.

Se utilizan dispositivos de muestreo completamente diferentes para colectar capas superficiales y para corazones de sedimentos, al igual que para colectar sedimentos suspendidos y de fondo.

En algunos casos, las muestras de lecho de sedimento pueden alterarse, pero para muchos propósitos se requieren muestras sin alterar. Por ejemplo, cuando se quiere conocer la composición vertical de los depósitos o la distribución de contaminantes a cierta profundidad se deben tomar corazones de muestras sin alterar.

Los muestreadores para sedimentos suspendidos colectan una muestra representativa de la mezcla agua-sedimento, y en general son de tres tipos:

- Muestreadores integrados
- Muestreadores simples o instantáneos
- Muestreadores de bombeo

Los muestreadores estándares para sedimentos suspendidos usados en corrientes y ríos no deben usarse en lagos, estanques u otros cuerpos de agua donde el agua está estacionaria o casi estacionaria.

Los dispositivos de pistón y de gravedad se usan para obtener muestras de corazonas sin alterar en ríos, lagos, estanques y lagunas. Los muestreadores de este tipo esencialmente son tubos que se clavan dentro del lecho del sistema, las muestras se retienen dentro del barril del muestreador por el vacío parcial que se forma arriba de la muestra y/o por un contenedor en el extremo inferior.

Los muestreadores simples se usan más que los muestreadores de corazón para colectar sedimentos depositados, porque son mucho más ligeros y en algunas circunstancias mucho más fáciles de usar. Usado apropiadamente, un muestreador simple colecta un volumen de material del lecho y aísla la muestra de las corrientes de agua durante su ascenso a la superficie para dar una muestra razonablemente buena sin alterar.

#### Muestreo de sedimentos de fondo

En el muestreo de sedimentos de fondo se deben colectar muestras con alto contenido de arcilla y materia orgánica, en lugar de rocas y arena, porque es más probable observar los contaminantes en el primer tipo de matrices. Esta propuesta obviamente introduce un sesgo en la selección del sitio de muestreo y es un ejemplo del muestreo a juicio aplicado a los sedimentos de fondo.

Generalmente, las muestras de sedimentos de fondo se toman a partir del ensanchamiento de un río, donde se depositan los sedimentos suspendidos en el fondo del río. En un lago las muestras se colectan en el punto más profundo. Para obtener un buen estimado de la variabilidad espacial del parámetro de interés dentro de los sedimentos de fondo, el muestreo debe realizarse en tantos sitios como sea posible dentro del lago o río que se está estudiando.

Los muestreadores para sedimentos de fondo son de tres tipos:

- Muestreadores simples
- Muestreadores de corazón
- Dragas

Los muestreadores de corazón sirven para colectar muestras de columna de sedimento y sedimento superficial con mínima perturbación; los muestreadores simples colectan grandes muestras superficiales; y las dragas colectan muestras más grandes, bien mezcladas, cerca de la superficie. Generalmente, las muestras de dragas se consideran cualitativas porque durante la colección no se puede controlar adecuadamente el sitio de muestreo ni la profundidad de muestreo en la columna del sedimento.

Los sedimentos del lecho superficial proporcionan la distribución espacial de los contaminantes. Estos estudios imponen el muestreo al azar en grandes áreas geográficas usando sedimentos colectados de pequeñas corrientes localizadas.

En el caso de corrientes poco profundas donde se puede uno meter en ellas, las muestras se colectan con la mano; en el caso de ríos, lagunas o lagos más profundos las muestras se colectan con algún tipo de muestreador simple. Existen diferentes dispositivos de muestreo simples de varios diseños, cuyas ventajas y desventajas dependen de factores como la naturaleza del sedimento si es grueso o fino, la profundidad del agua, la cantidad de sedimento requerida, el tamaño del área a muestrear, etcétera.

Generalmente, la selección del tipo de muestreador simple depende de la evaluación de cuatro criterios: a) el grado de desorden físico durante el muestreo, debido a la onda de presión creada por el dispositivo que puede dispersar sedimento de grano fino o flóculos en la interfase sedimento-agua; b) la pérdida de material, especialmente sedimentos de gránulo fino, durante la recuperación del muestreador por arrastre del agua; c) la eficiencia del muestreador para colectar sedimentos de diferentes texturas, por ejemplo, tamaño de grano, grado de endurecimiento; y d) el potencial de contaminación de la muestra.

Una de las consideraciones más importantes cuando se colectan sedimentos superficiales es obtener una muestra representativa. Invariablemente es mejor colectar un grupo de submuestras para generar una muestra final compuesta, que colectar arbitrariamente una muestra simple aislada representativa del sitio de muestreo.

El muestreo vertical de una columna de sedimento se realiza con un dispositivo para obtener corazones, los cuales se clasifican en tres categorías: de gravedad, de pistón y vibratorios. Muchos de los criterios que se aplican para la selección de un muestreador simple se aplican también a la selección de un dispositivo para obtener corazones. Un criterio adicional es la longitud de la columna de sedimento que se va a muestrear. La selección de muestras de corazones involucra submuestreo, especialmente cuando existen diferencias físicas obvias, como textura o color, entre varias secciones de un corazón entero.

Los muestreadores de gravedad, como su nombre lo indica, usan la fuerza de la gravedad para penetrar dentro de la columna de sedimento y obtener una muestra. Generalmente, entre más grande es el dispositivo mayor es el grado de penetración. Estos dispositivos también requieren una cantidad mínima de profundidad de agua para alcanzar suficiente velocidad y obtener la máxima penetración. Normalmente se obtienen corazones de 2 m de longitud.

Los muestreadores de pistón se usan para obtener corazones largos en sedimentos relativamente suaves. Son muy pesados y se elevan de modo que el pistón, el cual está insertado dentro del barril, se detiene en la interfase sedimento-agua mientras el barril del corazón continua para penetrar la columna de sedimento. El pistón crea vacío, lo cual reduce la resistencia de fricción a la penetración del barril. Con estos equipos se obtienen corazones de más de 30 m de longitud.

Los muestreadores vibratorios normalmente se usan para obtener corazones largos en sedimentos bastante duros. Estos dispositivos pueden funcionar con electricidad o aire comprimido. El muestreo se logra a través del uso de barriles de pared delgada junto con vibración, la cual tiende a fluidizar los sedimentos para facilitar la penetración. Como resultado de esto, los corazones que se obtienen tienden a estar más desordenados que los corazones de pistón. La longitud se controla por el tamaño del equipo, generalmente no exceden los 12 m.

### Muestreo de sedimentos suspendidos

El muestreo y análisis de sedimentos suspendidos son un requisito para cualquier estudio que involucre la determinación del transporte de contaminantes y el cálculo de flujos de contaminantes. Además, los sedimentos suspendidos junto con el muestreo y análisis de muestras disueltas puede representar el único medio disponible de determinar cambios temporales en corto tiempo en la calidad del agua. El transporte de sedimentos suspendidos está fuertemente interrelacionado a las características hidrológicas y geomorfológicas.

Los muestreadores para sedimentos suspendidos son de tres tipos: muestreadores integrados, los cuales acumulan una mezcla de sedimento-agua en un tiempo dado; muestreadores instantáneos, los cuales atrapan un volumen de agua completo sellando los extremos de una cámara de flujo continuo (de un extremo a otro); y los muestreadores de bombeo, los cuales colectan una muestra completa de agua por acción del bombeo. Generalmente se prefieren los integrados porque obtienen muestras más representativas de la sección transversal fluvial.

Muchos veces se obtienen muestras instantáneas representativas. Sin embargo, existe evidencia de que los cambios temporales en la concentración de sedimentos suspendidos y las distribuciones en la sección transversal (cambios espaciales) pueden ser bastante grandes y por consiguiente las muestras deben obtenerse en un período de tiempo largo para ser realmente representativas, por ejemplo de 8 a 10 horas. Por lo tanto el usuario debe decidir cuál variable es más importante para el estudio y seleccionar un muestreador y técnica acorde con ello.

#### **3.5.3.4 Preservación y Almacenamiento de la Muestra (CCME, 1993)**

En general, los requerimientos de preservación y almacenamiento de sedimentos son similares a los de suelo. Los procedimientos para el manejo y preservación de las muestras dependen de los análisis específicos necesarios y del ambiente en que se tomó la muestra, ya sea suspendido o de fondo. Las muestras para análisis de metales traza requieren preservación y precauciones especiales para evitar contaminación. Las botellas de muestreo siempre deben limpiarse, lavarse a fondo, secarse y sellarse antes de llevarlas al sitio de muestreo.

Las muestras de sedimento se deben filtrar tan rápido como sea posible después de colectarlas. El filtrado se puede usar para medir los constituyentes disueltos. Los procedimientos de preservación involucran refrigeración para compuestos orgánicos y acidificación para metales. Los análisis de muestras de sedimentos suspendidos están limitados debido a la dificultad de obtener suficiente sedimento para todas las submuestras que se requieren para los diferentes análisis, inclusive puede ser necesario hacer una muestra compuesta de un gran número de muestras representativas.

Las muestras de sedimentos de fondo para análisis de rutina de tamaño de partícula se pueden transportar y almacenar sin refrigeración. El congelamiento no se emplea porque puede ocasionar cambios físicos y químicos, fragmentar estructuras de las partículas de sedimento y cambiar la representatividad de la muestra.

### **3.5.4 Muestreo de Aire**

El muestreo de aire requiere el conocimiento de los tipos de sustancias peligrosas asociadas con el sitio, ya que no todos los sitios contaminados requieren muestreo de aire. Primero deben identificarse las sustancias que se dispersan más fácilmente. El muestreo de aire debe realizarse antes

o después de todas las otras actividades de muestreo, esto es, no debe hacerse durante las actividades de campo que pueden liberar sustancias al aire. Es conveniente muestrear en un día caluroso y seco cuando el potencial de volatilización es alto. Se debe evitar el muestreo de aire si las instalaciones en el sitio o los alrededores están descargando sustancias a la atmósfera (EPA/540, 1992).

Las sustancias peligrosas pueden emitirse a la atmósfera por acción del aire, combustión, explosión, evaporación y sublimación. Para definir la probable ruta de migración y la dispersión de una emisión al aire se requiere información sobre las características de la emisión y las condiciones atmosféricas. Las emisiones de polvos fugitivos contaminantes, por ejemplo partículas de suelo contaminadas, originadas en una fuente puede ser el resultado de la combinación de factores, tal como erosión eólica, tráfico vehicular o de equipo pesado. La probabilidad de que exista emisión al aire también depende del tipo de fuente que contiene las sustancias peligrosas, las propiedades químicas de estas sustancias y el espesor de la cubierta de la fuente (EPA/540, 1992).

El diseño del programa de muestreo de aire se basa en dos principios generales (OMEE, 1994):

- El monitoreo debe realizarse para aquellos contaminantes que se sabe que están presentes en el sitio o los cuales podría ser razonable esperar que se emitieran al aire a partir del sitio.
- Los muestreadores deben colocarse cerca de los límites de la propiedad, viento arriba y abajo del sitio de acuerdo a la dirección del viento prevaleciente. Normalmente se emplea un mínimo de cuatro sitios de muestreo.

Durante el muestreo de aire debe anotarse la distancia desde la fuente al sitio. Las estaciones de monitoreo deben colocarse cerca de las áreas de la fuente para maximizar el uso de los datos. Las muestras deben ser representativas del sitio.

Muchas veces es conveniente iniciar el muestreo de aire empleando técnicas analíticas de campo, las cuales dan lecturas directas mediante el uso de equipos como detector de fotoionización o una unidad portátil de fluorescencia de rayos X, estas técnicas se emplean para reducir los posibles grupos de sustancias químicas que se van a analizar en el laboratorio. Con las técnicas de campo se puede evaluar un gran número de muestras a bajo costo con el propósito de seleccionar un subgrupo de muestras para análisis de laboratorio y permiten recolectar grandes cantidades de datos sobre el sitio de manera económica y efectiva.

#### **3.5.4.1 Selección del Equipo de Muestreo (OMEE, 1994)**

Los principales tipos de muestreo de aire son:

- Muestreo de partículas
- Muestreo de compuestos orgánicos semivolátiles
- Muestreo de compuestos orgánicos volátiles

##### Muestreo de partículas

Para muestrear partículas se utilizan muestreadores de alto volumen (HiVol), jarras para coleccionar polvo (dustfall jars) o muestreadores que coleccionan partículas de un diámetro aerodinámico específico, tal como el HiVol con cabezas de tamaño selectivo o muestreadores dicotómicos. El tipo de muestreador seleccionado debe reflejar el uso final de los datos coleccionados. Si el objetivo principal

del muestreo de partículas es monitorear la contaminación producida por éstas entonces es apropiado el uso de "HiVol" o jarras para coleccionar polvo. Pero si el principal interés es determinar el material que se puede inhalar debe usarse un muestreador de partículas de tamaño selectivo.

Las jarras para coleccionar polvo son jarras abiertas que se colocan en el sitio de muestreo durante un tiempo específico. El polvo coleccionado se pesa para determinar la concentración de partículas y si es necesario también se deben analizar metales en el polvo.

Un muestreador HiVol consiste de un motor de vacío que conduce el aire a través de un filtro de partículas a una rapidez constante. El filtro se acondiciona a una humedad relativa y temperatura conocidas y se pesa antes de usarse. Después que se colecciona la muestra el filtro se re-acondiciona a la misma humedad relativa y temperatura y se vuelve a pesar. La masa total de partículas coleccionadas dividida por el volumen de aire muestreado proporciona la concentración de partículas en miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

#### Muestreo de compuestos orgánicos semivolátiles

Los compuestos orgánicos semivolátiles son sustancias químicas con presiones de vapor en el intervalo de  $10^{-2}$  a  $10^{-8}$  kPa. Estos métodos de muestreo se usan para determinar hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (BPC), plaguicidas y dibenzo-p-dioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados (DDPC/DFPC).

El muestreo se realiza usando un muestreador HiVol modificado para tener una trampa de vapor corriente abajo a partir del filtro de partículas. Se usa una bomba de vacío para pasar el aire a través del filtro y el adsorbente. El volumen de aire muestreado se obtiene a partir de la rapidez de flujo y el tiempo de muestreo transcurrido o con un medidor de gas.

Se usa un filtro de fibra de vidrio recubierto de teflón para atrapar los compuestos químicos enlazados a las partículas. Los adsorbentes más comúnmente usados para compuestos en fase vapor son resinas XAD-2 y espuma de poliuretano.

#### Muestreo de compuestos orgánicos volátiles

Existen dos métodos principales de muestreo de aire para determinar compuestos orgánicos volátiles: con adsorbentes sólidos y con recipientes llenados por medio de vacío o de bombeo. Ambos métodos usan cronómetros programables para apagar el equipo de muestreo en un tiempo preestablecido.

Generalmente los compuestos orgánicos atrapados por el método de los adsorbentes sólidos son no polares y no reactivos con puntos de ebullición de  $-15$  a  $120$  °C. Generalmente se usan dos o más adsorbentes en serie. El aire pasa a través de un cartucho conteniendo el adsorbente, el flujo de aire se controla con un controlador de flujo másico, la rapidez de flujo depende de la duración del muestreo, el tipo y cantidad de adsorbente y la sensibilidad del método analítico.

El método con recipientes se conoce también como colección de aire total porque la muestra de aire se colecciona en un recipiente en vez de pasarlo a través de un adsorbente que colecciona los compuestos de interés. Los recipientes se llenan usando vacío o bombeo dependiendo de si la presión de llenado es mayor a la atmosférica. El vacío se usa para coleccionar muestras a presión ambiente o cercana a ésta y en un tiempo de segundos. El muestreo con bombeo generalmente se usa para obtener muestras a largo plazo o cuando se requieren volúmenes de muestra grandes.

#### **3.5.4.2 Preservación y Almacenamiento de la Muestra (OMEE, 1994)**

Con objeto de asegurar una buena calidad durante el muestreo de aire todas las muestras deben transportarse en refrigeradores. Las muestras para compuestos orgánicos volátiles se deben coleccionar tres días o menos después de haber colocado el muestreador, deben refrigerarse y analizarse dentro de las siguientes tres semanas.

Es importante no permitir fumar cerca del equipo de muestreo, de los adsorbentes y de los filtros. También es importante que el personal de muestreo no use perfumes o colonias cuando está cerca de los tubos abiertos para compuestos orgánicos volátiles.

Se recomienda tomar muestras por duplicado, blancos de campo y blancos de transporte para asegurar la integridad del programa de muestreo.

## CAPÍTULO 4

### CLASIFICACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS

#### 4.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN

A nivel de país y contando con un inventario de sitios contaminados, una vez que se concluye la evaluación de un nuevo sitio y se ha determinado que está contaminado con sustancias químicas peligrosas, el tipo de contaminantes y sus concentraciones, el sitio debe clasificarse con respecto a otros para establecer la prioridad de restauración de cada uno, y de esta manera, dar atención primero a los sitios que representan un mayor riesgo a la salud y al ambiente.

Esta clasificación es necesaria para darle un mejor uso a los recursos materiales, financieros y humanos de que se dispone en México, ya que actualmente no se está en posibilidades de darle atención y solución inmediata a todos los sitios contaminados.

Para llevar a cabo la clasificación de un sitio contaminado se evalúan varios factores que toman en cuenta las características del sitio, de los contaminantes y los receptores. Estos factores deben seleccionarse de manera técnicamente razonable. El objetivo es evaluar el potencial de daño que posee un sitio sobre la salud humana y el ambiente con base en información general respecto a la naturaleza de los contaminantes y las características del sitio.

El método de evaluación ayuda a identificar, con bases técnicas y científicas, los sitios contaminados que presentan un alto riesgo y por lo tanto, deben considerarse como primeros candidatos para llevar a cabo acciones posteriores tales como restauración, evaluación más específica o medidas inmediatas de protección. El método debe seleccionar factores para los cuales la información esté generalmente disponible, además debe ser adecuado para aplicarse en la evaluación de la mayoría de los sitios contaminados a lo largo del país.

Por consiguiente, el proceso de clasificación de sitios contaminados debe diseñarse para evaluar el o los peligros potenciales de un lugar mediante la calificación de varias características, de tal manera que esta clasificación se obtiene como resultado de la evaluación de los diferentes factores que influyen en la posibilidad de (40 CFR Part 300, 1990):

- ♦ Contaminación del agua subterránea
- ♦ Contaminación del agua superficial
- ♦ Exposición a la contaminación presente en el suelo
- ♦ Contaminación del aire

La evaluación de cada una de las rutas de exposición anteriores se basa en el estudio de las siguientes tres categorías de factores:

1) Potencial de migración - con la cual se obtiene una medida de la probabilidad de que una sustancia peligrosa presente en el sitio se libere al ambiente y migre hacia algún medio, en este punto se consideran dos opciones:

- Liberación o contaminación observada
- Potencial de migración cuando no existe una liberación observada

2) Características de los contaminantes.- con ello se determina el peligro relativo de los contaminantes presentes en el sitio. Para esto se consideran las siguientes propiedades:

- Toxicidad.- con base en parámetros cuantitativos de dosis-respuesta para tres tipos de toxicidad: crónica, aguda y carcinogénica
- Combinación de la toxicidad con la movilidad, persistencia y/o bioacumulación
- Área o volumen contaminado
- Estado físico de los contaminantes

3) Receptores.- en este punto se determina el nivel de contaminación de los receptores, que son los seres vivos o recursos que pueden estar expuestos o afectados por la contaminación; incluye poblaciones humanas, recursos naturales y ambientes sensibles tales como hábitats de especies endémicas, amenazadas o en peligro de extinción, parques nacionales, reservas naturales.

Para los factores que influyen en la contaminación del agua subterránea, el aire y la exposición a contaminantes presentes en el suelo se hacen evaluaciones simples, mientras que para la contaminación del agua superficial se evalúa el potencial de afectación en tres áreas: el agua potable, la cadena alimenticia a través de peces y el ambiente. En las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan los factores que deben considerarse para evaluar cada ruta de migración.

**Tabla 4.1 Evaluación de la posibilidad de contaminación del agua subterránea**

Potencial de migración	Características de los contaminantes	Receptores
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación observada                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentraciones de contaminantes superiores a los límites máximos</li> </ul> </li> <li>• Potencial de migración                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contención subsuperficial para evitar la migración de contaminantes</li> <li>- Profundidad al acuífero</li> <li>- Precipitación pluvial anual</li> <li>- Conductividad hidráulica de la capa confinante</li> <li>- Conductividad hidráulica del acuífero</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad/movilidad                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Toxicidad                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- crónica</li> <li>- carcinogénica</li> <li>- aguda</li> </ul> </li> <li>- Movilidad                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- solubilidad en agua</li> <li>- coeficiente de distribución (<math>K_d</math>)</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• Cantidad de residuos peligrosos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Volumen contaminado</li> <li>- Area contaminada</li> </ul> </li> <li>• Estado físico de los contaminantes                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquido/gas</li> <li>- Lodo</li> <li>- Sólido</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pozos de agua más cercanos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Distancia a pozos de agua</li> <li>- Concentraciones de contaminantes superiores a los límites máximos</li> <li>- Suministros de agua potable alternos</li> </ul> </li> <li>• Población                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de personas que se abastecen de agua potable de los pozos</li> </ul> </li> <li>• Usos del agua del acuífero evaluado                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agua para ganado</li> <li>- Preparación de alimentos comerciales</li> <li>- Suministro para acuicultura comercial</li> <li>- Suministro para áreas recreativas</li> <li>- Riego agrícola</li> </ul> </li> <li>• Distancia del sitio a áreas de recarga del acuífero</li> </ul>

Elaborada a partir de información de 40 CFR Parte 300 y CCME EPC-CS39E

**Tabla 4.2 Evaluación de la posibilidad de contaminación del agua superficialafectación al agua potable**

Potencial de migración	Características de los contaminantes	Receptores
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación observada               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Concentración de contaminantes superiores a los límites máximos</li> </ul> </li> <li>• Potencial de migración               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Contención superficial por obras construidas o sistemas de protección naturales</li> <li>- - Distancia del sitio a cuerpos de agua superficial</li> <li>- - Topografía</li> <li>- - Escurrimiento</li> <li>- - Inundación potencial</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad/persistencia               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Toxicidad                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- crónica</li> <li>- carcinogénica</li> <li>- aguda</li> </ul> </li> <li>- - Persistencia                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- vida media</li> <li>- coeficiente de partición n-octanol-agua (<math>K_{ow}</math>)</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• Cantidad de residuos peligrosos               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Volumen contaminado</li> <li>- - Area contaminada</li> </ul> </li> <li>• Estado físico de los contaminantes               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Líquido/gas</li> <li>- - Lodo</li> <li>- - Sólido</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tomas de agua potable más cercanas</li> <li>• Población               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Número de personas que se abastecen del agua potable</li> </ul> </li> <li>• Usos del agua superficial               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Riego de cultivos alimenticios</li> <li>- - Agua para ganado</li> <li>- - Preparación de alimentos comerciales</li> <li>- - Recreación</li> </ul> </li> </ul>

Elaborada a partir de información de 40 CFR Parte 300 y CCME EPC-CS39E

Continuación Tabla 4.2

**Afectación a la cadena alimenticia a través de peces**

Potencial de migración	Características de los contaminantes	Receptores
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación observada                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentración de contaminantes superiores a los límites máximos</li> </ul> </li> <li>• Potencial de migración                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contención superficial por obras construidas o sistemas de protección naturales</li> <li>- Distancia del sitio a cuerpos de agua superficial</li> <li>- Topografía</li> <li>- Permeabilidad del material superficial</li> <li>- Inundación potencial</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad/persistencia/bioacumulación                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Toxicidad                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- crónica</li> <li>- carcinogénica</li> <li>- aguda</li> </ul> </li> <li>- Persistencia                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- vida media</li> <li>- coeficiente de partición n-octanol-agua (<math>K_{ow}</math>)</li> </ul> </li> <li>- Bioacumulación potencial                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>- factor de bioacumulación (BCF)</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• Cantidad de residuos peligrosos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Volumen contaminado</li> <li>- Area contaminada</li> </ul> </li> <li>• Estado físico de los contaminantes                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquido/gas</li> <li>- Lodo</li> <li>- Sólido</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cadena alimenticia                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Presencia de lugares de pesca sujetos a contaminación, con base en análisis de muestras de tejidos de peces</li> </ul> </li> <li>• Población                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Producción anual de alimento a partir de cada lugar de pesca</li> </ul> </li> </ul>

