



Apuntes de Suelos contaminados

Luis Antonio García Villanueva

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería

Apuntes de
**Suelos
contaminados**

Luis Antonio García Villanueva
Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

División de Ingenierías Civil y Geomática

Para una correcta visualización
del libro te sugerimos

Acrobat Reader
Haz Click

APUNTES DE SUELOS CONTAMINADOS
García Villanueva, Luis Antonio
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
2022, 145 págs.

APUNTES DE SUELOS CONTAMINADOS

Primera edición provisional electrónica
de un ejemplar (5 MB) en formato PDF
Publicado en línea: noviembre de 2022

D.R. © 2022, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Avenida Universidad 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de
México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán,
Ciudad de México, C.P. 04510

FACULTAD DE INGENIERÍA
<http://www.ingenieria.unam.mx/>

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad
Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción o
transmisión total o parcial por cualquier medio sin la autorización
escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Hecho en México.

UNIDAD DE APOYO EDITORIAL
Cuidado de la edición: Amelia Guadalupe Fiel Rivera
Formación editorial : Nismet Díaz Ferro
Foto de portada: ArtPhoto_studio en Freepik

Introducción

La industrialización ha sido un punto de referencia para desarrollar bienes y servicios en el mundo. Sin embargo, no todo ha sido benéfico, ya que por malas prácticas se han generado materiales y residuos peligrosos, los cuales han ocasionado lamentablemente diversos accidentes, como derrames, fugas, incendios, explosiones.

Dichos accidentes repercuten de manera directa en la contaminación del suelo, que se puede presentar como una emergencia ambiental o un pasivo ambiental, dependiendo principalmente de las causas y del tiempo transcurrido.

Cada suelo contaminado representa un caso particular, debido a sus características propias, las condiciones climáticas, tipo de contaminante y las causas que originaron la contaminación. Por lo tanto, los suelos contaminados deben ser evaluados para determinar la técnica adecuada para su rehabilitación y dar un uso responsable.

Existen técnicas de rehabilitación que brindan diferentes eficiencias, las cuales se dividen en físicas, químicas, biológicas, térmicas y combinación de ellas. Todas con el objetivo de reducir las concentraciones de contaminantes presentes en la matriz ambiental y, de esta manera, disminuir posibles riesgos o daños a la salud y al ambiente.

Por lo anterior, en estos apuntes se muestra la importancia de los suelos, su formación, las diferentes causas de contaminación y las diversas técnicas de rehabilitación de un suelo contaminado.

1

2

3

4

5

6

3

Contenido

Introducción	3
1. Antecedentes.....	6
1.1. Accidentes relacionados con suelos contaminados	8
1.2. Convenios internacionales para suelos contaminados	11
2. El suelo: un medio poroso.....	14
2.1. Formación de un suelo.....	15
2.1.1. Factores de formación.....	15
2.1.2. Origen y características de distintos tipos de suelos.....	18
2.2. Composición del suelo	19
2.3. Clasificación de los suelos por textura	22
2.3.1. Sistema de clasificación de aeropuertos.....	22
2.3.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	26
2.4. Propiedades físicas y químicas del suelo	26
3. Contaminación del suelo.....	36
3.1. Fuentes de contaminación naturales.....	38
3.1.1. Metales pesados	38
3.1.2. Radiactividad.....	39
3.1.3. Agentes biológicos	39
3.2. Actividades antropogénicas	40
3.2.1. Clasificación de actividades antropogénicas contaminantes del suelo.....	41
3.2.2. Residuos sólidos urbanos.....	44
3.2.3. Residuos industriales.....	46
3.2.4. Emisiones atmosféricas	47

3.2.5. Clasificación de residuos según su impacto al medioambiente y a la salud de las personas	48
4. Normatividad mexicana en suelos contaminados.	49
4.1. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	50
4.2. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).	52
4.3. Normas Oficiales Mexicanas.	56
5. Caracterización de suelos contaminados.	59
5.1. Metodologías para la caracterización de un suelo contaminado. . .	59
5.2. Descripción del sitio	61
5.2.1. Ubicación, descripción y uso actual del sitio.	62
5.2.2. Biodiversidad	63
5.2.3. Hidrología del sitio.	63
5.2.4. Geología del sitio.	64
5.3. Muestreo y caracterización de suelos	65
5.3.1. Número de muestreos mínimos y límites máximos permisibles .	66
5.3.2. Contaminantes orgánicos e inorgánicos	69
5.4. Área y volumen de suelo contaminado.	71
5.5. Modelación del contaminante en el suelo, subsuelo y en los acuíferos.	72
6. Tratamiento y disposición de suelos contaminados	75
6.1. Tipos de tratamientos para suelos contaminados.	75
6.2. Condiciones de tratamiento para suelos contaminados	79
6.3. Tecnologías de tratamiento fisicoquímico.	80
6.4. Tecnologías de tratamiento térmico	102
6.5. Tecnologías de tratamiento biológico.	121
Referencias bibliográficas	141

1. Antecedentes

El término *contaminación del suelo* hace referencia a la presencia de químicos o sustancias en concentraciones fuera de lo normal, las cuales tienen efectos adversos sobre este y sobre cualquier forma de vida presente.

Aunque la mayoría de las veces estos contaminantes son de origen humano, también pueden ocurrir de manera natural debido a la concentración de minerales en el suelo, los cuales pueden provenir de erupciones volcánicas e incendios forestales, entre otros.

La cantidad de contaminantes está constantemente en aumento y eso es debido al incremento industrial que se ha tenido en los últimos años. Esto representa un gran peligro porque este tipo de contaminación no puede ser percibida a simple vista. Por ello, se requieren necesariamente estudios de suelo para identificar el tipo de contaminante presente en este, lo cual tiene como gran desventaja el alto costo económico que conlleva realizar dichos estudios.

Las principales fuentes de contaminación en México se aprecian en la figura 1.1.

1

2

3

4

5

6

6

Fuentes de contaminación en México

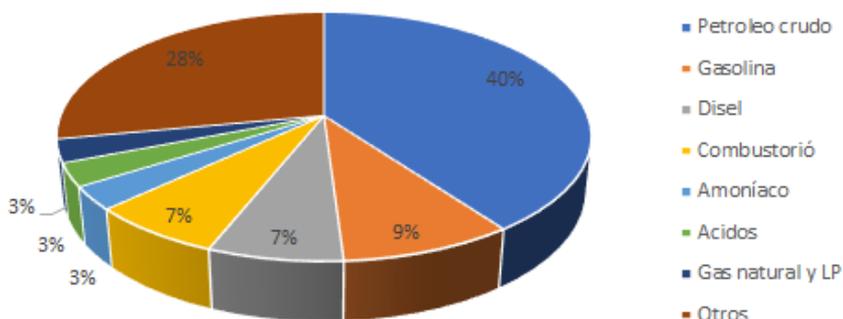


Figura 1.1 Principales sustancias involucradas en emergencias ambientales. Fuente: PROFEPA, 2002

Las sustancias más involucradas en la contaminación de suelos son las que provienen de las siguientes industrias:

1. *Industria petroquímica.* Debido al mal manejo de residuos peligrosos y abandono de materiales, sumado a las fugas en tuberías, hace que esta industria sea una de las principales generadoras de contaminantes que afectan al suelo.
2. *Industria minera.* Es una de las industrias que genera mayor riqueza económica. De acuerdo con la información de la Dirección General de Minas, la industria nacional minera se dedica principalmente a producir oro, cobre, plata, zinc, plomo, etc.; sin embargo, durante los procesos de extracción y procesamiento, origina enormes cantidades de residuos, los cuales se han estado acumulando por décadas a lo largo del territorio del país.

3. *Industria agroquímica.* Este sector productivo destaca principalmente por el uso excesivo de agroquímicos. De hecho, muchos plaguicidas utilizados en México han sido prohibidos en otros países por sus altos niveles de contaminación. Teniendo en cuenta que en grandes extensiones de cultivo se emplean estos productos por considerarlos necesarios, se ha llegado a afectar grandes extensiones de suelo.

1.1. Accidentes relacionados con suelos contaminados

A lo largo del tiempo, han ocurrido accidentes que han afectado el suelo de distintas maneras, lo cual ha perjudicado la vida de la población y las condiciones en las que queda el sitio después de haber ocurrido estos.

A continuación, se describen brevemente algunos de los accidentes más notables relacionados con suelos contaminados:

- * En 2012, ocurrió un accidente en la central nuclear de Fukushima en Japón (figura 1.2), donde cerca de un tercio de los suelos del país fueron contaminados por Cesio-137, el cual es un isótopo radiactivo que puede ser causante de cáncer en periodos de 10 a 30 años a partir de su inhalación, absorción e ingestión.



Figura 1.2 Descontaminación radiactiva de los suelos *in situ*. Fuente: NC Este University, 2012

- * En Tetepango (Hidalgo), se derramaron cientos o quizá miles de litros de combustóleo que dañaron la vegetación (figura 1.3). Este evento afectó a los campesinos de la región al provocarles la pérdida considerable de gran parte de sus cosechas.



Figura 1.3 Afectación de la zona por el combustóleo.

Fuente: *La Silla Rota*, 2020

Además de estos accidentes, en la tabla 1.1 se incluyen otros acontecimientos relacionados con la contaminación de suelos en diversas partes del mundo.

Tabla 1.1 Acontecimientos de contaminación en suelos

País	Año	Evento
Japón	2012	Un accidente nuclear contaminó cerca de un tercio de los suelos del país con Cesio-137, el cual es un isótopo que puede causar cáncer.

País	Año	Evento
México	2015	La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) atendió un derrame de ácido clorhídrico ocurrido en el municipio de San Nicolás de los Garza en Nuevo León. Este fue causado por el rompimiento de la cámara interna de la pipa que lo transportaba. Se señaló que el derrame afectó dos metros cuadrados de suelo natural.
México	2018	Una especie de lodo gris de origen minero contaminó un arroyo y cultivos agrícolas en Oaxaca. El lodo gris era una mezcla de agua de lluvia con desechos del proceso minero provenientes de la empresa de capital canadiense Compañía Minera Cuzcatlán.
Estados Unidos	2019	Una sustancia de color verde amarillento, altamente tóxica y cancerígena, fue derramada en una carretera. Se identificó que se trataba de cromo hexavalente, el cual también tiene repercusiones en el sistema respiratorio, riñones, hígado, piel y ojos de las personas.
Ecuador	2020	Comunidades indígenas de la Amazonía se vieron afectadas por un derrame de crudo en abril, que tuvo como consecuencia la destrucción de cultivos. Los resultados de las pruebas comprobaron la existencia de hidrocarburos y metales pesados, como níquel, plomo y vanadio, los cuales son sustancias tóxicas.
México	2020	Cientos de litros de combustóleo fueron derramados en Hidalgo, lo que causó enormes daños a la vegetación y afectó a los campesinos de la región que perdieron gran parte de sus cosechas.

Elaboración propia, 2021

1

2

3

4

5

6

10

1.2. Convenios internacionales para suelos contaminados

Para la década de los 70, se tenía la creencia de que el suelo poseía una capacidad de depuración infinita. En 1992, se reconoció la importancia de la protección de suelos y de los potenciales usos que se le podían dar, por lo que se adoptaron varias convenciones vinculadas en materia de cambio climático, diversidad biológica y posteriormente, desertificación.

En el mismo año, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático advirtió la importancia de los ecosistemas terrestres y planteó que los problemas de degradación del suelo podían agravar la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Posteriormente, en 1994, la Convención de las Naciones Unidas se pronunció contra la desertificación y estableció entre sus objetivos evitar y reducir la degradación del suelo.

Por otra parte, un grupo de países europeos se comprometió con la protección y conservación del suelo, entre ellos Inglaterra, que ha desarrollado una estrategia global en la que se consideran diferentes tipos de amenazas para el suelo y establece una relación de respuestas sostenibles. Asimismo, Francia, que también formó parte de este grupo, aprobó un plan nacional de gestión y protección del suelo que insiste en el control de la contaminación a futuro.

En general, en el contexto internacional, se ha tomado conciencia sobre el daño que puede causar a los suelos y a las personas el uso de ciertas sustancias, como lo son los plaguicidas, por lo cual para garantizar su correcta utilización se han establecido convenios que se presentan en la tabla 1.2. Estos son algunos de los tratados internacionales implementados para reducir el daño que estas sustancias pueden causar al suelo, por lo que

1

2

3

4

5

6

es de suma importancia actualizarlos cada cierto número de años con base en la producción de sustancias químicas o el daño causado por las grandes industrias.

Tabla 1.2 Principales tratados internacionales en el manejo de plaguicidas

Convenio	Año	Objetivo
Protocolo de Montreal	1990	Establece acciones que deben cumplir los estados para disminuir las sustancias agotadoras de la capa de ozono, convirtiendo sectores industriales que las utiliza en sus procesos productivos.
Convenio de Basilea sobre el Control de Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación	1991	Reducir el movimiento transfronterizo de residuos para tratarlos y disponerlos de una manera adecuada y cercana a su fuente de generación, así como minimizar la cantidad de residuos que se generan. Establece un procedimiento de notificación previa de todo movimiento transfronterizo de residuos.
Convenio sobre Lucha contra la Desertificación	1996	El objetivo es luchar contra la desertificación y mitigar los efectos de la sequía, por medio de la aplicación de estrategias integradas a lo largo que se centren simultáneamente en el aumento de la productividad de las tierras, la rehabilitación, conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos tierra e hídricos, con el fin de mejorar las condiciones de vida, especialmente a nivel comunitario.

1

2

3

4

5

6

Convenio	Año	Objetivo
Convenio de Rotterdam sobre el Consentimiento Fundamentado Previo Aplicable a Ciertos Plaguicidas y Productos Químicos Peligrosos Objeto de Comercio Internacional	2000	Promover la responsabilidad compartida y los esfuerzos conjuntos de las partes en la esfera del comercio intercontinental de ciertos productos químicos peligrosos, a fin de proteger la salud humana y el medio ambiente frente a posibles daños y contribuir a su actualización ambientalmente racional. Asimismo, facilitar el intercambio de información acerca de sus características para establecer un proceso racional de adopción de decisiones sobre su importación y exportación, y difundir esas decisiones a las partes. El convenio se aplica a los productos químicos prohibidos o rigurosamente restringidos y a las formulaciones plaguicidas extremadamente peligrosas.
Convenio de Estocolmo sobre Reducción y Eliminación de Contaminantes Orgánicos Persistentes	2005	Proteger la salud humana y al medio ambiente frente a los contaminantes orgánicos persistentes. Establecer medidas para reducir o eliminar las liberaciones derivadas de la producción y utilizaciones intencionales y no intencionales, y las derivadas de existencias y desechos.

Fuente: FARN, 2005, p.40

1

2

3

4

5

6

2. El suelo: un medio poroso

Los suelos dentro de la ingeniería son el material más antiguo de construcción y también el más complejo tanto en composición y variedades, así como en sus propiedades, variables en el tiempo y espacio, es por eso por lo que son difíciles de entender y medir. Hoy en día existe una excelente clasificación de suelos y sus propiedades son estudiadas y conocidas.

El término *suelo* puede tener varias definiciones e interpretaciones, las cuales varían de acuerdo con la rama de estudio y su aplicación, pero siempre compartiendo características en común.

De una manera general, se puede decir que el suelo es un “conjunto con organización definida y propiedades que varían vectorialmente”. Una de sus características es que en la dirección vertical (ordenadas) generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal (abscisas).

Desde el punto de vista de la ingeniería civil, el suelo es definido como “un agregado no cementado formado por partículas minerales y materia orgánica (producto de la descomposición o desintegración de las rocas) que junto con el líquido o el gas ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas”.

El suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves (ambas con cierta cantidad de minerales). El agua tiene un papel

muy importante, si no es que fundamental, dentro del comportamiento mecánico del suelo, porque se considera la mayoría de las veces como parte integral de este.

2.1. Formación de un suelo

Los suelos deben su origen a una gran variedad de causas que excede cualquier tipo de descripción por muy detallada que esta sea, como resultado se tiene una diversidad de tipos de suelos resultantes. La formación del suelo es un proceso que tarda mucho tiempo para que alcance las propiedades físicas y químicas necesarias para ser considerado un suelo.

2.1.1. Factores de formación

El proceso de formación del suelo está determinado por la interacción de cinco factores de formación:

1. Clima (cl)
2. Organismos (o)
3. Relieve/topografía (r)
4. Material orgánico/parental (p)
5. Tiempo (t)

Por simplicidad, el suelo se puede expresar mediante la siguiente igualdad:

$$S = f(cl, o, r, p, t)$$

La ecuación anterior queda ejemplificada en la figura 2.1.



Figura 2.1 Factores formadores de suelos.

Fuente: Sanzano, 2019

Algunos autores consideran a la actividad humana como el sexto factor de formación de suelos, aunque también otros como un factor modificador, ya que el ser humano es capaz de modificar de manera directa o indirecta las características físicas y químicas de los suelos.

Actualmente, se han concluido dos grandes tipos de generadores de ataque a la corteza terrestre, estos son la *desintegración mecánica* y la *descomposición química*.

1. *Desintegración mecánica.* Se trata de la intemperización de las rocas por agentes físicos, los cuales pueden manifestarse de la siguiente manera:
 - a) Cambios de temperatura (causando erosión en las rocas).
 - b) Efectos de diferentes tipos de organismos que adaptan el suelo como su hábitat y lo transforman para darle mayores características.

2. *Descomposición química.* Se trata de la acción de agentes que ataca las rocas, la cual modifica a su vez su composición química y mineralógica, y se pueden manifestar de la siguiente manera:
 - a) La congelación del agua (causa de agrietamiento pulverización y arrastre de rocas o sedimentos).
 - b) La formación de suelo depende directamente de las rocas que son fragmentadas, erosionadas, pulverizadas, meteorizadas o intemperadas u otras acciones que originan diferentes tamaños de grano, por lo que pueden presentarse desde grandes fragmentos de roca hasta polvo, en combinación con agua, materia orgánica y aire. Esto da como resultado la definición de suelo de manera general.
 - c) Un factor importante para la formación de suelos es el intemperismo. Este proceso consiste en el rompimiento de la roca debido a procesos físicos, químicos y mecánicos junto con la reacción de estas partículas de roca con el aire, agua y materia orgánica e inorgánica.
 - d) En la naturaleza existen numerosos agentes de transporte que pueden ser principalmente glaciares, viento, ríos o corrientes de agua superficial, mares y fuerzas de gravedad, los cuales muy a menudo se combinan entre sí.

1

2

3

4

5

6

2.1.2. Origen y características de distintos tipos de suelos

Actualmente, se han estudiado y definido dos grandes tipos de suelos con base en su formación:

1. Suelos residuales. Se forman principalmente por el producto del ataque de los agentes de intemperismo, los cuales pueden quedar directamente sobre la roca de la cual se derivan.
2. Suelos transportados. Se forman cuando estos agentes de ataque son removidos de su lugar original por los mismos agentes geológicos y redepositados en otra zona, lo cual genera suelos que yacen sobre otros estratos sin relación directa con ellos.

Los suelos residuales y transportados se distinguen por las siguientes características:

1. Suelo residual. Queda descrito por un perfil de meteorización y por un conjunto de estructuras heredadas.
2. Suelo transportado. Queda descrito por un perfil estratigráfico que resalta la secuencia de colocación y el espesor de sus estratos.

Gran parte de su formación ha ocurrido en las diferentes eras geológicas, tal como sigue sucediendo hasta el día de hoy, por lo que para el ser humano resulta ajena su composición cualquiera que sea esta.

En la tabla 2.1 se muestran los seis tipos de suelos transportados que existen.

Tabla 2.1 Tipos de suelos transportados

Tipo de suelo	Descripción
Suelos glaciales	Formados por transportación y depositación de glaciales.
Suelos aluviales	Transportados por el agua corriente y depositados en las orillas de arroyos y ríos.
Suelos lacustres	Formados por la depositación en lagos tranquilos.
Suelos marinos	Formados por la depositación en mares (fondo marino).
Suelos eólicos	Transportados y depositados por el viento (desiertos).
Suelos de pie de monte	Formados por el movimiento del suelo de su lugar de origen por la gravedad (deslizamiento de tierra).

Fuente: Legorreta, 2016

2.2. Composición del suelo

Los suelos están compuestos por tres fases: *sólida*, *líquida* y *gaseosa*. Además, otro porcentaje muy pequeño es una mezcla entre materia orgánica, minerales y organismos vivos.

1. *Fase sólida*. Representa el esqueleto del suelo y son aquellas partículas o fragmentos de roca que se encuentran en este. Esta fase está compuesta en un 95% de materia inorgánica y entre 1 y 5% de materia orgánica. La materia inorgánica puede dividirse de acuerdo con el tamaño de las partículas de arena, limo y arcilla.

2. *Fase gaseosa*. Representa el aire, gases atrapados o generados por la materia orgánica o reacciones químicas de estos (poros no ocupados por el agua).
3. *Fase líquida*. Representa el agua libre que rellena los poros o espacios entre las rocas, su contenido puede ser variable de acuerdo con las condiciones del suelo.

Factores o cálculos que se pueden obtener de las diferentes fases de la composición del suelo son los siguientes:

- a) Para las fases líquidas y gaseosas, se pueden obtener las relaciones de vacíos. Estos datos nos pueden ayudar a saber si un suelo está parcialmente saturado, saturado o seco.
- b) Para la fase sólida, se puede obtener el *volumen de sólidos*, que indicará el peso aproximado del suelo sin contar el agua o el aire (para fines matemáticos se toma como cero).
- c) La *porosidad del suelo* se expresa por el porcentaje de vacíos presentes en el suelo en relación con el volumen total.

La porosidad depende de la textura, estructura y actividad biológica del suelo, cuanto más gruesos sean los elementos de textura, mayores serán los espacios entre ellos, a menos que se coloquen las partículas más finas en estos espacios.

Lo más común es que los suelos con elementos de grano grueso también tengan poros gruesos. Los suelos fértiles y arcillosos son numerosos, pero tienen poros muy pequeños. El valor de porosidad se usa a menudo para dar el concepto de estructura del suelo; además, el agente que destruye la estructura puede reducir la porosidad, como es la compactación. El tercer factor que es fácil de formar poros es la *actividad biológica del suelo*, especialmente la *actividad biológica de la microfauna*, en suelos con

fuerte actividad biológica. A menudo se observan, junto a las huellas de los insectos, un gran número de pequeños tubos provocados por el trabajo de diminutos insectos. Cuando dominan este tipo de poros, se dice que el suelo tiene poros tubulares.

En la tabla 2.2, se muestra la clasificación de las diferentes funciones y tamaños de los poros del suelo.

Tabla 2.2 Funciones y tamaños de los poros del suelo

Diámetro de poros (mm)	Descripción de los poros	Funciones de los poros
<0.0002	Residual	Retienen agua que las plantas no pueden usar.
0.0002 a 0.05	Almacenamiento	Retienen agua que las plantas pueden utilizar.
>0.05	Transmisión	Permiten que el agua drene y que entre el aire.
0.01 a 0.3	Enraizamiento	Permiten que las raíces de las plantas penetren libremente.
0.5 a 3.5	Canal de lombrices	Permiten que el agua drene y que entre el aire.
2 a 5	Nidos de hormigas y canales	Permiten que el agua drene y que entre el aire.

Fuente: Ibáñez, 2007

2.3. Clasificación de los suelos por textura

Dentro de la clasificación de suelos por su textura, se encuentran cuatro tipos:

1. *Grava*. Los fragmentos de la grava miden entre 2 y 64 milímetros de diámetro y su composición química es variada. Está constituida principalmente por rocas ricas en cuarzo y cuarcita. También por clastos de caliza, basalto, granito y dolomita. Generalmente, se encuentra en los bancos artificiales de sedimentación y en los lechos de los ríos. Tienen formas redondeadas y superficies lisas.
2. *Arena*. Son partículas que tienen un tamaño de grano mayor de los tres, su diámetro va de los 0.05 a 2 mm, su textura es rasposa y se le conoce como suelo friccionante. Es un suelo excelente por su facilidad de trabajo, pero carece de nutrientes para ayudar a la vida de organismos vivos.
3. *Limo*. Los suelos tienen una retención de agua muy buena, así como su alta cantidad de nutrientes. Se componen de la mezcla de arcillas y arenas finas, y su característica principal es su facilidad de formar terrones fáciles de manejar secos.
4. *Arcilla*. Son partículas muy finas y pesadas en presencia de agua (saturada), secas son difíciles de manejar. Características importantes son que no se drenan fácilmente y que tienen una gran cantidad de nutrientes en ellas gracias a su alta retención de agua.

2.3.1. Sistema de clasificación de aeropuertos

Este sistema de clasificación fue propuesto originalmente en 1942 y adoptado por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, quienes lo aplicaron principalmente a la construcción de aeropistas.

1

2

3

4

5

6

El sistema divide los suelos en dos grandes fracciones:

- a) Gruesa. Formada por partículas mayores que la malla N.200 (0.074 mm) y menores que la malla de 3" (7.62 cm).
- b) Fina. Formada por las partículas que pasan la malla N.200 (0.074 mm).