Elaborada a partir de información de 40 CFR Parte 300 y CCME EPC-CS39E

## Continuación Tabla 4.2

***Afectación al ambiente***

Potencial de migración	Características de los contaminantes	Receptores
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación observada               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Concentración de contaminantes superiores a los límites máximos</li> </ul> </li> <li>• Potencial de migración               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Contención superficial por obras construidas o sistemas de protección naturales</li> <li>- - Distancia del sitio a cuerpos de agua superficial</li> <li>- - Topografía</li> <li>- - Escurrimiento potencial</li> <li>- - Permeabilidad del material superficial</li> <li>- - Inundación potencial</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad al ecosistema/persistencia/bioacumulación               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Toxicidad al ecosistema</li> <li>- - criterios de calidad del agua</li> <li>- - criterios para proteger la vida acuática</li> </ul> </li> <li>• Persistencia               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - vida media</li> <li>- - coeficiente de partición n-octanol-agua (<math>K_{OW}</math>)</li> </ul> </li> <li>• Bioacumulación potencial en el ecosistema</li> <li>• Cantidad de residuos peligrosos               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Volumen contaminado</li> <li>- - Area contaminada</li> </ul> </li> <li>• Estado físico de los contaminantes               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Líquido/gas</li> <li>- - Lodo</li> <li>- - Sólido</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distancia a ambientes sensibles sujetos a contaminación               <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Habitat de especies amenazadas endémicas o en peligro de extinción</li> <li>- - Parques nacionales</li> <li>- - Áreas de protección de la flora y la fauna</li> <li>- - Parques marinos</li> </ul> </li> </ul>

Elaborada a partir de información de 40 CFR Parte 300 y CCME EPC-CS39E

**Tabla 4.3 Evaluación de la exposición a la contaminación presente en la capa superficial de suelo**

POTENCIAL DE MIGRACIÓN	CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTAMINANTES	RECEPTORES
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Contaminación observada                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Concentraciones de contaminantes superiores a los límites máximos dentro de áreas con receptores residentes</li> </ul> </li> <li>• Accesibilidad al área contaminada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Crónica</li> <li>- Carcinogénica</li> <li>- Aguda</li> </ul> </li> <li>• Cantidad de residuos peligrosos                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Volumen contaminado</li> <li>- - Área contaminada</li> </ul> </li> <li>• Estado físico de los contaminantes                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Líquido/gas</li> <li>- - Lodo</li> <li>- - Sólido</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Población                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Cantidad de población residente expuesta</li> <li>- - Distancia del sitio a la población cercana</li> <li>- - Cantidad de población dentro de un radio de 1 600 m</li> <li>- - Número de trabajadores en el sitio</li> </ul> </li> <li>• Actividades en el área                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Agricultura</li> <li>- - Silvicultura</li> <li>- - Ganadería</li> </ul> </li> <li>• Ambientes sensibles terrestres                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Parques nacionales</li> <li>- - Habitat de especies amenazadas, endémicas o en peligro de extinción</li> <li>- - Áreas de protección de flora y fauna</li> </ul> </li> <li>• Usos del suelo alrededor del sitio de 0 a 5 Km                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- - Residencial</li> <li>- - Agrícola</li> <li>- - Comercial/Industrial</li> </ul> </li> </ul>

Elaborada a partir de información de 40 CFR Parte 300 y CCME EPC-CS39E

**Tabla 4.4 Evaluación de la posibilidad de contaminación del aire**

Potencial de migración	Características de los contaminantes	receptores
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentración observada               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Concentraciones de contaminantes superiores a los límites máximos o</li> </ul> </li> <li>• Potencial de liberación               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencial de liberación de gases                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contención del gas</li> <li>- Tipo de fuente de gas:</li> <li>- Potencial de migración del gas: presión de vapor constante de la Ley de Henry</li> </ul> </li> <li>- Potencial de liberación de partículas                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- Contención de las partículas</li> <li>- Tipo de fuente de partículas:</li> <li>- Potencial de migración de las partículas:                       <ul style="list-style-type: none"> <li>precipitación media mensual</li> <li>temperatura media mensual</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad/Movilidad               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Toxicidad                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- Crónica</li> <li>- Carcinogénica</li> <li>- Aguda</li> </ul> </li> <li>- Movilidad                   <ul style="list-style-type: none"> <li>- Movilidad del gas: presión de vapor</li> <li>- Movilidad de partículas: velocidad del viento anual promedio precipitación media mensual temperatura media mensual</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>• Cantidad de residuos peligrosos               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Volumen contaminado</li> <li>- Area contaminada</li> </ul> </li> <li>• Estado físico de los contaminantes               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Líquido/gas</li> <li>- Lodo</li> <li>- Sólido</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Individuos más cercanos               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de personas residentes o que ocupan regularmente las construcciones o áreas contaminadas</li> </ul> </li> <li>• Contaminación potencial               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de personas dentro de ciertas distancias al sitio (0 a 6 Km)</li> </ul> </li> <li>• Actividades a 2.5 Km de una fuente de contaminantes               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Agricultura</li> <li>- Silvicultura</li> <li>- Area de recreación</li> </ul> </li> <li>• Ambientes sensibles               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Parques nacionales</li> <li>- Parques marinos</li> <li>- Áreas de protección de flora y fauna</li> <li>- Habitat de especies amenazadas, endémicas o en peligro de extinción</li> </ul> </li> </ul>

Elaborada a partir de información de 40 CFR Parte 300 y CCME EPC-CS

Antes de empezar a clasificar un sitio contaminado, se debe revisar si se dispone de la siguiente información mínima acerca del sitio que se está evaluando (CCME, 1992):

- Descripción de la localización del sitio
- Tipo de contaminantes o materiales probablemente presentes en el sitio (y/o descripción de las actividades históricas que pudieron generar contaminación)
- Tamaño aproximado del sitio y cantidad de contaminantes
- Profundidad aproximada del nivel freático
- Mapa geológico o información sobre levantamiento topográfico
- Datos de precipitación pluvial y temperatura anuales y mensuales
- Datos de velocidad del viento
- Información sobre la cubierta superficial
- Proximidad al agua superficial
- Potencial de inundación del sitio
- Proximidad a suministros de agua potable
- Usos de fuentes de agua adyacentes
- Información sobre el uso de suelo (en el sitio y en los alrededores)
- Características hidrogeológicas

La calificación del riesgo que representa un sitio contaminado con sustancias químicas peligrosas se basa en el potencial de afectar a la salud pública y/o el ambiente. Para evaluar esto se deben considerar la concentración y las características fisicoquímicas del contaminante en cada medio, las características ambientales y la presencia de receptores o blancos que puedan ser afectados.

En cuanto a la naturaleza del contaminante deben considerarse factores tales como su toxicidad, movilidad, persistencia y bioacumulación. Es importante tomar en cuenta la distribución que tengan las sustancias químicas, ya que si están esparcidas aumenta su riesgo.

Las características ambientales se consideran para evaluar el potencial de liberación de un contaminante algunas de ellas son: topografía, precipitación pluvial, contención de los contaminantes mediante barreras naturales, propiedades de los acuíferos.

Para evaluar a los receptores se considera el número de personas que pueden estar expuestas a la contaminación, la distancia de la población al sitio contaminado, la cercanía de pozos de agua, la presencia de ambientes sensibles, de recursos ambientales y de actividades agrícolas y ganaderas.

A cada uno de los factores de evaluación se le debe asignar una calificación comprendida en un cierto intervalo. El intervalo de calificación se designa para darle peso a los factores de acuerdo a su potencial o actual relevancia en contribuir al riesgo del sitio. A los que se consideran más importantes se les asignan las calificaciones más altas.

Para cada factor se presentan varios escenarios posibles por ejemplo, el estado físico de los contaminantes puede ser líquido, lodo, sólido o gas; el relieve del sitio podría ser escarpado, moderado o plano, o cuando se evalúa el número de personas expuestas o la distancia al sitio, a cada intervalo le corresponde un valor de calificación y se deben sugerir los lineamientos de calificación o calificaciones sugeridas para cada escenario presentado. Estos valores se estiman por el grupo de estudio consultor de acuerdo con su importancia relativa en la determinación del riesgo.

En general, los sitios contaminados que exhiben impactos medibles u observables sobre el ambiente circundante o tienen un alto potencial para causar impactos negativos calificarán alto. Mientras que aquellos con impactos mínimos observados o un bajo potencial para causar impactos, generalmente recibirán una baja calificación.

Es muy importante señalar que una vez que se determina la calificación final del sitio, esta calificación se debe comparar con una escala en la que se establezca a partir de qué valor el sitio debe someterse a acciones de limpieza y restauración, con objeto de proteger la salud humana y el ambiente. De esta manera la calificación sirve como una herramienta para descartar a los sitios que no tienen necesidad de una acción posterior, como es la restauración. De aquí la importancia de contar con un sistema de clasificación para poder tomar decisiones sobre los sitios que deben tratarse y de esta manera optimizar recursos.

Junto a la evaluación de cada factor es conveniente que se documenten todas las decisiones tomadas en la selección de la calificación. Además, se debe proporcionar una guía para el grupo que está evaluando el sitio donde se explique el fundamento que soporta cada factor de evaluación, los lineamientos de interpretación de los datos y sugerir las fuentes de información para cada factor.

En los casos en que no se cuenta con suficiente información sobre el sitio, se debe dar la recomendación para asignar la calificación a los factores de que no se dispone información. Por ejemplo, se podría establecer que fuera la mitad de la calificación máxima permitida, aclarando siempre que se trata de un valor estimado (CCME, 1992).

Las personas que llevan a cabo la clasificación de los sitios deben ser profesionistas con experiencia en manejo de residuos peligrosos. Para algunos factores de evaluación es recomendable el apoyo de los hidrogeólogos regionales, también puede ser necesario consultar químicos ambientales y biólogos u otros científicos y profesionistas relacionados con el tema, para ayudar en la interpretación de las condiciones e impactos del sitio.

## **4.2 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN CUALITATIVO**

La creciente generación de residuos peligrosos dispuestos en forma inadecuada en diversos lugares, ha contribuido a la aparición de múltiples sitios contaminados abandonados, para los cuales actualmente en México no se tiene la suficiente capacidad para su atención, ni se cuenta con un sistema de clasificación soportado en bases técnicas, por esta razón, se propone una clasificación cualitativa para evaluar el posible riesgo que representa a la salud y al ambiente un sitio contaminado con sustancias peligrosas y, de esta manera, dar prioridad a los sitios para tomar decisiones sobre su limpieza o atención posterior.

Inicialmente, deberán adoptarse medidas de seguridad simples como señalización y acordonamiento del área afectada para evitar que la población y, en algunos casos también los animales, entren en contacto con el sitio y se expongan a la contaminación presente en éste. Después, se procede a realizar actividades de limpieza y restauración del sitio o en ocasiones podrían requerirse estudios adicionales más detallados, antes de llevar a cabo la restauración.

El proceso de clasificación que se propone, se basa en la evaluación de 10 factores a los cuales se les asigna un valor para obtener la calificación final del sitio, que servirá para clasificarlo.

Cabe señalar que los factores de evaluación se seleccionaron a partir del análisis de la información del apartado 4.1, considerando los aspectos más importantes y que generalmente están disponibles en la mayoría de los casos. Los valores que se proponen para cada factor se modificaron de los propuestos por EPA y CCME, con la finalidad de homologar el número de niveles que se le puede asignar a cada factor, ya que éstos sólo son valores cualitativos del riesgo intrínseco. Estos factores son:

### 1) Toxicidad del contaminante

La calificación que se le puede asignar al riesgo que representa un contaminante se basa en el potencial de causar daño a la salud. En general los contaminantes se pueden dividir en dos categorías: carcinogénicos y no carcinogénicos. La calificación para este factor considera los valores de toxicidad aguda, crónica y carcinogénica del contaminante con base en parámetros cuantitativos de dosis respuesta.

En el caso de compuestos orgánicos se debe tomar en cuenta además su biodegradabilidad, persistencia y bioacumulación. Para compuestos no cancerígenos se requieren datos de exposición crónica, por ejemplo a partir de valores de dosis de referencia RfD (por sus siglas en inglés reference dose), y parámetros de exposición aguda, para lo cual se pueden aplicar valores tales como el LD<sub>50</sub> y para el caso de compuestos carcinogénicos los datos publicados por el Instituto de Investigación Aplicada para el Cáncer (IARC Institute Applied Research Cancer).

Para poder asignarle una calificación a este factor se propone la siguiente escala:

Contaminantes contenidos en la Propuesta Ejecutiva Nacional del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) (SEMARNAT/INE 1996), a excepción de los gases de combustión y gases de invernadero. Así como los residuos radiactivos

El resto de las sustancias podrían calificarse de acuerdo con el siguiente criterio, tomando en cuenta su persistencia ambiental, bioacumulación y toxicidad (SEMARNAT/INE, RETC, 1996):

#### Persistencia Ambiental

##### Vida Media

> 100 días	5
> 50 = 100 días	3
> 10 = 50 días	2
< 10 días	0

#### Bioacumulación

$\log K_{ow} > 15,000$	5
$500 < \log K_{ow} = 15,000$	3
$20 < \log K_{ow} = 500$	2
$0 < \log K_{ow} = 20$	0

## Toxicidad

## Letalidad Aguda

LD <sub>50</sub> oral mg/kg	LD <sub>50</sub> dérmico mg/kg	LC <sub>50</sub> inhalación mg/m <sup>3</sup>	LC <sub>50</sub> acuático mg/l	
0.5	0.5	1.5	0.1	5
0.5 - 5	0.5 - 5	1.5 - 15	0.1 - 1	4
5 - 50	5 - 50	15 - 150	1 - 10	3
50- 500	50-500	150- 1500	100 -1000	2
500 - 5000	500 -5000	1500 - 15000	100- 1000	1
5000	5000	15000	1000	0

En el caso de que la sustancia presentara más de una propiedad se obtendría el promedio de ellas como la calificación para asignar.

**2) Área o volumen contaminado**

Para determinar la cantidad de contaminantes presentes debe estimarse o medirse el área o volumen de contaminación en el sitio, aquí también debe considerarse la presencia de tambos conteniendo líquidos. Este factor se puede calificar como sigue:

> 15 ha	ó	> 65000 m <sup>3</sup> o presencia de cualquier cantidad de tambos conteniendo líquidos	5
10 a 15 ha	ó	3500 a 6500 m <sup>3</sup>	4
a 10 ha	ó	1000 a 3500 m <sup>3</sup>	3
2 a 5 ha	ó	100 a 1000 m <sup>3</sup>	2
< 2 ha	ó	< 100 m <sup>3</sup>	1

**3) Potencial para afectar cuerpos de agua superficial**

La distancia del sitio a cuerpos de agua superficial afecta la probabilidad de que los contaminantes lleguen a ella, lo cual debe considerarse ya que ésta puede usarse para consumo humano, riego y recreación. Este factor se puede calificar como sigue:

0 < d =	30 m	5
30 < d =	150 m	4
150 < d =	300 m	3
300 < d =	750 m	2
750 < d =	2 km	1
d >	2 km	0

#### 4) Potencial para afectar acuíferos

El potencial para contaminar las fuentes de agua subterránea es una consideración importante, ya que los acuíferos son muy sensibles a la contaminación y su explotación está muy generalizada en México. El espesor de la capa confinante sobre el acuífero de interés afecta la atenuación de los contaminantes y la cantidad y calidad de los contaminantes que llegan al acuífero. La calificación se asigna como sigue:

	$d <$	3 m	5
3	$< d =$	10 m	4
10	$< d =$	20 m	3
20	$< d =$	30 m	2
30	$< d =$	60 km	1
	$d >$	60 km	0

#### 5) Potencial para afectar acuíferos

La rapidez a la cual migran los contaminantes a través de la capa confinante del acuífero afectará la atenuación y la carga contaminante que llegue a éste, lo cual se mide mediante la conductividad hidráulica (K) de la zona no saturada. La calificación puede ser como sigue:

	$K >$	$10^{-1}$ m/s	5
$10^{-3}$	$< K =$	$10^{-1}$ m/s	4
$10^{-6}$	$< K =$	$10^{-3}$ m/s	3
$10^{-9}$	$< K =$	$10^{-6}$ m/s	2
$10^{-11}$	$< K =$	$10^{-9}$ m/s	1
	$K <$	$10^{-11}$ m/s	0

#### 6) Potencial para afectar pozos de agua potable

La cercanía del sitio a un pozo de agua potable es una fuente de contaminación potencial de este suministro de agua, ya sea que se use para consumo humano, riego agrícola o para elaboración de alimentos. La calificación se establece de la siguiente manera:

0	$< d =$	100 m	5
100	$< d =$	300 m	4
300	$< d =$	1000 m	3
1	$< d =$	3 km	2
3	$< d =$	5 km	1
	$d >$	5 km	0

## 7) Potencial para afectar ambientes sensibles

A partir de la localización del sitio se establece la cercanía de éste a ambientes sensibles, los cuales incluyen principalmente parques nacionales, habitat donde existen especies amenazadas, en peligro de extinción o endémicas, parques marinos y áreas de protección de flora y fauna. La calificación se selecciona a partir de lo siguiente:

0	< d =	500 m	5
500 m	< d =	1 km	4
1	< d =	2 km	3
2	< d =	3 km	2
3	< d =	5 km	1
	d >	5 km	0

## 8) Potencial para afectar a la población

Es importante considerar el impacto por exposición directa a la contaminación del sitio que puede sufrir la población que reside en él o está muy próxima a éste. La distancia de la población al sitio puede calificarse considerando los siguientes valores:

0	d <	500 m	5
500	< d =	1 m	4
1	< d =	2 m	3
2	< d =	3 km	2
3	< d =	4 km	1
	d >	4 km	0

## 9) Uso del suelo en los alrededores

Puede haber un potencial de exposición humana a la contaminación presente en un sitio a través de las actividades que se llevan a cabo alrededor del mismo, esto puede evaluarse de acuerdo al uso del suelo en sus alrededores como sigue:

Uso del suelo	Distancia al sitio		
	0 - 300m	300 m - 1 Km	1 - 5 Km
Residencial	5	4	3
Parques/Escuelas	5	4	3
Agrícola	4	3	2
Comercial/Industrial	3	2	1

### **10) Impacto adverso conocido sobre receptores**

Es importante revisar si existe información sobre el impacto adverso en humanos o animales domésticos debido a la contaminación del sitio, por ejemplo a través de la medición de niveles de contaminantes en sangre o por la presencia de animales muertos. La calificación podría asignarse como sigue:

Efecto adverso conocido	5
Fuerte sospecha de efectos adversos	3
No existe efecto adverso conocido	1

Para asignarle una calificación al sitio contaminado que se está evaluando, se le da valor a cada uno de los diez factores anteriores y se suman, a partir de una calificación de 35 podría considerarse el sitio para acciones prioritarias de restauración.

## CAPÍTULO 5

### PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CRITERIOS DE LIMPIEZA

#### 5.1 FUNDAMENTOS DE LOS CRITERIOS DE LIMPIEZA

La decisión de limpiar un sitio se determina suponiendo que existen ciertas concentraciones de contaminantes las cuales si no se exceden en el ambiente se consideran permitidas. Comúnmente estos criterios de limpieza o concentraciones de contaminantes aceptables se aplican a suelos (Killian, D., 1989).

Los criterios de limpieza son concentraciones de sustancias químicas que aseguran la protección de la salud humana, del agua superficial, del agua subterránea y del aire, y que no poseen un riesgo significativo para la salud humana, por lo tanto las sustancias químicas pueden permanecer en el sitio a estas concentraciones como material residual.

Los siguientes principios se aplican para determinar las concentraciones aceptables de contaminantes (Killian, D., 1989):

- ♦ El suelo está contaminado si contiene una cierta concentración de contaminantes
- ♦ Los contaminantes pueden moverse desde el suelo hacia otros ambientes (agua superficial, agua subterránea, aire, sedimentos, biota) por varios mecanismos de transporte.
- ♦ Los organismos vivos (hombre, animales o plantas) pueden estar expuestos a los contaminantes del suelo o a los contaminantes que se transportan desde el suelo hacia otros ambientes.
- ♦ La exposición de organismos a uno o más de estos contaminantes a ciertas concentraciones puede producir uno o más efectos tóxicos indeseables.

Existen dos tendencias generales para establecer criterios o estándares de limpieza para sitios contaminados con materiales peligrosos (Booth y Jacobson, 1992):

- 1.- Estándares iguales para todos los estados de un país, es decir límites numéricos de concentración uniformes, o
- 2.- Estándares específicos del sitio basados en evaluaciones del riesgo a la salud y ecológico, factibilidad técnica y costo.

Si un país no cuenta con una estrategia de toma de decisión consistente para determinar cuál propuesta se debe usar para establecer estándares de limpieza para sitios contaminados con materiales peligrosos, la falta de esta propuesta da por resultado requerimientos de limpieza estrictos o poco protectores en algunos sitios y el desarrollo de estándares ineficientes en otros (Booth y Jacobson, 1992).

Los estándares de limpieza uniformes son recomendables, porque pueden evitar la necesidad de realizar análisis específicos del sitio que son costosos, tales como evaluaciones del

riesgo a la salud humana. Además, proporcionan un alto grado de consistencia y predicción para los administradores del sitio. Sin embargo, existe el riesgo de que los estándares de limpieza uniformes se apliquen inadecuadamente dando por resultado acciones de limpieza que no protegen lo suficiente o son sobreprotectoras. La aplicación generalizada de criterios de limpieza uniformes pueden tender a que éstos se vuelvan inflexibles a modificaciones basadas en avances en la ciencia o en las tecnologías de limpieza (Booth y Jacobson, 1992).

En muchos países, generalmente los estándares de limpieza se basan en criterios estatales o federales, tales como los de calidad del agua superficial y niveles máximos de contaminantes para agua potable. Sin embargo, estos criterios sólo existen para un número limitado de contaminantes, además de que se establecen para regular las descargas permitidas o para proteger los recursos en cuanto a sus usos, como agua para recreación o consumo doméstico, por lo tanto no son apropiados para la limpieza de sitios contaminados (Booth y Jacobson, 1992).

Los estándares de limpieza específicos de un sitio en algunas situaciones son recomendables porque están hechos a la medida para responder a los requerimientos y condiciones únicos del sitio específico. Estos estándares, por ejemplo pueden ser apropiados para un sitio donde están expuestos al riesgo un gran número de receptores tales como plantas, animales y seres humanos por la presencia de contaminantes en varios ambientes. Sin embargo, debido a que los estándares de limpieza específicos del sitio se desarrollan usando complejas evaluaciones de factibilidad técnica y del riesgo a la salud humana y ecológico, los costos para desarrollarlos pueden ser excesivos y requerirse mucho tiempo; además, no están disponibles guías apropiadas para determinar los tipos y alcances de los análisis necesarios para evaluar los estándares específicos de un sitio.

Las técnicas para desarrollar estándares de limpieza se basan principalmente en evaluaciones del riesgo ecológico y a la salud humana e involucran la modelación del transporte y destino de contaminantes en varios medios. Algunos estándares se desarrollan considerando también las concentraciones ambientales naturales. Sin embargo, existe una falta de consistencia y de guías sobre los métodos para desarrollar estándares de limpieza en diferentes medios.

En muchos casos la variación en los estándares de limpieza se puede atribuir a diferencias en los objetivos de ésta, en las condiciones específicas del sitio tal como uso futuro del suelo y en la sensibilidad de los receptores primarios. Los estándares de limpieza basados sólo en las evaluaciones de riesgo a la salud humana no son protectores del ambiente porque hay diferencias entre la toxicidad humana y ecológica y diferencias en las rutas de exposición (Booth y Jacobson, 1992).

Los estándares específicos deben desarrollarse considerando las concentraciones naturales en el ambiente, el riesgo ecológico y a la salud humana, los estándares y criterios federales y estatales ya existentes, y la mejor tecnología disponible. Además, es conveniente incluir los criterios para decidir cuáles estándares deben usarse para un sitio determinado: los estándares uniformes o los específicos del sitio.

Los principios de la evaluación de riesgo se han usado ampliamente en el desarrollo de estándares de limpieza del suelo. El proceso es una herramienta útil para ayudar a los administradores de riesgo a evaluar y comparar la efectividad de las alternativas y tecnologías de restauración para reducir el riesgo y diseñar un plan de restauración (OMME, 1994).

Los criterios o estándares de limpieza se desarrollan para cumplir con los siguientes objetivos (OMEE,1994):

- Llevar a cabo la restauración de sitios contaminados a niveles que protejan la salud humana y el ambiente natural contra el potencial de efectos adversos.
- Proteger a la salud humana y el ambiente natural con base en criterios de calidad, considerando los efectos adversos de los contaminantes en suelo, agua y sedimentos.

La determinación de los efectos adversos se basa en los impactos potenciales sobre receptores para diferentes usos de suelo, la frecuencia e intensidad de la exposición a través de las principales rutas (inhalación, ingestión y contacto dérmico); y en las características físicas y químicas que afectan el transporte y destino de contaminantes en el ambiente.

Los estándares para el suelo se basan en la evaluación del riesgo a la salud humana debido a la exposición directa e indirecta con el suelo por contacto dérmico, ingestión o inhalación. Esta evaluación del riesgo se determina con base en escenarios de exposición fundamentados en frecuencia, duración e intensidad de la exposición para niños y adultos. Bajo cada escenario de exposición, la concentración límite de un contaminante en suelo se calcula usando la más sensible de las diferentes situaciones receptor/exposición (OMEE, 1994).

Una vez que se hacen los cálculos para cada uno de los escenarios de exposición, aquél que produce el requerimiento de limpieza más estricto se selecciona como el nivel de limpieza. Se debe señalar que el mismo escenario de exposición no genera el nivel de limpieza para todas las sustancias químicas presentes en el sitio (Stephanatos, 1991).

Para calcular los estándares de limpieza con base en el riesgo se necesita información sobre toxicidad, dosis-respuesta y exposición, y datos de constantes físicas y químicas de los contaminantes.

La información sobre dosis-respuesta necesaria para desarrollar los estándares se refiere a (OMEE, 1994):

- Toxicidad asociada con los efectos (no carcinogénicos) límites en la salud.
- Toxicidad respecto a carcinogenicidad a partir de estudios epidemiológicos humanos o de estudios en animales de laboratorio.
- Factores de absorción relativa usados para relacionar los valores de toxicidad de la literatura con las rutas de exposición de interés.

Los valores de Dosis de Referencia Oral (RfD, por sus siglas en inglés oral reference dose) y Concentraciones de Referencia de Inhalación (RfC), se pueden obtener de la base de datos del Sistema de Información de Riesgo Integrado (IRIS, Integrated Risk Information System) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) y de las Tablas Resumen de la Evaluación de Riesgos a la Salud (HEAST, Health Effects Assessment Summary Tables) de la USEPA.

A continuación se describe brevemente el desarrollo de los criterios de limpieza en Canadá y Estados Unidos:

### 5.1.1 Canadá

En Canadá, los estándares de limpieza para suelo y agua subterránea se han desarrollado para proteger a la salud humana y al ambiente considerando varios escenarios de exposición a contaminantes relacionados a tres grupos comunes de uso del suelo: agrícola, residencial/parques e industrial/comercial y dos clases de agua: potable y no potable. El desarrollo de los criterios numéricos se basó en parte en las siguientes consideraciones (OMEE, 1995):

- Rutas de exposición directa e indirecta para los receptores ecológicos y humanos (terrestres y acuáticos)
- Destino y movimiento ambiental de los contaminantes.
- Suposiciones acerca de las probables rutas de exposición para receptores sensibles.

Para desarrollar estos niveles de protección se usaron modelos de transporte suelo/aire, suelo/agua subterránea y suelo/aire de interiores.

Finalmente, los estándares de limpieza o valores genéricos se compararon con las capacidades de detección analítica y con los antecedentes de las diferentes provincias del país de los niveles de calidad del suelo, para asegurar que estos criterios genéricos no estuvieran por abajo de estos niveles. Esta comparación produce ajustes a los valores numéricos para el componente ecológico y de salud humana para cualquier parámetro dado (MOEE, 1995).

Adicionalmente, Canadá desarrolló un grupo de valores llamados Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites, que son límites numéricos para contaminantes en suelo y agua con la finalidad de mantener, mejorar o proteger la calidad ambiental y la salud humana en sitios contaminados en general. Estos criterios se adoptaron directamente a partir de los valores que existen en las diferentes jurisdicciones en Canadá; también incluyen los criterios de calidad para el agua potable ya establecidos (CCME, 1991).

Estos criterios de calidad realmente no cuentan con un soporte técnico y científico completo; sin embargo, se continúan evaluando y modificando conforme se tiene mejor conocimiento de los efectos que producen los contaminantes. Han sido establecidos para dar respuesta rápida a la atención de múltiples sitios abandonados, y sirven como indicadores de la calidad de un sitio, para determinar la necesidad de restauración del sitio o bien de una investigación más profunda o de una evaluación del riesgo del sitio (CCME, 1991).

### 5.1.2 Estados Unidos de Norteamérica

En Estados Unidos se han establecido como estándares de limpieza los requerimientos aplicables o relevantes y apropiados conocidos como ARAR's por sus siglas en inglés (applicable or relevant and appropriate requirements) y cuando éstos no están disponibles o no son lo suficientemente protectores, porque existen muchos contaminantes o múltiples rutas de exposición, se desarrollan evaluaciones de riesgo para determinar los estándares de limpieza específicos para el sitio (HWSRM, 1994).

Existen tres fuentes de información para determinar los objetivos de limpieza apropiados: estatutos, regulaciones y lineamientos. Para determinar estos objetivos, el programa Superfund para limpieza de sitios contaminados cuenta con tres fuentes: La Sección 121 del SARA (Superfund Amendments and Reauthorization Act), El Plan Nacional de Contingencia para contaminación de sustancias peligrosas y aceites conocido como NCP (National Oil and Hazardous Substances Pollution Contingency Plan), y el Manual de Cumplimiento del CERCLA con otras leyes (CERCLA Compliance with other Manual) (HWSRM, 1994).

Todas las acciones de limpieza de un sitio contaminado deben proteger la salud humana y el ambiente y cumplir con los ARAR's, y adicionalmente cuando sea posible deben cumplir con los estándares de las siguientes regulaciones ambientales federales: metas de los niveles máximos de contaminantes (Maximum contaminant level goals, MCLGs) establecidos en el Acta de Agua Potable Segura (Safe Drinking Water Act), criterios de calidad del agua (Water quality criteria) establecidos en el Acta del Agua Limpia (Clean Water Act) y las concentraciones límites alternativas (Alternative concentration limits, ACLs) establecidas en el Acta de Disposición de Residuos Sólidos (Solid Waste Disposal Act), (HWSRM, 1994).

Cuando se incorporan los requisitos de otras leyes ambientales federales y estatales a un plan de restauración se vuelven ARAR's. Todos los planes de restauración deben cumplir con los ARAR's designados a menos que se pueda aplicar una de las exclusiones establecidas en la ley; la principal es que el Congreso permite una excepción general para establecer los requerimientos de limpieza estrictos donde se demuestre que se consigue una adecuada protección a la salud pública, para lo cual se usa el análisis del riesgo (HWSRM, 1994).

Los ARAR's se clasifican en tres categorías: 1) Requerimientos específicos de las sustancias químicas, 2) Requerimientos específicos del lugar, y 3) Requerimientos específicos de la acción (HWSRM, 1994).

## **5.2 DESARROLLO DE LOS CRITERIOS DE LIMPIEZA**

A continuación se detalla el procedimiento para determinar los criterios de limpieza o concentraciones aceptables de contaminantes, con base en el riesgo que representan para la salud humana y el ambiente. Este proceso toma en cuenta dos consideraciones:

- 1.- Destino y transporte de contaminantes, y
- 2.- Evaluación del riesgo

### **5.2.1 Destino y Transporte de Contaminantes**

Para determinar el riesgo que un contaminante posee en el suelo o en la salud humana y en el ambiente se deben considerar los conceptos de destino y transporte en el ambiente. Estos conceptos generalmente se usan para predecir el movimiento de contaminantes entre los diferentes medios, esto es, suelo, agua superficial, sedimento, agua subterránea, aire y biota; se basan en las características específicas del sitio y las propiedades fisicoquímicas del contaminante.

Las características físicas y químicas de los contaminantes específicos presentes en el suelo incluyen:

- Concentración
- Solubilidad en agua
- Presión de vapor
- Concentración de vapor saturado
- Calor latente de vaporización
- Coeficiente de difusión
- Peso molecular
- Constante de la ley de Henry
- Constante de disociación
- Punto de ebullición
- Punto de fusión
- Estado de oxidación
- Rapidez de biodegradación
- Coeficiente de distribución
- Factor de bioconcentración
- Solubilidad en fase no acuosa

Las características específicas del sitio se refieren a las del ambiente actual en el cual existe la contaminación y aquél al que pueden migrar los contaminantes debido a varios mecanismos de transporte. Tales características se presentan en la Tabla 5.1.

Las características específicas del sitio y del contaminante son numerosas y necesarias para predecir, mediante modelación, el transporte y destino del contaminante en el ambiente para una situación dada. Rara vez se utilizan todas, generalmente depende del número de mecanismos de transporte que se consideran y/o de la complejidad del modelo usado, conforme estos dos factores aumentan, el número de características se incrementa. A la inversa, si el número de mecanismos de transporte que se está considerando es más pequeño y el modelo de transporte se vuelve más simple, el número de características también disminuye.

**Tabla 5.1. Características específicas del sitio**

Condiciones meteorológicas	- temperatura - velocidad del viento - humedad - precipitación
Propiedades del suelo en la zona no saturada	- tipo de suelo - porosidad - densidad - contenido de agua - contenido de arcilla - contenido de materia orgánica - pH del suelo - capacidad de intercambio catiónico
Condiciones geológicas/hidrogeológicas	- espesor del lecho de roca y/o agua subterránea - tipo de roca firme y propiedades del suelo en la zona saturada - presencia de acuíferos confinados y/o noconfinados - conductividad hidráulica - gradiente hidráulico - porosidad efectiva - espesor del acuífero - rapidez de recarga
Topología/topografía del sitio	- gradientes y contornos superficiales - proximidad de cuerpos de agua superficiales y - tipo y cantidad de vegetación
Características del agua superficial	- tipo de cuerpos de agua superficial - dimensiones del cuerpo - rapidez de flujo del agua superficial
Características del sedimento	- contenido de materia orgánica - tamaño de partícula - volumen o cantidad de sedimento
Características de la biota	- proximidad al sitio - factores de bioconcentración - posición en la cadena alimenticia

Los mecanismos de transporte más importantes para determinar las concentraciones de contaminantes aceptables en el suelo incluyen:

- Migración de contaminantes a través de la zona no saturada del suelo hacia el agua subterránea
- Migración de contaminantes a través de la zona saturada (agua subterránea)
- difusión y volatilización hacia la atmósfera
- Migración de contaminantes sobre el suelo por medio de agua de precipitación y desagüe, y por erosión dentro de las aguas superficiales
- Asimilación de contaminantes por plantas y animales

En muchas ocasiones, la ruta de migración más significativa para el caso de la determinación de los niveles de limpieza es el movimiento de contaminantes a través de la zona no saturada del suelo hacia el agua subterránea.

Para modelar los escenarios de exposición potencial se usan suposiciones conservadoras a través de todo el proceso para representar las situaciones del peor caso probable. El proceso de modelación es un proceso iterativo que consiste básicamente en los siguientes tres pasos (Stephanatos, 1991):

- 1.- Definir el nivel de detalle de la modelación requerido para cumplir con los objetivos del estudio. En este paso se establecen las cuestiones a las que debe responder el modelo.
- 2.- Evaluar la capacidad del modelo matemático para simular el transporte y destino del contaminante en el sitio específico. Generalmente se selecciona el más simple que pueda satisfacer los objetivos del estudio. Para reducir la incertidumbre asociada al modelo deben usarse datos validados y calibrados.
- 3.- Revisar los resultados obtenidos de la modelación para dar por concluido el estudio cuando se responde a las cuestiones establecidas en el primer punto.

### **5.2.2 Evaluación del Riesgo (Li Muller y Marsh, 1994)**

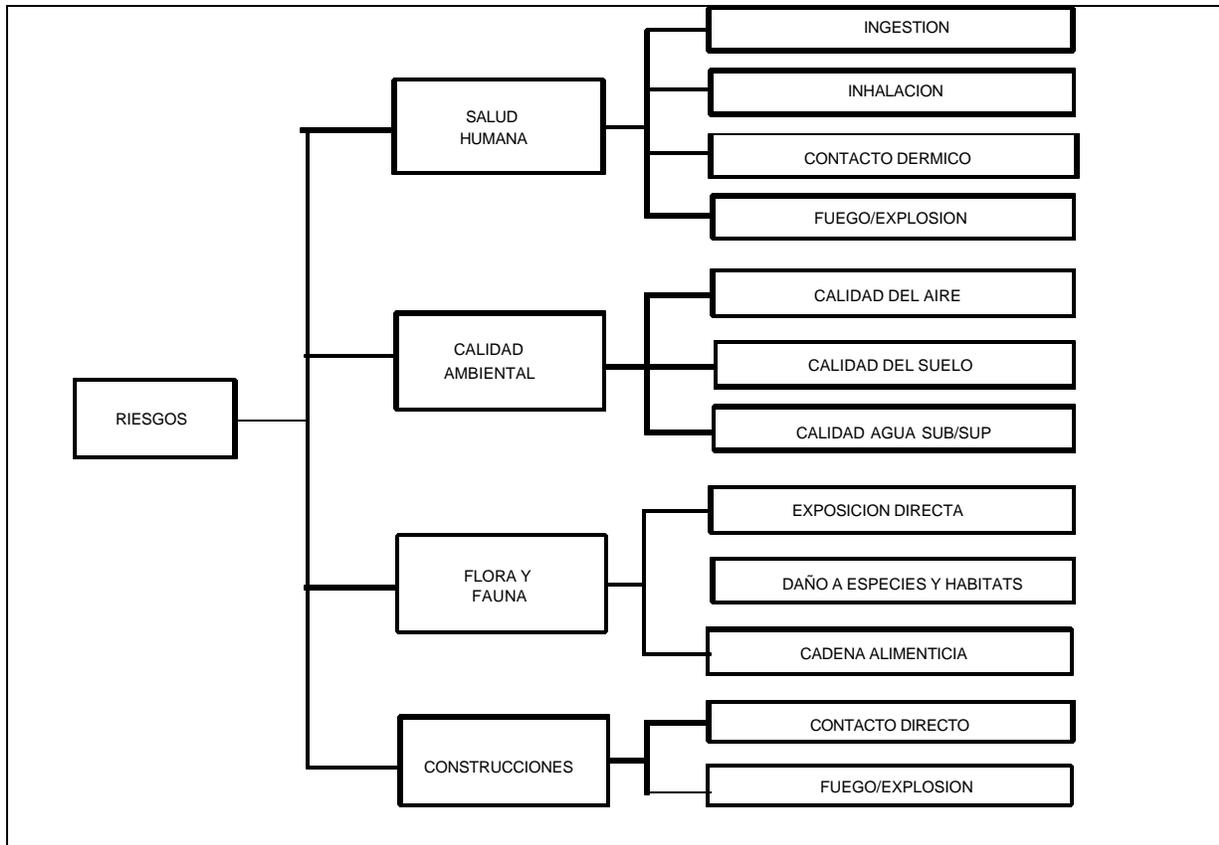
La evaluación del riesgo es una herramienta útil para estimar el potencial de los efectos adversos que podría originar la presencia de contaminación en un lugar. Los principios de la evaluación de riesgo se pueden utilizar para desarrollar los criterios de limpieza para sitios contaminados. Asimismo, la información derivada de la evaluación de riesgo puede ser de ayuda en la determinación de los criterios y las opciones de restauración.

La evaluación del riesgo consiste en la evaluación técnica y científica de la naturaleza y magnitud del riesgo aplicando criterios objetivos para definir los efectos en la salud debido a la exposición de individuos o poblaciones a contaminantes y situaciones peligrosas. El riesgo se define como la probabilidad de que un evento adverso ocurra. Se puede describir con la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = \text{Severidad del evento (peligro)} \times \text{Exposición}$$

El efecto final en la salud debido a la exposición a un contaminante es la aparición o no de cáncer y ambas situaciones deben analizarse. La calidad de la evaluación depende en gran medida de la calidad de la información toxicológica y sobre exposición, y de los profesionales que la llevan a cabo, tomando en consideración que la incertidumbre está inherente en el proceso de evaluación.

En la figura 5.1 se presentan los ejemplos de riesgos, receptores y rutas de exposición



**Figura 5.1. Ejemplos de riesgos, receptores y rutas de exposición (UNEP, 1994)**

## Manejo del Riesgo

El manejo del riesgo es un proceso mediante el cual se desarrollan y establecen las estrategias para controlar, mitigar o manejar el riesgo. En este proceso se comparan los méritos de una alternativa con los de otras y se selecciona la más apropiada para su aplicación. El manejo del riesgo integra los resultados obtenidos a partir de la evaluación del riesgo, con información sobre aspectos técnicos, socioeconómicos, y políticos, y las acciones de control para tomar una decisión (Li-Muller y Marsh, 1994).

El desarrollo de alternativas, su evaluación con base en sus efectos sobre la salud y a sus impactos en factores socioeconómicos, técnicos y legales, y la comparación entre alternativas constituyen un proceso iterativo. Es esencial separar claramente la evaluación del riesgo del manejo de riesgo.

Se pueden considerar dos tipos básicos de decisiones que se toman dentro del manejo del riesgo (MOEE, 1995):

a) Las decisiones que producen un ajuste o modificación del criterio de limpieza con base en los factores específicos del sitio. Estas modificaciones pueden obtenerse por ejemplo, haciendo ajustes a los diferentes modelos de transporte en suelo, aire y/o agua subterránea, o por modificaciones debido a las características hidrogeológicas suelo/agua subterránea, y

b) Las decisiones que involucran el uso de mecanismos para reducir, eliminar o bloquear las rutas de exposición. Estas decisiones involucran por ejemplo, la limitación del uso del suelo, limitar el acceso al sitio a ciertos receptores u otras medidas para minimizar el movimiento de contaminantes.

El manejo del riesgo debe considerar la fuente y naturaleza del efecto adverso, las medidas de control usadas para eliminar o reducir el efecto adverso a niveles aceptables, las partes responsables del monitoreo y mantenimiento de las medidas adoptadas y el programa de dichas actividades, los fondos disponibles para llevar a cabo las medidas correctivas requeridas y las medidas de contingencia (MOEE, 1995).

### **5.2.2.1 Evaluación del Riesgo a la Salud Humana**

La evaluación del riesgo a la salud humana es una evaluación científica de la probabilidad de consecuencias adversas a la población humana debido a perturbaciones en el ambiente. Usa herramientas científicas, estadísticas y de modelación para analizar información relativa al riesgo. Los métodos utilizados tienen que ser biológicamente significativos (Li-Muller y Marsh, 1994).

Los cuatro elementos principales que deben considerarse en la evaluación del riesgo a la salud son:

- Identificación del peligro
- Evaluación de la toxicidad
- Evaluación de la exposición
- Caracterización del riesgo

#### Identificación del peligro

Consiste en determinar si un contaminante ambiental particular está presente o es probable que lo esté e identificar sus efectos adversos, tal como efectos físicos y químicos (persistencia, bioacumulación), toxicológicos (cancerígenos, mutagénicos) y de salud (enfermedades).

Inicialmente, los peligros, rutas de migración y receptores asociados se identifican a través de la investigación preliminar y para definir las condiciones específicas del sitio se usan los datos de la evaluación detallada.

#### Evaluación de la toxicidad (dosis-respuesta)

Consiste en la determinación de la relación cuantitativa entre la magnitud de exposición y la probabilidad de ocurrencia de un efecto adverso particular, así como las incertidumbres asociadas con la determinación.

#### Evaluación de la exposición

Es la determinación o estimación de la magnitud, frecuencia, duración y rutas de exposición de los contaminantes y la evaluación de las incertidumbres asociadas con la determinación.

### Caracterización del riesgo

Integra los resultados de las evaluaciones de exposición y de toxicidad para describir la naturaleza y magnitud del riesgo a partir de cada ruta de exposición, la población y la subpoblación expuesta al mayor riesgo y las incertidumbres asociadas con el análisis global.

En muchas circunstancias, las evaluaciones de toxicidad publicadas pueden adoptarse y utilizarse en el proceso de evaluación del riesgo. En este caso, se debe revisar críticamente la calidad de las bases de datos utilizadas en la evaluación, la inclusión de datos toxicológicos recientes, la calidad de la evaluación en sí misma y la conveniencia de la evaluación en el contexto del problema.

Debido a que la evaluación abarca un amplio grupo de herramientas científicas y estadísticas, normalmente requiere de un equipo de profesionales con experiencia en varias disciplinas tales como, toxicología, química ambiental, hidrogeología, modelos de transporte y destino ambiental.

#### **5.2.2.2 Evaluación del Riesgo Específico para un Sitio**

La evaluación del riesgo específica para un sitio permite incorporar consideraciones particulares del sitio en el desarrollo de los criterios de limpieza para suelo y agua subterránea. Incorpora ambos procedimientos: la evaluación y el manejo del riesgo (MOEE, 1995).

La evaluación del riesgo específica de un sitio para una sustancia química consiste en evaluar la probabilidad de consecuencias adversas a la salud causadas por la presencia de una sustancia en un sitio dado. Toma en consideración que muchos contaminantes pueden estar presentes simultáneamente en varios medios tal como aire, suelo y en productos de consumo como alimentos, y que alcanzan a los receptores a través de múltiples rutas de exposición (Li-Muller y Marsh, 1994).

El primer paso en la caracterización del riesgo en un sitio es determinar qué poblaciones receptoras están presentes en o cerca del sitio y después determinar el riesgo asociado con la presencia de sustancias químicas en los receptores identificados. El riesgo se estima en 3 pasos principales:

- Evaluación de la toxicidad
- Evaluación de la exposición
- Caracterización del riesgo

#### Evaluación de la toxicidad

La evaluación de la toxicidad determina:

- Cuáles son los efectos adversos potenciales sobre los receptores asociados con la exposición a sustancias químicas (identificación del peligro)

- Cuál es la relación entre la magnitud de exposición a partir de diferentes rutas de exposición y la probabilidad de que ocurran estos efectos adversos en los receptores (evaluación dosis-respuesta).