A su vez estas fracciones se subdividen:

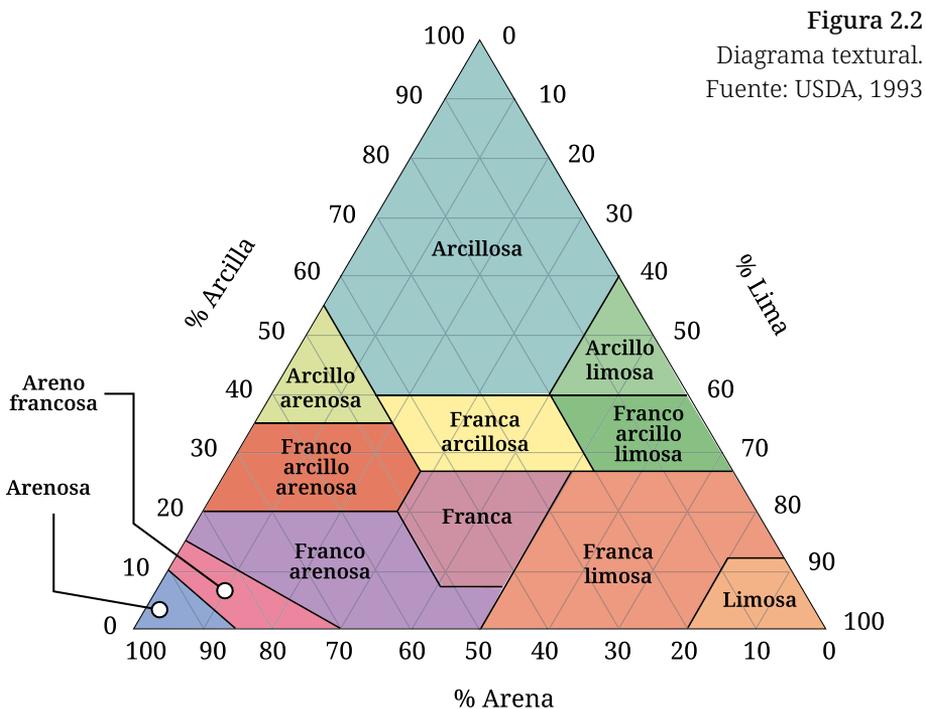
- *Gruesa*. Gravas y arenas que tienen como frontera la malla N.4 (4.76 mm).
- *Fina*. Se subdivide en grupos considerando su naturaleza y contenido, además de la plasticidad que está muy relacionada con sus propiedades mecánicas e hidráulicas:
 - » Gravas y arenas. Son partículas de tamaños comprendidos entre 0.074 mm y 76.2 mm que forman suelos o que pueden estar contenidas en suelos con partículas de tamaños menores (gravas, arenas).
 - » Limos y arcillas. Son partículas cuyo tamaño no se distingue y son menores que 0.074 mm que forman suelos o pueden estar contenidas en suelos con partículas de tamaños mayores.
 - » Fragmentos de roca. Partículas de tamaños mayores que 76.2 mm que no forman suelos, pero pueden estar contenidos en suelos de tamaños menores.

Diagrama textural o triángulo de texturas

El diagrama textural es una herramienta aplicada por la USDA (*United States Department of Agriculture*) sirve para obtener las clases texturales de un determinado suelo en función de los porcentajes de arena, limo y arcilla.

El diagrama textural es un triángulo equilátero, en el que cada arista de este se sitúa cada una de las fracciones cuyo valor cero corresponde al 100 de la anterior (vértice) y su 100 con el cero de la siguiente (vértice) de acuerdo con el movimiento de las manecillas del reloj.

Las relaciones entre los nombres de las clases texturales y la distribución del tamaño de las partículas se muestran en el diagrama, los porcentajes de arena, limo y arcilla se encuentran señalados sobre los tres ejes o aristas del triángulo (véase figura 2.2).



Interpretación

Cada muestra de suelo viene definida por un punto del interior del triángulo (véase figura 2.2). Este punto se obtiene al hacer intersectar dos valores de porcentaje de la fracción de partículas. La intersección de

dichos puntos se obtiene al trazar una recta desde una fracción textural a la otra fracción en función de los porcentajes.

La distribución del tamaño de una partícula fina del suelo está representada por un solo punto dentro del diagrama. Cada punto ocupa una de las doce clases texturales. Las clases texturales y sus rangos de variación (tabla 2.3) están representados en el triángulo textural (véase figura 2.2). La nomenclatura utilizada para nombrar las clases texturales ha sido establecida también por el USDA. Para determinar la clase que le corresponde a un suelo dado, se ubican los porcentajes de arena, limo y arcilla en el respectivo eje del triángulo, se proyecta en él dicho valor, siguiendo la dirección indicada por la flecha, hasta que las tres líneas se intercepten determinando un punto.

Tabla 2.3 Clases texturales de acuerdo con el porcentaje de arena, limo y arcilla

Clase textural	Rango (%)		
	Arena	Limo	Arcilla
Arenosa	100 a 85	15 a 0	10
Franco arenosa	85 a 43	50 a 0	20 a 0
Franca	52 a 23	50 a 32	27 a 7
Franca limosa	50 a 0	87 a 50	27 a 7
Limosa	20 a 0	100 a 80	12 a 0
Franca arcillosa	45 a 20	53 a 15	40 a 27
Arcillo Arenosa	67 a 45	20 a 0	55 a 35
Arcillo Limosa	20 a 0	60 a 40	60 a 40
Arcillosa	45 a 0	40 a 0	100 a 40

Fuente: Ramírez, 1997

2.3.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Está basado en el propuesto por el Sistema de Clasificación de Aeropuertos, pero con ligeras modificaciones.

Consideraciones:

- * El sistema cubre los suelos gruesos y los suelos finos distinguiendo a ambos por la malla N. 200, donde las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas menores.
- * Un suelo se considera grueso cuando más del 50% de sus partículas en peso son gruesas, y fino si más del 50% de sus partículas en peso son finas.

2.4. Propiedades físicas y químicas del suelo

El suelo es considerado un recurso natural no renovable por el tiempo que tarda en formar se, así como también por las propiedades tanto físicas como químicas que influyen en su productividad y buen manejo.

Las *propiedades físicas* son aquellas que no se derivan de otras y se encuentran presentes en el grupo de características que a continuación se explican.

Estructura

Es la forma en cómo se agregan las partículas del suelo. Es la responsable de las relaciones de aireación, infiltración, humedad y temperatura del suelo. Se caracteriza por la estabilidad estructural, es decir; la resistencia que los agregados del suelo hacen para no ser destruidos (tabla 2.4).

Tabla 2.4 Interpretación de la estabilidad estructural en relación con el diámetro ponderado medio

Diámetro ponderado medio DPM (mm)	Interpretación
>5.0	Muy estable
3.0 a 5.0	Estable
0.5 a 1.5	Ligeramente estable
< 0.5	Inestable

Fuente: Ramírez, 1997

Textura

Es la distribución de las partículas del suelo expresada en porcentaje. Estas partículas son:

Arena (2.0 – 0.02 mm)

Limo (0.02 – 0.002 mm)

Arcilla (0.002 mm)

Esta característica influye sobre la velocidad de infiltración del agua la facilidad de preparación o laboreo del suelo el drenaje (véase la tabla 2.5).

Tabla 2.5 Valores generalizados para la retención de humedad, según la clase de textura para diferentes suelos

Clase textura	Retención de humedad (%)	
	0.3 bar	15 bar
Arcillosa	25 a 75	15 a 45
Franco- arcillosa	20 a 50	12 a 35
Franca	18 a 40	10 a 35

Clase textura	Retención de humedad (%)	
	0.3 bar	15 bar
Franco-arenosa	12 a 32	5 a 18
Arenosa	5 a 15	12 a 10

Fuente: Ramírez, 1997

Color

Esta es una de las características que guarda relación directa con la temperatura, la dinámica de los elementos y la movilidad del agua en el suelo, el contenido de materia orgánica, la cantidad de organismos, la evolución de los suelos, etc. A simple vista se pueden deducir diferentes procesos y fenómenos que han ocurrido en el suelo a través del tiempo y en épocas actuales.

La meteorización del material de partida por el agua determina, en gran medida, la composición química del suelo que por último se ha producido (tabla 2.6). Las sustancias químicas que se eliminan con más rapidez son los cloruros y los sulfatos, a los que siguen el calcio, el sodio, el magnesio y el potasio.

Tabla 2.6 Interpretación de la humedad equivalente

Contenido de humedad (%)	Interpretación
>35	Muy alta
25 a 35	Alta
15 a 25	Media
5 a 15	Baja
<5	Muy baja

Fuente: Ramírez, 1997

Densidad real

Es la relación entre el volumen de las partículas de suelo y el volumen de estas sin considerar el espacio poroso.

El estado de porosidad del suelo se puede conocer mediante la siguiente ecuación:

$$PT = \frac{(DR - DA)}{DR} \times 100$$

Donde:

PT= Porosidad total (%)

DR= Densidad real

DA= Densidad aparente

Densidad aparente

Es la relación existente entre la masa y el volumen de suelo, en este volumen está considerado todo el espacio poroso existente. Es una característica que da a conocer las condiciones en las cuales se encuentra el suelo con respecto a la compactación, la porosidad, la disponibilidad de agua y de oxígeno como se muestra en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Densidad entre la densidad aparente y la porosidad total

Densidad aparente (G/CC)	Porosidad total (%)
>1.8	<31.0
1.6 a 1.8	32 a 39
1.4 a 1.6	40 a 46

Densidad aparente (G/CC)	Porosidad total (%)
1.2 a 1.4	47 a 54
1.0 a 1.2	55 a 62
<1.0	>63.0

Fuente: Ramírez, 1997

1

Permeabilidad o conductividad hidráulica

La *permeabilidad de un suelo* se puede definir como la combinación del tamaño y el grado en que los poros están intercomunicados, esta combinación controlará la facilidad con que el agua fluirá a través del suelo.

Los tipos de suelos que permiten pasar fácilmente el agua a través de ellos se les llama permeables y análogamente aquellos que permiten pasar el agua con dificultad o que no permiten el paso del agua se denominan impermeables.

El coeficiente de permeabilidad tiene las mismas unidades que la velocidad, es decir una relación de un cambio de posición con respecto del tiempo.

El término de *coeficiente de permeabilidad* es mucho más usado por los ingenieros geotecnistas, mientras que los ingenieros geólogos expresan el mismo concepto como conductividad hidráulica. El valor del coeficiente de permeabilidad varía en un amplio rango dependiendo del tipo de suelo que se esté estudiando (véase tabla 2.8).

2

3

4

5

6

Tabla 2.8 Interpretación del coeficiente de conductividad hidráulica en suelos

Conductividad hidráulica		Interpretación
cm/hora	m/día	
> 18	> 4.30	Muy lenta
12.0 a 18.0	2.90 a 4.30	Lenta
5.0 a 12.0	1.20 a 12.90	Moderadamente lenta
1.6 a 5.0	0.38 a 1.20	Moderada
0.5 a 1.6	0.12 a 0.38	Moderadamente rápida
0.1 a 0.5	0.03 a 0.12	Rápida
< 0.1	< 0.03	Muy rápida

Fuente: Ramírez, 1997

Coefficiente de absorción

Este coeficiente determina la superficie de un predio que deberá quedar libre de techo, pavimento, sótano o de cualquier material impermeable y que únicamente sea destinada para jardín, área verde o arborización, con el fin de cumplir con la absorción del suelo. Dicho coeficiente, se obtiene de dividir la superficie de área verde entre la superficie total del lote o predio. Cuando menos el 50% de este lineamiento deberá ubicarse preferentemente al frente del predio, en uno de sus costados.

pH

Las propiedades químicas se derivan fundamentalmente a partir del pH, el cual es considerado como una de las propiedades más importan-

tes de los suelos, ya que de esta depende la materia orgánica la concentración de iones tóxicos y la fertilidad del suelo.

El pH del suelo proporciona información extremadamente relevante en varios campos de la ciencia del suelo. Una de las razones es que las plantas solo pueden absorber minerales disueltos en agua y los cambios en el pH cambiarán la solubilidad de los minerales.

El pH es una medida de la concentración de hidrógeno expresada en forma logarítmica.

El valor de pH disminuye a medida que aumenta la concentración de iones de hidrógeno, variando de 0 a 14 (véase figura 2.2).

Los valores por debajo de 7.0 son ácidos, los valores entre 6.0 y 7.0 son neutros, y los valores mayores a 7.5 son básicos (alcalinos). Cada vez que el valor del pH cambia en una unidad, su acidez o alcalinidad cambiará 10 veces (debido a la escala logarítmica).

- * Suelos con pH ácidos. Este tipo de suelos están asociados con un número de toxicidades (aluminio, hierro y manganeso) y deficiencias (molibdeno) gran parte de los suelos ácidos pertenecen a acrisoles, alisoles, podzoles y subgrupos dístricos de otros suelos. Un caso extremo de un suelo ácido es un suelo con ácido sulfato (fluvisoles tíonicos y cambisoles tíonicos).
- * Suelos con pH básico. Este tipo de suelos generalmente tienen un alto contenido de calcio y magnesio, que se encuentran principalmente en todas las plantas y sus hojas, debido a que el magnesio es el componente central de la clorofila y es imprescindible para la síntesis de transporte y almacenamiento de importantes compuestos vegetales.

1

2

3

4

5

6

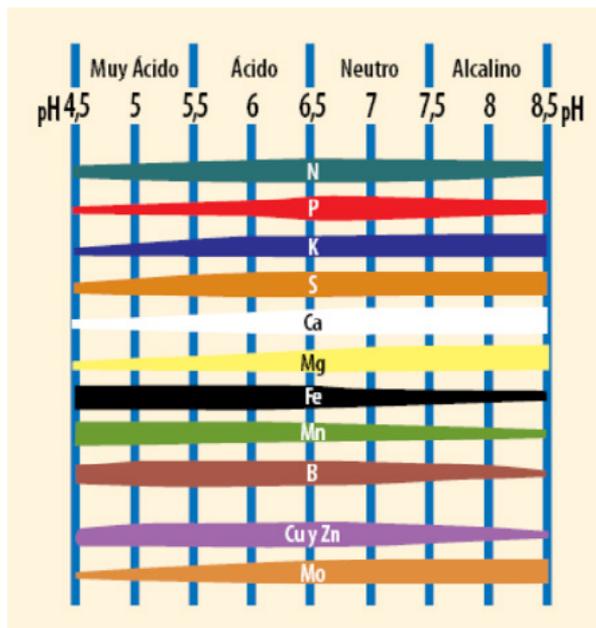


Figura 2.2 Disponibilidad de los nutrientes en función del pH del suelo
Fuente: Truog, 1951

Nitrógeno

El nitrógeno depende de la mineralización de la materia orgánica por parte de los microorganismos, la mineralización es una transformación (biológica) de compuestos orgánicos a inorgánicos, algunos ejemplos son NH_4 , NO_2 , NO_3 .

Fósforo

El fósforo presenta una mayor disponibilidad con pH entre 6.5 y 7.5, siendo en ese rango donde se presenta la mayor mineralización de compuestos de fósforo orgánico y mineral.

Materia orgánica

La materia orgánica constituye la capa primera del suelo, compuesta por restos en descomposición de seres vivos, como plantas, animales y residuos que brindan diversos nutrientes a los organismos productores, como la vegetación. Los suelos más fértiles son aquellos con mayor presencia de materia orgánica también tiene influencia sobre otras propiedades del suelo (principalmente químicas).

Carbón orgánico

El carbono orgánico del suelo es el carbono que permanece en el suelo después de la descomposición parcial de cualquier material producido por organismos vivos. La materia orgánica del suelo contribuye a funciones clave, ya que es fundamental para la estabilización de la estructura del suelo, la retención y liberación de nutrientes vegetales, y permite la infiltración y almacenamiento de agua, es esencial para garantizar la salud del suelo, la fertilidad y la producción de alimentos.

Porcentaje (%) de saturación de bases

Un incremento en el pH con valores cercanos a 7 da como resultado una mayor solubilidad para los diferentes elementos, lo cual provoca mayor porcentaje de saturación de bases.

1

2

3

4

5

6

Capacidad de intercambio catiónico

Este intercambio es debido en su totalidad por la fracción de arcilla y materia orgánica, esta se define como el número de cargas negativas del suelo. Se expresa en meq/100 g de suelo; aumentos del pH traen como consecuencia un incremento en las cargas negativas libres (véase tabla 2.9) y que pueden ser posiciones intercambiables entre los cationes presentes en la solución del suelo.

Tabla 2.9 Capacidad de intercambio catiónico y su interpretación

Capacidad Intercambio Catiónico (meq/100g)	Interpretación
> 30	Muy altos
20 a 30	Altos
10 a 20	Medios
<10	Bajos

Fuente: Ramírez, 1997

3. Contaminación del suelo

La *contaminación del suelo* surge a partir de la alta concentración de contaminantes en la superficie, ocasionada por malas prácticas que derivan en el daño a la biodiversidad del suelo y que, además, pueden poner en riesgo la salud humana, como el consumo de alimentos, principalmente frutas y verduras, que provienen del cultivo en suelos contaminados.

Los suelos contaminados tienen diversas consecuencias negativas y pueden representar peligros potenciales que llegan a manifestarse en periodos indefinidos, tardando inclusive décadas, lo cual genera pasivos ambientales, que en algunos casos pueden ser de grandes extensiones.

Generalmente, este tipo de contaminación surge por medio de actividades, como la ganadería y la agricultura intensiva, que se valen del uso de distintos fármacos, plaguicidas y fertilizantes que terminan por contaminar los campos; de igual forma, esto puede ser ocasionado por metales pesados y otras sustancias químicas.

Como se mencionó anteriormente, la contaminación puede resultar tanto de actividades planeadas como involuntarias, por lo que se pueden identificar dos tipos de contaminación del suelo: puntual y difusa.

Contaminación puntual

Es aquella causada por uno o más eventos en específico, todo esto dentro de un área determinada en la que los contaminantes son liberados

1

2

3

4

5

6

al suelo y donde podemos identificar con facilidad la fuente de origen. Los ejemplos más puntuales de este tipo son las actividades antropogénicas, que son aquellas actividades relacionadas con el hombre, en las que se puede mencionar la eliminación inadecuada de desechos, derrames, aplicación excesiva de agroquímicos entre otros.

Contaminación difusa

A diferencia de la contaminación puntual, este tipo se presenta en áreas muy extensas, se acumula en el suelo, además de no tener una fuente única de origen lo que ocasiona una dificultad para identificarla. Algunos ejemplos que se pueden dar son las actividades relacionadas con la electricidad y armas nucleares, efluentes contaminados liberados en cuencas, eliminación sin control de desechos entre otros.

Anteriormente se dieron a conocer algunos de los agentes que contribuyen a la contaminación del suelo, sin embargo, no son los únicos, ya que existen otros:

- * Mala gestión de los residuos urbanos e industriales.
- * Prácticas erróneas en instalaciones industriales: fugas, derrames, almacenamiento incorrecto.
- * Accidentes en transporte, almacenamiento y manejo de materiales químicos.
- * Tratamiento incorrecto de las aguas residuales domésticas e industriales
- * Deposición (transformación de un gas en sólido) de contaminantes atmosféricos.

1

2

3

4

5

6

3.1. Fuentes de contaminación naturales

3.1.1. Metales pesados

Una fuente importante de contaminación natural puede surgir por medio de los *metales pesados*, como puede ser el caso del arsénico (As). La contaminación por arsénico representa uno de los principales problemas ambientales que se enfrenta a nivel mundial.

Entre las fuentes contaminantes de origen natural por As, se encuentran las erupciones volcánicas, la meteorización de minerales que contienen As y yacimientos minerales; también zonas mineralizadas naturalmente de arsenopirita formadas por la meteorización de rocas con contenidos de sulfuros. De forma general, estas son las fuentes contaminantes debido a este metal.

El contenido de metales pesados en suelos debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos que dan origen al suelo, pero la actividad humana ha incrementado el contenido de estos metales en procesos industriales. Algunos de los metales de tóxicos de interés se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Metales tóxicos de interés

Metales muy tóxicos y fácilmente			Metales y no metales con concentraciones superiores a lo normal por causas antrópicas		
As	Pd	Zn	Tl	Ag	Pb
Co	Ag	Sn	Pb	As	Sb
Bi	Cd	Se	Te	Cu	Sn
Ni	Pt	Cu	Hg	Hg	Zn

Fuente: Seoáñez, 1999b

3.1.2. Radiactividad

Otra fuente contaminante para el suelo de origen natural son los *gases radiactivos*, por ejemplo, el radón (Rn), el cual puede estar presente en grandes concentraciones tanto en algunos tipos de rocas como en cierta clase de suelos; sin embargo, gracias a la estructura del suelo, así como su porosidad, este elemento presenta dificultades para ser difundido desde las capas más profundas hacia la superficie.

La *radiactividad natural* está presente comúnmente en rocas ígneas ácidas. Esto se debe de manera principal por los altos contenidos de feldespatos que presentan algunas de estas rocas; por otro lado, se tiene entendido que en suelos con altos contenidos de carbonatos las emisiones de radón son mayores que en cualquier otro tipo de rocas o suelos.

3.1.3 Agentes biológicos

Otra forma de contaminación de la cual existe muy poca información disponible es la contaminación por agentes biológicos. Este tipo de contaminación es aquella producida por los diferentes microorganismos o agentes contaminantes biológicos patógenos encargados de descomponer la materia, la calidad del aire, agua y suelo.

Los *agentes biológicos contaminantes* son organismos con un determinado ciclo de vida que, al ingresar en el cuerpo humano, terminan por causar una serie de efectos negativos en la salud. Tanto el nivel de gravedad como el tipo de efecto causado en la salud de las personas depende principalmente de dos factores: el sistema inmunológico al que se enfrenta y el tipo de microorganismo que está ingresando.

En el caso particular de los contaminantes biológicos, surge una variación bastante considerable, ya que estos a diferencia de los contaminantes físicos y químicos son seres vivos; es decir, que los agentes biológicos poseen la capacidad de reproducirse, además de que una vez que estos penetran al interior del cuerpo causan enfermedades de tipo infecciosa o parasitaria. Por lo tanto, al estar tratando con seres vivos, se puede observar que dentro de una misma especie bacteriana existan distintas cepas con diferente patogenicidad y su presencia puede depender de diferentes factores como la temperatura y la humedad.

De forma general, la contaminación biológica se presenta cuando los organismos descomponen elementos de gran importancia para el medio donde se encuentran, es decir, suelo, agua y aire. Esta descomposición tiene como principal foco de ataque a los seres vivos, lo cual supone altos riesgos de salud que podrían derivar en la muerte. Los organismos causantes de la contaminación biológica son los parásitos, bacterias, virus y hongos. Aunque existen algunos insectos que también pueden llegar a generar problemas, debido a que estos pueden convertirse en transmisores de agentes biológicos contaminantes.

3.2. Actividades antropogénicas

Las *actividades antropogénicas* son aquellos efectos, procesos o materiales que son el resultado de actividades humanas.

Las *principales fuentes antropogénicas de contaminación del suelo* son los químicos usados o producidos como derivados de actividades industriales, desechos domésticos y municipales, en los que se incluyen aguas residuales, agroquímicos (plaguicidas y fertilizantes), así como productos derivados del petróleo (figura 3.1). Estas sustancias químicas son libe-

radas al medio ambiente de forma involuntaria, por ejemplo, derrames de petróleo, irrigación con aguas residuales no tratadas y el uso de fertilizantes y plaguicidas.

3.2.1. Clasificación de actividades antropogénicas contaminantes del suelo

Existen diversas actividades antropogénicas causantes de la contaminación del suelo. A continuación, se presenta la clasificación de dichas actividades.

Industria

Los materiales de origen químico utilizados en actividades industriales son muy amplios, lo que ocasiona un gran impacto en el medio ambiente. Este tipo de actividades liberan contaminantes a la atmósfera, el agua y el suelo. Los contaminantes gaseosos que son liberados a la atmósfera pueden ingresar directamente al suelo a través de la lluvia ácida o deposición atmosférica.

El agua y otros fluidos usados para enfriamiento en las plantas de energía térmica y muchos otros procesos industriales pueden ser descargados en ríos, lagos y océanos, ocasionando contaminación térmica y arrastrando metales pesados que afectan a la vida acuática y a otros cuerpos de agua.

1

2

3

4

5

6

Minería

Gran parte de los desechos tanto sólidos como líquidos que se desprenden de diversas actividades humanas tienen como lugar de almacenamiento el suelo. Un ejemplo claro de esto son los desechos no deseables de origen geológico, tal es el caso de las aguas ácidas con metales pesados que provienen de mineralizaciones sulfuradas aflorantes.

La minería en su conjunto tiende a producir una gran cantidad de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos que, como ya se mencionó, terminan almacenados en el suelo. Esto puede suceder de distintas formas: por depósito a partir de la atmósfera como partículas sedimentarias o traídas como consecuencia del arrastre por parte de las lluvias, por vertido directo de los residuos líquidos ocasionados por la actividad minera y metalúrgica, también a causa de la disposición de elementos mineros sobre el suelo (escombreras, talleres de minas u otras edificaciones contaminantes dependiendo el caso), o simplemente por la infiltración de productos lixiviados derivados del entorno minero (aguas provenientes de minas a cielo abierto).