Para esto se analiza una amplia gama de información como estudios epidemiológicos humanos, estudios de toxicidad animal y otros datos de soporte que incluyen estudios metabólicos y farmacocinéticos, cultivos de células y estudios con microorganismos. Generalmente toda la información está enfocada al primer punto. Mientras que la evaluación dosis-respuesta involucra otras consideraciones, como es un conjunto de datos apropiados para usarse en la extrapolación de unas especies a otras y la extrapolación de dosis altas a bajas. La relación dosis-respuesta es una de las piezas clave en la información necesaria para determinar los criterios de limpieza para sustancias químicas.

#### Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición responde a tres aspectos básicos:

- Cuáles son las rutas de exposición (ingestión, inhalación, contacto directo) por las cuales los receptores están potencialmente expuestos
- Cuál es la frecuencia y duración de las exposiciones actual y/o potencial
- Cuál es la magnitud de estas exposiciones

Se desarrollan estimaciones de exposición máximas y promedio para poblaciones relevantes con base en suposiciones de uso de suelo actual y futuro. Para hacer esto se deben determinar las categorías de uso de suelo actual y futuro y se tienen que identificar las poblaciones expuestas. Para estos escenarios de uso de suelo se tienen que identificar las rutas potenciales de exposición de todos los medios, estimar la concentración en el punto de exposición para las rutas específicas.

La evaluación de la exposición y de la toxicidad generalmente requiere el uso de modelos para describir las relaciones peligro/ruta/receptor, tal como modelos de transporte y destino ambiental y modelos dosis/respuesta alta/baja. Los modelos pueden ser simples o complejos, pero es esencial asegurar que son representativos de la situación que se evalúa y que cualquier suposición que se usa es válida (UNEP, 1994).

Los datos colectados durante la evaluación de la toxicidad y de la exposición se combinan para estimar las dosis probables de que reciba un receptor bajo condiciones de exposición definidas (UNEP, 1994).

#### Caracterización del riesgo

La última etapa es la caracterización del riesgo, en ella se integra la información de la evaluación de la exposición y de la toxicidad. Se determina si los niveles de contaminación actuales o futuros en el sitio son de interés potencial, comparando la información de la toxicidad de una sustancia química específica contra los niveles de exposición medidos y los niveles calculados con modelos de transporte y destino (Li-Muller, A y Marsh, M, 1994). Los valores de la exposición y la toxicidad se comparan con valores de referencia para obtener una medida de la probabilidad de que el daño ocurrirá (UNEP, 1994).

Existen varias fuentes de información sobre criterios de referencia para diferentes tipos de riesgos como: Dosis de referencia crónica (Chronic Reference Dose RfD), Cancer Slope Factors (CSFs), International Register of Potentially Toxic Chemicals, Environmental Quality Standards (UNEP, 1994).

La estimación del riesgo específica para un sitio será requerida cuando no están disponibles criterios de limpieza genéricos para los contaminantes que se están evaluando (UNEP, 1994).

### **5.2.2.3 Evaluación del Riesgo Ecológico** (Li-Muller y Marsh, 1994)

Es un proceso que intenta estimar y, donde es posible, cuantificar el riesgo que causa al ambiente y a los seres vivos, sin incluir a los humanos, la presencia de una sustancia química en concentraciones superiores a las que existen de manera natural. Al igual que la evaluación de riesgo a la salud humana, la de riesgo ecológico es una evaluación técnica y científica de la naturaleza y magnitud del riesgo atribuible al contaminante.

La evaluación del riesgo ecológico puede ser predictiva o retrospectiva. La primera intenta predecir los efectos futuros de un contaminante en el ambiente y se usa para determinar el riesgo potencial de una sustancia química antes de su liberación en el ambiente. La segunda intenta estimar el efecto que ya ha tenido un contaminante sobre el ambiente y se usa para ayudar a determinar los procedimientos de restauración.

La evaluación de riesgo ecológico se utiliza principalmente en dos situaciones:

- 1) Cuando existen sitios potencialmente sensibles o receptores especiales, tales como especies amenazadas, endémicas o en peligro de extinción, reservas ecológicas, y
- 2) Cuando no existen criterios de limpieza, o sí existen pero por alguna razón no se aplican tanto la evaluación del riesgo específica de un sitio como la del riesgo ecológico deben usarse para desarrollar los criterios de limpieza cuando éstos no están disponibles.

La información obtenida de las evaluaciones preliminar y detallada del sitio proporcionan las bases para planear y realizar la evaluación del riesgo ecológico.

Existen cuatro elementos que deben considerarse para llevar a cabo una evaluación del riesgo ecológico. Estos elementos son:

- Caracterización del receptor
- Evaluación de la exposición
- Evaluación del peligro
- Caracterización del riesgo

#### Caracterización del receptor

Es el proceso de identificación de los receptores ecológicos (no humanos) de interés, los efectos contra los cuales es deseable proteger a los receptores y las rutas específicas por las cuales entran en contacto cada uno de estos receptores con los contaminantes.

### Evaluación de la exposición

Es la evaluación de la exposición potencial de los receptores ecológicos de interés a determinadas sustancias. Determina las rutas de exposición, magnitud, frecuencia y duración.

### Evaluación del peligro

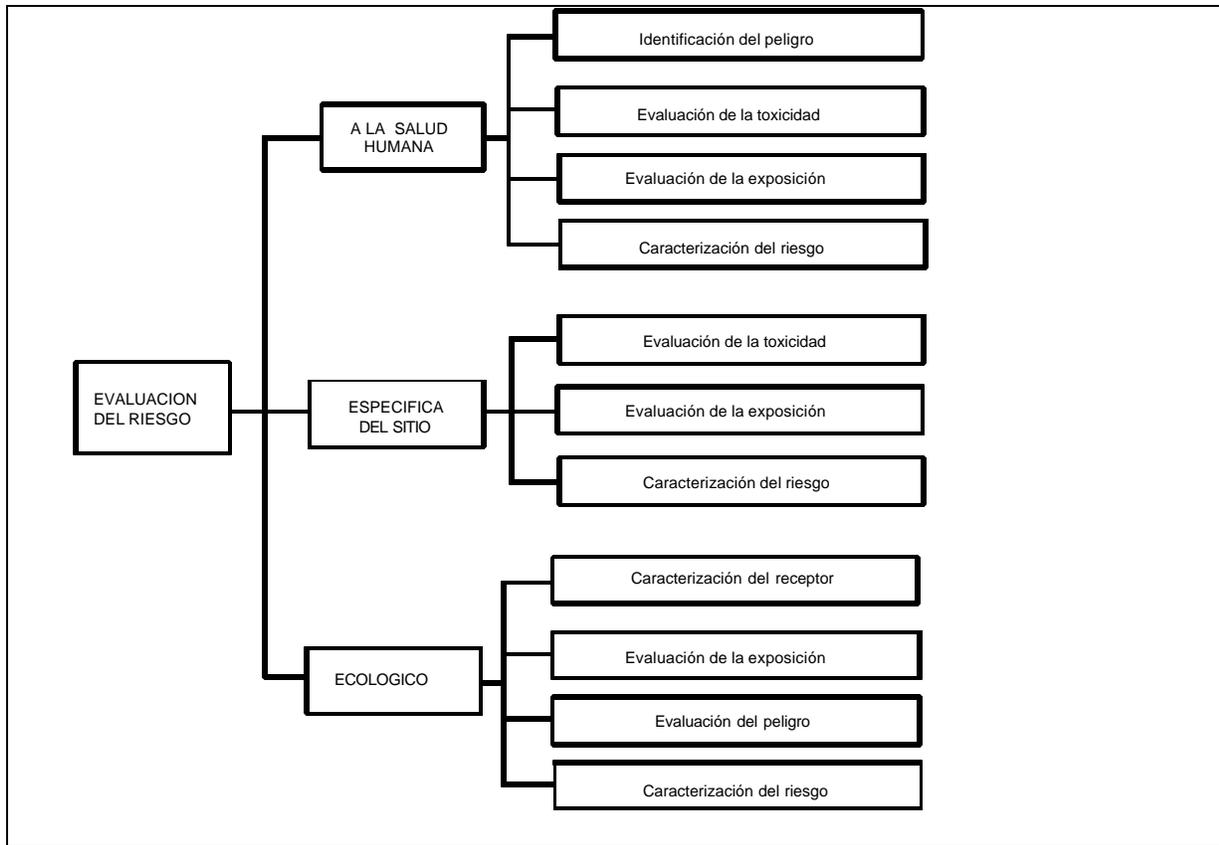
Es el proceso para determinar el potencial de contaminantes específicos de ocasionar efectos adversos en individuos o poblaciones expuestas, para estimar la relación entre el grado de exposición y la severidad de los efectos.

### Caracterización del riesgo

Es la integración de la información derivada de la caracterización del receptor, evaluación de la exposición y de la evaluación del peligro. Dando una estimación del grado de riesgo a partir de contaminantes específicos en los receptores ecológicos.

En la figura 5.2 se presentan los elementos que componen los diferentes tipos de evaluaciones del riesgo anteriormente descritas.

A manera de resumen es posible decir que los criterios de limpieza para suelo se desarrollan para determinar la cantidad de sustancias químicas que pueden permanecer en él dentro de niveles de riesgo aceptables para la salud humana y el ambiente. Debido a que el riesgo es una función de la toxicidad y los tiempos de exposición, un criterio de limpieza aceptable para suelo puede determinarse estableciendo un nivel de riesgo aceptable (por ejemplo de  $10^{-6}$ ), determinando la cantidad de exposición humana (en mg de suelo por día por kilogramo de peso de un ser humano), entonces se resuelven las ecuaciones para determinar la concentración de la sustancia química que puede permanecer en el suelo. Para hacer el análisis del riesgo se pueden usar los factores potenciales de cáncer de la USEPA para obtener los valores de toma crónicos aceptables para sustancias químicas carcinogénicas. Las dosis de referencia (RfDs) se pueden usar para establecer las dosis aceptables para sustancias químicas no carcinogénicas (Stephanatos, 1991).



**Figura 5.2. Etapas que componen las diferentes evaluaciones del riesgo**

Las sustancias químicas que se evalúan incluyen todas las que fueron detectadas en los residuos, las que fueron encontradas en concentraciones altas, o las que son tóxicas, móviles y persistentes en el suelo o el agua subterránea (Stephanatos, 1991).

Los escenarios de exposición humana y ambiental que se consideran son: exposición humana al agua superficial, al agua subterránea, al agua de ríos y la ingestión de peces, y protección de la vida acuática.

De esta manera los principales pasos para la determinación de los criterios de limpieza son (Stephanatos, 1991):

1.- Selección de las sustancias químicas indicadoras.

Se debe determinar cuáles son las sustancias químicas que se van a considerar para establecer los niveles de limpieza, tomando en cuenta su concentración, propiedades físicas y químicas, destino y persistencia, toxicidad y movilidad ambiental.

En los sitios donde existen sustancias carcinogénicas y no carcinogénicas, generalmente las primeras son las que guiarán el proceso de restauración porque las concentraciones correspondientes al riesgo de los receptores normalmente son menores que las concentraciones aceptables para sustancias no carcinogénicas.

## 2.- Identificación de las rutas de exposición potencial

Una ruta de exposición completa tiene cuatro componentes: una fuente de liberación de sustancias químicas, un medio de transporte ambiental, un punto donde los receptores humanos puedan estar expuestos, y una ruta de exposición probable. Siempre es necesario simplificar el número total de rutas de exposición e incluir solo el análisis del peor caso más probable.

## 3.- Determinación de concentraciones objetivo en los puntos de exposición

En esta etapa se calculan las concentraciones para cada sustancia química indicadora con base en un intervalo de riesgo de cáncer de  $10^{-4}$  a  $10^{-7}$ , generalmente se emplea el valor de  $10^{-6}$ .

### **5.2.2.4 Incertidumbre Asociada a la Evaluación del Riesgo**

La estimación del riesgo puede estar sujeta a incertidumbre debido a la falta de datos suficientes, por ejemplo sobre la forma química, el comportamiento y concentraciones de los contaminantes; la naturaleza de la exposición (cuándo, con qué frecuencia y durante qué tiempo) y el efecto de la exposición (especialmente a dosis bajas y respecto a efectos carcinogénicos) (UNEP, 1994). También contribuyen a la incertidumbre los problemas de extrapolación de los efectos a partir de animales de laboratorio a humanos, en la determinación de las poblaciones receptoras y sus patrones de actividad y en la estimación de niveles de dosis; así como en la extrapolación de dosis altas a bajas (ECO, 1989).

La incertidumbre generalmente se corrige usando suposiciones conservadoras (el peor caso) para crear márgenes de seguridad adecuados dentro de la evaluación.

Algunos ejemplos de suposiciones del peor caso son (UNEP, 1994):

- El contaminante está presente en su forma más tóxica disponible
- Las concentraciones observadas más altas son típicas de toda el área contaminada
- Ocurre un mínimo de dilución, dispersión y degradación del contaminante a lo largo de la ruta de migración

Mientras la evaluación del riesgo conservadora claramente tiene implicaciones en el diseño y en el costo de la acción de restauración, se pueden seguir los siguientes procedimientos para asegurar que las estimaciones de riesgo son razonables y realistas (UNEP, 1994):

- Selección y uso cuidadoso de modelos, y comparación entre el rendimiento de diferentes modelos
- Evaluación y uso de un amplio intervalo de datos publicados y de campo para corroborar las estimaciones de riesgo calculadas. Por ejemplo, estudios epidemiológicos y análisis en cabello, sangre y orina como evidencias de exposición.
- Uso de técnicas estadísticas que permiten variaciones en los valores de entrada, usadas para las evaluaciones exposición/efecto que se realizan durante la estimación del riesgo

Es esencial que todas las suposiciones usadas para estimar el riesgo estén totalmente documentadas, ya que el análisis de la incertidumbre es una parte importante de la evaluación del riesgo, que como ya se señaló debe hacerse durante cada una de sus etapas.

## CAPÍTULO 6

### TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN DE SUELOS Y AGUAS SUBTERRÁNEAS CONTAMINADOS

Las técnicas para restauración de suelo contaminado se han desarrollado en los últimos años, principalmente como resultado de las acciones por parte de los gobiernos, como es la expedición de leyes y reglamentos que hacen responsables a los propietarios de las industrias o de la tierra, de la contaminación que ocasionan sus actividades, exigiéndoles la limpieza del suelo contaminado. Aún en los países desarrollados, la experiencia sobre restauración del suelo es muy reciente, y las diferentes empresas continúan desarrollando tecnologías para limpieza de suelo, las cuales se someten a evaluación a través de los programas que para tal efecto tiene cada país.

Técnicamente la opción más simple y que se ha usado más ampliamente, es cubrir el suelo con material sin contaminar o con una membrana o material plástico. Este método sólo es efectivo cuando la contaminación no se disemina y en los sitios donde el nuevo uso de suelo que se tiene contemplado no va a alterar el subsuelo contaminado. Otra técnica muy empleada es la excavación y disposición de la tierra contaminada en un relleno sanitario, lo cual técnicamente es simple pero muy costoso e inoperable cuando el volumen de suelo contaminado es muy grande (I&E, 1993).

En cuanto a las tecnologías de tratamiento para agua subterránea contaminada, generalmente consisten en bombear el agua para llevarla a la superficie y una vez ahí darle tratamiento físico, químico o biológico, o bien una combinación de ellos. Algunas técnicas están basadas en los principios de diseño para el tratamiento de aguas residuales.

#### 6.1 RESTAURACIÓN DEL SITIO

La etapa de restauración del sitio implica el desarrollo y la aplicación de un plan para remover, dar tratamiento o disponer los contaminantes presentes en el sitio.

El plan de trabajo para llevar a cabo la restauración de un sitio contaminado incluye las siguientes actividades (MOEE, 1995):

- Selección del tipo de restauración que se llevará a cabo.
- Evaluación de las opciones para remoción, almacenamiento y/o tratamiento del suelo contaminado.
- Estudios de tratabilidad y evaluación de las tecnologías que podrían aplicarse
- Diseño detallado del proceso de restauración
- Obtención del Oficio de Acreditación de la empresa y la tecnología propuesta y la determinación de los niveles de limpieza a alcanzar con base en el análisis de riesgo o de acuerdo con la legislación de cada lugar.
- Monitoreo y muestreo de verificación

- Documentación del proceso y de las condiciones finales del sitio

Para el desarrollo del plan de restauración se debe observar lo siguiente (MOEE, 1995):

- Deben hacerse todos los esfuerzos posibles para remover los residuos sólidos y la fase libre separada de los residuos líquidos.
- Los residuos deben manejarse de acuerdo con La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, el Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos y las normas oficiales mexicanas correspondientes.
- Debe reconocerse que puede ocurrir mezclado incidental de sólidos durante algunas actividades de restauración. Sin embargo, no se recomienda el mezclado intencional del suelo contaminado en el sitio con suelos limpios para cumplir con los objetivos de limpieza, que sería un efecto semejante al de dilución en las descargas líquidas. Las posibles excepciones pudieran ser:

i. Cuando se pueda demostrar un efecto benéfico para el crecimiento de las plantas (efecto de fertilidad por macro y micro nutrientes). Los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas son: N, P, K, Ca, Mg, Na, S, Fe, B, Cl, Cu, Co, Mn, Mo, F, I, Ni y Zn. En este caso es conveniente someter esta opción a la consideración de la dependencia ambiental correspondiente.

ii. Cuando el mezclado es parte de una actividad dentro de la restauración, tal como en la biorrestauración o lavado del suelo.

- La liberación continua y sin control de compuestos volátiles al aire como parte de una acción de restauración no es aceptable. Deben tomarse las medidas pertinentes para recuperar los contaminantes volátiles y prevenir la liberación a la atmósfera.

La necesidad de limpiar un sitio con residuos peligrosos se determina con base en varios factores (Nelson, N, 1987):

- el grado de contaminación (extensión, medio afectado, número de sustancias químicas presentes en el sitio, y el área geográfica)
- la probabilidad de diseminación
- la probabilidad o grado de exposición humana
- la toxicidad intrínseca de las sustancias químicas
- la amenaza a la salud para las poblaciones potencialmente expuestas

La parte final de la restauración consiste en la verificación de las actividades realizadas. Para ello se deben coleccionar y analizar las muestras necesarias para verificar que el plan de trabajo propuesto ha eliminado o reducido la contaminación identificada en el sitio hasta alcanzar los niveles de limpieza establecidos.

Una vez que se ha concluido la restauración se debe documentar el proceso y las condiciones finales del sitio. Esta documentación debe describir los objetivos de la restauración propuestos, el plan de trabajo de

restauración, que debe incluir el monitoreo periódico para considerar si la restauración fue exitosa alcanzando estos objetivos.

Es conveniente proporcionar la siguiente información general respecto a los trabajos de restauración llevados a cabo:

- Ubicación del sitio donde se realizó la restauración.
- El nivel de restauración alcanzado y aclarar si es adecuado para el uso de suelo pensado para el sitio.
- Anexar los datos obtenidos en el muestreo de verificación.
- Especificar si la restauración se llevó a cabo a nivel superficial o subsuperficial y si fue necesario restaurar el agua subterránea.
- Describir la tecnología de restauración empleada.
- Incluir las máximas concentraciones de contaminantes encontradas.

## 6.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO

Antes de describir las técnicas de restauración que existen para suelos contaminados es conveniente conocer las propiedades físicas y químicas del suelo y los procesos físicos, químicos y biológicos que se presentan en el sistema residuo/suelo/sitio.

La cantidad de suelo contenida en los quince centímetros de la capa superior se estima en  $2.2 \times 10^6$  kg/ha. La capacidad de esta masa de suelo para absorber nutrientes y retener suficiente agua para sustentar la vida de las plantas depende de ciertas propiedades físicas y químicas. Algunas de éstas son: textura, infiltración y permeabilidad, capacidad de almacenamiento de agua, densidad, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, contenido de macronutrientes, salinidad y contenido de micronutrientes (Hornick, 1983).

Los suelos minerales están compuestos aproximadamente de 45% de material mineral (variando las proporciones de arena, limo y arcilla), 25% de aire, 25% de agua y 5% de materia orgánica. Cualquier cambio significativo en el balance de estos componentes afecta las propiedades físicas y químicas antes mencionadas. Esto altera la capacidad del suelo para a) soportar las reacciones químicas y biológicas necesarias para degradar, transformar e inactivar los constituyentes tóxicos de los residuos, y b) funcionar como filtro natural en la adsorción y retención de los constituyentes de los residuos, así como en la prevención o minimización del transporte, lixiviación y contaminación de las aguas subterráneas y superficiales (Hornick, 1983).

Por lo tanto, el suelo contaminado es un sistema que generalmente consiste de cuatro fases:

- 1.- Acuosa
- 2.- Gas
- 3.- Aceite, comúnmente referido como fase líquida no acuosa NAPL (non aqueous phase liquids)

#### 4.- Sólido, el cual tiene dos componentes, una parte mineral inorgánica y una parte de materia orgánica.

La interfase para la transferencia potencial de los constituyentes de los residuos entre las fases de aceite, agua, aire y sólido (orgánica e inorgánica) en un sistema de suelo, se ve afectada por la relativa afinidad de los constituyentes por cada fase; esta afinidad se puede cuantificar mediante el cálculo de los coeficientes de partición. Los coeficientes de distribución se calculan como la relación de la concentración de una sustancia química en la fase del suelo, aceite, o aire a la concentración de una sustancia química en la fase de agua (Sims, 1990).

La zona vadosa es la región que se extiende desde la superficie del suelo a la capa superior de la principal formación que contiene el agua y se divide en tres franjas. La capa superior consiste de suelo y otros materiales que están situados muy cerca de la superficie, como para descargar agua a la atmósfera en cantidades perceptibles por la acción de plantas o por la evaporación y conversión del suelo. La franja más baja, llamada zona capilar, está localizada inmediatamente arriba del nivel freático y contiene agua atraída desde la zona de saturación por acción capilar. La zona intermedia se encuentra entre la franja de agua y la franja capilar. Las técnicas de restauración que se han desarrollado son para aplicarse a la franja superior de la zona vadosa (Sims, 1990).

Casi todos los suelos tienen materia orgánica. En la turba el material orgánico comprende hasta un 80% en peso del suelo. En las arenas y arcillas, el contenido orgánico del suelo puede ir de un bajo porcentaje a casi un 15%. El material orgánico se adhiere tenazmente a muchos tipos de compuestos químicos orgánicos contaminantes, liberándolos lentamente y haciendo difícil su tratamiento o recuperación (HWSRM, 1994).

Los suelos que contienen principalmente arena y grava generalmente son los más fáciles de tratar porque no tienen afinidad por los compuestos orgánicos; sin embargo, tienen una ligera afinidad por los contaminantes inorgánicos causada por reacciones de superficie con los iones y la matriz de silicato de la arena o la grava. Esto no aplica a roca muy fracturada, especialmente caliza (HWSRM, 1994).

El tratamiento de contaminantes en roca muy fracturada es más difícil debido a la amplia variación de la conductividad hidráulica a través de la roca y por las complejas reacciones químicas involucradas con los complejos de carbonato en las formaciones rocosas. El lavado hidráulico de la roca puede hacerse, especialmente si la roca es porosa como arenisca (HWSRM, 1994).

La presencia de arcillas y cienos en los suelos implica una nueva dificultad en la selección del tratamiento. Las arcillas y cienos son predominantemente complejos de silicato de aluminio, y tienen conductividades hidráulicas substancialmente más bajas, presentan afinidad por muchos compuestos orgánicos y tienen capacidad de intercambio iónico activa y medible para compuestos inorgánicos. El contenido de materiales orgánicos no polares produce roturas en las arcillas por encogimiento, como si se hubieran deshidratado. Estas grietas puede incrementar la conductividad hidráulica de una capa (HWSRM, 1994).

### **6.2.1 Efecto de la Adición de Residuos Peligrosos en las Propiedades Físicas del Suelo**

Hornick (1983) menciona que la incorporación de residuos peligrosos puede alterar las propiedades físicas y químicas del suelo de la manera que a continuación se resume:

### Textura del suelo

La composición del suelo influye en la rapidez de infiltración y la permeabilidad, la capacidad de almacenamiento de agua y la capacidad de absorción de varios componentes del residuo.

En los suelos de textura fina, la rapidez de infiltración de agua tiende a ser lenta debido al tamaño de poro muy pequeño, resultado de la predominancia de partículas de arcilla y limo. Si la porción de arcilla está compuesta de minerales como la montmorillonita, que tiene tendencia alta a contraerse e hincharse, entonces la adición de humedad o agua ocasionará que se hinche, lo cual resultará en el bloqueo de cualquier movimiento posterior de sustancias líquidas. Si la cantidad de líquido presente excede la rapidez de infiltración del suelo, ocurrirá un desagüe o un inundación dependiendo de la pendiente del terreno. En este caso, se inducirán condiciones anaeróbicas con la posibilidad de que se produzcan olores. La rapidez de permeabilidad lenta o muy lenta es menor a 0.5 cm/h.

Los suelos gruesos, compuestos en su mayoría de partículas de arena y grava, permiten el movimiento rápido de agua debido a su gran interconexión de poros. Sin embargo, estos suelos también tienen varias limitaciones, ya que si un sitio está excesivamente drenado, los nutrientes presentes en los residuos se moverán muy rápido como para ser suficientemente absorbidos por las plantas o sobre los suelos. La contaminación del agua subterránea puede presentarse si no existe una capa más restrictiva entre la capa gruesa y el nivel freático.

### Densidad

La densidad de un suelo es una medida del peso del suelo por unidad de volumen que determina el espacio del poro a través del cual el agua puede moverse. Por ejemplo debido a la presencia de residuos orgánicos disminuye la densidad del suelo y se incrementa la infiltración y la permeabilidad, ya que estos residuos tienden a incrementar la porosidad y agregación del suelo.

### Capacidad de almacenamiento de agua

La capacidad de almacenamiento de agua de un suelo está directamente relacionada a la densidad y textura del suelo. Los suelos que tienen texturas muy finas o muy gruesas, o alta densidad no son capaces de mantener un suministro adecuado de agua disponible para usarse por las plantas. El contenido de agua determina el oxígeno disponible, el potencial redox y la actividad microbiana de un sistema de suelo. Aunque la adición de residuos orgánicos o material incrementará el contenido de agua de un suelo, no puede necesariamente incrementar el agua disponible que una planta necesita.

## **6.2.2 Efecto de la Adición de Residuos Peligrosos en las Propiedades Químicas del Suelo**

Algunos factores que afectan las reacciones químicas que pueden ocurrir en los suelos son: el tipo y la cantidad de fracciones inorgánica y orgánica que interactúan con la solución de suelo, el pH del sistema de suelo, las concentraciones relativas de macro y micronutrientes y el potencial redox. Estos factores, junto con otros tal como clima y población microbiana, determinan si un suelo es capaz de asimilar residuos industriales. Debido a los procesos de intercambio y adsorción que tienen lugar en el suelo los iones que podrían contaminar el agua subterránea pueden retenerse.

### Intercambio catiónico

El término "capacidad de intercambio catiónico" o CIC se refiere a la cantidad total de cationes que se intercambian por unidad de masa o peso de un suelo (meq/100 g de suelo). La CIC de un suelo depende de su contenido de arcilla y humus, de tal manera que se tienen los siguientes valores: caolinitas 1-10 meq/100 g, illitas 10-40 meq/100 g, montmorillonitas 80-100 meq/100 g, vermiculitas 120-150 meq/100 g, y humus 150-300 meq/100 g.

Los suelos ácidos resultan de la dominación de protones ( $H^+$ ), iones de aluminio ( $Al^{+3}$ ) e hidroxipolímeros de aluminio sobre sitios de intercambio de suelo y de la contribución resultante de iones de hidrógeno en la solución de suelo directa o indirectamente por medio de hidrólisis.

La capacidad de intercambio catiónico del suelo por consiguiente, le permite al suelo actuar como un filtro o amortiguador de muchos compuestos contaminantes contenidos en los residuos industriales. La adición de residuos orgánicos incrementa la CIC de un suelo. Una vez que las adiciones cesan, la CIC disminuirá lentamente conforme la materia orgánica se descompone.

### Intercambio aniónico

La capacidad de retención molecular y de aniones de los suelos es más pequeña que para cationes y está gobernada por mecanismos más complejos que por la simple atracción electrostática responsable de muchas reacciones de intercambio catiónico. Generalmente, las partículas de silicato de la arcilla tienen una carga negativa neta la cual repele los aniones de la superficie del mineral. Sin embargo, los suelos contienen una mezcla de minerales, de modo que las cargas positivas aumentan a partir de los bordes de la arcilla, material amorfo e hidróxidos y las superficies cargadas negativamente afectan los aniones próximos a la superficie de las partículas. Aniones tales como cloruro ( $Cl^-$ ), nitrato ( $NO_3^-$ ) y sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) generalmente se retienen en los suelos por fuerzas electrostáticas a partir de sitios cargados positivamente y se considera que no se absorben específicamente. En suelos con carga dependiente del pH, la disminución del pH disminuye la carga negativa neta y de este modo disminuye la repulsión de aniones o incrementa la adsorción de aniones.

### Reacciones de sorción y precipitación

Los hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso incluyen la fracción más grande de no-silicato del suelo que son importantes en reacciones de sorción. Las superficies de estos óxidos contienen iones los cuales no están totalmente coordinados y por lo tanto las superficies están cargadas eléctricamente. En la solución de suelo, la carga neta resultante que se desarrolla a través de la disociación anfotérica sobre las superficies hidroxiladas depende del pH y puede proporcionar propiedades de intercambio aniónico o catiónico. En adición a las reacciones de intercambio simple con la solución de suelo, los hidróxidos pueden adsorber específicamente ciertos aniones tales como arsenato, molibdato y fosfato por medio de intercambio de ligantes. Este intercambio es la capacidad de adsorción de un óxido por un anión más allá de la electroneutralidad predicha.

La precipitación generalmente ocurre cuando se excede la solubilidad de un compuesto y se forma una fase sólida soluble. Generalmente, ambas reacciones de adsorción y precipitación ocurren simultáneamente en suelos donde los procesos predominantes dependen de los niveles de concentración de los iones en la solución y en la fase sólida.

Además del intercambio iónico, adsorción específica y precipitación, la formación de complejos organometálicos por medio de la quelación de metales de la materia orgánica, es un factor importante que

interviene en la disponibilidad de metales. La movilidad de los metales pesados suministrados por los residuos se relaciona con el contenido de materia orgánica de los suelos, el pH, las reacciones de hidróxidos y de oxidación-reducción o potencial redox de un suelo.

La presencia de bióxido de carbono en el suelo también afecta la solubilidad de los cationes en el suelo. El CO<sub>2</sub> reacciona con muchos cationes para formar carbonatos ligeramente solubles. El calcio es uno de los cationes más abundantes en la solución de suelo, el cual forma carbonatos y por esta razón el carbonato de calcio sólido se encuentra en grandes cantidades en muchos suelos.

### Reducción-oxidación

Casi todas las reacciones químicas y biológicas del suelo involucran reacciones de oxidación y reducción, las cuales consisten en la transferencia de electrones a partir de un ión o molécula, a otra. La oxidación es la pérdida o donación de electrones de una sustancia a otra, mientras que la reducción es la ganancia o aceptación de electrones de una sustancia.

Cuando el oxígeno acepta electrones a partir de materia orgánica bajo condiciones aerobias, funciona como un agente oxidante porque oxida a la materia orgánica.



El papel del suelo es proporcionar aceptores de electrones para la oxidación de la materia orgánica y otros compuestos. Cuando el oxígeno no está disponible, otros compuestos con capacidad reductora tales como nitrato, manganeso (Mn(IV) Mn(III)), hierro (Fe(III)) y azufre (S(VI)) pueden funcionar como aceptores de electrones. En los casos donde el suelo está inundado o saturado con agua y el oxígeno no está disponible se incrementa la actividad de microorganismos anaerobios y comienza la reducción del suelo. Una vez que el oxígeno remanente se reduce en el suelo inundado, seguirá la reducción del nitrato y del manganeso.

El proceso de oxidación-reducción puede medirse por el potencial de electrodo Eh, el cual representa la capacidad de los iones redox para donar o aceptar electrones en condiciones estándar y de equilibrio.

## **6.3 PROCESOS FÍSICOQUÍMICOS QUE OCURREN EN EL SUELO**

De acuerdo a Sims (1993) y Testa (1994) los procesos fisicoquímicos que pueden llevarse a cabo en el suelo son:

### Transporte de contaminantes

El retardo del transporte descendente (potencial de lixiviación) y el transporte ascendente (potencial de volatilización) se refiere a la inmovilización de los constituyentes de los residuos. La inmovilización de los compuestos orgánicos se ha relacionado con el contenido de materia orgánica del suelo (especialmente de sustancias químicas hidrofóbicas), humedad del suelo, y presencia de solventes orgánicos.

Una forma de predecir la rapidez de transporte de un constituyente a través de un sistema subsuperficial es describir su movilidad (o inmovilidad relativa) para estimar su retardo, el cual es un factor que describe la relación de la velocidad relativa del contaminante comparada con la rapidez de movimiento del agua a través de la subsuperficie.

Los constituyentes de los residuos pueden estar sujetos a alguna de las siguientes reacciones dentro del sistema residuo/suelo/sitio:

### Degradación

Cada fase del sistema de suelo puede ser un sitio para que se lleven a cabo reacciones biológicas y/o abióticas que transforman una sustancia química y por consiguiente provocan su destrucción. La caracterización de la reacción (degradación) de las sustancias químicas específicas en la mezcla residuo/suelo es importante para evaluar la capacidad de asimilación del sitio para cada sustancia química.

La degradación de muchos compuestos orgánicos en los sistemas subsuperficiales se puede describir monitoreando su desaparición a través del tiempo.

La rapidez de degradación se calcula midiendo la pérdida del compuesto original y la producción de dióxido de carbono en el tiempo de tratamiento, así como la producción y desaparición de productos intermedios.

### Transformación/reducción de la toxicidad

La transformación se refiere a la alteración parcial de los constituyentes peligrosos formando productos intermedios. Los productos intermedios pueden ser menos tóxicos o más tóxicos que el compuesto original. Para evaluar la reducción de la toxicidad de una sustancia química se pueden usar bioensayos para medir el efecto tóxico de una sustancia química sobre las especies de prueba bajo condiciones específicas. La toxicidad de una sustancia química es proporcional a la severidad de la sustancia sobre la respuesta monitoreada del organismo de prueba.

Los procesos físicos que actúan en la subsuperficie determinan cómo se lleva a cabo la partición de sustancias químicas en la subsuperficie, lo cual tiene un efecto significativo en el destino ambiental de una sustancia. Estos procesos son:

- Advección
- Dispersión
- Difusión
- Reacciones ácido/base
- Hidrólisis
- Disolución/precipitación
- Oxidación/reducción
- Intercambio iónico y sorción
- Volatilización
- Filtración
- Disociación
- Complejación
- Especiación
- Degradación térmica
- Reacciones fotoquímicas

## **6.4 FACTORES DE CARACTERIZACIÓN PARA LA RESTAURACIÓN DEL SUELO**

Durante la etapa de caracterización de la contaminación del sitio se debieron determinar los contaminantes presentes en la superficie y en la subsuperficie, así como la concentración de éstos y su forma física.

En la tabla 6.1 se presentan las principales características específicas de los contaminantes presentes en el sitio que son importantes para describir y evaluar el comportamiento y destino ambiental de constituyentes orgánicos en el suelo y en la subsuperficie (Sims, 1990).

**Tabla 6.1. Parámetros de caracterización de los contaminantes**

Clase química	- Acido - Base - Polar neutral - No polar neutral
Propiedades químicas	- Punto de fusión - Gravedad específica - Estructura - Peso molecular - Solubilidad en agua - Peso molecular
Reactividad química	- Oxidación - Reducción - Hidrólisis - Precipitación - Polimerización
Parámetros de sorción en suelo	- Constante de sorción de Freundlich (K, N) o de distribución (Kd) - Sorción basada en el contenido de carbón orgánico (Koc) - Coeficiente de partición octanol agua (Kow)
Parámetros de degradación en suelo	- Vida media - Constante de rapidez de degradación - Biodegradabilidad relativa
Parámetros de volatilización en suelo	- Presión de vapor - Constante de la ley de Henry - Sorción basada en el contenido de carbón orgánico (Koc) - Solubilidad en agua
Parámetros de contaminación en suelo	- Concentración en el suelo - Profundidad de la contaminación - Fecha de la contaminación

La información que se requiere para cada sustancia o clase química se puede resumir como sigue (Sims, 1990):

- 1.- Características relacionadas con el potencial para lixiviar
  - Solubilidad en agua
  - Coeficiente de partición octanol/agua
  - Coeficiente de sorción en sólido
- 2.- Características relacionadas con la volatilización potencial
  - Presión de vapor
  - Volatilidad
  - Constante de la Ley de Henry
- 3.- Características relativas a la degradación potencial
  - Vida media
  - Rapidez de degradación
  - Índice de degradabilidad
- 4.- Características relativas a la reactividad química
  - Vida media de hidrólisis

### Potencial redox del suelo

La evaluación del sitio requiere la organización de la información obtenida a partir de las actividades de caracterización para evaluar el transporte y el comportamiento de degradación de cada sustancia química de interés en el sitio de estudio. Específicamente la rapidez de transporte debe compararse con la rapidez de degradación para determinar si el transporte es significativo en relación con la degradación.

Una vez que se ha determinado la necesidad de limpiar el sitio, la información obtenida sobre el contaminante y el sitio se emplea para (Sims, 1990):

- 1.- Determinar los requerimientos de contención para prevenir la contaminación de los sistemas receptores fuera del sitio
- 2.- Desarrollar técnicas para maximizar la transferencia de masa de las sustancias químicas que afectan el proceso (por ejemplo, mejorando la actividad microbiológica mediante la adición de nutrientes, oxígeno, control de pH, etc)
- 3.- Diseñar un programa de monitoreo eficiente para evaluar la efectividad del tratamiento.

#### **6.4.1 Estudios de Tratabilidad**

Los estudios de tratabilidad se usan para obtener información específica concerniente a la aplicación potencial de las tecnologías de tratamiento a escala de campo, evaluando y comparando la rapidez y el grado de restauración entre varias tecnologías. Los estudios de tratabilidad se pueden llevar a cabo en microcosmos de laboratorio o en reactores a escala laboratorio, instalaciones a escala piloto o en campo.

Casi invariablemente los programas de biorrestauración requerirán estudios de tratabilidad, para mejorar el desarrollo de los criterios de diseño y los parámetros más importantes de esta técnica.

Los resultados de los estudios de tratabilidad proporcionan información sobre la rapidez y grado de tratamiento de los constituyentes orgánicos peligrosos, también representan las condiciones óptimas con respecto al mezclado, contacto de los materiales sólidos del suelo con los constituyentes de los residuos y con los microorganismos, y condiciones homogéneas en todo el microcosmos. De esta manera se puede saber si es conveniente aplicar tratamiento biológico en un sitio en particular (Sims, 1990).

#### **6.4.2 Medición e Interpretación de la Efectividad del Tratamiento**

Para medir la efectividad del tratamiento, generalmente se toman las muestras de suelo a partir del reactor donde se hacen las pruebas de tratabilidad en los estudios de laboratorio o escala piloto, y se extraen con un solvente o se desorben térmicamente. La concentración de los compuestos se mide en el extracto de solvente o en la corriente de desorción térmica usando instrumentos de detección. Esta información se llama "pérdida aparente" de una sustancia química y se refiere a la observación de la desaparición de la sustancia en el solvente o la fase de extracción después del tratamiento, pero no necesariamente representa un balance de masa químico completo (Sims, 1990).

El cambio en la concentración del compuesto en el solvente con el tiempo, frecuentemente se usa para calcular la rapidez y el grado de disminución en la concentración del compuesto en el suelo. Esta información se usa para interpretar la efectividad del tratamiento en tecnologías directas y para determinar las estrategias de ingeniería y propuestas de manejo, que incluyen: 1) tiempo requerido para llegar a las concentraciones de limpieza del suelo, 2) efectos de los factores ambientales o variables experimentales sobre la efectividad del tratamiento (Sims, 1990).

## 6.5 CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN

Las tecnologías de restauración de suelos contaminados se clasifican en los siguientes tres tipos de sistemas de acuerdo con su forma de operación o aplicación (Sims, 1990):

- Técnicas in-situ: El suelo contaminado se trata en el lugar donde se encuentra, sin moverlo.
- Técnicas on-site: El suelo contaminado se mueve físicamente de su lugar original y puede: a) colocarse en un área preparada, la cual ha sido diseñada para mejorar el tratamiento y/o prevenir el transporte de contaminantes a partir del sitio; b) llevarse a un área de almacenamiento mientras se prepara el sitio original para poder usarse y después colocar el suelo removido para tratamiento. La preparación del lecho puede consistir en colocar una capa de arcilla o una membrana plástica para retardar el transporte de contaminantes, o en la adición de suelo sin contaminar o algún aditivo para proporcionar un medio de tratamiento adicional; o c) tratarse en una planta móvil llevada al sitio.
- Técnicas off-site: el suelo contaminado se remueve completamente del sitio y se transporta a una planta de tratamiento permanente en otra parte, generalmente el suelo se vuelve a poner en el sitio después de tratarlo.

Las tecnologías y procesos de tratamiento para suelos contaminados de acuerdo con su principio de operación se clasifican en tres amplias categorías (Asante-Duah, 1996):

### Tratamientos físicos

Algunos constituyentes químicos presentes en los sitios contaminados se pueden tratar por medio de procesos de separación y purificación, que consisten en técnicas tales como: filtración, centrifugación, flotación, destilación, evaporación, extracción con solventes, ósmosis inversa, adsorción con carbón activado, decantación e inmovilización de constituyentes por solidificación.

Este tipo de técnicas generalmente no alteran la composición química de los contaminantes sólo separan o concentran los materiales tratados aprovechando las diferencias en las características físicas tales como densidad, presión de vapor, tamaño de partícula. Los procesos físicos rara vez se usan como la opción de tratamiento final para cualquier material contaminado. En general, los objetivos de muchos de estos métodos son: a) separar los materiales peligrosos de aquellos que se consideran menos peligrosos, b) separar diferentes tipos de materiales peligrosos en varias corrientes que requieren diferentes métodos de tratamiento o c) pretratar un material contaminado antes de su disposición final.

### Tratamientos químicos

Algunos compuestos químicos o materiales contaminados se pueden separar o transformar en menos peligrosos, mediante tratamientos químicos. Estos procesos involucran el uso de reacciones químicas para transformar los compuestos peligrosos en sustancias menos tóxicas. Estas técnicas son: precipitación, neutralización, hidrólisis, fotólisis, oxidación-reducción y deshalogenación.

### Tratamientos biológicos

Estos procesos consisten en el uso de microorganismos naturales o desarrollados para degradar los compuestos químicos presentes en el suelo. Los procesos biológicos pueden transformar materiales tóxicos en elementos no tóxicos tales como agua, bióxido de carbono y otros productos inocuos. El tratamiento biológico es altamente sensible a cambios en la composición orgánica y las concentraciones del material que se está tratando, generalmente no tiene efecto sobre sustancias inorgánicas disueltas, inclusive niveles significativos de algunos compuestos químicos inorgánicos llegan a inhibir la actividad biológica o hasta matar a los microorganismos.

### Tratamientos térmicos

Las tecnologías de tratamiento térmico emplean calor para destruir o transformar los contaminantes de interés. Este tipo de procesos a través del control de la temperatura y de la disponibilidad de oxígeno, convierten los materiales peligrosos en dióxido de carbono, agua y otros productos de combustión. La degradación térmica es aplicable a materiales contaminados que contienen concentraciones significativas de compuestos orgánicos y se puede realizar a través de diferentes tipos de incineración o pirólisis.

Dependiendo del tipo de material contaminado que se está tratando, resultan diferentes productos finales. La degradación térmica de compuestos orgánicos produce principalmente como subproductos agua, nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono, gases ácidos y partículas. Si están presentes metales una parte de éstos puede emitirse a la atmósfera. También existe la posibilidad de formar y liberar productos de combustión incompleta.

## 6.6 TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN PARA SUELOS

Actualmente se desarrollan técnicas para restauración de suelos potencialmente más efectivas. En general estas técnicas son:

#### De contención

##### \* Física

- Con cubierta
- De barreras verticales
- Con revestimientos

##### \* Hidráulica

- Mediante contención de la pluma contaminante
- Manejando el gradiente hidráulico

#### Tratamiento

- Incineración
- Estabilización/Solidificación

- Vitricación
- Biorrestauración
- Lavado de suelo
- Extracción con vapor
- Cubierta
- Desorción térmica
- Tratamientos químicos

A continuación se presenta la descripción de las principales tecnologías de restauración de suelos contaminados que actualmente están en uso a escala comercial (HWSRM, 1994; Asante-Duah, 1996, Sims, 1990; EPA 540/R-94/043, 1994, Nelson, N et al, Long, 1993, Suthersan, 1997).

### 6.6.1 Incineración

Es un proceso térmico por medio del cual los materiales contaminados se exponen a calor excesivo en algún tipo de incinerador, que en el caso de suelos es horno rotatorio o de lecho fluidizado. Involucra la destrucción térmica de los contaminantes por calentamiento. Dependiendo de la intensidad del calor los contaminantes se evaporan y/o se destruyen, las temperaturas de operación están entre los 870 °C a 1370 °C. Los compuestos tóxicos se reducen a elementos básicos como hidrógeno, carbono, cloro, nitrógeno, etcétera, los cuales se combinan con el oxígeno para formar sustancias no tóxicas tales como agua, bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), también se producen cenizas inertes, materia orgánica particulada, ácido clorhídrico, pequeñas concentraciones de materiales orgánicos y óxidos metálicos. Generalmente se obtiene una eficiencia de destrucción del 99.99 %. Las cenizas generadas deben disponerse en rellenos sanitarios.

#### Ventajas

- Destrucción de todos los compuestos orgánicos
- Proporciona solución permanente por destrucción total de los contaminantes
- Reducción del volumen de contaminantes

#### Desventajas

- Requiere excavación del suelo para su tratamiento
- Requiere control de la contaminación del aire
- Posibilidad de formación de dioxinas si se incinera material clorado
- Costo relativamente alto y requiere instalación a gran escala de equipo e instalaciones portátiles
- La tecnología no es apta para remover contaminantes inorgánicos

#### Parámetros de caracterización

##### Físicos:

Contenido de humedad

Contenido de cenizas

Temperatura de fusión de las cenizas

##### Químicos:

Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles

Principales compuestos orgánicos peligrosos

Cloro total

Flúor  
Azufre total  
Nitrógeno total  
Fósforo  
Bifenilos policlorados  
Dioxinas  
Metales (Hg, Pb, Cd, Zn, Ag, Sn)

### 6.6.2 Estabilización/Solidificación

Es una técnica para fijar o modificar químicamente los contaminantes mediante la aplicación de reactivos específicos. El proceso de fijación consiste en la inmovilización de los contaminantes previniendo la migración hacia el ambiente circundante. En este proceso el suelo o material contaminado se mezcla con reactivos y materiales solidificantes para estabilizar y/o encapsular los constituyentes químicos, produciendo un residuo inmóvil e inactivo, convirtiendo los contaminantes en formas menos solubles, menos móviles o menos tóxicas. El resultado de la solidificación es un bloque monolítico de alta rigidez estructural.

La solidificación indica la producción de una masa monolítica sólida, con suficiente integridad estructural como para transportarse en piezas de tamaño adecuado sin requerir de algún contenedor secundario. La estabilización se refiere a un proceso por el cual el residuo se convierte en una forma más estable químicamente. El término incluye la solidificación, pero también involucra una reacción química para transformar a un componente tóxico en una nueva sustancia o compuesto no tóxico. No se consideran los procesos biológicos.