Desechos y aguas residuales

Uno de los principales motivos por el cual se presenta este tipo de actividad es el aumento de la población global, ya que conforme esta se incrementa, también es mayor la generación de desechos.

La eliminación de desechos municipales en tiraderos y la incineración, son las dos formas más comunes de manejar los desechos. En ambos casos, muchos de los contaminantes, como metales pesados, compuestos farmacéuticos y productos para el cuidado personal, se acumulan en el

1

2

3

4

5

6

suelo procedentes directamente de los lixiviados de los vertederos que pueden estar contaminando el suelo y las aguas subterráneas o de la lluvia de cenizas de las plantas de incineración.

Otra actividad causante de la contaminación del suelo es el uso de aguas residuales. Este empleo indebido de aguas residuales puede llevar a la deposición de metales pesados, sales, patógenos, si estos no son totalmente eliminados durante el tratamiento o en casos en los que las aguas residuales quedan sin tratamiento.

Agricultura y ganadería

Dentro de las diferentes fuentes agrícolas contaminantes del suelo se incluyen productos agroquímicos, como pueden ser los fertilizantes, plaguicidas. Los metales incluidos en estos productos agroquímicos también se consideran contaminantes del suelo, ya que alteran el metabolismo de las plantas y disminuyen la productividad de los cultivos.

Las fuentes de agua utilizadas para riego también pueden ser causa de contaminación del suelo y el daño varía dependiendo el tipo de aguas residuales usadas, pueden ser agrícolas, industriales o urbanas. Por otra parte, el exceso de nutrientes como el nitrógeno (N) y el fósforo (P), así como metales pesados no solo son una fuente de contaminación del suelo, sino que, además, suponen una amenaza para la seguridad alimentaria, la calidad del agua y la salud humana cuando hacen presencia en la cadena alimentaria.

1

2

3

4

5

6

3.2.2. Residuos sólidos urbanos

Los *residuos sólidos urbanos* (RSU) son todos aquellos generados en casas habitación que resultan como desecho o desperdicio de productos usados, ya sea para consumo humano o para la limpieza del hogar; un ejemplo de estos son los envases o empaques en donde están contenidos muchos de los productos consumidos en casa. En esta definición también pueden entrar los residuos provenientes de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública, siempre y cuando estos residuos tengan características similares a los generados en domicilios particulares, y la ley de residuos no los considere dentro de otra clasificación.

La *clasificación de los residuos urbanos y el tipo de residuo* que entran en dicha segregación se enlistan a continuación:

- * *Vidrio*: envases de cristal, frascos, botellas, etc.
- * *Papel y cartón*: periódicos, revistas, embalajes de cartón, envases de papel, cartón, etc.
- * *Restos orgánicos*: restos de comida, de jardinería, etc. En peso son la fracción mayoritaria en el conjunto de los residuos urbanos.
- * *Plásticos*: en forma de envases y elementos de otra naturaleza.
- * *Textiles*: ropa, vestidos y elementos decorativos del hogar.
- * *Metales*: latas, restos de herramientas, utensilios de cocina, mobiliario, etc.
- * *Madera*: en forma de muebles mayoritariamente.
- * *Escombros*: procedentes de pequeñas obras o reparaciones domésticas.

El suelo puede sufrir graves afectaciones debido a que en ciertas partes suelen acumularse grandes cantidades de RSU al aire libre. Dicha acción

hace que estos cúmulos de residuos permanezcan en el mismo lugar durante mucho tiempo.

Una parte considerable de los residuos sólidos urbanos está compuesta por *desechos orgánicos* (residuos de alimentos como cáscaras de fruta, pedazos de tortilla e incluso, en algunos casos, restos de carne) que terminan por fermentarse, lo cual produce mal olor y gases tóxicos, y que al filtrarse a través del suelo, en especial cuando este es permeable (deja pasar los líquidos), contaminan con hongos, bacterias y otros microorganismos patógenos (productores de enfermedades).

Como consecuencia de dicha infiltración, la contaminación no queda únicamente en ese suelo, sino también son afectadas las aguas superficiales y subterráneas que están en contacto con él, lo cual interrumpe los ciclos biogeoquímicos.

A continuación, se mencionan algunos de los *principales contaminantes del suelo que se desprenden de los RSU*, como son:

- * Basura no biodegradable arrojada al suelo o al agua.
- * Lixiviados, es decir, sustancias tóxicas procedentes de la basura descompuesta y filtradas al suelo mediante el agua de la lluvia.

Dentro de las principales consecuencias que se pueden encontrar, derivadas del mal manejo de residuos sólidos urbanos, están las siguientes:

- * Muerte de la flora y la fauna de la región del suelo contaminado
- * Alteración de los ciclos biogeoquímicos
- * Contaminación de mantos freáticos
- * Interrupción de procesos biológicos

1

2

3

4

5

6

3.2.3. Residuos industriales

La contribución de cada sector industrial a la contaminación es muy variable. La industria química es la principal fuente de contaminantes orgánicos. La amplia variedad de este sector (petroquímica, farmacia, pinturas, productos con sustancias químicas, cosmética, electroquímica) produce grandes cantidades de sustancias, muchas de ellas nocivas, que precisan tratamientos específicos de depuración antes de ser vertidas o depositadas en contenedores especiales para su eliminación final.

Los residuos industriales pueden clasificarse de varias formas, según su composición física, densidad, humedad, composición química o valor calorífico, así como por criterios y principios muy variados, acordes con la tecnología disponible, susceptibilidad a tratamiento y legislación ambiental vigente.

La *clasificación de los residuos de acuerdo con el estado físico* es la siguiente:

1. *Residuos industriales líquidos (RIL)*. Son los provenientes de las corrientes líquidas del proceso industrial que son descargados fuera de la industria, ya sea al alcantarillado público o a cuerpos de aguas naturales.

Las fuentes de RIL corresponden a:

- * Agua residual de procesos
- * Operaciones de separación por medio acuoso
- * Derrames
- * Fugas

2. *Residuos industriales sólidos (RIS)*. Son todos aquellos residuos sólidos o semisólidos provenientes de algún proceso u operación relacionada

a la industria, los cuales no pueden ser reutilizados, recuperados o reciclados por la misma industrial.

Los RIS pueden clasificarse de acuerdo con el origen que los genera:

- * Residuos de los procesos: resultan de las operaciones que no emplean en su totalidad las materias primas o donde se generan residuos no utilizables en el proceso.
- * Productos rechazados: se originan en los procesos de control de calidad, donde un producto o materia prima puede ser rechazado por estar fuera de especificación.
- * Embalajes: son todos los envases y contenedores de materias primas una vez que cumplieron su objetivo de contener, transportar y distribuir los materiales.
- * Fin de la vida útil del producto: los productos tienen un cierto tiempo de vida útil, pasado este, ya no pueden ser utilizados para lo que fueron adquiridos.

3.2.4. Emisiones atmosféricas

Son las descargas directas o indirectas a la atmósfera de gases o partículas por un ducto, chimenea o punto de descarga, los cuales se generan principalmente a partir de los procesos de combustión o durante el proceso de las materias primas.

Las *principales fuentes de contaminación atmosférica* son:

- * *Fuentes móviles*: son las que pueden desplazarse en forma autónoma, emitiendo contaminantes durante su trayectoria.
- * *Fuentes estacionarias o fijas*: son las que se encuentran en un punto

fijo, es decir, el punto de origen de la emisión no se desplaza. Se pueden clasificar en fuentes puntuales o grupales, dependiendo de la magnitud y distribución de las emisiones.

- * *Emisión por fugas*: son aquellas emisiones atmosféricas no controladas, como la evaporación de solventes en tanques de almacenamiento y tuberías de transporte.

3.2.5. Clasificación de residuos según su impacto al medioambiente y a la salud de las personas

1. *Inertes o asimilables a urbanos*. Son aquellos que requieren un tratamiento similar a los urbanos, al poseer algunas características semejantes, o bien, que no tienen capacidad de reacción para formar otros compuestos peligrosos, por ejemplo, los residuos de la construcción.
2. *Tóxicos y peligrosos*. Son aquellos cuyas propiedades incluyen algunas o algunas de las siguientes características: corrosivo, irritante, cancerígeno, tóxico, inflamable. La gestión de estos residuos será manejada por empresas autorizadas.

1

2

3

4

5

6

4. Normatividad mexicana en suelos contaminados

Legalmente, la estructura jerárquica de México está regida primero por la Constitución de los Estados Unidos Mexicanos, seguido de los tratados internacionales y las leyes federales. Posteriormente, en la base de la jerarquía están los reglamentos administrativos y las normas oficiales mexicanas, como se aprecia en la figura 4.1.

Figura 4.1. Jerarquía legal en materia ambiental. Elaborada conforme a la Suprema Corte de Justicia de la Nación



En materia ambiental, algunos de los documentos enfocados al cuidado y regulación legal del uso del suelo son:

- * El Protocolo de Kioto sobre cambio climático (tratado internacional) en donde se fomenta el crecimiento sustentable de los países miembros.
- * Otros ejemplos a nivel federal son la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, Ley Federal de Responsabilidad Ambiental, Ley General de Cambio Climático, etc.
- * Por último, derivado de las leyes mencionadas anteriormente, se encuentran sus respectivos reglamentos, las NOM y las NMX en materia ambiental.

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

La Ley y Reglamento de la LGEEPA, cuya última actualización fue publicada en 2012 en el Diario Oficial de la Federación, está conformada por seis títulos en materia de medio ambiente, distribuidos a lo largo de 204 artículos. Esta ley tiene como propósito establecer la normativa que salvaguarde el medio ambiente libre de contaminantes, y también especificar los principios políticos que serán de carácter obligatorio en el país. Algunos de los artículos más importantes se enlistan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Contaminación del suelo en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Última reforma DOF 22-05-2015
(Elaboración propia con base en la LGEEPA)

Título	Ubicación	Descripción
Título Primero	Capítulo I. Normas preliminares Artículo 1. Fracción V	Establece que la LGEEPA es la encargada del cuidado, preservación y restauración del suelo.

Título	Ubicación	Descripción
Título Primero	Capítulo II. Distribución de competencias y coordinación Artículo 4	Se especifica que la regulación sustentable del suelo está gobernada por la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.
	Capítulo II. Distribución de competencias y coordinación Artículo 11. Fracción IV	Los gobiernos de los estados del país, en conjunto con sus respectivos municipios, deben preservar y proteger el suelo.
	Capítulo IV. Instrumentos de la política ambiental Sección II. Ordenamiento ecológico del territorio Artículo 20 bis 4. Fracción II	Las autoridades municipales tienen la obligación de proveer los programas de ordenamiento ecológico local, con base en la regulación sustentable en el uso del suelo.
	Capítulo IV. Instrumentos de la política ambiental Sección V. Evaluación del impacto ambiental Artículo 28. Fracción VII	Durante los cambios de uso del suelo de áreas forestales, se requiere una autorización de la Secretaría mediante una evaluación de impacto ambiental.
Título segundo. Biodiversidad	Capítulo I. Áreas naturales protegidas Sección II. Tipos y características de las áreas naturales protegidas Artículo 49	Especifica que verter o descargar contaminantes en áreas naturales protegidas está prohibido.
Título tercero. Aprovechamiento Sustentable de los Elementos Naturales	Capítulo II. Preservación y Aprovechamiento Sustentable del suelo y sus recursos Artículos 98 al 105	A lo largo de este capítulo, se habla de la preservación, criterios de cuidado y aprovechamiento sustentable del suelo.
	Capítulo III. De la exploración y explotación de los recursos no renovables en el equilibrio ecológico Artículo 108. Fracción II	Se especifica que la Secretaría tiene la obligación de expedir normas oficiales mexicanas para prevenir y controlar la explotación de los suelos.

Título	Ubicación	Descripción
Título cuarto. Protección al Ambiente	Capítulo I. Disposiciones generales Artículo 109 bis.	Los estados de la república y sus respectivos municipios deberán de llevar un registro de las emisiones contaminantes de las personas físicas y morales que presenten fuentes contaminantes.
	Capítulo III. Prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos. Artículo 121	Prohíbe la descarga sobre suelos de aguas residuales contaminantes sin tratar y sin previa autorización federal.
	Capítulo III. Prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos. Artículo 122	Prohíbe la descarga sobre suelos de aguas residuales provenientes de usos urbanos, industriales o agropecuarios, a menos que cumplan con las características especificadas en el mismo artículo.
	Capítulo IV. Prevención y control de la contaminación del suelo Artículos 134 al 144	Establece los criterios y las condiciones bajo los cuales se busca prevenir y controlar la contaminación del suelo; asimismo, especifica los organismos gubernamentales que tienen la facultad para llevar esto a cabo.

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

La Ley y el Reglamento de la LGPGIR es un documento de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) que tiene como fin el señalar diferentes procesos, los cuales son la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los generadores de residuos peligrosos y los planes que se deben llevar a cabo para su manejo adecuado. Algunos de los artículos más importantes se aprecian en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Prevención y Gestión Integral de los Residuos en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Última reforma DOF 22-05-2015.
(Elaboración propia con ayuda de la LGPGIR)

Título	Capítulo	Artículo	Descripción
Título primero. Disposiciones generales	Capítulo Único. Objetivo y ámbito de aplicación de la Ley	Artículo 1	Establece que se tiene como objetivo garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable mediante ciertos procesos del manejo de residuos peligrosos.
		Artículo 2	Esta Ley no aplica para los residuos radioactivos, estos estarán sujetos a ordenamientos específicos.
		Artículo 5	Se establecen ciertas definiciones para efectos de esta Ley.
Título segundo. Distribución de competencias y coordinación	Capítulo Único. Atribuciones de los tres órdenes de Gobierno y coordinación entre dependencias	Artículo 6	Se establece que la Federación, entidades federativas y los municipios deben ejercer atribuciones con el fin de la prevención, aprovechamiento y gestión de los residuos.
		Artículo 9	Se establecen las facultades de las entidades federativas.
		Artículo 10	Se establecen las funciones del manejo integral de residuos urbanos de los municipios.
Título tercero. Clasificación de los residuos	Capítulo Único. Fines, criterios y bases generales	Artículo 15	Se agruparán y subclasificarán los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial.
		Artículo 17	Los residuos de la industria minera-metalúrgica deben ser regulados por la competencia federal.
		Artículo 19	Se establece la clasificación de los residuos de manejo especial considerados como peligrosos.
		Artículo 21	Se establecen los factores que definen el riesgo de un residuo peligroso.

1

2

3

4

5

6

Título	Capítulo	Artículo	Descripción
Título cuarto. Instrumentos de la Política de Prevención y Gestión Integral de los Residuos	Capítulo I. Programas para la prevención y gestión integral de los residuos	Artículo 25	Se debe basar en los principios de reducción, reutilización y reciclado de los residuos.
		Artículo 26	Cada entidad federativa y municipios deben elaborar sus respectivas competencias y en coordinación con la Federación.
	Capítulo II. Planes de manejo	Artículo 27	Se establecen los fines y objetivos de los planes de manejo.
		Artículo 31	Se establecen qué residuos peligrosos y productos estarán sujetos a un plan de manejo.
	Capítulo III. Participación social	Artículos 35 y 36	El Gobierno Federal, entidades federativas y municipios deben promover la participación para la prevención de la generación de residuos.
	Capítulo IV. Derecho a la información	Artículos 37 al 39	Las autoridades de los tres órdenes de gobierno deben elaborar, difundir, actualizar informes anuales.
Título quinto. Manejo Integral de Residuos Peligrosos	Capítulo I. Disposiciones generales	Artículos 40 al 43	Los generadores de residuos peligrosos y gestores deben cumplir con los términos de la Ley; el manejo y disposición final corresponde a quien los genera.
	Capítulo II. Generación de residuos peligrosos	Artículo 44	Se establecen las categorías de generadores de residuos peligrosos.
		Artículos 45 al 49	Se establecen las obligaciones de cada categoría de generadores de residuos peligrosos.
Título quinto. Manejo Integral de Residuos Peligrosos	Capítulo III. De las autorizaciones	Artículo 50	Se establece que las actividades requieren autorización de la Secretaría.
		Artículo 52	Se establecen las causas de revocación de las autorizaciones.

Título	Capítulo	Artículo	Descripción
Título quinto. Manejo Integral de Residuos Peligrosos	Capítulo IV. Manejo integral de los residuos peligrosos	Artículos 54 al 67	Se establece el manejo de los residuos de acuerdo con el Reglamento y normas oficiales.
	Capítulo V. Responsabilidad acerca de la contaminación y remediación de sitios	Artículos 68 a 71	Los responsables de la contaminación de un sitio o actividades relacionadas con este están obligados a reparar el daño.
		Artículo 73	Si se desconoce el propietario de un sitio contaminado, las entidades federativas y municipios deben formular y ejecutar programas de remediación.
		Artículos 75 al 76	La Secretaría y autoridades locales competentes deben llevar a cabo acciones para identificar sitios contaminados y categorizarlos.
	Capítulo VI. La prestación de servicios en materia de residuos peligrosos	Artículo 80 al 84	Se establece la información necesaria para la autorización de transporte, acopio, mantenimiento, entre otros, de residuos.
	Capítulo VII. Importación y exportación de residuos peligrosos	Artículo 86	Se establecen las disposiciones para la importación de residuos peligrosos.
		Artículos 89 a 94	Se establece la póliza o garantía del solicitante y acciones que se harán en caso de incumplimiento de las disposiciones legales aplicables.
	Título Sexto. De la Prevención y Manejo Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial	Capítulo Único	Artículos 96 a 99
Artículo 100			Se establecen las prohibiciones en relación con la generación, manejo y disposición final de residuos sólidos urbanos.

4.3. Normas Oficiales Mexicanas

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) constituyen la base piramidal de la normatividad en México; por ello, es importante saber sus objetivos principales en materia del uso y conservación del suelo para llevar a cabo actividades que vayan a favor del cuidado del medio ambiente.

Como se puede observar en la tabla 4.3, existen al menos seis Normas Oficiales Mexicanas, encargadas de la reglamentación del uso del suelo. Estos documentos van desde la explicación de los procedimientos y lineamientos para la rehabilitación de los terrenos forestales de pastoreo, hasta la determinación de los límites máximos permisibles de los hidrocarburos en suelos.

Tabla 4.3. Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con la contaminación del suelo (elaboradas con documentos oficiales de la SEMARNAT)

NOM	Nombre	Objetivo	Sanciones
Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000	Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos	Determina a detalle los aspectos técnicos de muestreo, del análisis de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.	La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente y la SEMARNAT están encargados de las sanciones conforme a lo establecido en la Ley Forestal.
Norma Oficial Mexicana NOM-023-SEMARNAT-2001	Establece las especificaciones y técnicas que deberá contener la cartografía y la clasificación para la elaboración de los inventarios de suelos	Fija las obligaciones de personas físicas y morales respecto a las cuestiones técnicas de la cartografía y la clasificación para inventarios de suelos	La Procuraduría Federal de Protección al Ambiente y la SEMARNAT están encargados de las sanciones conforme a lo establecido en la Ley Forestal.

NOM	Nombre	Objetivo	Sanciones
Norma Oficial Mexicana NOM-060-SEMARNAT-1994	Que establece las especificaciones para mitigar los efectos adversos ocasionados en los suelos y cuerpos de agua por el aprovechamiento forestal	Al presentarse efectos adversos en suelos y cuerpos de agua debido al aprovechamiento forestal, se plantean ciertas especificaciones para moderar estos efectos.	Las sanciones impuestas por el incumplimiento de esta NOM serán especificadas por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley Forestal y los aplicables en orden jurídico.
Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT-2012	Límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y lineamientos para el muestreo en la caracterización y especificaciones para la remediación	Orienta el muestreo en la caracterización y las especificaciones para las reparaciones para suelos con concentraciones de hidrocarburos, así mismo, menciona las cantidades límites permisibles de estos últimos.	Las sanciones impuestas por el incumplimiento de esta NOM serán especificadas por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos y su Reglamento y demás disposiciones jurídicas aplicables.
Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT-2004	Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio	<p>Establece las concentraciones para la restauración de suelos contaminados por las siguientes sustancias químicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> * Arsénico * Bario * Berilio * Cadmio * Cromo * Hexavalente * Mercurio * Níquel * Plata * Plomo * Selenio * Talio * Vanadio 	Las sanciones impuestas por el incumplimiento de esta NOM serán especificadas por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos y la Ley General de la Salud y los aplicables en orden jurídico.

NOM	Nombre	Objetivo	Sanciones
Norma Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007	Que establece los requisitos de protección ambiental para los sistemas de lixiviación de minerales de oro y plata	Establece los requisitos para las etapas de preparación del lugar, su construcción, operación, cierre y control del lixiviado de minerales de oro y plata. Así mismo especifica la caracterización del mineral lixiviado.	Las sanciones impuestas por el incumplimiento de esta NOM serán especificadas por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la prevención y Gestión Integral de los Residuos, Ley de Aguas Nacionales, Ley General de la Vida Silvestre y los aplicables en orden jurídico.

Conocer las Normas Oficiales Mexicanas en materia de contaminación del suelo no solo permite salvaguardar el medio ambiente en el que se trabaja, sino que también ayuda a evitar sanciones por incumplimiento de las obligaciones que tienen tanto personas físicas como personas morales.

5. Caracterización de suelos contaminados

La remediación de sitios contaminados (figura 5.1) es una actividad enmarcada dentro de la protección ambiental en México que permite a la sociedad ver de manera tangible cómo es posible realizar acciones concretas de remediación atendiendo a las demandas de la sociedad para reducir los riesgos a la salud y al ambiente.

La Ley General de Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) define la caracterización de sitios contaminados como “la determinación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes químicos o biológicos presentes, provenientes de materiales o residuos peligrosos, para estimar la magnitud y tipo de riesgos que conlleva dicha contaminación”.



Figura 5.1 Ejemplo de sitio contaminado.

Fuente: Hinojal, 2010

5.1. Metodologías para la caracterización de un suelo contaminado

Existe una gran variedad de pruebas para poder comprender las características de un suelo contaminado, como las siguientes:

- * Físicas y químicas que consideran parámetros importantes como pH, humedad, salinidad, conductividad eléctrica, fósforo, nitrógeno, sulfatos, entre otros (figura 5.2).



Figura 5.2 Medición de pH en suelo
Fuente: INIA, 2017

- * Para el análisis de hidrocarburos, principalmente hidrocarburos totales de petróleo (figura 5.3).



Figura 5.3 Extracción de hidrocarburos
Fuente: CEINASEG, 2019

- * Para análisis microbiológicos, como hongos, bacterias aerobias y anaerobias (figura 5.4).



Figura 5.4 Proceso de análisis microbiológico
Fuente: OLEICA, 2020

- * Para ensayos toxicológicos, que incluyen pruebas de germinación, crecimiento de plantas y toxicidad aguda con lombrices de tierra (figura 5.5).



Figura 5.5 Proceso de ensayo toxicológico
Fuente: Bazán, 2016

Cada una de las pruebas mencionadas tiene sus fundamentos, materiales, equipos y reactivos, procedimientos y forma de analizar los resultados para una correcta interpretación de ellos.

5.2. Descripción del sitio

Para tomar una muestra representativa de un suelo contaminado, la norma NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 propone una caracterización que debe considerar, por lo menos, los siguientes elementos:

- * Descripción del sitio
- * Estrategia de muestreo
- * Plan de muestreo
- * Informe

5.2.1 Ubicación, descripción y uso actual del sitio

Se conoce por ubicación a la posición de un lugar con respecto de otro. En el caso de los suelos, es la delimitación y posición geográfica del área donde se considera que está el suelo a tratar en la ubicación basta con que se conozcan las coordenadas del sitio y el tamaño del área de este.

La descripción es apearse con una narrativa lo más cercano a la realidad. En este sentido, se busca describir con relación al suelo lo siguiente: los tipos de contaminantes que contiene; las propiedades físicas (color, textura, dureza, etc.), químicas (contenido de sulfatos, silicatos hidrocarburos, presencia o ausencia de calcio, etc.) y biológicas (flora y fauna que se encuentre en el área delimitada). Asimismo, determinar las posibles causas que generan contaminación en el suelo y, de la misma manera, delimitar lo que colinda con el área, es decir, qué es lo que hay alrededor.

Otro aspecto importante es identificar los usos que tiene el suelo en la actualidad (cultivo, construcción, filtro, etc.), como se muestra en la figura 5.6.