La solidificación no necesariamente involucra una interacción química entre los residuos y los agentes solidificantes pero puede involucrar la unión mecánica de los residuos dentro del monolito. La solidificación y la estabilización están diseñadas para cumplir con uno o más de los siguientes puntos: 1) producir un sólido a partir de un residuo líquido o semisólido, 2) reducir la solubilidad del contaminante; y/o 3) disminuir el área de exposición superficial a través de la cual puede ocurrir la transferencia. La solidificación puede involucrar la encapsulación de partículas finas de residuo (microencapsulación) o de grandes bloques (macroencapsulación) de manera que se reduce el potencial de peligrosidad del material residual.

#### Ventajas

- Útil para la inmovilización de muchos compuestos orgánicos, metales, aceites, solventes, residuos radiactivos y residuos orgánicos sólidos
- Tecnología probada con aplicaciones específicas

#### Desventajas

- Puede ser difícil mezclar los suelos y los compuestos químicos del tratamiento
- La tecnología no es capaz de prevenir el lixiviado a bajo nivel de compuestos inorgánicos
- Se requiere monitoreo a largo plazo
- Restricción del uso futuro del suelo

#### Parámetros de caracterización

##### Físicos:

Descripción de los materiales  
Tamaño de partícula

Contenido de humedad  
 Densidad  
 Pruebas de resistencia del material tratado

Químicos:

pH  
 Alcalinidad/acidez  
 Compuestos que causan interferencia  
 Pruebas de lixiviado  
 Calor de hidratación

### 6.6.3 Vitrificación

La vitrificación es un proceso de tratamiento térmico que emplea calor para convertir el material contaminado en un producto cristalino, químicamente inerte y estable parecido al vidrio. El proceso consiste en introducir electrodos dentro del suelo contaminado que contiene niveles significativos de silicatos. En la superficie los electrodos se conectan al suelo por medio de grafito, se aplica una corriente eléctrica muy alta que pasa a través de los electrodos y el grafito y el suelo se funde como resultado de la elevada temperatura. Es necesario atrapar los gases y vapores que escapan debido a que algunos contaminantes se evaporan. Una vez que se enfría el suelo, los contaminantes quedan químicamente enlazados por el calor dentro del vidrio formado. Las temperaturas de operación están entre los 1600 a 1990 °C y funciona hasta 15 m de profundidad, el potencial eléctrico es de 12 KV.

Ventajas

- Puede destruir o inmovilizar compuestos orgánicos, inorgánicos, radiactivos, bifenilos policlorados, metales pesados.
- No requiere excavación del suelo
- Minimiza la exposición de los trabajadores a los contaminantes

Desventajas

- Es muy costoso debido al consumo de energía por lo que se emplea sólo para residuos radiactivos o extremadamente peligrosos
- Se requiere instalación para captar las emisiones de gases de los compuestos que se evaporan
- Limitación del uso futuro del suelo

Parámetros de caracterización

Físicos:

Profundidad de la contaminación y el nivel freático  
 Permeabilidad del suelo  
 Contenido de escombros en los residuos presentes  
 Volumen de vacíos

Químicos:

Concentración de metales cerca de los electrodos

### 6.6.4 Biorrestauración

Es un proceso biológico que consiste en el uso de microorganismos para degradar las sustancias peligrosas presentes en un sitio contaminado formando compuestos no tóxicos como agua, dióxido de carbono, ácidos grasos y otros productos inocuos. Es una de las tecnologías más prometedoras para tratar suelos contaminados, ya que elimina las sustancias químicas presentes y ofrece una solución permanente.

La biorrestauración emplea los microorganismos que existen de manera natural en el suelo tales como hongos, bacterias y levaduras o microorganismos desarrollados mediante técnicas de biotecnología. Las condiciones óptimas para llevar a cabo la transformación biológica se obtienen manipulando el ambiente físico y controlando el suministro de nutrientes. Esta técnica se puede usar para tratar la contaminación presente en los primeros 15 a 30 cm de suelo, mediante labranza para proporcionar aireación y adición de nutrientes y agua para estimular el crecimiento de los microorganismos. El tratamiento de la contaminación a profundidades superiores a los 12 m generalmente requiere la instalación de pozos de inyección para suministrar nutrientes y oxígeno.

La biodegradación de compuestos en condiciones de campo depende de la temperatura, el tipo de compuestos a degradar, niveles de oxígeno disuelto, contenido de humedad del suelo, permeabilidad, potencial de oxidación-reducción, pH, disponibilidad y concentración de los contaminantes, disponibilidad de nutrientes y de la comunidad microbiológica natural. Algunas razones por las cuales no funciona esta técnica son: 1) la concentración de las sustancias químicas puede ser tan alta que sea tóxica para los microorganismos, 2) las condiciones del suelo pueden ser demasiado ácidas o alcalinas, 3) Puede haber falta de nutrientes que se necesitan para usar las sustancias químicas como fuente de alimentos (nitrógeno, fósforo, potasio, azufre o elementos traza), 4) condiciones de humedad desfavorables, 5) falta de oxígeno, nitrato o sulfato necesarios para usar los compuestos químicos como fuente de energía.

#### Ventajas

- Bajo costo
- Aplicable a muchos compuestos orgánicos
- No requiere excavación del suelo
- Proporciona solución permanente
- Puede usarse sobre acuíferos de roca permeable

#### Desventajas

- No es efectivo en suelos con baja permeabilidad
- En ocasiones se requiere mucho tiempo para lograr la degradación completa de los contaminantes
- Puede ser altamente selectiva respecto a cuáles compuestos son degradados
- Requiere mantenimiento continuo

#### Parámetros de caracterización

##### Físicos:

Contenido de humedad del suelo

Capacidad de campo del suelo

pH

Temperatura

Disponibilidad de oxígeno

Permeabilidad del suelo

**Químicos:**

Carbono orgánico total

Potencial redox

Relación carbono:nitrógeno:fósforo

**Biológicos:**

Pruebas de incubación de suelo

Pruebas con respirómetro electrolítico

Estudios de cultivos para determinar microorganismos

Pruebas de conteo de bacterias

Pruebas de toxicidad/inhibición de crecimiento bacteriano

**6.6.5 Lavado de Suelo**

El lavado del suelo es un proceso mecánico que consiste en la excavación del suelo del área contaminada, luego se tamiza para separar objetos grandes y rocas y después se lava con agua o una solución acuosa para remover los contaminantes, el efluente contaminado se recupera, se trata y se recicla o se dispone. Generalmente el solvente de extracción es agua, aunque se pueden usar otros cuando los contaminantes son ligeramente solubles en agua. Los solventes se seleccionan considerando su capacidad de solubilizar los contaminantes y su toxicidad sobre el ambiente y la salud. Cuando se van a tratar compuestos semivolátiles o poco solubles en agua se utilizan surfactantes apropiados para mejorar la eficiencia de remoción. Los surfactantes pueden ser muy efectivos para contaminantes orgánicos y los ácidos son útiles para remover metales.

Los contaminantes generalmente están enlazados química o físicamente al cieno o arcilla. El cieno y la arcilla están ligados a grandes partículas de arena y grava. El lavado de suelo separa las partículas finas de cieno y arcilla, de las partículas de grava y arena granular. De esta manera las partículas grandes se remueven y los contaminantes se concentran en un volumen menor haciendo la restauración posterior más fácil.

**Ventajas**

- Útil para remover contaminantes orgánicos volátiles, semivolátiles y halogenados, e inorgánicos tales como hidrocarburos, solventes, plaguicidas y metales
- Disminuye el volumen de suelo contaminado que debe tratarse con otra tecnología más costosa

**Desventajas**

- Los contaminantes se transfieren a la fase acuosa
- Requiere remoción del suelo
- Generalmente se utiliza acoplado con otra tecnología

**Parámetros de caracterización****Físicos:**

Distribución de tamaño de partícula

Contenido de arcilla

Conductividad hidráulica

Químicos:

Compuestos orgánicos

Metales

Capacidad de intercambio catiónico

pH

Coefficiente de partición suelo/agua

Coefficiente de partición octanol/agua

### 6.6.6 Extracción con Vapor

La extracción de contaminantes del suelo con vapor es una técnica que emplea la aireación para remover los compuestos orgánicos volátiles (COV's) presentes en la zona no saturada del sitio contaminado. El sistema de extracción con vapor es más efectivo en sitios en los que el derrame o liberación de compuestos orgánicos volátiles es reciente. Esta tecnología es particularmente económica y eficiente para remover COV's de la capa subsuperficial del suelo. También se conoce como venteo de suelo y extracción con vacío.

Esta técnica consiste en la inyección de aire limpio que fluye dentro de la zona no saturada del suelo, el aire arrastra los COV's en fase vapor que se encuentran en los poros, ya que rompe el equilibrio que existe entre los contaminantes en el suelo y en fase vapor, después el aire conteniendo los contaminantes se extrae aplicando vacío.

La aplicación de esta técnica se recomienda cuando el contaminante tiene  $P_v \geq 1.0$  mm Hg a 20 °C y una constante de la ley de Henry  $>$  de 0.001 atm.m<sup>3</sup>/mol. Además esta técnica se aplica más en sitios donde la zona insaturada es relativamente permeable y homogénea y es más útil su aplicación para tratamiento de compuestos orgánicos volátiles puros y solventes.

Ventajas

- Bajo costo
- Se puede aplicar a grandes extensiones
- Mínima perturbación con las operaciones del sitio
- Se puede integrar fácilmente con otras tecnologías de restauración

Desventajas

- No es útil para compuestos inorgánicos ni COV's semivolátiles
- Debe haber control de emisiones de contaminantes al aire
- No es efectivo abajo del nivel del agua
- Requiere dar tratamiento a la corriente de aire que lleva los contaminantes

Parámetros de caracterización

Físicos:

Distribución del tamaño de partícula

Permeabilidad

Porosidad

Humedad

Contenido de arcilla

Químicos:

Presión de vapor

Solubilidad  
 Volatilidad  
 Constante de la ley de Henry  
 Coeficiente de partición aire/agua  
 Carbono orgánico total  
 Capacidad de intercambio catiónico

### 6.6.7 Cubierta

La cubierta es un proceso usado para cubrir los residuos peligrosos enterrados o depositados en un sitio para prevenir la migración de los contaminantes. Esta migración puede producirse por el agua de lluvia o el movimiento de agua superficial a través del sitio o por el viento. Las cubiertas generalmente están hechas de una combinación de materiales como fibras sintéticas, arcillas pesadas y algunas veces concreto. Las cubiertas se diseñan para minimizar el movimiento de agua a través de los residuos, deben ser de fácil mantenimiento y resistentes. Cuando se utiliza esta técnica es necesario monitorear el agua subterránea y un sistema de colección de gas si los residuos generan gases.

#### Ventajas

- Menor costo
- Prácticamente se puede construir sobre cualquier sitio
- Rápida construcción

#### Desventajas

- No proporciona tratamiento, sólo evita la dispersión de los contaminantes
- Requiere monitoreo continuo para detectar liberación de contaminantes
- La efectividad a largo plazo depende del mantenimiento

### 6.6.8 Desorción Térmica

La desorción térmica es un proceso de separación con calor a baja temperatura diseñado para remover contaminantes orgánicos de un sitio. El suelo contaminado se calienta a temperaturas relativamente bajas entre 93 y 482 °C de manera que sólo los contaminantes con bajo punto de ebullición se evaporan. Estos gases se colectan para tratamiento posterior. El calentamiento puede hacerse mediante inyección de vapor, por calentamiento directo, calentamiento indirecto a través de las paredes de un horno o por calentamiento libre de oxígeno en un horno sellado.

La desorción térmica no es un sistema de incineración ni se forman subproductos de combustión. Esta técnica es útil para tratar compuestos orgánicos volátiles, bifenilos policlorados y algunos hidrocarburos aromáticos policlorados. Es aplicable para tratar compuestos de peso molecular intermedio (aceites lubricantes, aceites minerales, combustibles) y en suelos relativamente permeables.

#### Ventajas

- Útil para tratar compuestos orgánicos volátiles y bifenilos policlorados
- Se obtienen altas eficiencias de remoción

#### Desventajas

- No es aplicable a compuestos inorgánicos u orgánicos poco volátiles
- Los contaminantes evaporados requieren tratamiento o disposición

### 6.6.9 Tratamientos Químicos

Las sustancias químicas tienen la capacidad de alterar la naturaleza de los materiales y es la razón de la amplia aplicación que tiene el tratamiento químico en la destrucción de residuos peligrosos. Algunos procesos químicos modifican los materiales peligrosos de manera que se vuelven no tóxicos. En algunos casos se pueden complementar los métodos químico y biológico. Los principales tratamientos químicos son:

#### Oxidación química

Los compuestos pueden oxidarse químicamente para formar compuestos no peligrosos o hacerlos más accesibles para remoción o destrucción. Durante el proceso el agente oxidante se reduce.

Esta técnica se ha usado para tratar sustancias orgánicas peligrosas y contaminantes orgánicos en solución acuosa. Su principal uso ha sido para tratar el cianuro en los residuos de la industria de recubrimiento de metales. Los agentes oxidantes más usados son gas cloro, dióxido de cloro, hipoclorito, otros menos usados son permanganato de potasio, peróxido de hidrógeno y ozono. Los agentes oxidantes son poco selectivos y pueden oxidar otros compuestos presentes en los residuos antes de oxidar el contaminante de interés, por lo tanto es más útil para residuos acuosos diluidos.

#### Reducción química

Consiste en la transferencia de electrones reactivos de un compuesto a otro. Los metales, en particular el cromo hexavalente se reducen mediante la adición de un agente reductor compatible, por ejemplo compuestos reducidos de azufre. Para obtener una reducción correcta se debe controlar el pH específico de la reacción y la agitación.

La reducción química se aplica mejor a residuos líquidos libres de compuestos orgánicos. También se utiliza para reducir metales quelados o complejados como cobre y níquel.

#### Neutralización

La neutralización continúa siendo uno de los procesos más comunes usados en el tratamiento de residuos peligrosos. Involucra la combinación de una corriente de residuos peligrosos con un ácido o una base para ajustar el pH del líquido a niveles aceptables, que generalmente están entre 6 y 9. Los productos de la reacción son agua, sales y sólidos precipitados por las reacciones de solubilidad que dependen del pH.

#### Oxidación húmeda con aire

Consiste en la oxidación en fase acuosa de sustancias inorgánicas u orgánicas suspendidas o disueltas a temperaturas entre 177 y 315 °C y presión elevada entre 300 y 3000 psi. La presión elevada se usa para mantener el agua en estado líquido permitiendo que la destrucción de los compuestos orgánicos proceda a temperaturas más bajas de las que serían necesarias. El agua sirve para moderar la rapidez de oxidación, removiendo el exceso de calor de reacción. El oxígeno se adiciona como agente oxidante. Se puede usar esta técnica para tratar sulfuros, mercaptanos, cianuros, hidrocarburos clorados y metales.

## Deshalogenación

Este proceso se emplea para la destrucción química específica de compuestos orgánicos halogenados. Se usan reactivos químicos para remover el halógeno (flúor, cloro, bromo, yodo), para romper las moléculas halogenadas o para cambiar su estructura molecular. El reactivo típico es el sodio metálico.

En la Tabla 6.2 se presentan los costos estimados por volumen de matriz contaminada para los diferentes tipos de tecnologías.

**Tabla 6.2 Costos estimados para diferentes tecnologías de restauración de suelos (Asante-Duah, 1996)**

Tecnología	Costo (dls/m <sup>3</sup> )
Incineración	50 - 390
Estabilización/solidificación	130 - 390
Vitrificación	
Biorrestauración	15 - 195
Lavado	
Extracción con vapor	15 - 185
Cubierta	40 - 195
Desorción térmica	

## 6.7 TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO PARA AGUA SUBTERRÁNEA

Los contaminantes orgánicos se pueden clasificar con base en su volatilidad, biodegradabilidad, solubilidad, concentración y otras propiedades físicas que puedan ser específicas o de interés para la tecnología que se está considerando.

Los contaminantes inorgánicos generalmente no son susceptibles de tratarse con sistemas de tratamiento biológico, es más recomendable emplear sistemas fisicoquímicos, tales como filtración, coagulación, sedimentación y precipitación química. Los compuestos que tienen mayor objeción generalmente son los elementos metálicos y ocasionalmente los iones amonio, nitrato y sales disueltas incluyendo sales de cloruro y sulfato de sodio y calcio. Los contaminantes también pueden presentarse en forma de suspensiones, emulsiones, soles y flóculos, los cuales se remueven por combinación de métodos físicos y químicos.

A continuación se presentan las recomendaciones generales que sirven de guía para el desarrollo de un sistema de tratamiento para aguas contaminadas con sustancias peligrosas (HWSRM, 1994):

- Muchas tecnologías de tratamiento físicas y químicas, excepto los sistemas biológicos, no remueven realmente el contaminante, sólo lo transfieren o transforman a una fase o especie diferente en la cual puede ser concentrado, colectado y manejado más económicamente. Aunque en ocasiones la concentración de un contaminante puede incrementar su toxicidad potencial.
- Todos los sistemas de tratamiento tienen subproductos o corrientes residuales las cuales deben tratarse para su disposición. Si el sistema de tratamiento remueve un material y concentra la corriente de subproducto, ésta se puede volver un residuo peligroso y el costo de la disposición de la corriente residual puede tener un impacto mayor sobre los costos del tratamiento total.
- Si están presentes emulsiones, sólidos suspendidos o aceites, se debe considerar su remoción como un primer paso en el tratamiento.
- Si están presentes metales a niveles extremadamente bajos (generalmente menos de 0.1 mg/l) se debe considerar el uso de intercambio iónico, ultra-filtración u ósmosis inversa más que sedimentación y precipitación.
- Los compuestos orgánicos solubles presentes en concentraciones menores de 1 mg/l se pueden remover con tratamiento biológico, pero con dificultad y sólo si el sistema se puede mantener y optimizar asegurando que se mantienen los niveles críticos de nutrientes requeridos para el crecimiento biológico.
- La eficiencia de un sistema de tratamiento con carbón activado puede disminuir por la presencia de elementos inorgánicos comunes tales como sales y iones férricos. El carbón servirá como medio para el crecimiento de limo y bacterias, por lo tanto los sistemas de tratamiento con carbón activado requieren desinfección y regeneración periódica.
- La oxidación química con cloro no siempre resulta en la formación de halometanos u otros compuestos clorados. La oxidación usando cloro o dióxido de cloro a niveles correctos, puede reducir muchos compuestos a dióxido de carbono y agua. El dióxido de cloro es un oxidante más fuerte que el cloro pero no tiende a formar halometanos o cloroaminas. La oxidación con ozono generalmente es más cara y menos eficiente que la oxidación con dióxido de cloro o cloro.

Los principales sistemas de tratamiento aplicados para agua subterránea se describen a continuación (HWSRM, 1994; EPA 540/R-94/043, 1994).

### **6.7.1 Tratamiento Biológico**

Los sistemas de tratamiento y bombeo biológico esencialmente son tecnologías que fueron desarrolladas para el tratamiento de aguas residuales municipales. El tratamiento involucra llevar el agua subterránea contaminada con compuestos orgánicos a la superficie, adicionarle sustancias químicas para asegurar el crecimiento biológico óptimo y pasar el agua a través de un reactor.

El diseño del reactor requiere la integración de conceptos biológicos con cinéticas de reacción, transferencia de masa y características de flujo de las unidades de contacto. Los sistemas se clasifican en dos modos básicos de crecimiento microbiano: en suspensión y en lecho fijo.

Como ya se explicó el tratamiento biológico de los contaminantes del agua es una técnica de destrucción en la cual los microorganismos rompen y degradan los compuestos tóxicos formando productos inocuos tal como agua y bióxido de carbono.

La temperatura del agua subterránea es aproximadamente de 13 °C. La rapidez de reacción y la eficiencia de tratamiento de un sistema de tratamiento biológico disminuye cerca de la mitad con cada 10 °C de disminución en la temperatura. Muchos sistemas de agua subterránea operan en estado perpetuo de baja actividad biológica porque los sistemas son tan pequeños que el tiempo de residencia del líquido en el sistema es insuficiente para alcanzar el equilibrio térmico con la atmósfera aún en los días más calientes.

### 6.7.2 Adsorción con Carbón Activado

El proceso de tratamiento con carbón activado se basa en la propiedad física del carbón de adsorber o atrapar ciertos compuestos orgánicos y mantenerlos dentro de los poros de su estructura. El carbón activado se empaca en columnas verticales y se hace fluir el agua subterránea a través de él por gravedad, los contaminantes del agua se adsorben en el carbón y el agua efluente tiene una concentración menor de contaminante. El agua puede pasar a través de varias columnas hasta completar la remoción.

El carbón activado tiene una relación de área superficial a volumen muy alta. Los compuestos orgánicos volátiles con bajos pesos moleculares se remueven marginalmente. Los compuestos aromáticos polinucleares y muchos compuestos orgánicos con baja polaridad se pueden remover a niveles no detectables. Los compuestos polares con alto grado de solubilidad en agua generalmente no se pueden remover exitosamente por esta técnica. Algunos de estos compuestos incluyen cetonas y alcoholes.

La cantidad de compuesto o grupo de compuestos que puede ser adsorbido por carbón activado depende del balance entre las fuerzas que mantienen el compuesto en solución y aquellas que atraen el compuesto a la superficie del carbón. Los factores que afectan este balance son: la adsorptividad, el pH del agua, la clase de compuestos químicos, la temperatura, el tipo de adsorbente y el proceso de activación empleado.

Después de un cierto tiempo el carbón activado se satura y debe ser regenerado o dispuesto como residuo, generalmente la regeneración consiste en calentar el carbón y después pasar una corriente de aire a través de él.

#### Ventajas

- Aplicable a muchos compuestos orgánicos e inorgánicos
- Equipo relativamente simple

#### Desventajas

- Se genera el carbón activado gastado como residuo
- Altos costos de mantenimiento
- Requiere la regeneración frecuente del carbón activado

### 6.7.3 Sistemas de Filtración

La filtración del agua se emplea para remover sólidos suspendidos antes o después del tratamiento biológico u otro tratamiento. En sistemas con bajos volúmenes y niveles relativamente bajos de materiales suspendidos es conveniente considerar el uso de sistemas de filtración de tierras diatomáceas, de cartuchos y filtros prensa.

Una técnica que ha ganado mucha aceptación es la filtración con membrana que consiste en pasar el agua mediante presión a través de una membrana sintética. La porosidad de la membrana varía en tamaño dependiendo del tipo de contaminante que va a removerse. Esta tecnología se clasifica en: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa o hiperfiltración, basándose principalmente en el tamaño de poro de la membrana.

### 6.7.4 Sistemas de Precipitación

La precipitación química consiste en transformar un ión metálico soluble en un precipitado insoluble mediante la adición de sustancias químicas para crear condiciones de supersaturación. La precipitación procede en tres etapas: formación de núcleos, crecimiento del cristal y floculación.

Los sistemas de precipitación química generalmente se usan para remover contaminantes inorgánicos mediante la formación de hidróxidos, sulfuros o carbonatos. Para lograr la reducción, se ajusta el pH del agua al intervalo óptimo para precipitar la sal del hidróxido. Cada ión inorgánico tiene diferente intervalo de pH y pueden requerirse más de una etapa de ajuste para lograr precipitar y remover los diferentes iones.

Muchos procesos de precipitación requieren la adición de sales de sodio o calcio, o de ácidos sulfúrico o clorhídrico para ajustar el pH al valor óptimo para la precipitación. Algunas veces las sales se remueven por ablandamiento químico del agua o por intercambio iónico.