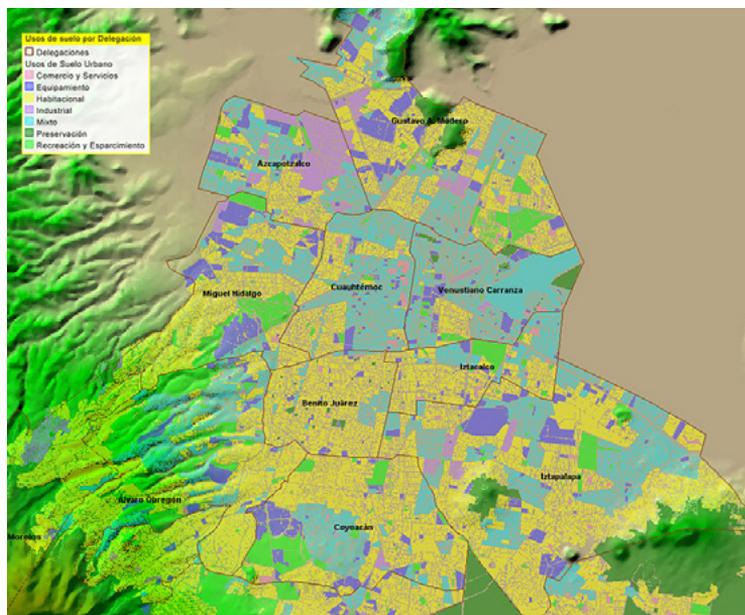


Figura 5.6

Mapa de uso de suelo
Fuente: Tamayo, 2016

5.2.2 Biodiversidad

La descripción de la biodiversidad consiste en desarrollar la explicación de los elementos de la biota que se encuentran en nuestra área delimitada, con la finalidad de saber qué especies de los cinco reinos de la naturaleza contiene y a cuáles de estos se está afectando en mayor medida por la contaminación de este (figura 5.7).



Figura 5.7 Representación de biodiversidad nacional

Fuente: Probosque, 2019

5.2.3 Hidrología del sitio

Es la descripción de los cuerpos de agua aledaños que tienen de alguna manera contacto con o en el interior del sitio de interés, los cuales se ven afectados por la contaminación de este. Por ejemplo, un río al tener contacto con los contaminantes que hay en el sitio de interés (suelo) los lleva

aguas abajo. En este caso, se debe tener en cuenta en la descripción de los cuerpos de agua que estos no solo se alimentan por maneras superficiales, sino también por el nivel freático del cual se abastecen, lo cual puede estar ligado con el sitio de interés (figura 5.8).



Figura 5.8 Importancia de la hidrología
Fuente: Flórez, 2016

5.2.4 Geología del sitio

La *geología* es una ciencia que estudia el origen, formación y evolución de la Tierra, los materiales que la componen y su estructura; por lo tanto, la geología estudia el suelo en cuanto a las características y componentes geológicos que lo componen.

Es importante conocer la *geología del sitio de estudio* porque ayuda a obtener información del suelo de una manera más rápida. Gran parte

de la geología del país ya se encuentra registrada, lo cual permite saber cuáles estudios se han realizado, tener acceso a la información existente y plantear nuevas investigaciones sobre aspectos que todavía no se han estudiado o profundizado.

De igual forma, conocer la geología del lugar proporciona una idea de cómo pueden o no afectar los contaminantes en el suelo a caracterizar, lo cual permite elaborar predicciones sobre la evolución del lugar para tomar o no la decisión de ejecutar ciertas acciones en el suelo (figura 5.9).



Figura 5.9 Montañas arcoíris. Fuente: Levy, 2019

5.3. Muestreo y caracterización de suelos

Los resultados de las investigaciones históricas deben ser tomados en cuenta al momento de planear el muestreo en específico en los sitios determinados como pasivos ambientales.

Para sitios considerados emergencias ambientales, debe procederse a la planeación del muestreo a partir de las observaciones efectuadas durante la inspección del sitio y el juicio del experto con respecto a la instalación o sitio donde sucedió la emergencia, por ejemplo, un ducto o una volcadura de un carrotanque.

La ubicación y el número de los puntos de muestreo deben ser representativos y garantizar que una muestra o grupo de muestras proporcionen las características del sitio de muestreo con las menores incertidumbres posibles.

5.3.1 Número de muestreos mínimos y límites máximos permisibles

El número mínimo de puntos de muestreo en dependencia de la superficie del sitio en hectáreas para contaminaciones por hidrocarburos y metales y metaloides está dado por las normas NOM-138-SEMARNAT/SS-2003 y NMX AA 132 SCFI 2006 (véase tabla 5.1).

Tabla 5.1 Número de muestreos mínimos de acuerdo con un área específica

Área contaminada (ha)	Puntos de muestreo
Hasta 0.1	4
02	8
03	12
04	14
05	15
06	16
07	17
08	18

Área contaminada (ha)	Puntos de muestreo
09	19
10	20
20	25
30	27
40	30
50	33
100	38
150	40
200	45
300	50
400	53
500	55
1,000	60

Fuente: NOM-138-SEMARNAT/SS-2003

Los productos asociados a los derrames de hidrocarburos para los que se establecen límites máximos permisibles de contaminación en suelos se enlistan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 hidrocarburos específicos en el suelo

Hidrocarburos específicos	Uso de suelo predominante (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Benceno	6	6	15
Tolueno	40	40	100
Etilbenceno	10	10	25
Xilenos (suma de isómeros)	40	40	100
Benzo(a)pireno	2	2	10

Hidrocarburos específicos	Uso de suelo predominante (mg/kg base seca)		
	Agrícola	Residencial	Industrial
Dibenzo(a,h)antraceno	2	2	10
Benzo[a]antraceno	2	2	10
Benzo(b)fluoranteno	2	2	10
Benzo[k]fluoranteno	8	8	80
Indeno(1,2,3-cd)pireno	2	2	10

Fuente: NOM-138-SEMARNAT/SS-2003

*HAP: Hidrocarburos aromáticos polinucleares

*BTEX: B, benceno; T, tolueno; E, etilbenceno; X, xilenos (suma de isómeros)

En la figura 5.10, se muestra una comparativa de los puntos de muestreo con respecto al área en hectáreas entre ambas normas.

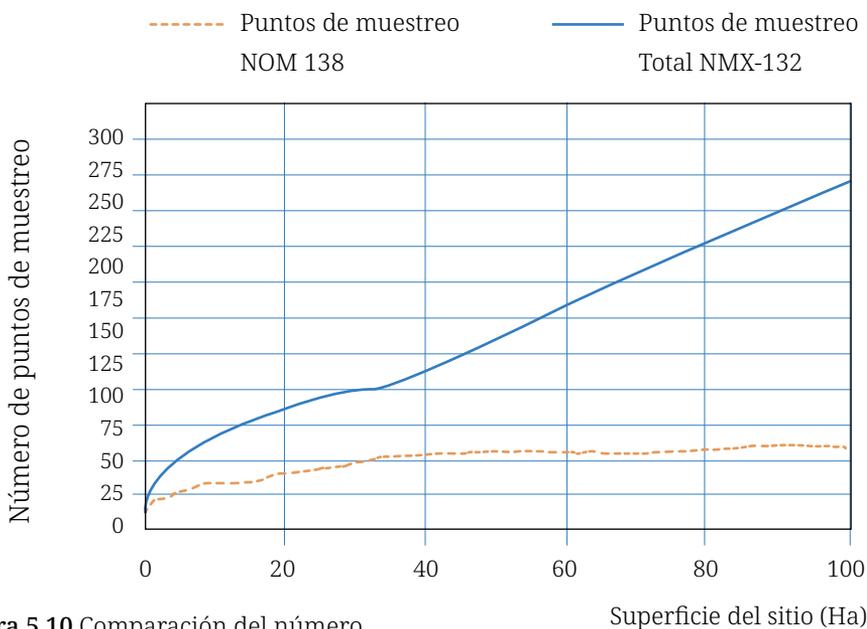


Figura 5.10 Comparación del número de muestreos de acuerdo con las diferentes leyes

Superficie del sitio (Ha)

Estos números mínimos de puntos de muestreo representan el “mínimo de calidad” y, por ello, en la ejecución de una caracterización son de tomarse muestras de un número igual o mayor de puntos de muestreo. La realización de un número menor de puntos de muestreo no es permisible y conduce al rechazo de dicho trabajo. Solo en casos particulares el mínimo es adecuado; por regla común, se requiere de un número mayor de puntos de muestreo.

5.3.2. Contaminantes orgánicos e inorgánicos

Las muestras que se presume contengan *contaminantes orgánicos* deben colectarse en bolsas de polietileno debidamente selladas y etiquetadas. Hasta su entrega al laboratorio, deben mantenerse en una hielera para evitar cualquier cambio o contaminación de la muestra por efecto de temperatura, luz o aeración. Si se desconocen los posibles contaminantes presentes, el análisis de las muestras debe realizarse lo más pronto posible.

Con relación a los *contaminantes inorgánicos*, la caracterización de un sitio contaminado en su calidad de tarea preliminar a la remediación debe proporcionar:

- * Los datos cuantitativos de los contaminantes presentes en los distintos elementos del sitio contaminado (suelo, agua, aire, instalaciones o combinaciones de ellos).
- * El tipo de los contaminantes presentes en el sitio contaminado.
- * La información acerca de si estos contaminantes provienen de materiales o residuos peligrosos.
- * La información sobre las cantidades de contaminantes, sus características (toxicidad, peligrosidad, etc.), su distribución y rutas de exposición.

1

2

3

4

5

6

- * La base para poder estimar los riesgos que dichos contaminantes implican para el medio ambiente (recursos naturales y organismos vivos) y para la salud humana.
- * La información, en términos generales, acerca del daño generado por los contaminantes presentes en el sitio contaminado.

En la tabla 5.3, se muestran algunos compuestos con los que se debe tener atención porque son de hidrocarburos.

Tabla 5.3 Compuestos de cuidado

Producto contaminante	Hidrocarburos					
	Fracción pesada	HAP	Fracción media	HAP	Fracción ligera	BTEX
Mezclas	×	×	×	×	×	×
Petróleo crudo	×	×	×	×	×	×
Combustóleo	×	×				
Parafinas	×	×				
Petrolatos	×	×				
Aceites	×	×				
Gasóleo			×	×		
Diésel			×	×		
Turbosina			×	×		
Keroseno			×	×		
Creosola			×	×		
Gasavión					×	×
Gasolvente					×	×
Gasolinas					×	×
Gasnafta					×	×

Fuente: NOM-138-SEMARNAT/SS-2003

5.4. Área y volumen de suelo contaminado

Para el entendimiento de los datos de este tema, se presenta primero lo que es un sitio contaminado debido a una emergencia ambiental. Estos sitios son identificados por las propuestas de remediación que son aprobadas por la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) que pertenece a la SEMARNAT (tabla 5.4).

Tabla 5.4 Volumetría de suelos contaminados en el país

Año	No. de sitios contaminados	Área [m ²]	Volumen [m ³]
2008	142	147,123	101,924
2009	135	144,982	272,556
2010	114	233,605.3	348,025.67
2011	123	195,723.95	218,704.08
2012	93	156,551.15	157,748.82
2013	51	83,501.6	101,299.62
2014	144	269,358.98	296,982.3
2015	52	55,875.94	37,728.5
2016	15	28,341.06	13,589.8
2017	20	57,013.43	29,903.73
2018	14	9,973.94	7,182.97
2019	9	16,204.05	18,292.67

Fuente: SEMARNAT, Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, 2020

Para la medición de un área de suelo contaminado, se requiere conocer sus dimensiones, pero es importante que se considere la extensión del contaminante con todos los estudios anteriormente mencionados. Cada contaminante se comportará de manera distinta, ya que existen gran

variedad de suelo y contaminantes, y que dependiendo de sus características físicas y químicas tendrá una extensión amplia o no.

En cuanto al cálculo del volumen, es fundamental conocer la penetración del contaminante, para así poder hacer la volumetría correcta con la profundidad adecuada.

5.5. Modelación del contaminante en el suelo, subsuelo y en los acuíferos

El movimiento de contaminantes a través del suelo hacia los depósitos de agua subterránea es la causa más importante de degradación de los recursos hídricos en el mundo. En muchos casos, serios problemas de salud humana se asocian con esta forma de contaminación.

Diversas investigaciones han permitido el desarrollo de modelos y métodos que describen el transporte de lixiviados por el suelo y en el interior de un relleno sanitario. El transporte de sustancias químicas a través del suelo produce, en muchos casos, la degradación de fuentes de agua subterránea cuando la mancha de contaminante las alcanza.

Uno de los más grandes desafíos al modelar el transporte del soluto en el suelo es cómo caracterizar y cuantificar efectivamente la geometría y las propiedades hidráulicas y químicas del medio poroso.

La cantidad de sustancias nocivas que se generan en un relleno sanitario durante un largo período de tiempo puede predecirse con buena aproximación mediante modelos de balance hídrico. Tales modelos calculan la descarga de lixiviados como la diferencia entre la precipitación y la suma de evapotranspiración, escorrentía y almacenamiento de agua

1

2

3

4

5

6

dentro del cuerpo de desperdicios. En cambio, la variación de la tasa de descarga del lixiviado en el tiempo es más difícil de determinar, por eso se requiere entender el proceso de flujo de agua dentro del relleno.

Investigaciones de campo indican que el contenido de agua dentro de los rellenos puede variar desde condiciones saturadas a completamente secas. Esto se explica por trayectorias preferenciales que atraviesan la masa del suelo.

En general, estos modelos no consideran dos factores importantes. El primero es el efecto de la sobrecarga en las características de los suelos de este tipo. Este efecto puede hacer que las capas inferiores del suelo disminuyan su permeabilidad vertical significativamente en relación con las capas superiores, afectando los patrones de flujo de los contaminantes y la distribución de la humedad dentro del suelo, lo cual puede también influir en la composición del lixiviado efluente. El segundo factor es el desarrollo progresivo de los suelos.

Un trabajo desarrollado en 2008 por Mirbagheri y Kazemi proporciona un modelo matemático unidimensional basado en la ecuación de convección dispersión en medios porosos no saturados, para calcular la concentración de sólidos totales inorgánicos dentro del relleno. El modelo numérico está fundamentado en el método del elemento finito.

Según este trabajo, la ecuación diferencial que controla el transporte de los contaminantes a través del suelo, en la cual no se considera la degradación y se desprecia la mezcla debido a la difusión molecular, es la siguiente:

1

2

3

4

5

6

$$R = K' \frac{S}{S_0} (Cst - C)$$

$$Dh(\theta) = \lambda \left(\frac{q}{\theta} \right)$$

$$\theta_c = \frac{2b \theta_s}{1 + 2b}$$

Donde:

- C = concentración de la fase fluida;
- Dh = coeficiente de dispersión hidrodinámica longitudinal [L^2/T];
- λ = dispersividad [L];
- K' = Coeficiente de tasa [1/T];
- S = masa por volumen de residuo disponible para transferir en un tiempo t [M/T^3];
- S_0 = masa por volumen de residuo disponible para transferir en un tiempo $t = 0$ [M/T^3];
- Cst = concentración máxima de contaminante en la fase líquida;
- θ_s = contenido de agua [L^3/L^3].

Además del modelado numérico, se han desarrollado modelos físicos empleando reactores de laboratorio para simular y predecir las emisiones de un relleno sanitario municipal. Se ha examinado el flujo de agua y transporte y solutos a través del mismo cuerpo de desperdicios para diferentes escalas volumétricas, y se han evaluado las diferencias entre el flujo de agua y las emisiones de lixiviado en elementos como cloro, carbono total orgánico y nitrógeno.

6. Tratamiento y disposición de suelos contaminados

El tratamiento y la adecuada disposición de los suelos contaminados tienen como objetivo remediar las áreas que se desean proteger o que representan un riesgo importante para la salud de las personas.

En la actualidad, existen diversas alternativas que ayudan a gestionar la problemática que generan los diferentes tipos de contaminantes en los suelos. Para ello, se emplean tecnologías que se adecuan a la necesidad del proyecto remedial, tomando en cuenta el peligro que el suelo afectado implica para la salud, el medio ambiente detectado, así como el uso futuro que se le asignará al área en cuestión.

Sin embargo, la viabilidad de estas opciones depende de varios factores, principalmente del económico, pero también de los esquemas básicos de operación, campo de acción, principios de aplicación, ventajas y desventajas del plan, estimación de costos asociados, entre otros aspectos. En este capítulo, se presenta un recorrido por las diferentes alternativas de tratamiento para suelos.

6.1. Tipos de tratamientos para suelos contaminados

Los tratamientos para suelos contaminados tienen como misión modificar la composición de un contaminante en un sitio específico mediante acciones químicas, físicas o biológicas. A esta operación unitaria o serie de operaciones unitarias se le conoce como *tecnologías de tratamiento*,

1

2

3

4

5

6

las cuales buscan reducir la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminante.

Se deben establecer objetivos y prioridades antes de decidir el tipo de tratamiento que se utilizará; para tal fin es necesario realizar una evaluación de riesgo, tomando en cuenta que la estrategia a seguir tenga un costo de control eficiente.

Una vez tomada la decisión de implementar el tratamiento, se deben definir los objetivos de dicha tarea que se basan en tres principios fundamentales asociados a algún tipo de riesgo: el primero de ellos es la o las fuentes de contaminación; el segundo, las vías de exposición y, en último lugar, los receptores expuestos.

A partir de esta valoración, se establece una de las siguientes opciones: eliminar la fuente de contaminación o cortar la ruta de interacción. La primera opción consiste en erradicar o disminuir la biodisponibilidad de las sustancias peligrosas presentes en el medio hasta asegurarse que no representen un riesgo y, la segunda, reside en contener a los contaminantes a una matriz que los inmovilice y evite su interacción con el suelo.

Hoy en día existe en el mercado una variedad de tecnologías de tratamiento de suelos contaminados, algunas de uso frecuente y otras aún en fase experimental, cuya función principal es controlar la presencia o interacción de contaminantes.

Su elección depende de las características intrínsecas del medio y del contaminante, la eficiencia de cada tratamiento, factibilidad técnico-económica y el tiempo estimado para su ejecución.

1

2

3

4

5

6

Normalmente pueden agruparse en función de los siguientes criterios: (1) objetivo del tratamiento, (2) lugar en que se aplica el proceso de tratamiento y (3) tipo de tratamiento.

1. Los *objetivos del tratamiento* pueden agruparse de la siguiente manera:

- * *Técnicas de contención*: son utilizadas para aislar el contaminante en el medio, sin actuar sobre él.
- * *Técnicas de confinamiento*: estas actúan absolutamente mediante la alteración de las condiciones fisicoquímicas del medio reduciendo la movilidad del contaminante.
- * *Técnicas de descontaminación*: la descontaminación está enfocada en la disminución o eliminación de la concentración de contaminantes presentes en el medio.

2. En el *lugar de aplicación según del tratamiento*, se tienen dos opciones: *in situ*, cuando se realiza directamente en el sitio contaminado, y *ex situ*, cuando se requiere de la extracción del suelo contaminado para su tratamiento posterior, ya sea en el mismo lugar (*on site*) o en instalaciones externas (*off site*).

3. *Clasificación de las tecnologías*: se pueden distinguir los tratamientos biológicos, cuya degradación, transformación o remoción de contaminantes es mediante la actividad metabólica natural de ciertos organismos; los tratamientos fisicoquímicos logran la transformación, separación o contención de contaminantes aprovechando las propiedades físicas o químicas de los contaminantes o del medio; y los tratamientos térmicos, que utilizan altas temperaturas para volatilizar, descomponer o fundir los contaminantes.

1

2

3

4

5

6

A continuación, se presenta la tabla 6.1 donde se observan las principales tecnologías de tratamiento de suelos y aguas subterráneas contaminadas, agrupadas según el tipo de tratamiento aplicado.

Tabla 6.1 Clasificación de tratamientos de suelos

Tratamientos biológicos	Tratamientos térmicos	Tratamientos fisicoquímicos
<ul style="list-style-type: none"> » Bioaumentación » Biodegradación asistida » Biotransformación » Bioventing » Compostaje » Fitorremediación » <i>Landfarming</i> » Lodos biológicos » Pilas biológicas 	<ul style="list-style-type: none"> » Calentamiento por conducción térmica » Calentamiento por radiofrecuencia » Calentamiento por resistencia eléctrica » Desorción térmica » Incineración » Inyección de agua caliente » Inyección de aire caliente » Inyección de vapor » Pirolisis » Vitricación 	<ul style="list-style-type: none"> » Adición de enmiendas » Barreras de suelo seco » Barreras físicas (verticales/horizontales) » Barreras hidráulicas » Barreras permeables activas » Electrocinética » Estabilización fisicoquímica » Extracción de agua » Extracción de aire » <i>Flushing</i> » Inyección de aire comprimido » Inyección de solidificantes » Lavado de suelos » Oxidación UV » Pozos de recirculación » Sellado de suelos

Fuente: Candia, 2015

En la tabla 6.2 se presenta un resumen de las principales ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento, clasificadas según su tipo.

Tabla 6.2 Ventajas y desventajas de cada tratamiento de suelo

Tratamientos	Ventajas	Desventajas
Biológicos	<ul style="list-style-type: none"> » Permiten tiempos más rápidos de limpieza 	<ul style="list-style-type: none"> » Es el grupo de tratamientos más costoso » Los costos aumentan en función del empleo de energía y equipo » Intensivos en mano de obra y capital
Térmicos	<ul style="list-style-type: none"> » Son efectivos en cuanto a costos » Pueden realizarse en periodos cortos » El equipo es accesible y no se necesita de mucha energía ni ingeniería 	<ul style="list-style-type: none"> » Los residuos generados por técnicas de separación deben tratarse o disponerse » Aumento de costos y necesidad de permisos » Los fluidos de extracción pueden aumentar la movilidad de los contaminantes » Hay necesidad de sistemas de recuperación
Fisico-químicos	<ul style="list-style-type: none"> » Son efectivos en cuanto a costos » Son tecnologías más benéficas para el ambiente » Los contaminantes generalmente son destruidos » Se requiere un mínimo o ningún tratamiento posterior 	<ul style="list-style-type: none"> » Requieren mayores tiempos de tratamientos » Es necesario verificar la toxicidad de intermediarios o productos » No pueden emplearse si el tipo de suelo no favorece el crecimiento microbiano

Fuente: Candia, 2015

6.2. Condiciones de tratamiento para suelos contaminados

El suelo es una matriz compleja, donde sus componentes sólidos, líquidos, gaseosos, orgánicos, inorgánicos y biológicos son sinónimo de su diversidad. Para aplicar un correcto tratamiento de rehabilitación, se debe cono-

cer sus condiciones y características. Esto implica considerar si se trata de un suelo homogéneo o heterogéneo, permeabilidad, densidad aparente, pH, humedad, textura, condiciones Redox, disponibilidad de nutrientes y microflora presente.

Para un suelo heterogéneo, es decir, de textura diferente, resulta difícil su rehabilitación con un solo método de tratamiento *in situ*, debido a que contiene diferentes componentes, lo que hace difícil determinar la condición de tratamiento adecuada.

6.3. Tecnologías de tratamiento fisicoquímico

Como su nombre lo indica, los *tratamientos fisicoquímicos* se centran en hacer uso de las propiedades físicas y químicas tanto de los propios contaminantes como del medio en el que se presentan. Estos tienen como ventajas un menor tiempo de tratamiento, además de un costo reducido en comparación con otras tecnologías. Como desventaja, se encuentra un incremento de costos, ya que se puede recurrir a técnicas de separación en las que los contaminantes puedan requerir de algún tipo especial de disposición final. Al igual que las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse *in situ* o *ex situ*.

Adición de enmiendas

- * Objetivo del proceso: se busca la descontaminación del suelo reduciendo la movilidad y biodisponibilidad de sales y metales a través de sustancias orgánicas o inorgánicas.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.

- * Descripción del proceso: se adicionan sustancias orgánicas o inorgánicas en el suelo contaminado, provocando que estas aporten nutrientes al medio y, de esta forma el suelo degradado restaure sus propiedades físicas, químicas y biológicas (figura 6.1).

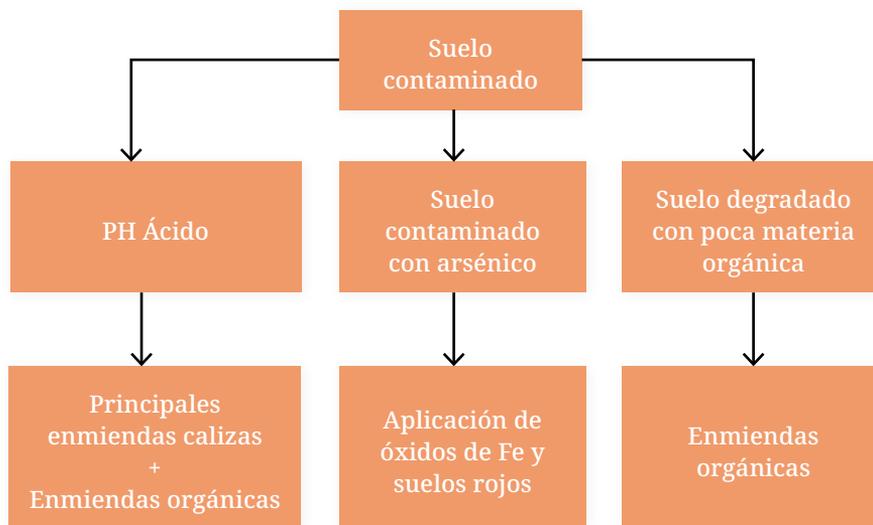


Figura 6.1 Esquema de la adición de enmiendas. Fuente: Elaboración propia, 2021

Tabla 6.3 Ventajas y desventajas de la adición de enmiendas

Ventajas	Desventajas
Facilita gestión de residuos.	Concentración de nutrientes baja y variable.
Mantiene y mejora la fertilidad de los suelos.	Escaso control de calidad.
	Tiempo e infraestructura para el procesamiento de residuos.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Barreras de suelo seco

- * Objetivo del proceso: contener la contaminación del suelo mediante el flujo de aire seco.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: se elimina el contenido de agua en el suelo a través del flujo de aire seco, permitiendo así que la capacidad de retención de sustancias contaminantes por parte de los suelos pueda aumentar y esto a su vez impida la migración de esta hacia los reservorios de agua subterránea (figura 6.2).