El proceso de precipitación puede mejorarse por la adición de polímeros o coagulantes. Estos compuestos sirven para mantener juntas las partículas de flóculo o actúan como centro de nucleación para la formación del flóculo. El uso de soles activados formados a partir de silicato de sodio también es útil para promover la precipitación. El sulfato de aluminio, cloruro férrico o sulfato férrico (iones metálicos trivalentes) promueven la coagulación de partículas discretas y suspensiones que se remueven por flotación o precipitación.

El proceso de precipitación produce un lodo con alto contenido de agua. El lodo requiere algún tratamiento antes de su disposición, uno de los métodos más comunes para eliminar el agua del lodo ha sido el filtro prensa.

### 6.7.5 Sistemas de Flotación

Los sistemas de flotación son excelentes para remover altas concentraciones de grasas y aceites del agua. También sirven para remover sólidos suspendidos. La flotación generalmente requiere la adición de un coagulante o polímero para promover el crecimiento del flóculo. Los coagulantes más usados son sales de aluminio y hierro; polímeros catiónicos, aniónicos y no iónicos; y mezclas de estos materiales. Dependiendo de los contaminantes que se van a remover, las sustancias químicas se deben adicionar en concentraciones proporcionales a los niveles de contaminante.

Los sistemas de flotación deben probarse antes de construirse. Desafortunadamente el equipo de prueba y los protocolos a escala laboratorio no pueden modelar exactamente el funcionamiento de un sistema de aire disuelto. Sin embargo, las pruebas de laboratorio pueden dar una indicación preliminar de si la tecnología será aplicable.

Existen varios tipos de flotación disponibles. La tecnología más común es la flotación con aire disuelto, consiste en la presurización de una porción de la corriente de líquido y su saturación con aire. Dependiendo del tipo de sistema usado, toda la corriente o solo una porción pueden presurizarse. La selección de la tecnología considera la presión de operación de la corriente y la cantidad de energía consumida.

El otro tipo principal de sistema de flotación disponible es la electrolítica. Esta tecnología usa corriente directa o alterna para disociar el agua en hidrógeno y oxígeno. La tecnología opera bien en aguas con alta conductividad, pero produce gases de oxígeno e hidrógeno como subproducto en una mezcla potencialmente explosiva.

Los gases generados en un sistema de flotación pueden contener algunos contaminantes, los cuales se remueven en una torre de lavado, inclusive los gases pueden necesitar un tratamiento posterior antes de liberarse a la atmósfera.

### **6.7.6 Extracción con Aire**

La extracción con aire es un proceso utilizado para la remoción de compuestos orgánicos volátiles disueltos en el agua. Es una tecnología de separación que utiliza el hecho de que ciertos compuestos químicos son más solubles en el aire que en el agua. El proceso consiste en bombear el agua subterránea y pasarla a través de una torre empacada donde se hace circular una corriente de aire limpio, el sistema opera a contracorriente. El agua gotea sobre el material de empaque y al ponerse en contacto con el aire los contaminantes tienden a evaporarse y pasar del agua al aire.

#### Ventajas

- Útil para remover compuestos orgánicos volátiles
- El equipo es relativamente simple
- Requiere poco mantenimiento

#### Desventajas

- No es útil para remover compuestos orgánicos semivolátiles, compuestos inorgánicos ni metales
- La corriente residual de gas con los contaminantes requiere tratamiento antes de liberarse a la atmósfera

## **6.8 MÉTODOS DE DISPOSICIÓN**

Cuando se encuentran almacenados residuos peligrosos en un sitio contaminado es recomendable seleccionar la disposición de estos materiales como parte del plan de restauración.

Existen dos opciones de disposición para residuos peligrosos: confinamientos y formaciones geológicas.

### 6.8.1 Confinamientos

El confinamiento es una obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos en el suelo, consiste en la colocación de impermeabilizantes que incluyen membranas flexibles para evitar la infiltración de lixiviados de los contaminantes y un sistema de colección y monitoreo de los mismos. Una vez depositados los residuos se aplica una cubierta final al relleno.

El uso de confinamientos para residuos peligrosos se ve afectado por dos situaciones:

- Siempre existirá la necesidad de disponer residuos en el ambiente, porque algunos constituyentes tóxicos no pueden ser destruidos o bien los mismos tratamientos generan algún residuo que se debe disponer.
- Todos los esquemas de disposición en tierra están sujetos a una posible liberación de contaminantes al ambiente.

Durante el diseño, construcción y operación del confinamiento deben adoptarse medidas para disminuir los daños al ambiente y evitar la contaminación del agua subterránea, para ello se prohíbe la disposición de ciertos residuos peligrosos en estas construcciones y se deben cumplir los requerimientos tecnológicos mínimos para su construcción como es el uso de membranas sintéticas, sistemas de colección de lixiviados, monitoreo de agua subterránea y sistema de venteo.

### 6.8.2 Formaciones Geológicas

#### Pozos de inyección

La técnica de inyección de residuos líquidos a través de pozos dentro de formaciones geológicas se basa en el concepto de que estos estratos geológicos no tienen ningún beneficio potencial.

La formación geológica es el factor clave en el éxito de la inyección en pozos. Las características deseables para un pozo subterráneo son profundidad, uniformidad, área grande, espesor substancial, porosidad y permeabilidad alta, presión baja, un acuífero con agua salada o salmuera, separación del agua dulce, acuíferos subyacentes o superficiales (estratos que confinan el agua), entradas cerradas dentro del depósito y compatibilidad entre la mineralogía y los fluidos del embalse y el residuo inyectado.

Para el buen funcionamiento del pozo de inyección es muy importante la construcción correcta del mismo, para ello debe tomarse en cuenta la protección del agua potable y de los minerales que puedan tener un valor económico, y prevenir la corrosión del mecanismo tubular y de los materiales de cimentación.

#### Minas

El almacenamiento de residuos en minas subterráneas consiste en empaquetar los residuos peligrosos en una forma sólida, transportarlos a la mina y colocarlos en cuartos preparados. Los cuartos se llenan con residuos compatibles y se sellan. La atmósfera debe ser seca para evitar la corrosión de los tambores, los cuales se pueden retirar en cualquier momento. Las minas de sal, yeso y potasa se consideran que tienen gran potencial para almacenar residuos.

## 6.9 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE RESTAURACIÓN

La tecnología de restauración para un sitio contaminado debe reunir las siguientes cualidades para ser seleccionada entre todas las posibles técnicas:

- 1.- Proteger la salud humana y el ambiente
- 2.- Cumplir con los criterios de limpieza seleccionados
- 3.- Tener un costo beneficio
- 4.- Utilizar soluciones permanentes

Después que se ha hecho la clasificación y selección de las acciones de restauración, se puede iniciar el proceso de análisis detallado de alternativas. Este proceso incluye la generación de datos de costo, de impacto a la salud humana, evaluaciones de riesgo, y análisis de factibilidad técnica (HWSRM, 1994).

La EPA ha definido nueve criterios que deben usarse en la evaluación de las alternativas de restauración, para seleccionar la más adecuada, estos criterios son (EPA, 9355.0-27FS, 1990, HWSRM,1994):

- 1.- Protección global de la salud humana y el ambiente

Consiste en definir si la técnica de restauración proporciona una protección adecuada y en describir cómo se eliminan, reducen o controlan los riesgos presentes en cada ruta de exposición (suponiendo máxima exposición razonable) con el tratamiento y los controles de ingeniería e institucionales que se adopten.

- 2.- Cumplimiento de los criterios de limpieza

Esto se refiere a establecer si la técnica de restauración cumplirá con todos los valores de concentración máximos permisibles para cada contaminante.

- 3.- Efectividad y permanencia a largo plazo

Consiste en evaluar la capacidad de la técnica de restauración para mantener una protección confiable de la salud humana y el ambiente durante todo el tiempo, una vez que se han cumplido los objetivos de limpieza.

- 4.- Reducción de la toxicidad, movilidad o volumen de los contaminantes

Se debe plantear en qué medida se logra esto a través de la aplicación de la tecnología.

- 5.- Efectividad a corto plazo

Consiste en establecer el periodo de tiempo necesario para lograr la protección a cualquier impacto adverso sobre la salud humana y el ambiente que puede presentarse durante la construcción y adaptación de la técnica de restauración, hasta que se cumplen los objetivos de limpieza.

- 6.- Factibilidad

Consiste en la factibilidad técnica y administrativa de la tecnología de restauración, incluyendo la disponibilidad de materiales y servicios necesarios para implementar una determinada opción. Esto es especialmente importante cuando se tiene un sitio con residuos o medios muy heterogéneos, o bien la tecnología no está muy probada y depende de los equipos y de los expertos.

Como parte de los análisis técnicos globales del proyecto, se debe juzgar su factibilidad y funcionamiento técnico, así como de las alternativas específicas y del equipo. El concepto de factibilidad técnica en general considera funcionamiento, vida útil del proyecto, requerimientos de operación y mantenimiento, fiabilidad y funcionamiento demostrado, características de construcción, tiempo requerido para la construcción y aspectos de seguridad.

#### 7.- Costo

Incluye el capital estimado, los costos de operación y mantenimiento y los costos a valor presente neto. Este aspecto es importante para decidir entre dos tecnologías que son parecidas en cuanto a los otros criterios o que presentan resultados similares y el factor que puede decidir es el costo. El desarrollo de un análisis de costos generalmente es difícil debido a los problemas en la obtención exacta de éstos, particularmente de construcción y de contratistas.

Un análisis aceptable debe contener la estimación de los costos de equipo, de construcción, de operación y mantenimiento, de reemplazo de equipo, del terreno y de desarrollo del sitio, y si es necesario, costos de reubicación de la población para cada una de las alternativas bajo consideración.

Generalmente los costos deben proyectarse a 50 años o hasta la vida del proyecto, considerando los costos de mantenimiento, de reemplazo de equipo y de los operadores del equipo durante ese tiempo.

#### 8.- Aceptación del estado

Se refiere a los comentarios y la aceptación que manifiesta la autoridad ambiental, ya sea federal o estatal, tomando en cuenta principalmente el cumplimiento de los criterios de limpieza que logre la tecnología.

Todas las acciones que se lleven a cabo deben cumplir con la política y legislación ambiental vigente. Al proponer una solución debe tenerse cuidado de no violar alguna regulación sobre control de la contaminación.

#### 9.- Aceptación de la comunidad

Se refiere a la respuesta general que presente el público a la tecnología de restauración propuesta. Un rasgo clave del proceso de análisis institucional es la opinión pública. Se debe estar preparado para defender la propuesta contra partidos potencialmente hostiles en una reunión pública.

Actualmente se han desarrollado muchas técnicas de restauración para la limpieza de suelos contaminados. Para determinar cuál es la más adecuada se deben considerar diferentes factores, tales como las opciones tecnológicas disponibles y la estructura ambiental, económica y social con que se cuenta. Cada técnica de restauración se debe evaluar con respecto a su función (separación, destrucción, reducción y/o eliminación de la toxicidad), potencial para formar subproductos y residuos, aplicación y limitaciones (Sims, 1990).

Durante la evaluación de las opciones de restauración del suelo es importante tener un conocimiento completo de la geología del sitio, las rutas de migración de los contaminantes identificados y las propiedades físicas, químicas y toxicológicas de los contaminantes presentes.

Se deben evaluar las incompatibilidades entre las diferentes tecnologías, al igual que el potencial de consolidación, integración y mejoramiento de muchas de las tecnologías de restauración. No debe ignorarse la posibilidad de que surjan problemas inherentes que pueden originarse cuando se tratan residuos mezclados (HWSRM, 1994).

La selección final entre las tecnologías preseleccionadas sólo se logra con una revisión minuciosa de los detalles de cada proceso con respecto a los tipos de residuos y las interacciones con los procesos.

El uso de un balance de masa para desarrollar la revisión inicial y seleccionar la tecnología es de ayuda. Un diagrama de bloques listando las entradas, sustancias químicas, materias primas y corrientes de residuos, y una lista similar de productos, reactivos y efluentes a partir del proceso pueden ser de utilidad para seleccionar y revisar las tecnologías propuestas (HWSRM, 1994).

También es importante analizar los riesgos a la salud a corto y largo plazo asociados con la puesta en marcha de la técnica de restauración, así como los posibles efectos ecológicos que la técnica pueda ocasionar tal como alteración o destrucción de hábitat terrestres y acuáticos. Generalmente esta evaluación de riesgo no se usa como criterio de selección para las alternativas de restauración (Asante-Duah, 1996).

Debe considerarse el uso de trenes de tratamiento en la propuesta de restauración y evaluarse el costo que tendría una sola técnica comparado con el uso de una tecnología adicional y la eficiencia que se lograría en ambos casos.

Si hay amenaza de fuego, explosión, fugas o peligro inmediato a la población o al ambiente, por ejemplo la amenaza de contaminación a un suministro de agua público o un río, se deben garantizar acciones de restauración. No todas las acciones de restauración inmediata son situaciones de emergencia, algunas como cercar el sitio o cubrirlo para reducir la migración de polvos arrastrados por el viento y la remoción de residuos, pueden tomarse inmediatamente pero pueden estar relacionadas con los objetivos de limpieza a largo plazo.

## 6.10 INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE TECNOLOGÍAS DE RESTAURACIÓN

Actualmente se ha generado un mercado de servicios de restauración de sitios contaminados a nivel mundial que está en constante crecimiento. Muchas firmas están desarrollando nuevas e innovadoras técnicas de restauración, lo cual ha generado un incremento de información en la literatura técnica. Los usuarios potenciales de la tecnología y los creadores de ésta necesitan estar actualizados sobre los nuevos desarrollos.

La USEPA (Environmental Protection Agency of USA) ha desarrollado varios productos diseñados para incrementar la eficiencia del proceso de evaluación de las tecnologías. Estas guías para decidir entre las diferentes técnicas intentan proporcionar un resumen de la información disponible, y son las siguientes (Kovalich y Kingscott, 1993):

### Fuentes de Información Seleccionadas de la EPA

La EPA ha compilado un folleto de sus fuentes de información más relevantes relacionadas con la aplicación de tecnologías innovadoras. El documento *Selected Alternative and Innovative Treatment Technologies for Corrective Action* (EPA/542/R-92/004) (Tecnologías de Tratamiento Alternativas e Innovadoras Seleccionadas para Acciones Correctivas) se publica semestralmente y proporciona títulos, números de documentos e información ordenada sobre documentos de las tecnologías. La bibliografía incluye información sobre bases de datos de la EPA respecto a tecnologías de restauración de sitios.

### Revisión de la Literatura

Esta bibliografía fue concebida como un esfuerzo para mejorar el conocimiento sobre literatura técnica e incrementar la eficiencia del proceso de evaluación de tecnologías innovadoras. La Revisión de la Literatura sobre Tecnologías Innovadoras para la Restauración de Sitios con Residuos Peligrosos (*Literature Survey of Innovative Technologies for Hazardous Waste Site Remediation*) (EPA/542/B-92/004) representa un intento único para obtener información a partir de extensas fuentes bibliográficas disponibles a través de bases de datos comerciales. Se desarrolló una estrategia de búsqueda por medio de palabras clave para seleccionar entre las referencias y los resúmenes fueron revisados de acuerdo a su importancia. La bibliografía resultante representa una revisión que puede actualizarse fácilmente. Las referencias sobre cada tecnología no son extensas pero son útiles y representativas.

### VISITT

La EPA ha desarrollado una base de datos útil para discernir entre tecnologías durante el proceso de selección. El Sistema de Información para Tecnologías de Tratamiento Innovadoras (*Vendor Information System for Innovative Treatment Technologies, VISITT*) contiene información actual sobre la disponibilidad, funcionamiento y costos del tratamiento para restaurar suelo y agua subterránea contaminados. Las búsquedas se basan en varios criterios tales como contaminantes, tipo de residuos, fuente de residuos, etcétera. La base de datos incluye tecnologías en etapa de desarrollo a nivel laboratorio o piloto y procesos disponibles comercialmente.

### ATTIC

El Centro de Información de Tecnologías de Tratamiento Alternativas (*Alternative Treatment Technology Information Center, ATTIC*) contiene información sobre procesos de tratamiento biológicos, químicos y físicos; solidificación y estabilización; y tecnologías de tratamiento térmico. ATTIC proporciona al usuario una línea de acceso a varias bases de datos, así como a un boletín electrónico, una línea telefónica de atención directa para quien no cuenta con computadora y un depósito de documentos relacionados con las tecnologías de tratamiento alternativas e innovadoras. El componente primario de ATTIC es la base de datos bibliográfica ATTIC, que proporciona los resúmenes de 2 500 referencias. Además, el sistema en línea da acceso a una base de datos de tratabilidad, un centro de mensajes, un directorio de asistencia técnica y un calendario general de eventos relacionados con las tecnologías.

### Mesa Redonda

La Mesa Redonda Federal sobre Tecnologías de Restauración (The Federal Remediation Technologies Roundtable) ha desarrollado un compendio sobre evaluación de proyectos de demostración titulado *Synopses of Federal Demonstrations of Innovative Site Remediation Technologies* (EPA/542/B-92/003) (Sinopsis de las Demostraciones Federales de Tecnologías Innovadoras de Restauración de Sitios). Esta publicación se enfoca a las tecnologías que están más adelantadas en el proceso de comercialización y en la etapa de demostración en campo. El reporte contiene una compilación de 105 resúmenes que describen las demostraciones de las tecnologías de tratamiento innovadoras para residuos peligrosos.

## CAPÍTULO 7

### ASPECTOS LEGALES SOBRE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO EN MÉXICO

En este capítulo se presentan los principales aspectos de la actual legislación en materia de contaminación del suelo, haciendo un análisis de la misma y proponiendo los puntos más relevantes que deben tomarse en consideración para tratar de completar la legislación referente a la prevención y control de la contaminación del suelo.

#### 7.1 LEGISLACIÓN AMBIENTAL MEXICANA SOBRE CONTAMINACIÓN DEL SUELO

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos es la Ley Suprema de la Unión, tal y como se encuentra establecido en el artículo 133 de la misma. Con este carácter de supremacía se puede iniciar el examen del sistema jurídico sobre la protección del ambiente, estudiando las disposiciones constitucionales referidas a este aspecto.

Desde sus orígenes se plasmó en el artículo 27 Constitucional que este precepto fuera el fundamento de toda política conservacionista de los recursos naturales en nuestro país, consagrándose originalmente el principio de que la Nación tendría en todo tiempo el derecho "... de regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública y cuidar su conservación, con este objeto se dictarán las medidas necesarias para [...] evitar la destrucción de los elementos naturales y daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad"; dicho precepto es la base con la cual se elaboró toda la legislación mexicana en torno a los recursos naturales y la legislación ecológica y ambiental.

Con fundamento en este artículo constitucional se desprendió la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), ley reglamentaria que regula este aspecto.

A partir de las reformas constitucionales de 1987, de aspecto eminentemente ambientalista, las cuales entran en vigor en 1988, el artículo 27 Constitucional en sus párrafos primero y tercero, establece:

"La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada."

"La Nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. En consecuencia se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos y establecer adecuadas provisiones, usos, reservas y destinos de tierras, aguas y bosques, a efecto de ejecutar obras públicas y de planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico; ..."

Con esta reforma es deber del Estado velar por la protección del ambiente, idea que además integra una concepción de protección total del ambiente y no solo de ciertos elementos que lo forman.

La prevención y control de la contaminación del suelo y la restauración de sitios contaminados tiene sus bases legales en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente publicada el 28 de enero de 1988 y entra en vigor en marzo del mismo año, la cual ha sido recientemente reformada el 13 de diciembre de 1996. Dentro de los artículos de la nueva ley modificada que hacen mención al tema están los siguientes:

**Art. 1** La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto establecer las bases para:

Frac. III La preservación, la restauración y el mejoramiento del ambiente;

Frac. V El aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas;

Frac. VI La prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo;

**Art. 3** Para los efectos de esta Ley se entiende por:

Frac. XXXIII Restauración: Conjunto de actividades tendientes a la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y continuidad de los procesos naturales;

**Art. 5** Son facultades de la Federación:

Frac. I La formulación y conducción de la política ambiental nacional;

Frac. II La aplicación de los instrumentos de la política ambiental previstos en esta Ley, en los términos en ella establecidos, así como la regulación de las acciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente que se realicen en bienes y zonas de jurisdicción federal;

Frac. V La expedición de las normas oficiales mexicanas y la vigilancia de su cumplimiento en las materias previstas en esta Ley;

Frac. VI La regulación y el control de las actividades consideradas como altamente riesgosas, y de la generación, manejo y disposición final de materiales y residuos peligrosos para el ambiente o los ecosistemas, así como para la preservación de los recursos naturales, de conformidad con esta Ley, otros ordenamientos aplicables y sus disposiciones reglamentarias;

Frac. XI La regulación del aprovechamiento sustentable, la protección y la preservación de los recursos forestales, el suelo, las aguas nacionales, la biodiversidad, la flora, la fauna y los demás recursos naturales de su competencia;

Frac. XIV La regulación de las actividades relacionadas con la exploración, explotación y beneficio de los minerales, sustancias y demás recursos del subsuelo que corresponden a la nación, en lo relativo a los efectos que dichas actividades puedan generar sobre el equilibrio ecológico y el ambiente;

**Art. 15** Para la formulación y conducción de la política ambiental y la expedición de normas oficiales mexicanas y demás instrumentos previstos en esta Ley, en materia de preservación y restauración del equilibrio ecológico y protección al ambiente, el Ejecutivo Federal observará los siguientes principios:

Frac. IV Quien realice obras o actividades que afecten o puedan afectar el ambiente, está obligado a prevenir, minimizar o reparar los daños que cause, así como a asumir los costos que dicha afectación implique. Asimismo, debe incentivarse a quien proteja el ambiente y aproveche de manera sustentable los recursos naturales;

Frac. XI En el ejercicio de las atribuciones que las leyes confieren al Estado, para regular, promover, restringir, prohibir, orientar y en general inducir las acciones de los particulares en los campos económico y social, se considerarán los criterios de preservación y restauración del equilibrio ecológico;

**Art. 36** Para garantizar la sustentabilidad de las actividades económicas, la Secretaría (de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca) emitirá normas oficiales mexicanas en materia ambiental y para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, que tengan por objeto:

Frac. I Establecer los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, metas, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en regiones, zonas, cuencas o ecosistemas, en aprovechamiento de recursos naturales, en el desarrollo de actividades económicas, en el uso y destino de bienes, en insumos y en procesos;

Frac. II Considerar las condiciones necesarias para el bienestar de la población y la preservación o restauración de los recursos naturales y la protección al ambiente;

Frac. IV Otorgar certidumbre a largo plazo a la inversión e inducir a los agentes económicos a asumir los costos de la afectación ambiental que ocasionen;

**Art. 37** En la formulación de normas oficiales mexicanas en materia ambiental deberá considerarse que el cumplimiento de sus previsiones deberá realizarse de conformidad con las características de cada proceso productivo o actividad sujeta a regulación, sin que ello implique el uso obligatorio de tecnologías específicas.

Cuando las normas oficiales mexicanas en materia ambiental establezcan el uso de equipos, procesos o tecnologías específicas, los destinatarios de las mismas podrán proponer a la Secretaría para su aprobación, los equipos, procesos o tecnologías alternativos mediante los cuales se ajustarán a las previsiones correspondientes.

Para tal efecto, los interesados acompañarán a su propuesta la justificación en que ésta se sustente para cumplir con los objetivos y finalidades establecidos en la norma oficial mexicana de que se trate.

**Art. 49** En las zonas núcleo de las áreas naturales protegidas quedará expresamente prohibido:

Frac. I Verter o descargar contaminantes en el suelo, subsuelo y cualquier clase de cauce, vaso o acuífero, así como desarrollar cualquier actividad contaminante;

**Art. 98** Para la preservación y aprovechamiento sustentable del suelo se consideran los siguientes criterios:

Frac. I El uso del suelo debe ser compatible con su vocación natural y no debe alterar el equilibrio de los ecosistemas;

Frac. II El uso de los suelos debe hacerse de manera que éstos mantengan su integridad física y su capacidad productiva;

Frac. III Los usos productivos del suelo deben evitar prácticas que favorezcan la erosión, degradación o modificación de las características topográficas, con efectos ecológicos adversos;

Frac. IV En las acciones de preservación y aprovechamiento sustentable del suelo, deberán considerarse las medidas necesarias para prevenir o reducir su erosión, deterioro de las propiedades físicas, químicas o biológicas del suelo y la pérdida duradera de la vegetación natural;

Frac. V En las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, deberán llevarse a cabo las acciones de regeneración, recuperación y rehabilitación necesarias, a fin de restaurarlas, y

Frac. VI La realización de las obras públicas o privadas que por sí mismas puedan provocar deterioro severo de los suelos, deben incluir acciones equivalentes de regeneración, recuperación y restablecimiento de su vocación natural.

**Art. 101** En las zonas selváticas, el Gobierno Federal atenderá en forma prioritaria, de conformidad con las disposiciones aplicables:

Frac. VII La regeneración, recuperación y rehabilitación de las zonas afectadas por fenómenos de degradación o desertificación, a fin de restaurarlas.

**Art. 109 BIS** La Secretaría, en los términos que señalen los reglamentos de esta Ley, deberá integrar un inventario de emisiones atmosféricas, descargas de aguas residuales en cuerpos receptores federales o que se infiltren al subsuelo, materiales y residuos peligrosos de su competencia, coordinar los registros que establezca la Ley y crear un sistema consolidado de información basado en las autorizaciones, licencias o permisos que en la materia deban otorgarse

**Art. 121** No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.

**Art. 122** Las aguas residuales provenientes de usos públicos urbanos y las de usos industriales o agropecuarios que se descarguen en los sistemas de drenaje y alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas, ríos, cauces, vasos y demás depósitos o corrientes de agua, así como las que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo, y en general, las que se derramen en los suelos, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir:

Frac. I Contaminación de los cuerpos receptores;

**Art. 123** Todas las descargas en las redes colectoras, ríos, acuíferos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de descarga que determine la Secretaría o las autoridades locales. Corresponderá a quien genere dichas descargas, realizar el tratamiento previo requerido.

**Art. 134** Para la prevención y control de la contaminación del suelo se consideran los siguientes criterios:

Frac. I Corresponde al estado y la sociedad prevenir la contaminación del suelo;

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

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

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

Frac. V 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.

**Art. 135** Los criterios para prevenir y controlar la contaminación del suelo se considerarán, en los siguientes casos:

Frac. Y La ordenación y regulación del desarrollo urbano;

Frac. II La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios;

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

Frac. IV El otorgamiento de todo tipo de autorizaciones para la fabricación, importación, utilización y en general la realización de actividades relacionadas con plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas.

**Art. 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

Frac. I La contaminación del suelo;

Frac. II Las alteraciones nocivas en el proceso biológico de los suelos;

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

Frac. IV Riesgos y problemas de salud

**Art. 139** Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos se sujetará a lo que disponga esta Ley, la Ley de Aguas Nacionales, sus disposiciones reglamentarias y las normas oficiales mexicanas que para tal efecto expida la Secretaría.

**Art. 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 las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Las autorizaciones para el tránsito por el territorio nacional de residuos no peligrosos con destino a otra Nación, sólo podrán otorgarse cuando exista previo consentimiento de ésta.

**Art. 151** La responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En el caso de que se contrate los servicios de manejo y disposición final de los residuos peligrosos con empresas autorizadas por la Secretaría y los residuos sean entregados a dichas empresas, la responsabilidad por las operaciones será de éstas independientemente de la responsabilidad que, en su caso, tenga quien las generó.

Quienes generen, reusen o reciclen residuos peligrosos, deberán hacerlo del conocimiento de la Secretaría en los términos previstos en el Reglamento de la presente Ley.

En las autorizaciones para el establecimiento de confinamientos de residuos peligrosos, sólo se incluirán los residuos que no puedan ser técnica y económicamente sujetos de reuso, reciclamiento o destrucción térmica o fisicoquímica, y no se permitirá el confinamiento de residuos peligrosos en estado líquido.

**Art. 152 BIS** Cuando la generación, manejo o disposición final de materiales o residuos peligrosos, produzca contaminación del suelo, los responsables de dichas operaciones deberán llevar a cabo las acciones necesarias para recuperar y restablecer las condiciones del mismo, con el propósito de que éste 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.

**Art. 170** Cuando exista riesgo inminente de desequilibrio ecológico, o de daño o deterioro grave a los recursos naturales, casos de contaminación con repercusiones peligrosas para los ecosistemas, sus componentes o para la salud pública, la Secretaría, fundada y motivadamente, podrá ordenar alguna o algunas de las siguientes medidas de seguridad:

Frac. III La neutralización o cualquier acción análoga que impida que materiales o residuos peligrosos generen los efectos previstos en el primer párrafo de este Artículo.

Asimismo, la Secretaría podrá promover ante la autoridad competente, la ejecución de alguna o algunas de las medidas de seguridad que se establezcan en otros ordenamientos.

**Art. 170 BIS** Cuando la Secretaría ordene alguna de las medidas de seguridad previstas en esta Ley, indicará al interesado, cuando proceda, las acciones que debe llevar a cabo para subsanar las irregularidades que motivaron la imposición de dichas medidas, así como los plazos para su realización, a fin de que una vez cumplidas éstas, se ordene el retiro de la medida de seguridad impuesta.

**Art. 171** Las violaciones a los preceptos de esta Ley, sus reglamentos y las disposiciones que de ella emanen serán sancionadas administrativamente por la Secretaría, con una o más de las siguientes sanciones:

- I. Multa por el equivalente de veinte a veinte mil días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal en el momento de imponer la sanción;
- II. Clausura temporal o definitiva, total o parcial, cuando:
  - a) El infractor no hubiere cumplido en los plazos y condiciones impuestos por la autoridad, con las medidas correctivas o de urgente aplicación ordenadas;
  - b) En casos de reincidencia cuando las infracciones generen efectos negativos al ambiente, o
  - c) Se trate de desobediencia reiterada, en tres o más ocasiones, al cumplimiento de alguna o algunas medidas correctivas o de urgente aplicación impuestas por la autoridad.
- III. Arresto administrativo hasta por treinta y seis horas.
- V. La suspensión o revocación de las concesiones, licencias, permisos o autorizaciones correspondientes.

Si una vez vencido el plazo concedido por la autoridad para subsanar la o las infracciones que se hubieren cometido, resultare que dicha infracción o infracciones aún subsisten, podrán imponerse multas por cada día que transcurra sin obedecer el mandato, sin que el total de las multas exceda del monto máximo permitido, conforme a la fracción I de este Artículo.

En el caso de reincidencia, el monto de la multa podrá ser hasta por dos veces del monto originalmente impuesto, sin exceder del doble del máximo permitido, así como la clausura definitiva.

## 7.2 LEGISLACIÓN AMBIENTAL MEXICANA SOBRE RESIDUOS PELIGROSOS

En virtud de que el manejo y disposición inadecuada de los residuos peligrosos es una de las principales causas de contaminación del suelo, a continuación se presentan los artículos que regulan el manejo, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos generados durante algún proceso u operación en cuanto a su potencial de causar contaminación al suelo. Estas regulaciones están contenidas en el Reglamento en Materia de Residuos Peligrosos de la LGEEPA (RLGEEPAMRP), cabe señalar que este Reglamento corresponde a la versión de la Ley de 1988 y debe emitirse un nuevo Reglamento para la versión de 1996.

**Art. 4** Compete a la Secretaría:

Frac. III Controlar el manejo de los residuos peligrosos que se generan en las operaciones y procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, y de servicios

**Art. 8** El generador de residuos peligrosos deberá:

Frac. V Envasar sus residuos peligrosos, en recipientes que reúnan las condiciones de seguridad previstas en este Reglamento y en las normas técnicas ecológicas (actualmente normas oficiales mexicanas) respectivas

Frac. VI Identificar a sus residuos peligrosos con las indicaciones previstas en este reglamento y las normas técnicas ecológicas respectivas

Frac. VII Almacenar sus residuos peligrosos en condiciones de seguridad y en áreas que reúnan los requisitos previstos en el presente Reglamento y en las normas técnicas ecológicas correspondientes

Frac. VIII Transportar sus residuos peligrosos en los vehículos que determine la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y bajo las condiciones previstas en este Reglamento y en las normas técnicas ecológicas que correspondan

Frac. IX Dar a sus residuos peligrosos el tratamiento que corresponda de acuerdo con lo dispuesto en el Reglamento y las normas técnicas respectivas

Frac. X Dar a sus residuos peligrosos la disposición final que corresponda de acuerdo con los métodos previstos en el Reglamento y conforme a lo dispuesto por las normas técnicas ecológicas aplicables

**Art. 13** El generador podrá contratar los servicios de empresas de manejo de residuos peligrosos, para cualquiera de las operaciones que comprende el manejo. Estas empresas deberán contar con autorización previa de la Secretaría y responsables, por lo que toca a la operación de manejo en la que intervengan, del cumplimiento de lo dispuesto en el Reglamento y en las normas técnicas ecológicas que de él se deriven.

**Art. 18** En los casos de áreas abiertas no techadas, no deberán almacenarse residuos peligrosos a granel, cuando éstos produzcan lixiviados.

**Art. 31** La disposición final de residuos peligrosos se sujetará a lo previsto en este Reglamento y a las normas técnicas ecológicas que al efecto se expidan. Los sistemas para la disposición final de residuos peligrosos son:

- I. Confinamientos controlados
- II. Confinamientos en formaciones geológicas estables, y
- III. Receptores de agroquímicos

Los receptores de agroquímicos sólo podrán confinar residuos de agroquímicos o sus envases

**Art. 35** Los lixiviados que se originen en las celdas de confinamiento o de tratamiento de un confinamiento controlado, deberán recolectarse y tratarse para evitar la contaminación del ambiente y el deterioro de los ecosistemas.

Los métodos para su recolección y tratamiento deberán ajustarse a las normas técnicas ecológicas que al efecto se expidan.

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

El aviso por escrito a que se refiere el párrafo anterior deberá comprender:

Frac. VI Medidas adoptadas para la limpieza y restauración de la zona afectada

### **7.3 ANÁLISIS SOBRE LA LEGISLACIÓN EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN DEL SUELO**

La legislación vigente en la materia, indica que el responsable de llevar a cabo las actividades de restauración de un sitio contaminado por residuos peligrosos a causa de fuga o derrame, corresponde al que ocasionó dicha acción, y está obligado a asumir los costos de dicha restauración.

También está asentado en las nuevas reformas a la Ley que las obras y actividades que causen deterioro en los suelos deben considerar la aplicación de medidas para contrarrestar dicha afectación, y dejar el suelo en condiciones similares a las que presentaba al inicio de las operaciones.

La Ley contempla la prevención de la contaminación del suelo producida por la descarga de aguas residuales, estableciendo que el generador de dichas descargas está obligado a dar tratamiento a las aguas residuales antes de su descarga para cumplir con las normas oficiales mexicanas y las condiciones particulares de descarga.

Respecto a la contaminación del suelo producida por residuos peligrosos, se menciona en la Ley de manera muy general que los residuos deben cumplir con una serie de condiciones para evitar alteraciones en el suelo y riesgos a la salud, asimismo señala que el generador de los residuos peligrosos es el responsable de su manejo y disposición final; o bien, lo es la empresa que se contrate para tales servicios, queda prohibido el confinamiento de residuos peligrosos líquidos y sólo se confinarán los residuos peligrosos que no se puedan destinar a reuso, reciclado o destrucción.

En cuanto a las normas oficiales mexicanas aplicables a suelos contaminados no existe actualmente ninguna. Es importante señalar que existen aún grandes limitaciones y deficiencias en el sistema legislativo mexicano con respecto a residuos peligrosos y contaminación del suelo, por lo que es urgente desarrollar el

Reglamento para la prevención y control de la contaminación del suelo, así como las normas oficiales mexicanas necesarias para dar cumplimiento a dicho reglamento.

A continuación se proponen algunos de los aspectos más relevantes que debería contemplar la legislación ambiental para complementar la normatividad respecto a la contaminación del suelo, sus causas y las medidas correctivas:

1.- En el caso de sitios contaminados donde no existen instalaciones industriales prohibir el desarrollo de actividades sin antes restaurar el sitio, de acuerdo al nuevo uso que se le quiera asignar.

2.- Para la clausura de instalaciones abandonadas o que han dejado de operar, debe considerarse dentro del plan de cierre de las instalaciones, la limpieza y restauración del sitio.

3.- Establecer los métodos para la evaluación del grado y extensión de la contaminación presente en sitios potencialmente contaminados con sustancias peligrosas.

4.- Establecer los criterios de limpieza para la restauración de sitios contaminados dependiendo del nuevo uso del suelo, el tipo de contaminante presente y las condiciones naturales prevalecientes en el sitio.

5.- Se deben establecer los procedimientos para llevar a cabo la restauración de sitios contaminados.

6.- Se debe considerar la minimización, reuso y reciclaje de los residuos peligrosos además del tratamiento y confinamiento.

7.- Establecer las posibles tecnologías de tratamiento para residuos peligrosos.

8.- Se deben especificar claramente cuáles son las sanciones a las que se hace merecedor aquel que no cumpla con las disposiciones establecidas en la ley.

Resulta prioritario completar la legislación en cuanto a contaminación del suelo considerando los puntos anteriores para llenar las lagunas existentes, y sobre todo es necesario establecer los procedimientos de evaluación y restauración de sitios contaminados para definir los lineamientos a seguir y homologar la manera en que deberán llevarse a cabo por parte del responsable del sitio contaminado o bien del personal al que se le asigne la restauración del mismo. Además todo esto facilitaría a la autoridad ambiental, la evaluación y seguimiento del plan de restauración.

Otro punto de vital importancia es trabajar en el desarrollo de los criterios de limpieza para suelo que sean aplicables en México, tomando en cuenta las condiciones naturales de cada región.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSIONES

La contaminación del suelo se produce principalmente por disposición inadecuada de residuos peligrosos, por derrames accidentales de sustancias químicas durante su transporte y por actividades específicas, tales como la minería, la agricultura y la industria petrolera.

Para dar solución al problema de la contaminación del suelo en sitios abandonados, lo primero que debe hacerse es llevar un registro de tales sitios, tratando de concentrar toda la información general de referencia en un inventario a cargo de una dependencia ambiental, a la cual se le pueda notificar la sospecha o descubrimiento de posibles sitios contaminados.

Después debe llevarse a cabo la evaluación del grado y extensión de la contaminación presente en el sitio, la cual se efectúa en dos etapas: la evaluación preliminar y la detallada. La primera consiste en recabar información sobre los usos y las actividades que se han realizado en el lugar y se realiza un reconocimiento del sitio; en la segunda etapa se lleva a cabo un muestreo y análisis de los diferentes medios presentes como suelo, agua, aire y sedimentos.

Es importante planear las actividades de muestreo con la finalidad de cumplir correctamente con el objetivo del muestreo, evitar confusiones durante el trabajo de campo, proteger la salud de los trabajadores y ahorrar tiempo y dinero.

En este trabajo se presentan los principales aspectos que deben tomarse en cuenta para el diagnóstico de un sitio contaminado, su muestreo, así como las recomendaciones más relevantes durante la planeación del trabajo.

Es necesario establecer los criterios o valores máximos permisibles de contaminantes en suelo aplicables en México, para comparar con los datos de concentración de contaminantes detectados en los diferentes medios durante la evaluación del sitio, y así concluir si éste se encuentra contaminado y diseñar el plan de restauración.

Una vez que se concluye que el sitio está contaminado, cuáles son las sustancias químicas presentes y en qué concentración, es recomendable clasificar a todos los sitios contaminados para determinar prioridades de restauración y, de esta manera, atender primero a los sitios que representan un mayor riesgo a la salud y al ambiente. Esta clasificación toma en cuenta las características del sitio, de los contaminantes y de los receptores, evaluando estos factores para cuatro situaciones: la migración de contaminantes al agua subterránea, al agua superficial, al aire y la exposición a la contaminación presente en el suelo.

En virtud del tiempo y el trabajo que implicaría el desarrollo de un sistema de clasificación cuantitativo y debido al creciente número de sitios contaminados en México, se propone un sistema de clasificación cualitativo basado en la consideración de diez factores.

La experiencia sobre restauración del suelo es muy reciente aún en países desarrollados y es necesario continuar desarrollando tecnologías de restauración más efectivas y menos costosas,

que lleven en lo posible a la recuperación de las propiedades naturales del suelo permitiendo continuar con su uso de acuerdo a su vocación , ya que el suelo es un recurso no renovable que debe cuidarse.

Durante la selección de la tecnología de restauración del suelo que vaya a aplicarse, deben tomarse en cuenta factores específicos del sitio en cuestión, tales como la composición, densidad y capacidad de almacenamiento del suelo; las reacciones y transformaciones del contaminante que ocurren en el suelo, el tipo de contaminante y sus propiedades fisicoquímicas, así como los aspectos técnicos y económicos de cada técnica.

En cuanto a la legislación actual en materia de prevención y control de la contaminación del suelo, no obstante que fue modificada la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en diciembre de 1996, aún falta considerar muchos aspectos, es necesario desarrollar el Reglamento para la prevención y control de la contaminación del suelo, así como las normas oficiales mexicanas necesarias.

En México no existen criterios de limpieza para sitios contaminados con materiales peligrosos, a falta de ello, el desarrollo de estos niveles de limpieza debe hacerse con base en la evaluación del riesgo a la salud humana y ecológico y considerando las concentraciones naturales en el ambiente y el uso de suelo propuesto.

Para poder evitar que se siga contaminando el suelo, es importante fomentar la minimización y el tratamiento de los residuos peligrosos, lo cual se traduciría en una menor generación final de estos desechos que se llevan a confinamiento o se disponen de manera inadecuada, y también disminuiría el riesgo que implica el transporte de estos materiales.

Sin embargo, una solución más real sería el uso de tecnología que genere una mucho menor cantidad de residuos, lo cual implica también mayor aprovechamiento de los recursos naturales y las materias primas, que conlleva a su vez ventajas económicas.

## BIBLIOGRAFÍA

Asante-Duah Kofi, "Management of Contaminated Site Problems", Lewis Publishers, 1996.

Booth, Pieter and Jacobson, Michael, "Development of Cleanup Standards at Superfund Sites: An Evaluation of Consistency", J. Air Waste Management Association, Vol. 42, No. 6, June 1992.

Canadian Council of Ministers of the Environment, "Interim Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites", CCME EPC-CS34, September 1991.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), The National Contaminated Sites Remediation Program, "National Classification System for Contaminated Sites" Report CCME EPC-CS39E, March 1992.

Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), The National Contaminated Sites Remediation Program, "Guidance Manual on Sampling, Analysis, and Data Management for Contaminated Sites Volumen I: Main Report" Report CCME EPC-NCS62E, December 1993.

Escolero Fuentes O. A, "Criterios para evaluar la vulnerabilidad de contaminación en acuíferos", Comisión Nacional del Agua.

Federal Register, Part II Environmental Protection Agency, "40 CFR Part 300 Hazard Ranking System; Final Rule", Friday, December 14, 1990.

Hazardous Waste Site Remediation Management (HWSRM), A special publication prepared by Task Force Hazardous Waste Site Remediation, 1994.

Hobson, D.M. Capítulo 3 de "Land Contamination Problems and Solutions" editado por Tom Cairney. Blackie Academic & Professional, 1993.

Hornick, S.B., Capítulo 2 de "Land Treatment of Hazardous Wastes" editado por James F. Parr, Paul B. Marsh y Joanne M. Kla, Noyos Data Corporation, USA , 1983.

Industry and Environment (I&E), "Managing contaminated land: facts and figures", Vol. 16, No. 3, pp. 4-6, July - Sept, 1993.

Killian, Donald, Capítulo 20, publicado en "Management of hazardous materials and wastes: Treatment, minimization and environment impacts", editado por Majumdar, S.K., Miller, E.W., & Schmalz, R.F. The Pennsylvania Academy of Sciences, 1989.

Kovalick, Walter W Jr. and Kingscott, John W "Hazardous Waste Site Remediation in the United States: Information Sources and Selection Trends for Innovative Technologies", Industry and Environment, Vol. 16 No. 3, pp. 10-14, July - Sept. 1993.

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, SEMARNAP/PROFEPA, 1a. edición, enero 1997.

Li-Muller Angela and Marsh Marius, "Guidance for the Use of Risk Assessments in Site Clean-ups in Ontario", -Proposed Draft-, Ontario Ministry of the Environment and Energy (OMEE), May 1994.

Marsh, M., Lall R., Capstick S., et al "Guidance on Sampling and Analytical Methods for Site Clean-ups in Ontario", Ontario Ministry of the Environment and Energy, May 1994.

Ministry of Environment and Energy (MOEE), "Guideline for Use at Contaminated Sites in Ontario, ISBN 0-7778-4052-9, Ontario, 1995.

Nelson Norton, Baker Scott, et al capítulo 9 publicado en "Toxic chemicals, health and environment" editado por Lave, L.B. y Upton, A.C. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1987.

Ontario Ministry of Environment and Energy (OMEE), "Rationale for the Development and Application of Generic Soil, Groundwater and Sediment Criteria for Clean-up of Contaminated Sites -Draft-, May 1994.

SEMARNAP/INE, "Programa para la minimización y manejo integral de residuos industriales peligrosos en México 1996-2000", Septiembre, 1996.

SEMARNAP/INE, "Propuesta Ejecutiva Nacional Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC)", Septiembre, 1996

Sims Ronald, C. "Soil Remediation Techniques at Uncontrolled Hazardous Waste Sites", J. Air Waste Management Association, Vol. 40, No.5, pp. 704-732, May 1990.

Stephanatos, Basilis N., Capítulo 36 de "Hydrocarbon Contaminated Soils and Groundwater Analysis, Fate, Environmental and Public Health Effects Remediation" Vol. 1, Editores Paul T. Kostecky y Edward J. Calabrese, Lewis Publishers, USA, 1991.

Suthersan, Suthan S., "Remediation Engineering Design Concepts", Lewis Publishers, 1997.

Testa Stephen M. "Geological Aspects of Hazardous Waste Management", Lewis Publishers, USA, 1994.

United Nations Environment Programme (UNEP), "Risk Management of Contaminated Industrial Land" A Training Resource Package, Preliminary Edition, October 1994.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), "A Guide to Selecting Superfund Remedial Actions", 9355.0-27 FS, April 1990.

United States Environmental Protection Agency (USEPA), "Guidance for Performing Site Inspections Under CERCLA" Interim Final, EPA/540-R-92-021, September 1992.

United States Environmental Protection Agency USEPA, "Common Cleanup Methods at Superfund Sites" EPA 540/R-94/043, August 1994.

*“Lineamientos generales para la evaluación de sitios contaminados y propuesta de acciones para su restauración”*  
Se terminó de imprimir en diciembre de 2001, en los Talleres Gráficos de México, Av. Canal del Norte N° 80, Col. Felipe Pescador, México, D.F. La edición en papel bond de 90 grs. en interiores y portada en cartulina sulfatada de 14 puntos, consta de 300 ejemplares más sobrante para reposición.



**Coordinación General de Protección Civil**  
**Centro Nacional de Prevención de Desastres**  
Av. Delfín Madrigal No.665,  
Col. Pedregal de Sto. Domingo,  
Deleg. Coyoacán,  
México D.F., C.P. 04360  
[www.cenapred.unam.mx](http://www.cenapred.unam.mx)