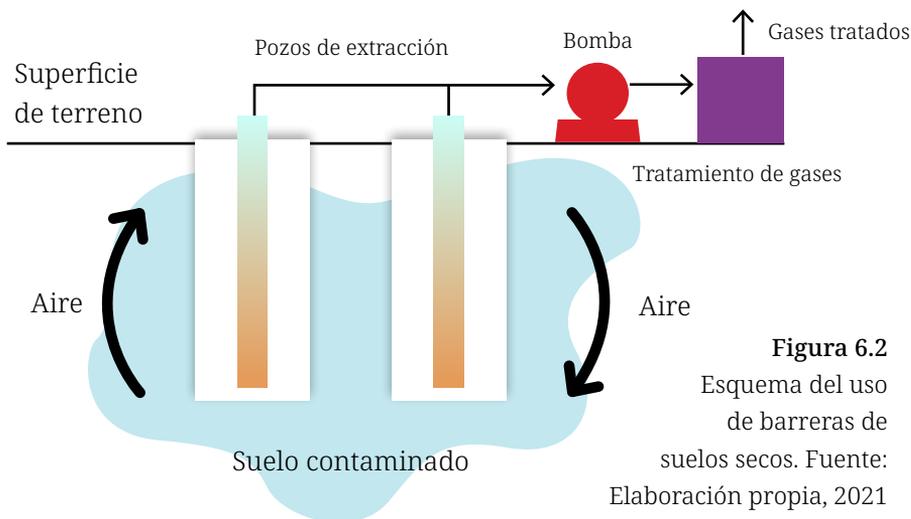


Figura 6.2

Esquema del uso de barreras de suelos secos. Fuente:

Elaboración propia, 2021

Tabla 6.4 Tabla ventajas y desventajas de las barreras de suelo seco

Ventajas	Desventajas
El suelo puede ser tratado y repuesto a su origen.	Este tratamiento se ha utilizado poco y no se tienen una base de datos que garantice su funcionalidad y su costo-beneficio.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Barreras físicas (verticales/horizontales)

- * Objetivo del proceso: contener la migración de los contaminantes vertidos en el suelo mediante la introducción paredes o barreras impermeables en este.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: este tratamiento se emplea en casos donde la descontaminación resulta técnica o económicamente inviable y consiste en la introducción de barreras impermeables en las zonas donde la contaminación está concentrada (figura 6.3).

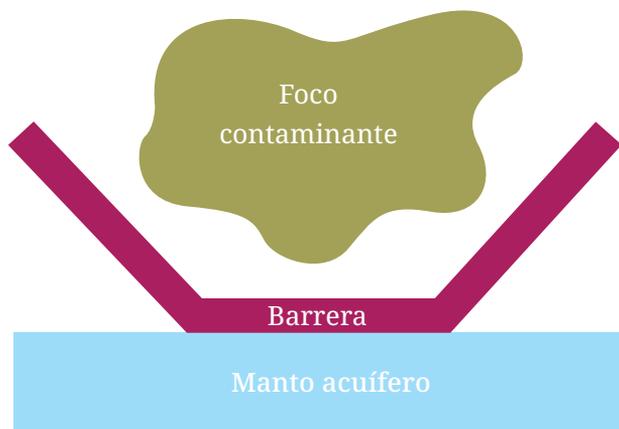


Figura 6.3 Esquema de barreras verticales
Fuente: Elaboración vertical, 2021

Tabla 6.5 Ventajas y desventajas de las barreras físicas

Ventajas	Desventajas
Costo de operación accesible comparado con otras técnicas	Solo evita migraciones. No modifica toxicidad ni movilidad de los contaminantes.

Ventajas	Desventajas
La puesta en marcha de este tratamiento es rápida y flexible en cuanto a acción frente a diferentes contaminantes de baja peligrosidad.	Los materiales de las barreras pueden degradarse con el tiempo, sufrir fracturas o ser atacados por las soluciones contaminantes.
	La construcción es compleja.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Barreras hidráulicas

- * Objetivo del proceso: contener la contaminación del agua subterránea en las inmediaciones de la zona contaminada.
- * Lugar de aplicación: aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: se extrae el agua subterránea presente en las zonas contaminadas o en ciertos casos la que se encuentra aguas arriba de dicha zona y así evitar su contaminación, además de frenar la migración de los contaminantes aguas abajo (figura 6.4).

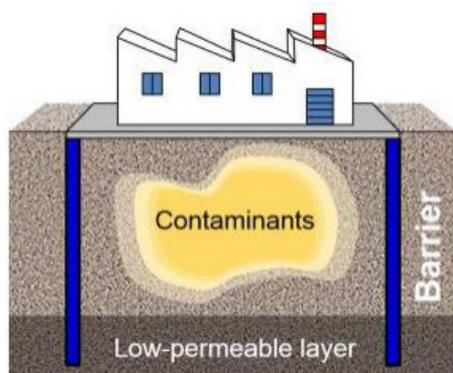


Figura 6.4
Ilustración del sistema de barreras hidráulicas
Fuente: Takai, 2016

Tabla 6.6 Ventajas y desventajas de las barreras hidráulicas

Ventajas	Desventajas
Este tratamiento se puede utilizar tanto para evitar la contaminación del agua en sitio como aguas abajo	Se debe controlar las disminuciones del nivel freático, ya que la pérdida de humedad del suelo puede afectar a ecosistemas, por tanto, el agua extraída debe ser tratada y retomada.
	Alto costo

Fuente: Elaboración propia, 2021

Barreras permeables reactivas

- * Objetivo del proceso: este tratamiento busca la descontaminación de la zona a través de la absorción, precipitación o degradación de los contaminantes presentes en las aguas subterráneas.
- * Lugar de aplicación: aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: se debe instalar una pantalla perpendicular al flujo de la pluma de contaminación, esta pantalla debe estar constituida por un material que permitirá absorber, precipitar o degradar, ya sea biótica o abióticamente los contaminantes (figura 6.5).

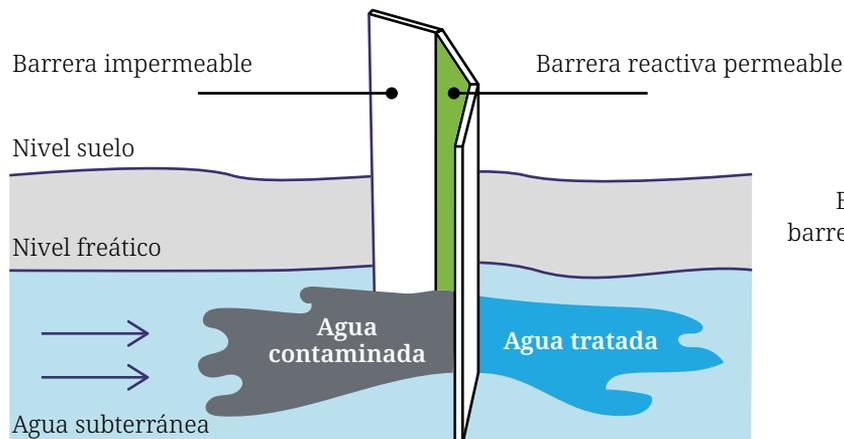


Figura 6.5
Esquema de la barrera permeable reactiva.
Fuente: Candia, 2002

Tabla 6.7 Ventajas y desventajas de las barreras permeables reactivas

Ventajas	Desventajas
Inmovilizan o transforman los contaminantes <i>in situ</i> .	La incompleta reducción puede ocurrir en zonas de baja reactividad o en zonas de flujo muy elevado
No requiere estructuras sobre tierra.	Para profundidades más grandes de 30 metros no son eficaces económicamente.
Operación durante largos períodos.	
Fracasos mecánicos mínimos que causan el cierre del sistema	
Costes de mantenimiento mínimo.	

Fuente: Elaboración propia, 2021

Enjuague/inundación de suelos

- * Objetivo del proceso: descontaminar el suelo mediante la extracción de los contaminantes.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: extraer los contaminantes presentes en el suelo mediante la anegación del suelo, ya sea con agua u otras soluciones acuosas; esto permitirá que los contaminantes sean transportados a una zona determinada para su captación o reciclaje (figura 6.6).

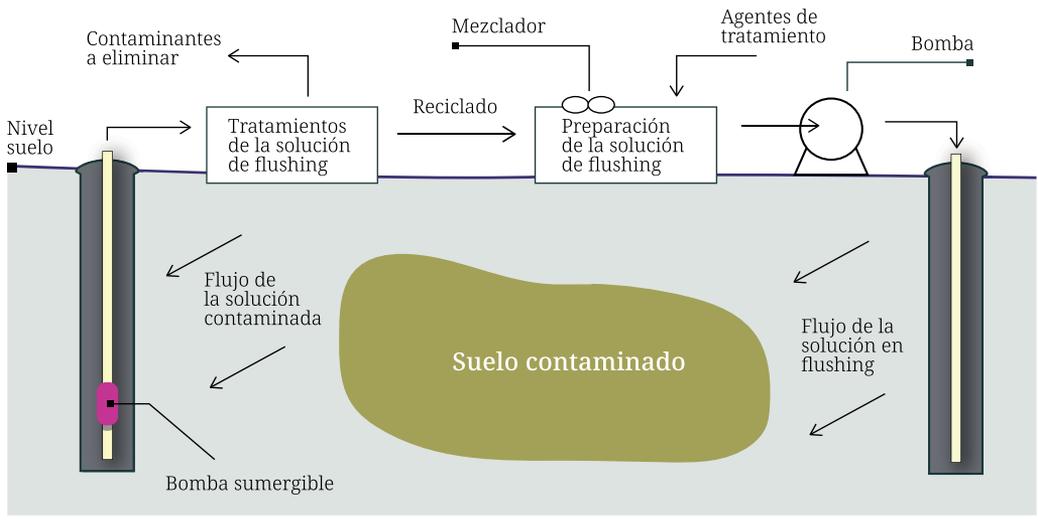


Figura 6.6 Esquema enjuague/ inundación de suelos. Fuente: Candia, 2002

Tabla 6.8 Ventajas y desventaja del enjuague de suelos

Ventajas	Desventajas
Crea un sistema cerrado que no sea afectado por condiciones externas.	Baja permeabilidad o suelos heterogéneos son difíciles de tratar.
Permite el tratamiento <i>in situ</i> de desechos peligrosos.	Reacciones de la solución de lavado al contacto con el suelo contaminado puede reducir la movilidad de los contaminantes.
Efectiva para una gran variedad de contaminantes del suelo.	Los costos de los procesos de separación y tratamiento para los fluidos recuperados pueden elevar el costo total de la tecnología.
Es eficaz en función del costo.	
Produce un material más uniforme al cual se aplicarán otras técnicas de tratamiento.	

Fuente: Elaboración propia, 2021

Estabilización fisicoquímica

- * Objetivo del proceso: se busca confinar los contaminantes, ya sea limitando su solubilidad o su movilidad.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *ex situ*.
- * Descripción del proceso: se limitan la solubilidad y movilidad del contaminante por medio de la adición de cemento hidráulico, cal o algún polímero, que asegure que los constituyentes peligrosos se mantengan en su forma menos móvil o tóxica. Para realizar este proceso, se requiere un pretratamiento para eliminar la fracción gruesa del contaminante y luego se mezcla en tanques con agua y una serie de agentes estabilizadores (figura 6.7).

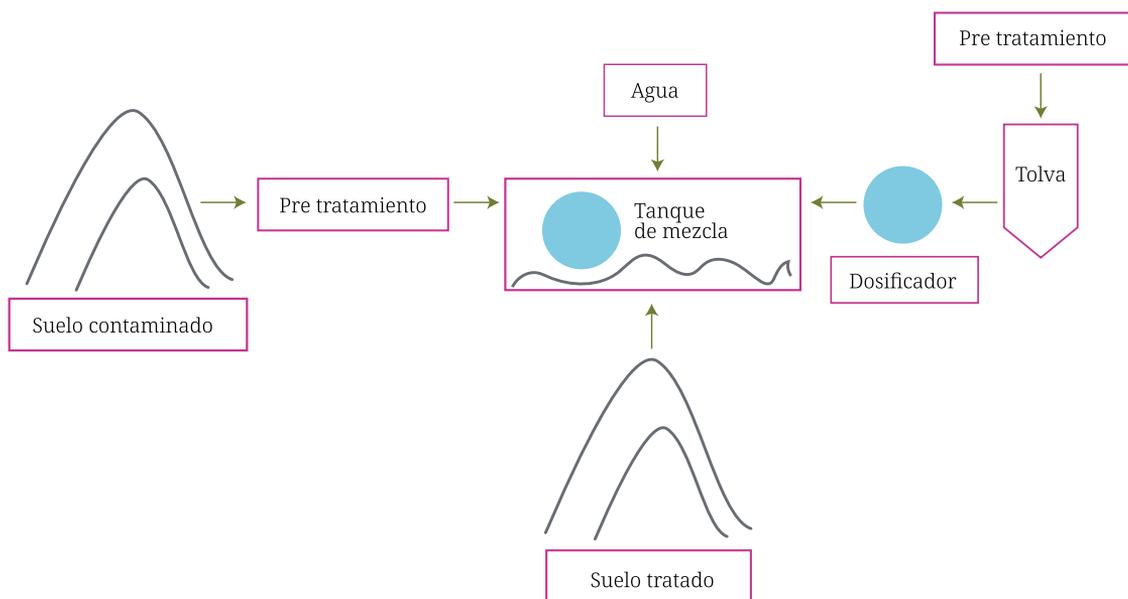


Figura 6.7 Esquema de estabilización fisicoquímica
Fuente: Elaboración propia, 2021

Tabla 6.9 Ventajas y desventajas en la estabilización fisicoquímica

Ventajas	Desventajas
Se puede completar en un periodo de tiempo relativamente corto.	No destruye los contaminantes.
Se puede efectuar <i>in situ</i> o <i>ex situ</i> .	Puede ser difícil predecir su comportamiento a largo plazo.
El equipo del proceso deja poca huella.	Aumento de volumen.
Las propiedades estructurales de los suelos pueden ser mejoradas por el tratamiento.	Puede requerir un mantenimiento a largo plazo de los sistemas de protección o monitoreo.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Extracción de agua / *Pump & Treat*

- * Objetivo del proceso: se busca descontaminar los suelos y las aguas subterráneas, mediante la extracción del agua contaminada del suelo y subsuelo.
- * Lugar de aplicación: suelos y aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: se extrae el agua contaminada en la zona saturada como en la no saturada. En el caso de la zona saturada, el agua es bombeada a la superficie para ser tratada posteriormente, a esto se le llama *Pump & Treat*. Cuando se habla de la zona no saturada, es necesaria una inyección previa de agua por gravedad y de esta forma arrastra los elementos contaminantes del suelo, que son almacenados en la zona saturada para ser bombeada posteriormente (figura 6.8).

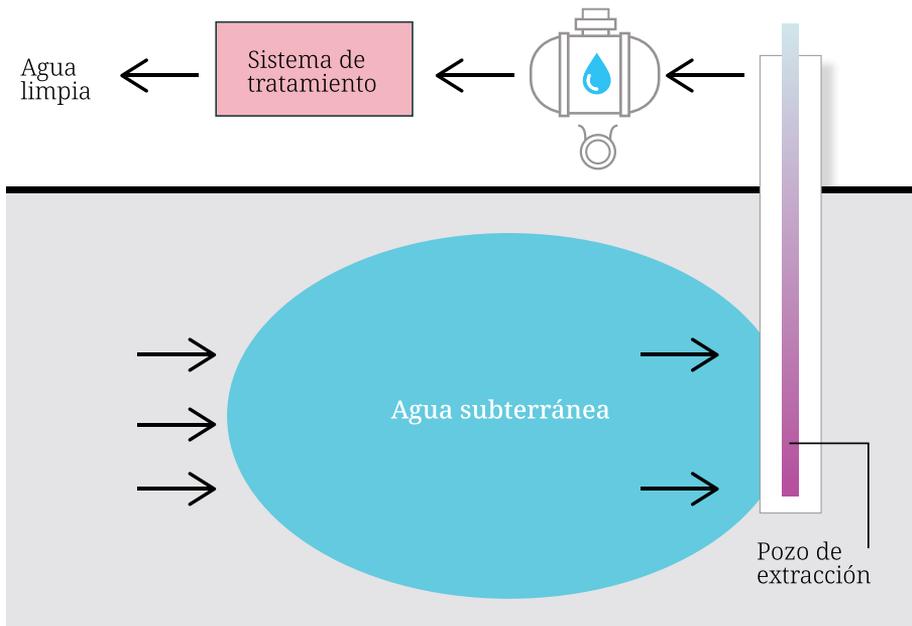


Figura 6.8 Esquema extracción de agua. Fuente: Elaboración propia, 2021

Tabla 6.10 Ventajas y desventajas en la extracción de agua como tratamiento de suelos

Ventajas	Desventajas
Recuperación del nivel freático por infiltración del agua extraída.	Pérdida de eficacia en terrenos fracturados o suelos poco permeables.
La eficacia del tratamiento se incrementa para suelos permeables con niveles freáticos de gran profundidad	Recuperación del agua para consumo humano deficiente.
	Consumo energético elevado.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Extracción de aire

- * Objetivo del proceso: descontaminar el suelo mediante la extracción de contaminantes absorbidos en las partículas de suelos no saturados.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: la extracción de contaminantes absorbidos en las partículas de suelo no saturado se lleva a cabo mediante la volatilización o evaporación por medio de pozos de extracción, y a través de estos se conduce el aire con los contaminantes a la superficie donde serán trasladados por sistemas especializados o también podrían ser degradados por la atmósfera de forma natural (figura 6.9).

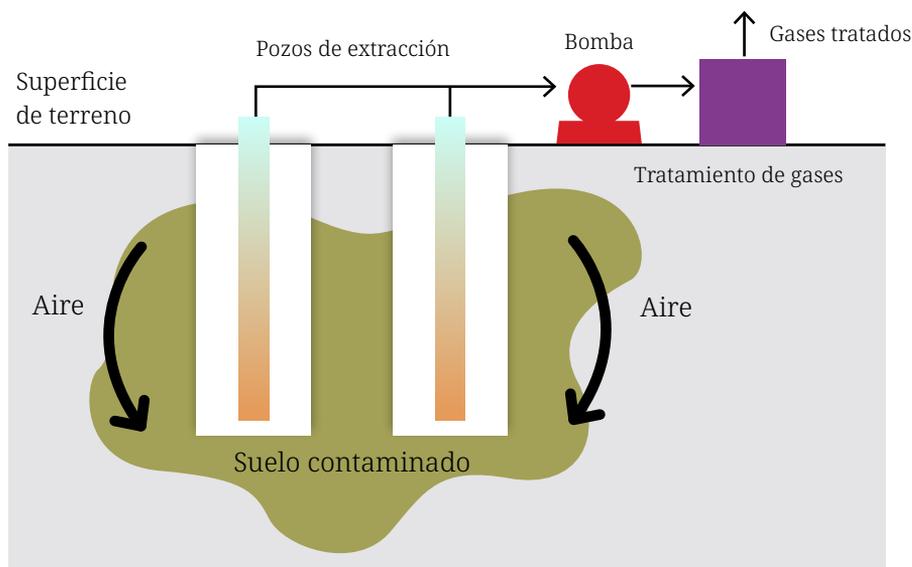


Figura 6.9 Proceso de extracción de aire
Fuente: Ortiz, 2007

Tabla 6.11 Ventajas y desventajas en la extracción de aire

Ventajas	Desventajas
Aumento de la eficacia mediante inyección de aire caliente.	Tiempo de duración.
	Método no adecuado para el tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos pesados derivados del petróleo, PCB, dioxinas o metales

Fuente: Elaboración propia, 2021

Flushing

- * Objetivo del proceso: descontaminación de suelos y aguas subterráneas.
- * Lugar de aplicación: suelos y aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: este tratamiento consiste en sumergir o inundar los suelos contaminados con una solución que transporte los contaminantes a una zona determinada donde puedan ser eliminados. De esta forma, los contaminantes son extraídos del suelo haciéndole pasar agua u otras soluciones acuosas mediante un sistema de inyección o infiltración (figura 6.10).

1

2

3

4

5

6

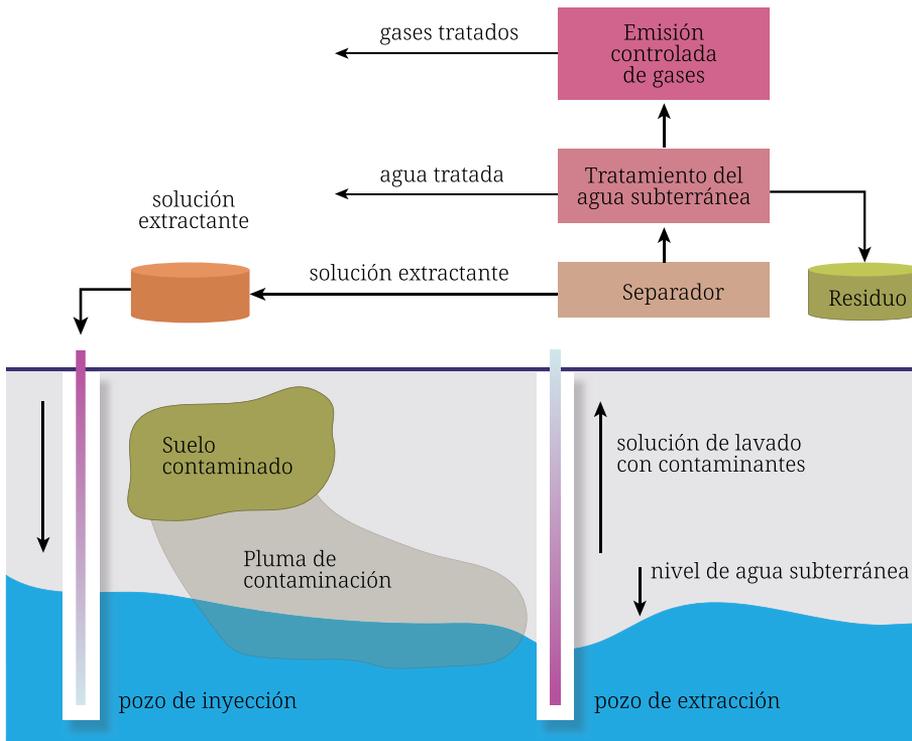


Figura 6.10 Esquema lavado de suelos *in situ*
Fuente: Mulligan et al., 2001

Tabla 6.12 Ventajas y desventajas del flushing

Ventajas	Desventajas
Los costes y el tiempo son moderados, pero están sujetos al tipo de contaminación presente.	Difícil de aplicar en suelos de baja permeabilidad o ricos en elementos fino.
	Requiere de un seguimiento estrecho para impedir que los contaminantes migren en otra dirección distinta a la deseada.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Inyección de aire comprimido / Air sparging

- * Objetivo del proceso: descontaminar los suelos y las aguas subterráneas separando los contaminantes disueltos en el agua gracias a la inyección de aire comprimido *in situ* a través de pozos.
- * Lugar de aplicación: suelos y aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: el inyectar aire comprimido en las aguas contaminadas logra volatilizar los contaminantes que se encuentran disueltos en el agua, lo cual provoca que se desplacen en forma de vapor hacia la zona no saturada para posteriormente ser extraídos y depurados en la superficie mediante filtros de carbón activado (figura 6.11).

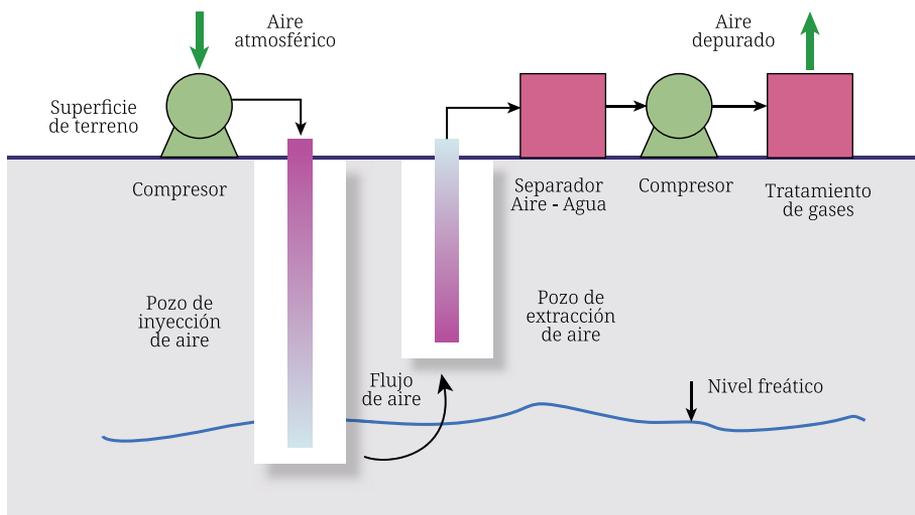


Figura 6.11 Proceso inyección de aire comprimido
Fuente: Ortiz, 2007

Tabla 6.13 Ventajas y desventajas de la inyección de aire comprimido

Ventajas	Desventajas
No producen polvos tóxicos durante el proceso.	Elevado consumo energético
Se pueden tratar grandes cantidades de suelo.	Dispersión de contaminantes a otras zonas del subsuelo
No altera el área alrededor de la contaminación.	Tiempos largos de tratamiento.
	No se puede aplicar en suelos muy estratificados y arcillosos.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Inyección de solidificación/solidificación /estabilización

- * Objetivo del proceso: la contención de los contaminantes mediante la mezcla de suelos y aditivos fluidificantes.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ* y *ex situ*.
- * Descripción del proceso: se encapsularán los contaminantes gracias a la mezcla lograda entre los suelos y los aditivos solidificantes agregados, formando así un material sólido que los contendrá (figura 6.12).

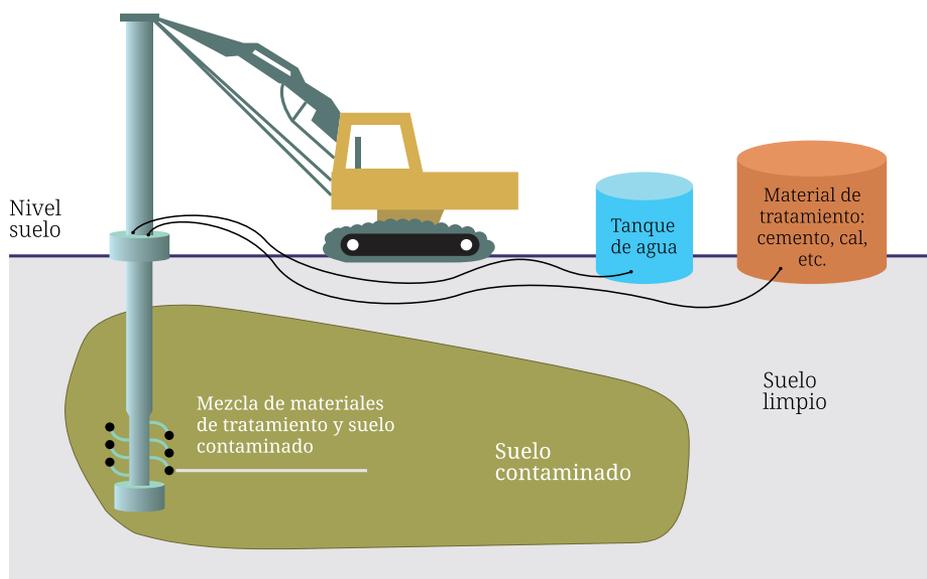


Figura 6.12 Esquema inyección de solidificación
Fuente: Candia, 2015

Tabla 6.14 Ventajas y desventajas en la inyección de solidificación

Ventajas	Desventajas
Se puede completar en un periodo de tiempo relativamente corto.	No destruye los contaminantes.
Se puede realizar <i>in situ</i> o <i>ex situ</i> .	Puede ser difícil predecir su comportamiento a largo plazo.
El equipo del proceso deja poca huella.	Aumento de volumen.
Las propiedades estructurales de los suelos pueden ser mejoradas por el tratamiento.	Puede requerir un mantenimiento a largo plazo de los sistemas de protección o monitoreo.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Tabla 6.15 Ventajas y desventajas del lavado de suelos

Ventajas	Desventajas
Bajos costos.	Se requiere excavar y manipular el suelo.
Efectivo para tratar suelos arenosos o muy permeables.	Altas cantidades de materia orgánica dificultan el proceso de separación.
Disminuye la cantidad de material contaminado.	No es eficiente para tratar mezclas complejas.
Son sistemas cerrados, en donde se pueden controlar las condiciones del sistemas y las emisiones al ambiente.	Requiere de grandes cantidades de agua.
	Los contaminantes deben ser solubles.

Fuente: Van Deuren *et al.*, 2002

Oxidación UV

- * Objetivo del proceso: la destrucción de contaminantes mediante la adición de compuestos de oxígeno.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *ex situ*.
- * Descripción del proceso: este tratamiento de oxidación UV se lleva a cabo en un reactor, donde la oxidación de los contaminantes se produce por contacto directo con los oxidantes, por fotólisis ultravioleta y a través de la acción en conjunto de la luz ultravioleta y ozono (figura 6.14).

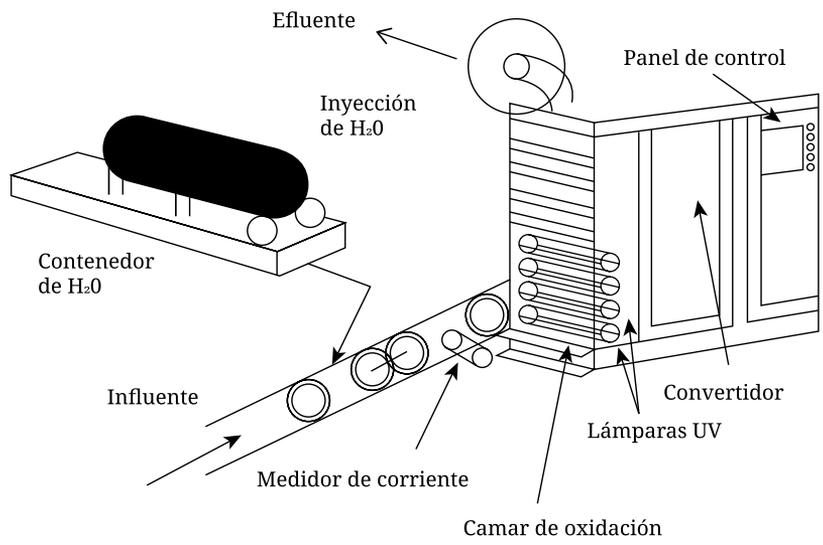


Figura 6.14 Esquema de oxidación UV
 Fuente: Elaboración propia, 2021

Tabla 6.16 Ventajas y desventajas de la oxidación UV

Ventajas	Desventajas
Aumento en costos e ingeniería para equipos	Menor tiempo de tratamiento
Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante	Más seguro en lo que concierne a uniformidad del tratamiento

Fuente: Elaboración propia, 2021

Pozos de recirculación

- * Objetivo del proceso: separar contaminantes orgánicos volátiles presentes en aguas subterráneas en forma de vapor.
- * Lugar de aplicación: suelos y aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: se crearán celdas por las cuales circulará el agua subterránea en el interior y los alrededores del pozo. Posteriormente, al inyectar aire a presión en el pozo, el agua ascenderá y disminuirá su densidad de esta forma, lo que favorece la volatilización de los compuestos orgánicos que serán captados en la parte superior del pozo y volverá a circular hacia abajo por gravedad. El aire contaminado será extraído por medio de bombas de vacío y será tratado en la superficie por filtros de carbón activado (figura 6.15).

Figura 6.15 Esquema pozo de regulación

Fuente: Candia, 2015

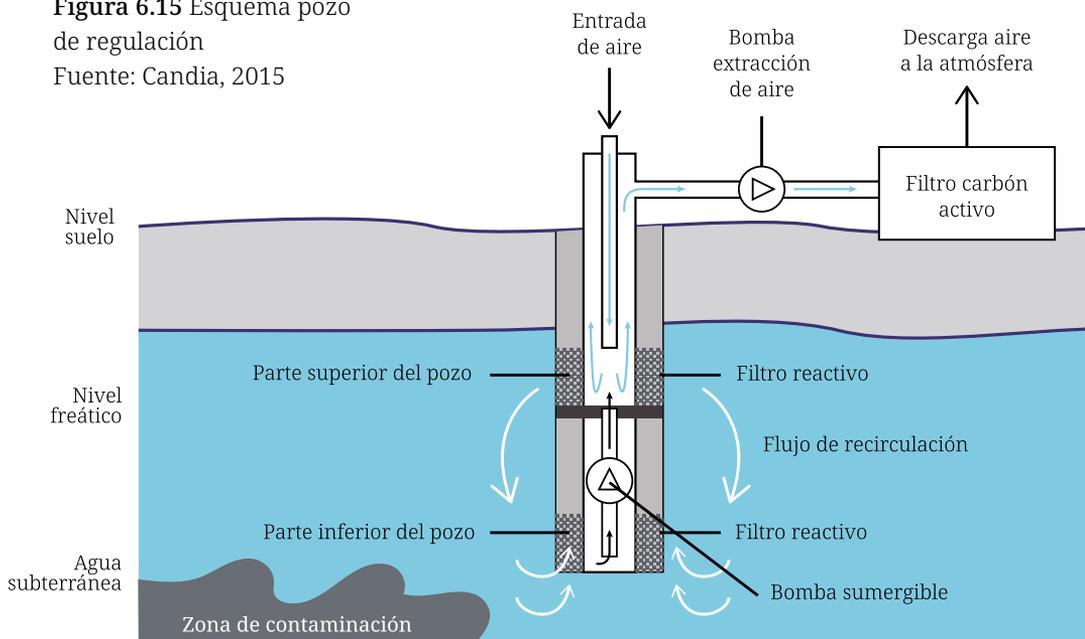


Tabla 6.17 Ventajas y desventajas de los pozos de recirculación

Ventajas	Desventajas
Costos bajos.	El sistema puede estar sujeto a obstrucción por la infiltración de precipitados que contengan componentes oxidados
Vapores contaminados generados son más fácilmente retirados y tratados en superficie.	Acuíferos poco profundos pueden limitar la efectividad del proceso.
Funcionamiento continuo.	Si el sistema no está bien diseñado o construido, la pluma de contaminación puede extenderse más allá del radio de influencia o los pozos se pueden obstruir.
Los sistemas pueden ser modificados para hacer circular el agua subterránea en dirección ascendente o descendente, con el fin de aprovechar las propiedades físicas de los contaminantes tratados	La actividad biológica o precipitación química pueden limitar la permeabilidad del filtro.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Sellado de suelos

- * Objetivo del proceso: contención.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.

- * Descripción del proceso: se altera la estructura del suelo contaminado para así poder disminuir la permeabilidad y de esta forma controlar el avance de la contaminación en profundidad (figura 6.16).

Tabla 6.18 Ventajas y desventajas del sellado de suelos

Ventajas	Desventajas
Puede ser sometido a altas temperaturas para posteriormente ser vitrificado y sellarse de manera permanente	Se pueden producir grietas por las cuales el contaminante puede salir
	De cierta forma se elimina el suelo

Fuente: Elaboración propia, 2021

6.4 Tecnologías de tratamiento térmico

Las *tecnologías de tratamiento térmico*, de igual manera que las fisicoquímicas, son utilizadas para la separación, inmovilización o destrucción de los contaminantes. Algunas de las posibles desventajas son los costos de tratamiento o disposición final para los residuos, estos pueden ser sólidos y en ocasiones líquidos en el caso de las técnicas destructivas, o residuos gaseosos en las técnicas de separación. Como ventaja, los procesos térmicos ofrecen tiempos rápidos de limpieza, pero estos se elevan debido al costo de la energía utilizada y equipos específicos. La mayoría de las tecnologías térmicas pueden aplicarse *in situ* y *ex situ*.

Calentamiento por conducción térmica

- * Objetivo del proceso: descontaminación. Trata de la evaporación y destrucción de los contaminantes presentes en el suelo.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: mediante la aplicación de calor utilizando pozos de acero o mantas que cubren la superficie del suelo, las mantas generalmente son utilizadas para contaminación poco profunda (figura 6.15). Las ventajas y desventajas se muestran en la tabla 6.19.

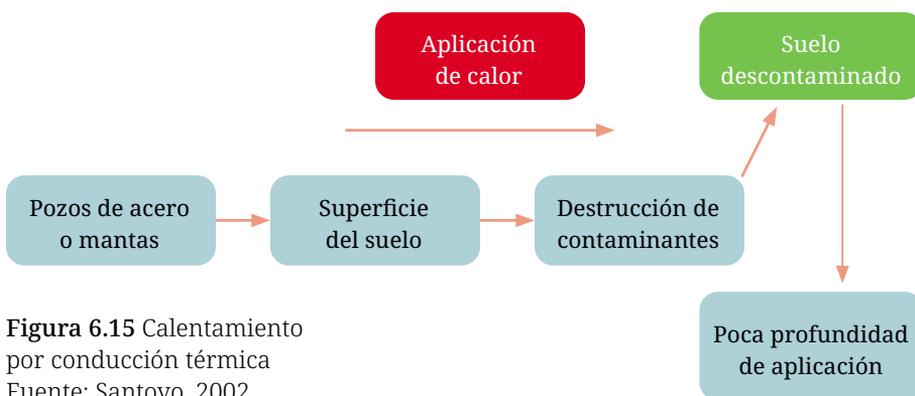


Figura 6.15 Calentamiento por conducción térmica
Fuente: Santoyo, 2002

Tabla 6.19 Ventajas y desventajas del calentamiento por conducción térmica

Ventajas	Desventajas
Tratamiento uniforme y fácilmente monitoreado por la poca profundidad del suelo contaminado.	El contenido alto de humedad, el alto contenido húmico o los suelos compactos inhiben la volatilización.
	Se requiere una gran cantidad de espacio.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Calentamiento por radiofrecuencia

- * Objetivo del proceso: descontaminación. Trata de la evaporación de contaminantes usando energía electromagnética para calentar el suelo, lo cual favorece la extracción de vapores.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: esta técnica aplica a un volumen de suelo limitado, usando filas de electrodos verticales enterrados en el suelo, pudiendo elevar la temperatura hasta 300 °C (véase figura 6.16). Las ventajas y desventajas se muestran en la tabla 6.20.

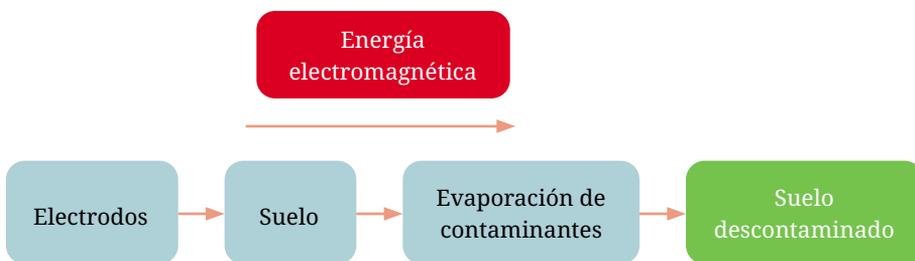


Figura 6.16 Calentamiento por radiofrecuencia
Fuente: Santoyo, 2002

Tabla 6.20 Ventajas y desventajas del calentamiento por radiofrecuencia

Ventajas	Desventajas
El vapor extraído puede ser entonces ser tratado por una variedad de tecnologías existentes, tales como carbón activado granular o incineración.	El suelo que es impermeable o tiene un alto contenido de humedad tiene una permeabilidad reducida del aire, requiriendo más entrada de energía para aumentar el vacío y la temperatura.

Ventajas	Desventajas
	El suelo con permeabilidades altamente variables podría dar como resultado una distribución desigual del flujo de gas en las regiones contaminadas.
	Las emisiones de aire podrían necesitar ser reguladas para eliminar posibles daños a la población y el ambiente. El tratamiento de aire y el permiso podría incrementar el costo del proyecto.
	Los residuos líquidos y el carbón activado podrían requerir tratamiento posterior.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Calentamiento por resistencia eléctrica

- * Objetivo del proceso: descontaminación. Trata de la volatilización y movilización de contaminantes presentes en el suelo.
- * Lugar de aplicación: suelos y aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: Mediante arreglos de electrodos instalados en torno a un electrodo neutro central se crea un flujo de corriente hacia ese punto. La resistencia eléctrica fluye a través del suelo, lo cual genera temperaturas por sobre los 100 °C y convierte en vapor el agua del suelo para evaporar así los químicos nocivos (véase figura 6.17). Las ventajas y desventajas se presentan en la tabla 6.21.

Figura 6.17 Calentamiento por resistencia eléctrica
Fuente: Santoyo, 2002

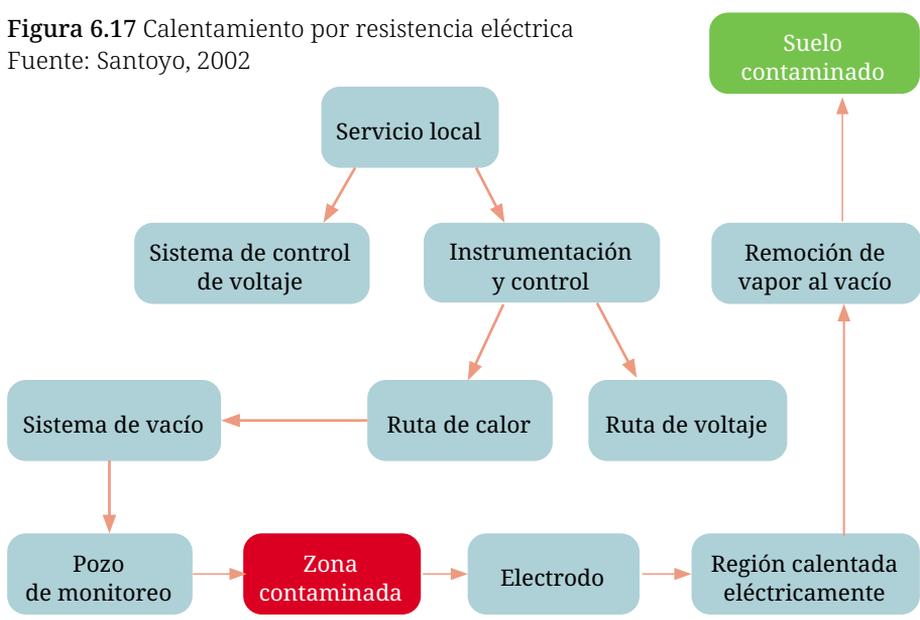


Tabla 6.21 Ventajas y desventajas del calentamiento por resistencia eléctrica

Ventajas	Desventajas
Usa corriente eléctrica para calentar suelos menos permeables como suelos arcillosos y sedimentos.	Los suelos con un alto contenido orgánico tienen una capacidad de sorción alta de COV (compuestos orgánicos volátiles), lo cual da como resultado velocidades de remoción reducidas.
	Los escombros u otros objetos grandes en el medio pueden causar problemas de operación.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Desorción térmica

- * Objetivo del proceso: descontaminación. Trata de la volatilización de contaminantes presentes en suelos extraídos desde su lugar de origen y tratados en equipos, típicamente conocidos como desorbedores. Los desorbedores son un tipo de horno rotatorio formado por un cilindro revestido en el interior con material refractario y ligeramente inclinado que, al rotar, actúa como cámara de combustión a temperaturas de hasta 980 °C. Está equipado con una cámara de poscombustión y un sistema de tratamiento de gases.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *ex situ*.
- * Descripción del proceso: es un proceso de separación física no destructivo que requiere que los vapores generados reciban un tratamiento posterior. La desorción térmica puede implementarse por inyección a presión de aire caliente, inyección de vapor o por calentamiento del suelo por radiofrecuencia (véase figura 6.18). Las ventajas y desventajas se muestran en la tabla 6.22.

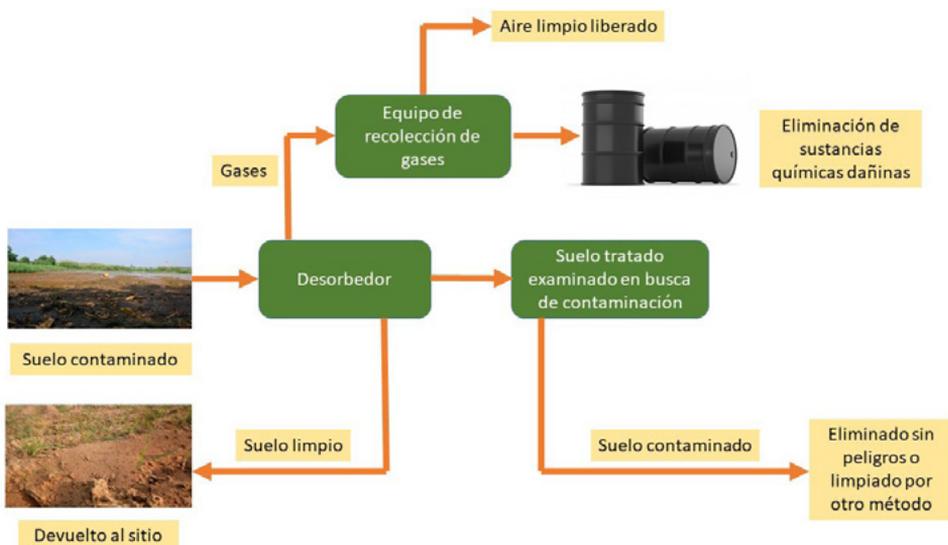


Figura 6.18 Esquema de desorción térmica

Fuente: USEPA, 1996

Tabla 6.22 Ventajas y desventajas del calentamiento por desorción térmica

Ventajas	Desventajas
Durante la desorción térmica de baja temperatura, el suelo retiene sus propiedades físicas y sus componentes orgánicos, lo que hace posible que pueda conservar su capacidad para soportar futura actividad biológica.	La deshidratación puede ser necesaria para lograr el nivel del contenido de humedad adecuado.
	Alimentaciones altamente abrasivas pueden potencialmente dañar las unidades de proceso.
	Los metales pesados en la alimentación pueden producir un residuo del suelo tratado que requiere estabilización.
	Los suelos arcillosos y sedimentos y el alto contenido húmico aumentan el tiempo de reacción como resultado de la unión de los contaminantes.

Fuente: Elaboración propia, 2021

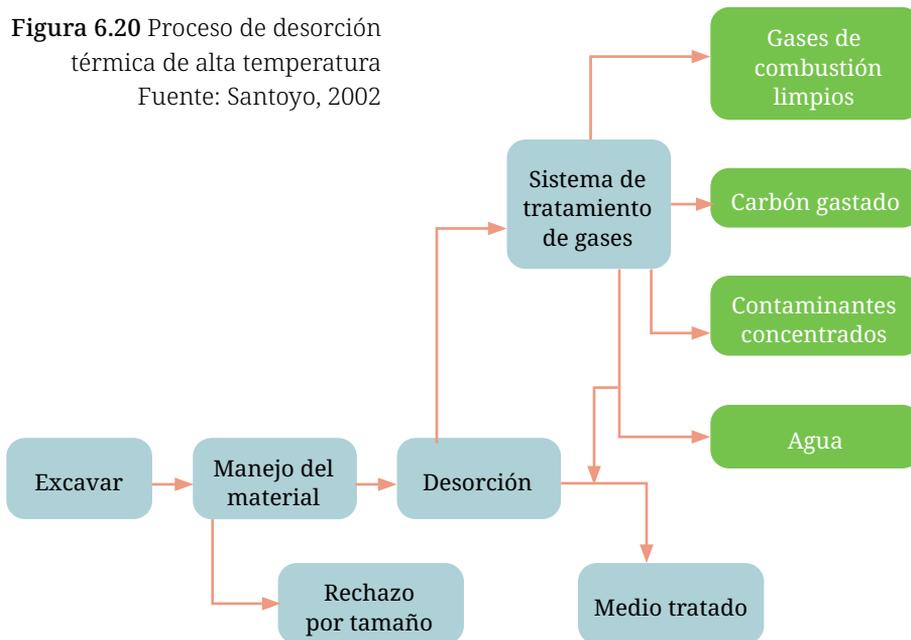
Basado en la temperatura de operación del equipo, el proceso puede ser categorizado en:

1. Desorción térmica de baja temperatura (de 90 a 320 °C), véase la figura 6.19.
2. Desorción térmica de alta temperatura (de 320 a 560°C), véase la figura 6.20.

Figura 6.19 Proceso de desorción térmica de baja temperatura
Fuente: Santoyo, 2002



Figura 6.20 Proceso de desorción térmica de alta temperatura
Fuente: Santoyo, 2002



1

2

3

4

5

6

Incineración

- * Objetivo del proceso: descontaminación. Trata de la oxidación y volatilización de compuestos orgánicos contaminantes presentes en el suelo (véase figura 6.21).

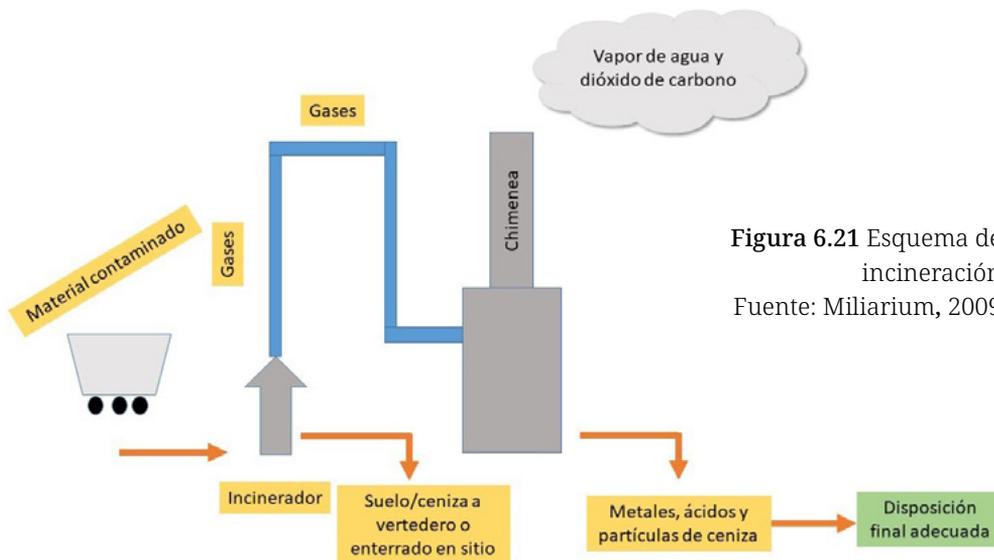


Figura 6.21 Esquema de incineración
Fuente: Miliarium, 2009

- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *ex situ*.
- * Descripción del proceso: Mediante la exposición a altas temperaturas de operación, entre los 870 a los 1200 °C en presencia de oxígeno (véase figura 6.22). Las ventajas y desventajas se muestran en la tabla 6.23.

Este proceso genera gases y cenizas residuales (orgánicos e inorgánicos) que deben ser depurados.

Figura 6.22 Diagrama de flujo de la técnica de incineración

Fuente: Santoyo, 2002

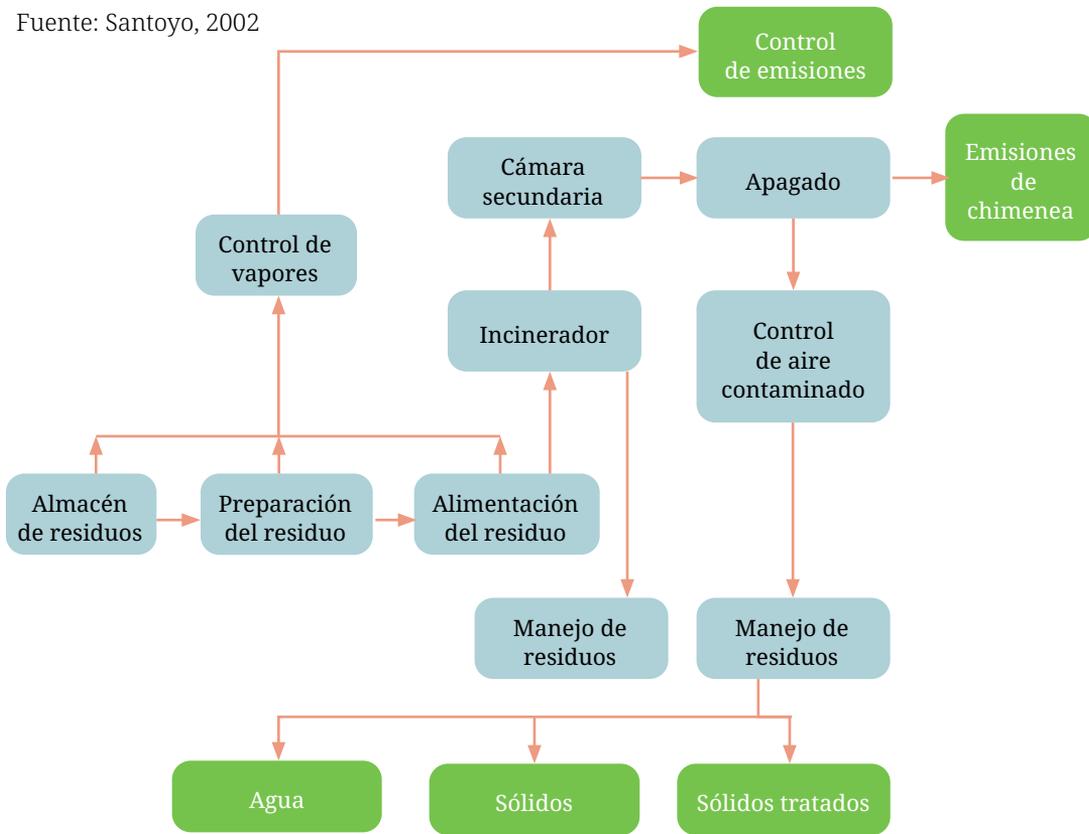


Tabla 6.23 Ventajas y desventajas del proceso de incineración

Ventajas	Desventajas
<p>La eficiencia de destrucción y de remoción para incineradores operados adecuadamente excede el 99.99% del requerimiento para residuos peligrosos y pueden ser operadas para encontrar el 99.9999% del requerimiento para PCB (bifenilos policlorados) y dioxinas.</p>	<p>Solo es permitido un incinerador fuera del sitio para quemar PCB y dioxinas.</p>

1

2

3

4

5

6

Ventajas	Desventajas
	El tamaño de la alimentación y los requerimientos del manejo de materiales pueden impactar en la aplicabilidad o el costo en sitios específicos.
	Los metales pesados pueden producir en el fondo ceniza que requiere estabilización.
	Los metales pueden reaccionar con otros elementos en la corriente de alimentación, tal como cloro o azufre, lo que forma más compuestos volátiles y tóxicos que las especies originales.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Inyección de agua caliente

- * Objetivo del proceso: descontaminación. Este método de tratamiento elimina la materia orgánica del subsuelo al reemplazar el aire y el agua, lo que obliga a que los contaminantes se descarguen hacia arriba y hacia afuera; además, se recolectan y tratan los contaminantes en el sitio, para lo cual se inyecta agua a una temperatura de 95 a 110 °C.
- * Lugar de aplicación: suelos y aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.

- * Descripción del proceso: el equipo necesario para inyectar agua caliente incluye un generador de vapor o una caldera móvil conectada a una fuente de agua, una entrada de aire o una bomba de elevación neumática para eliminar los contaminantes líquidos, un ventilador para mover los contaminantes vaporizados y un ventilador para convertir el vapor en líquido. Intercambiadores de calor, refrigeradores y condensadores para convertir vapor en fluidos tratando los contaminantes extraídos.

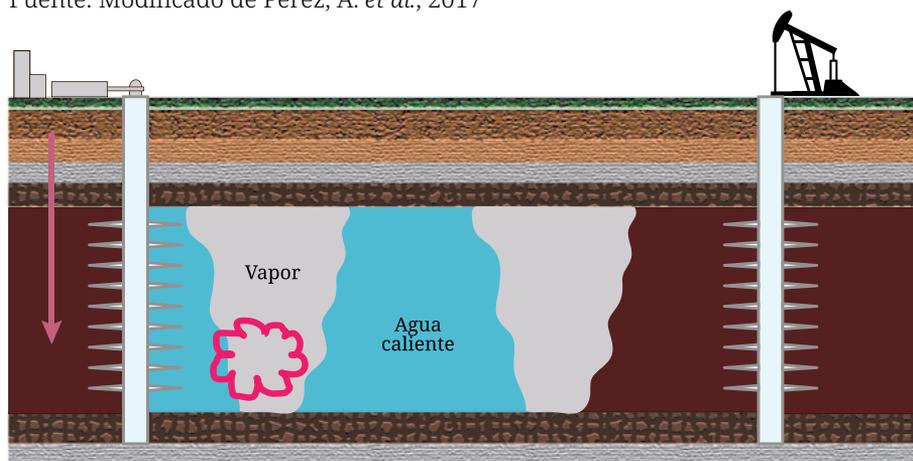
Tabla 6.24 Ventajas y desventajas del proceso de inyección de agua caliente

Ventajas	Desventajas
Es un tratamiento muy común.	No es el más eficiente.
Fácil instalación	No es aplicable en cualquier terreno.
	Limitaciones como su elevado coste.
	Tiempo de ejecución.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 6.23 Esquema de un proceso de inyección de agua alternada con vapor (WASP)

Fuente: Modificado de Pérez, A. *et al.*, 2017



Inyección de aire caliente

- * Objetivo del proceso: descontaminación. Se inyecta aire a alta temperatura para volatilizar los contaminantes presentes en el suelo. El vapor generado se recupera a través de un pozo de recolección y se procesa en la superficie.
- * Lugar de aplicación: suelos y sedimentos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: se utiliza aire caliente para extraer los vapores nocivos del suelo contaminado. El aire inyectado en el suelo se puede calentar a 100 °C para acelerar el proceso. El suelo cálido ayuda a que los productos químicos se evaporen más rápido.

Tabla 6.25 Ventajas y desventajas del proceso de inyección de aire caliente

Ventajas	Desventajas
Desempeño probado.	Menor efectividad en suelos con poca permeabilidad.
Tiempo de tratamiento corto (6 meses-1 año)	Puede requerir tratamientos costosos para tratar vapores extraídos.
Puede combinarse con otra tecnología.	Solo se puede tratar zona no saturada.
Desempeño probado.	

1

2

3

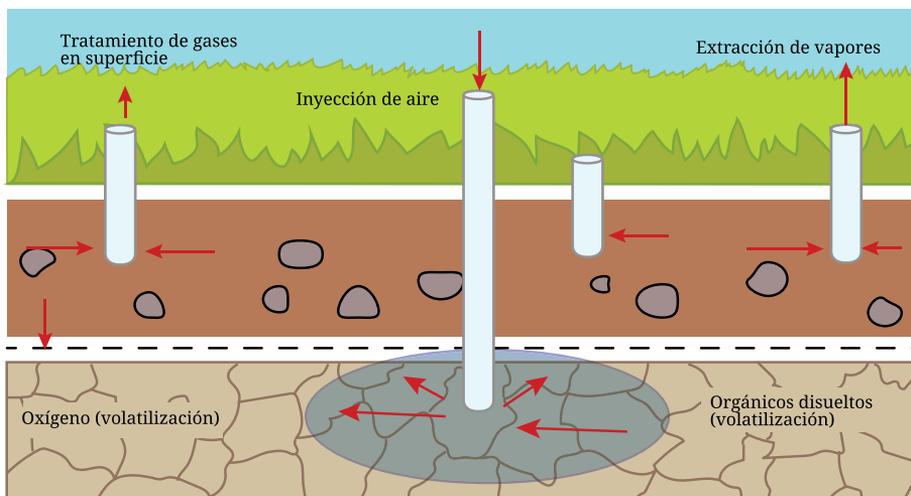
4

5

6

Figura 6.24 Esquema de inyección de aire

Fuente: Anónimo, 2021



Inyección de vapor

- * Objetivo del proceso: movilización, evaporación o destrucción de contaminantes presentes en el suelo y aguas subterráneas mediante inyección de vapor de agua.
- * Lugar de aplicación: suelos y aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: la inyección de vapor de agua a través de los pozos y la extracción, permitirá la desorción de los contaminantes del suelo contaminado, son arrastrados por el vapor, recuperados y tratados, lo que reduce la concentración de componentes volátiles derivados del petróleo, en el suelo de la zona insaturada, existe una tecnología de remediación *in situ*. En esta tecnología, se aplica un sistema de extracción a la matriz del suelo para crear un gradiente de presión que provoca el movimiento de los vapores hacia los de extracción.

1

2

3

4

5

6

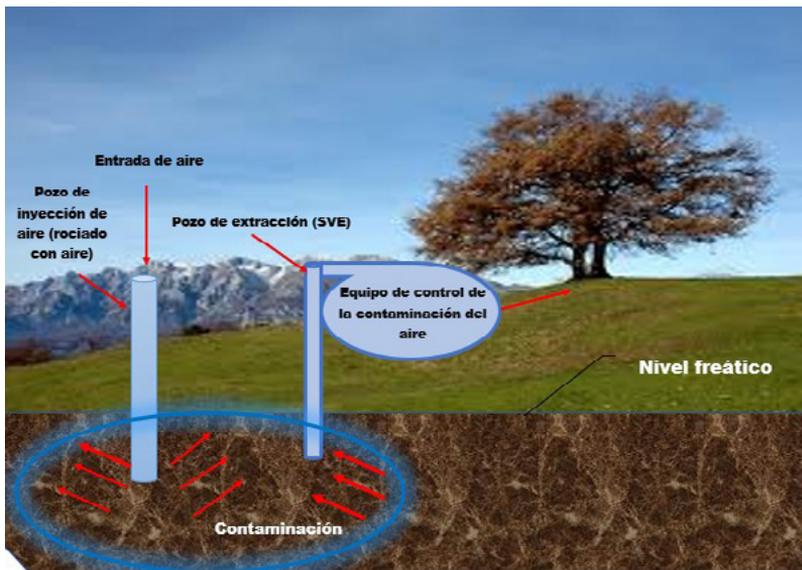
Tabla 6.26 Ventajas y desventajas del proceso de inyección de vapor

Ventajas	Desventajas
Desempeño probado.	Se deben tratar los vapores efluentes.
Tecnología comercial.	La movilidad de los vapores puede contaminar otros sitios.
Poco mantenimiento.	
Costo competitivo.	
Tiempo de rehabilitación de medio a largo plazo.	

Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 6.25 Esquema de extracción de vapores

Fuente: USEPA, 1996



Pirólisis

- * Objetivo del proceso: descomposición química inducida por calor de compuestos orgánicos en ausencia de oxígeno. El proceso se realiza normalmente a presión y a temperaturas de funcionamiento superiores a 430 °C. Los hornos y equipos utilizados para la pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero deben estar a una temperatura más baja en ausencia de aire.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *ex situ*.
- * Descripción del proceso: la pirólisis es la descomposición química de materiales orgánicos inducida por calor en ausencia de oxígeno. El proceso normalmente se efectúa a presión y temperaturas de operación mayores a 430 °C. Los hornos y equipos empleados para la pirólisis pueden ser físicamente similares a los utilizados para la incineración, pero se deben operar a temperaturas menores en ausencia de aire. Los productos primarios formados del pirólisis de materiales orgánicos en diferentes proporciones, de acuerdo con las condiciones del proceso, son:
 - a) Gases residuales (metano, etano y pequeñas cantidades de hidrocarburos ligeros)
 - b) Condensados acuosos y aceitosos.
 - c) Residuos sólidos carbonosos (coque) que pueden usarse como combustible.

Tabla 6.27 Ventajas y desventajas del proceso de pirolisis

Ventajas	Desventajas
Transforma contaminantes orgánicos peligrosos en componentes gaseosos.	La tecnología requiere secado del suelo para lograr un contenido de humedad bajo (<1%).

1

2

3

4

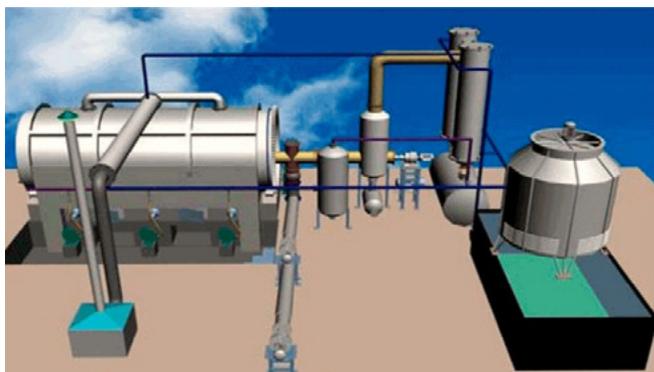
5

6

Ventajas	Desventajas
Eliminación de COV (compuestos orgánicos volátiles), COSV (composiciones orgánicas semivolátiles), BPC (bifenilos policlorados), HAP (poli-carburos aromáticos policíclicos), dioxinas y pesticidas	La alimentación altamente abrasiva puede dañar potencialmente las unidades de proceso.
Productos finales de reducido volumen.	El contenido de humedad alto incrementa los costos de tratamiento.
	El medio tratado que contiene metales pesados puede requerir estabilización.
	Destrucción total del suelo.
	La incompleta combustión puede producir compuestos extremadamente tóxicos.
	Procedimiento no válido para contaminantes inorgánicos.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 6.26 Pirólisis. Fuente: CEUPE, 2019



Vitrificación

- * Objetivo del proceso: descontaminación. Calentamiento del suelo contaminado a alta temperatura (1600 a 2000 °C) para conseguir su fusión y transformación en un material vítreo estable, reduciendo así la movilidad de los contaminantes inorgánicos y la destrucción de los contaminantes orgánicos por reacciones de oxidación o pirolisis. La vitrificación da lugar a gases tóxicos que deben ser recogidos y tratados antes de ser emitidos a la atmósfera.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ* y *ex situ*.
- * Descripción del proceso: el proceso de vitrificación puede llevarse a cabo *in situ* o *ex situ*, y utiliza una corriente eléctrica para fundir los suelos contaminados con temperaturas que van de 1 600 a 2 000 °C. Es un proceso que estabiliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos y destruye los orgánicos. El producto de la vitrificación es un material cristalino químicamente estable que no produce lixiviados, en el cual quedan incorporados los compuestos inorgánicos. Durante el proceso, las altas temperaturas provocan la destrucción o remoción de los materiales orgánicos.

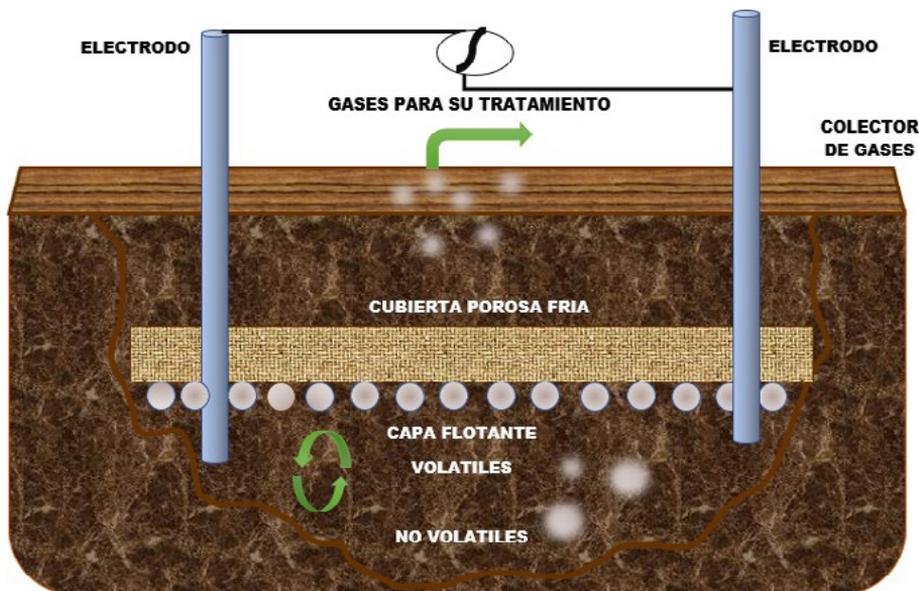
Tabla 6.28 Ventajas y desventajas del proceso de vitrificación

Ventajas	Desventajas
Inmoviliza la mayoría de los contaminantes inorgánicos.	Se generan gases tóxicos, que deben ser correctamente recolectados y tratados antes de proceder a su emisión a la atmósfera.
Técnica de remediación de suelos muy efectiva.	Grandes inversiones.

Ventajas	Desventajas
El proceso también puede destruir o remover COV y COSV y otros compuestos orgánicos como dioxinas y BPC.	Produce la destrucción del suelo, normalmente, limitando su reutilización.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Figura 6.27 Esquema de vitrificación
Fuente: Córdova *et al.*, 2008



Ventajas y desventajas de los tratamientos térmicos ex situ e in situ

La mayor ventaja de los tratamientos *ex situ* es que requieren periodos de tiempo más cortos en comparación con las técnicas *in situ* y se tiene una mayor certeza en la uniformidad del tratamiento debido a la homo-

1

2

3

4

5

6

genización, tamizado y mezclado constante del suelo. Sin embargo, los tratamientos *ex situ* requieren la excavación del suelo, con lo cual hay un incremento en el costo, debido al requerimiento de equipo para excavación y transportación, además del material que se necesita para proteger a los trabajadores de la exposición a los contaminantes.

6.5. Tecnologías de tratamiento biológico

Los *tratamientos biológicos* consisten en el uso de organismos vivos, principalmente plantas, hongos, bacterias, entre otros; estos contribuyen a la degradación, transformación e incluso remoción de compuestos orgánicos tóxicos, dependiendo de las actividades catabólicas de los organismos y de su capacidad natural para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía. Por tal motivo, la selección de este tratamiento está condicionada al tipo de compuesto y, por supuesto, a las especies microbianas.

Entre los procesos más empleados, se encuentran los de sorción, óxido-reducción e intercambio iónico, pero también se puede recurrir a reacciones de acomplejamiento y quelación para inmovilizar los metales presentes.

Las tecnologías biológicas pueden emplear organismos propios del sitio contaminado (nativos) o de otros sitios (exógenos), pueden realizarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno), entre otras condiciones características.

A continuación, se explican los métodos de tratamiento biológico.

Bioaumentación

- * Objetivo del proceso: es un tratamiento biológico en donde se dota al área afectada, de microorganismos degradadores o transformadores de cierto tipo de contaminantes, su proceso se puede apreciar en la figura 6.28.

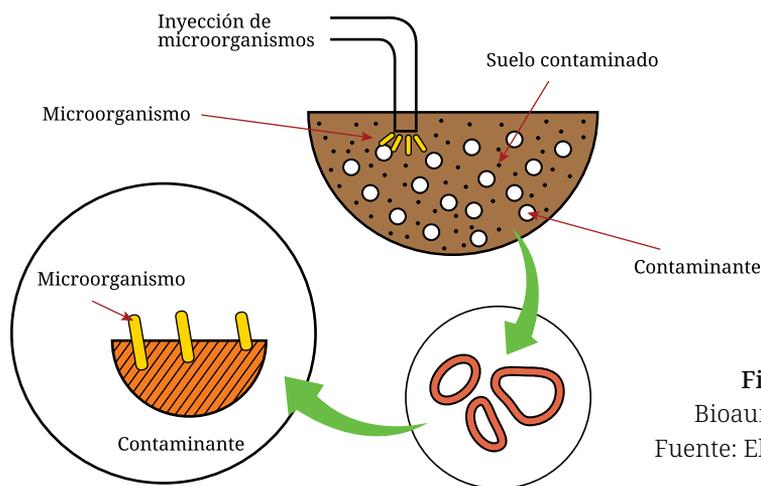


Figura 6.28.
Bioaumentación
Fuente: Elaboración propia

- * Lugar de aplicación: suele usarse en suelos contaminados por herbicidas, insecticidas o fungicidas, además de servir en terrenos con altos niveles de metales contaminantes. Este proceso es aplicable en suelos y aguas subterráneas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: por su simplicidad, este tratamiento suele efectuarse cuando se requiere un tratamiento urgente. Del mismo modo, la bioaumentación se utiliza cuando la microflora del sitio es insuficiente para la reducción que se desea.

Este tipo de tratamiento aplicado en hidrocarburos presenta un gran rendimiento de remoción. Sin embargo, los cambios de humedad y la dis-

1

2

3

4

5

6

minución de nutrientes y carbono propician las condiciones para que se originen otro tipo de bacterias, lo que a su vez disminuye el rendimiento en la degradación del contaminante. Aunado a esto, existen parámetros que, de no ser controlados, afectan de manera significativa a los microorganismos encargados de la eliminación de contaminantes, como la temperatura, el pH o la salinidad.

Debido a su complejidad, este tipo de tratamiento requiere de una caracterización previa del suelo, para conocer si las condiciones que se presentan son las adecuadas para hacer uso de la bioaumentación.

Algunas de las ventajas y desventajas de este tipo de tratamiento biológico se presentan en la tabla 6.29.

Tabla 6.29. Ventajas y desventajas de la bioaumentación

Ventajas	Desventajas
Degradan un rango amplio de contaminantes orgánicos	Su efectividad de degradación se ve afectada si las condiciones de humedad son adversas
Su operación y aplicación no requiere de mucha inversión económica	Este tipo de tratamiento puede llegar a durar meses o años
Es funcional en suelos y en aguas subterráneas	

Fuente: Elaboración propia, 2021

Biodegradación asistida

- * Objetivo del proceso: la biodegradación asistida o bioestimulación es un tratamiento que consiste en la adición de nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo, principalmente) a través de medios acuosos con el objetivo de estimular el crecimiento de los microorganismos degradadores y, de ese modo, aumentar la velocidad de eliminación de contaminantes.
- * Lugar de aplicación: en suelos y aguas subterráneas. Su aplicación se ha visto favorecida en compuestos orgánicos volátiles, en plaguicidas y gasolinas.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: su fundamento central se basa en las necesidades nutricionales de los microorganismos, las cuales no distan de su composición celular que es 67% en peso seco solo de carbono nitrógeno y fósforo (Coochson, 1995).

En su lugar de aplicación, existe una relación particular entre los microorganismos, los nutrientes y la concentración de oxígeno, de tal modo que la efectividad de la biodegradación asistida depende del equilibrio adecuado entre estas tres variables. Caso contrario, llevaría a un crecimiento insuficiente de microorganismos (USEPA, 1999). Del mismo modo, otra de las limitantes para el uso de esta técnica son los suelos arcillosos, pues entorpecen la transferencia de oxígeno en el suelo contaminado. En la figura 6.29, se puede observar el proceso de esta tecnología de descontaminación de suelo.

1

2

3

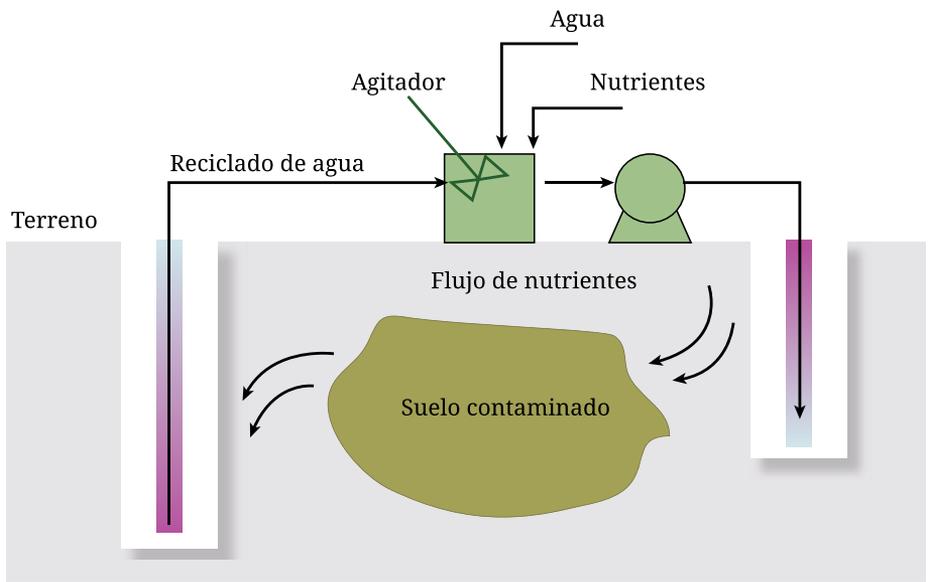
4

5

6

Figura 6.29. Sistema de biodegradación asistida

Fuente: Ortiz, Sanz, Dorado y Villar, s. f.



En la tabla 6.30, se enlistan algunas de las ventajas y desventajas de este proceso.

Tabla 6.30. Ventajas y desventajas de la biodegradación asistida

Ventajas	Desventajas
Si se cuenta con los recursos económicos, se puede incrementar su eficiencia y velocidad.	El proceso de descontaminación puede tomar años.
Se trata de un tratamiento que no afecta al medio ambiente.	El tratamiento requiere una inversión alta. Es un tratamiento caro.
	Se requiere estudios preliminares para saber si se puede usar este tipo de tratamiento.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Biotransformación de metales

- * Objetivo del proceso: se trata de una tecnología que utiliza el proceso de transformación e inmovilización llevado a cabo por los microorganismos, esto mediante el lavado, transformaciones redox, metilación y consecuente volatilización.
- * Lugar de aplicación: suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: los procesos de transformación ayudan a la eliminación de metales insolubles y minerales, entre otros. En cuanto a la inmovilización, el proceso de biosorción y acumulación intracelular, y precipitación son fundamentales para su desarrollo. La biosorción se trata de los mecanismos de intercambio iónico para la acumulación de metales y para su posterior cambio a material biológico; los parámetros que más influyen en su eficacia son la temperatura, el pH y la concentración de metales.

El mejoramiento de este tipo de tratamiento de descontaminación está ligado al desarrollo de la ingeniería genética y a su adaptación a problemas contaminantes a nivel global. En la figura 6.30 se puede observar un proceso de biotransformación de metales.

1

2

3

4

5

6

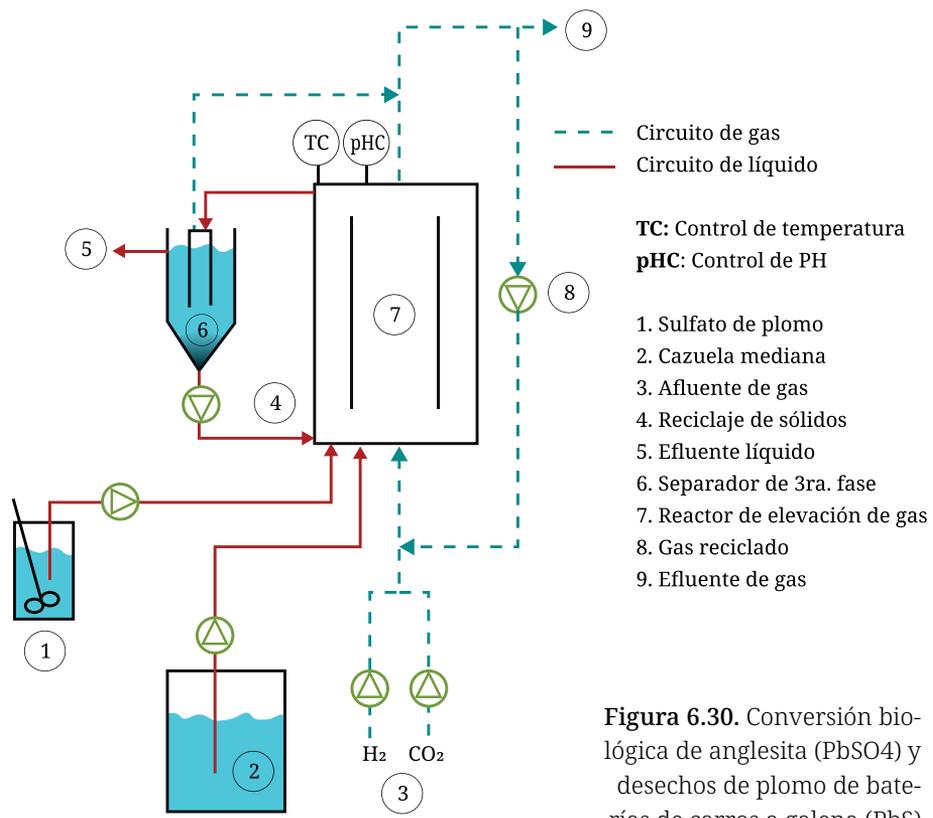


Figura 6.30. Conversión biológica de anglesita ($PbSO_4$) y desechos de plomo de baterías de carros a galena (PbS)
 Fuente: Weijma, 2002

En la tabla 6.31, se presentan las ventajas y desventajas del bioventeo.

Tabla 6.31. Ventajas y desventajas de la biotransformación de metales

Ventajas	Desventajas
Su tecnología puede remediar el suelo para uso de fines agrícolas.	Si las condiciones de temperatura, pH y concentración no son óptimas, el método pierde eficacia.

Ventajas	Desventajas
Ayuda a la descontaminación de una variedad cada vez más grande de metales.	
En el mundo, la contaminación por metales es grande, por lo que puede ser una tecnología que a futuro cobre mayor importancia.	

Fuente: Elaboración propia, 2021

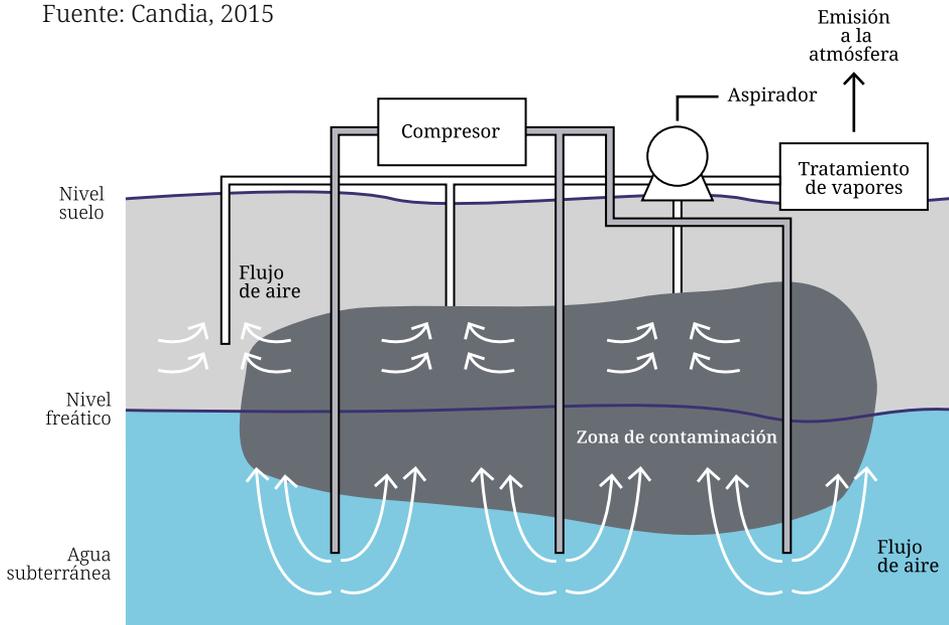
Biouenteo

- * Objetivo del proceso: es un tratamiento de biorrecuperación, el cual consiste en la inyección a presión de oxígeno en la zona no saturada del suelo mediante pozos de inyección para favorecer la degradación de los hidrocarburos, debido a la volatilización y el aumento de la oxigenación del suelo, lo cual contribuye a la biodegradación aeróbica.
- * Lugar de aplicación: se aplica en suelos y aguas subterráneas que estén contaminadas por hidrocarburos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: se debe determinar el tipo de suelo del área contaminada, el suelo debe tener bajo contenido de arcilla y debe ser lo más homogéneo posible, el pH debe estar entre 6 y 8, la humedad debe ser del 12 al 30% en peso y temperatura entre 0 y 40 °C. Una vez que se cumple con lo anterior el proceso que se realiza es el mostrado en la figura 6.31 y, por otra parte, se determina los siguientes elementos de diseño:

- a) Radio de influencia
- b) Caudal de extracción
- c) Concentración inicial y final de vapor
- d) Volumen de suelo que se tratará
- e) Suministro de nutrientes
- f) Pozos de inyección
- g) Equipo de tratamiento de vapor

Figura 6.31. Esquema de bioventeo

Fuente: Candia, 2015



En la tabla 6.32, se presentan las ventajas y desventajas del bioventeo.

Tabla 6.32. Ventajas y desventajas del bioventeo

Ventajas	Desventajas
Tratamiento altamente efectivo para contaminantes de baja volatilidad.	No se puede aplicar en todos los suelos, tales como los que tienen baja permeabilidad y alto contenido en arcilla.
Equipo viable y de fácil instalación.	Se requiere de estudios preliminares para saber si el tratamiento es viable y obtención de permisos para la elaboración de pozos.
Costos bajos a comparación de otros tratamientos.	Debido a las altas concentraciones se puede presentar pérdida de nutrientes en el subsuelo.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Compostaje

- * Objetivo del proceso: es un tratamiento que consta de una descomposición biológica aerobia y la estabilización de sustratos orgánicos, con el fin de transformar los residuos orgánicos degradables en un material o producto final estable, libre de patógenos, llamado compost y que pueda ser utilizado en el suelo como enmienda orgánica.
- * Lugar de aplicación: Se aplica en suelos y sedimentos contaminados con contaminantes orgánicos.
- * Tipo de aplicación: *ex situ*.
- * Descripción del proceso: Para iniciar este proceso se debe tomar en cuenta ciertos factores, lo más importantes son:
 - a) Temperatura. Se considera óptima en un intervalo de 35-55 °C
 - b) Humedad. Se debe alcanzar unos niveles óptimos del 40-60%

- c) pH
- d) Oxígeno
- e) Relación C/N de 25-35
- f) Población microbiana

Una vez que se cumple con los factores previamente mencionados, el proceso a seguir es el representado en la figura 6.32. Existen varios sistemas para realizar este tratamiento, algunos de los más comunes son:

- a) Pilas
- b) Túneles de compostaje
- c) Tambores de compostaje
- d) Estabilización en trincheras

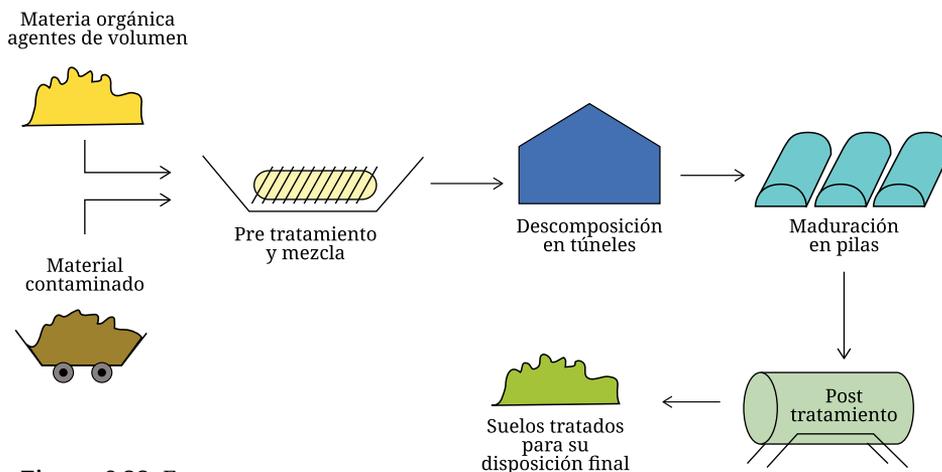


Figura 6.32. Esquema de compostaje

Fuente: Candía, 2015

En la tabla 6.33, se muestran las ventajas y desventajas del compostaje.

Tabla 6.33. Ventajas y desventajas del compostaje

Ventajas	Desventajas
Facilidad de manejo y obtención de compost.	Inversión inicial.
Disminución de malos olores y riesgos de contaminación.	Se debe disponer de un espacio amplio, superficie impermeabilizada y un sistema para los lixiviados.
Reducción del peso y volumen.	Climatología adecuada.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Fitorremediación

- * Objetivo del proceso: es un proceso en el cual se hace uso de ciertas plantas con el fin de remover, transferir, estabilizar, concentrar o destruir contaminantes.
- * Lugar de aplicación: puede ser utilizado en suelos, lodos y sedimentos contaminados por un contaminante de tipo orgánico e inorgánico.
- * Tipo de aplicación: *in situ/ex situ*.
- * Descripción del proceso: es un proceso que consta de varios mecanismos que incluyen los siguientes procesos mostrados en la figura 6.33:
 - a) Rizodegradación: es llevado a cabo en el suelo que rodea las raíces, suministra nutrientes de forma natural para los microorganismos y logra mejorar la actividad biológica.
 - b) Fitoextracción: las raíces captan los contaminantes y estos contaminantes son transportados y acumulados en los tallos y hojas.
 - c) Fitoestabilización: las plantas limitan la disponibilidad de los contaminantes en el suelo, debido a que en las raíces se producen compuestos químicos que absorben y forman complejos con los contaminantes para lograr así inmovilizarlos.

d) Fitodegradación: es el metabolismo de los contaminantes que se encuentran dentro de los tejidos de la planta, esto se produce mediante enzimas que estimulan la degradación.

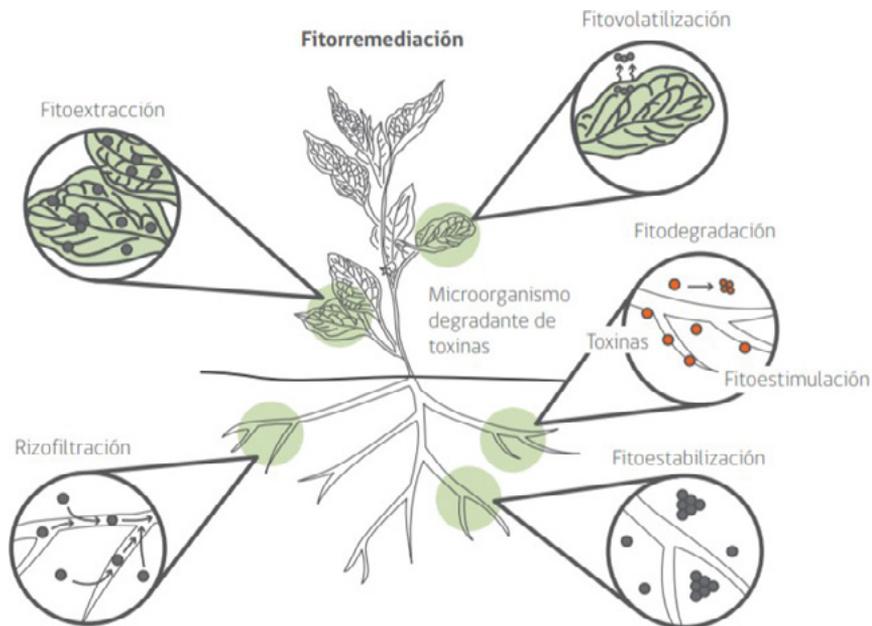


Figura 6.33. Esquema de fitorremediación
Fuente: Candia, 2015

En la tabla 6.34, se presentan las ventajas y desventajas de la fitorremediación.

Tabla 6.34. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
Puede realizarse <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> .	La profundidad por tratar depende del tipo de planta usado.

Ventajas	Desventajas
Se puede aplicar a una gran variedad de contaminantes.	Puede ser estacional en función de la ubicación.
Bajo costo.	El producto puede movilizarse o bioacumularse en animales.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Landfarming o biolabranza

- * Objetivo del proceso: es la reducción de la concentración de hidrocarburos en suelos, aprovechando su capacidad para ser biodegradados.
- * Lugar de aplicación: se aplica en suelos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: los suelos son sometidos a un tratamiento biológico con microorganismos que metabolizan los hidrocarburos, convirtiéndolos en agua y anhídrido carbónico. Para la realización de esta técnica, se tienen que controlar las siguientes condiciones:
 - a) Contenido en humedad: la humedad óptima del sistema de tratamiento debe variar entre el 50-60% debido a que valores superiores o inferiores pueden reducir la actividad bacteriana.
 - b) Aireación: el suelo es volteado por métodos mecánicos con una frecuencia de tres veces por semana.
 - c) pH: se tiene que mantener un pH de entre 6 y 8.
 - d) Nutrientes: se añaden nitratos y fosfatos según la necesidad del terreno y los microorganismos.
 - e) Temperatura: el rango de temperatura óptimo para la biorremediación es entre 37°C a 50°C.

El proceso de biolabranza lleva a cabo los siguientes pasos:

- 1) Construcción de la celda de tratamiento.
- 2) Transferencia de los suelos que se tratarán a la celda de tratamiento.
- 3) Preparación de una solución acuosa con los insumos.
- 4) Aplicar agua periódicamente y continuar con la aireación de la mezcla.
- 5) Realizar un muestreo en laboratorios acreditados.
- 6) Se concluye al lograr los límites permisibles de contaminantes, según lo dicte la normatividad vigente.
- 7) El suelo ya tratado se depositará en el sitio del que fue extraído.

En la figura 6.34 se observa el esquema del proceso biolabranza.

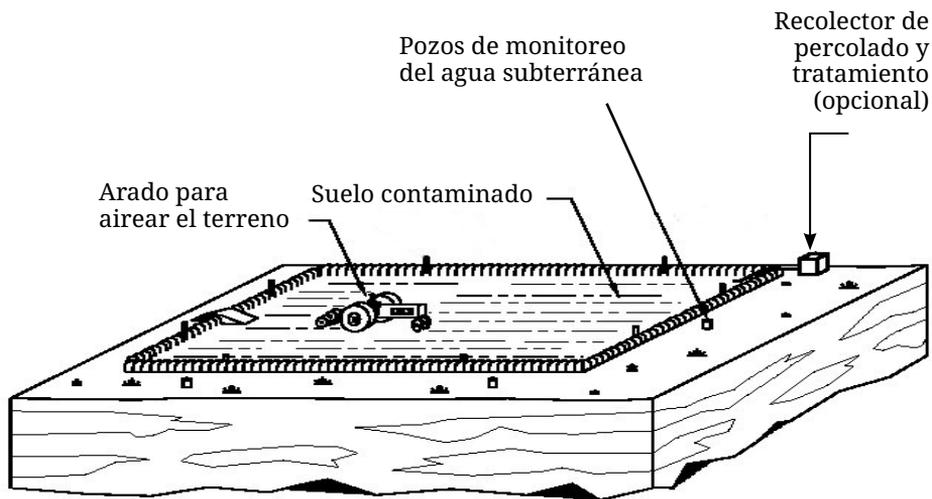


Figura 6.34. Esquema del procedimiento de biolabranza

Fuente: Wikipedia, 2017

En la tabla 6.35, se describen las principales ventajas y desventajas de este proceso.

Tabla 6.35. Ventajas y desventajas del proceso de biolabranza (elaboración propia)

Ventajas	Desventajas
Requiere poca maquinaria, la aplicación es seguro y no aporta efectos adversos al medio ambiente.	Presenta una serie de limitaciones relacionadas con la actividad biológica.
Costos de operación bajos en comparación con otras tecnologías.	Es difícil predecir el tiempo requerido para un proceso adecuado.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Lodos biológicos

- * Objetivo del proceso: la reducción de la concentración de hidrocarburos en suelos, aprovechando su capacidad para ser biodegradados.
- * Lugar de aplicación: en suelos. Es útil para eliminar los hidrocarburos y los plaguicidas.
- * Tipo de aplicación: *ex situ*.
- * Descripción del proceso: se trata de otro tratamiento de biodegradación, el suelo es excavado y tamizado para eliminar elementos gruesos, posteriormente es mezclado con agua y aditivos en un biorreactor controlado. La mezcla de lodo mantiene a los sólidos en suspensión y a los microorganismos biodegradadores en contacto con los contaminantes. En estos biorreactores se controlan parámetros

que pueden limitar el crecimiento microbiano, los nutrientes, el oxígeno, temperatura, pH y la humedad.

Las tasas de biodegradación dentro de estos biorreactores son rápidas, incluso pueden llegar a ser menores de un mes. Asimismo, se añade oxígeno, nutrientes y ácidos para controlar el pH. Una vez terminado el proceso, el lodo es desecado mediante filtros, lechos secantes o centrifugas y el suelo tratado es eliminado.

Este sistema ha resultado eficaz para recuperar suelos contaminados con hidrocarburos del petróleo, petroquímicos y plaguicidas entre otros.

El uso de biorreactores es más favorecido que los tratamientos biológicos *in situ* para suelos heterogéneos o cuando se requieran eliminaciones más rápidas de los contaminantes.

La figura 6.35 muestra el esquema del proceso de tratamiento de biorreactores por lodos activados

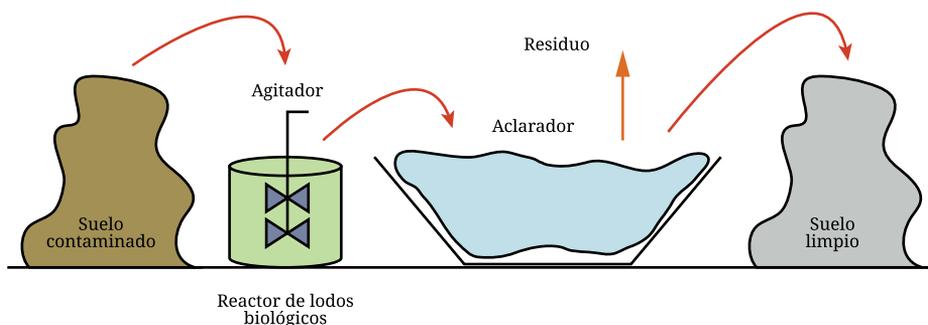


Figura 6.35. Esquema del sistema de biorrecuperación mediante lodos biológicos

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency

En la tabla 6.36, se presentan algunas ventajas y desventajas de este proceso.

Tabla 6.36. Ventajas y desventajas de los lodos biológicos

Ventajas	Desventajas
Tasas de biodegradación rápidas.	Es exclusivamente para tratamientos <i>ex situ</i> .
Eficaz para recuperar suelos contaminados con hidrocarburos, plaguicidas y petroquímicos.	Costos de operación más elevados.

Fuente: Elaboración propia, 2021

Pilas biológicas

- * Objetivo del proceso: Es la reducción de la concentración de hidrocarburos en suelos, aprovechando su capacidad para ser biodegradados.
- * Lugar de aplicación: se aplica en suelos. Es útil para eliminar los hidrocarburos.
- * Tipo de aplicación: *in situ*.
- * Descripción del proceso: este tratamiento es utilizado especialmente para degradar compuestos del petróleo. Para realizarlo, los suelos contaminados son apilados en montones de pilas sucesivas y se estimula la actividad microbiana aerobia por medio de aireación, nutrientes y agua, obteniendo la degradación por medio de la respiración microbiana.

Las biopilas son muy similares al proceso *landfarming*, solo que en este caso la aireación no se obtiene arando el terreno, sino forzando la circulación de aire mediante su inyección o extracción mediante conductos perforados dentro de la pila de material. El periodo de tratamiento es corto, va desde unas cuantas semanas hasta un par de

meses; además de que también se puede usar para compuestos orgánicos volátiles halogenados y no halogenados y pesticidas.

La correcta aplicación de esta técnica está controlada por las propiedades físicas de los suelos contaminados, de forma que los suelos más permeables permitirán una mejor circulación del aire, el agua y los nutrientes.

A continuación, la figura 6.36 muestra un esquema del proceso de biopilas.

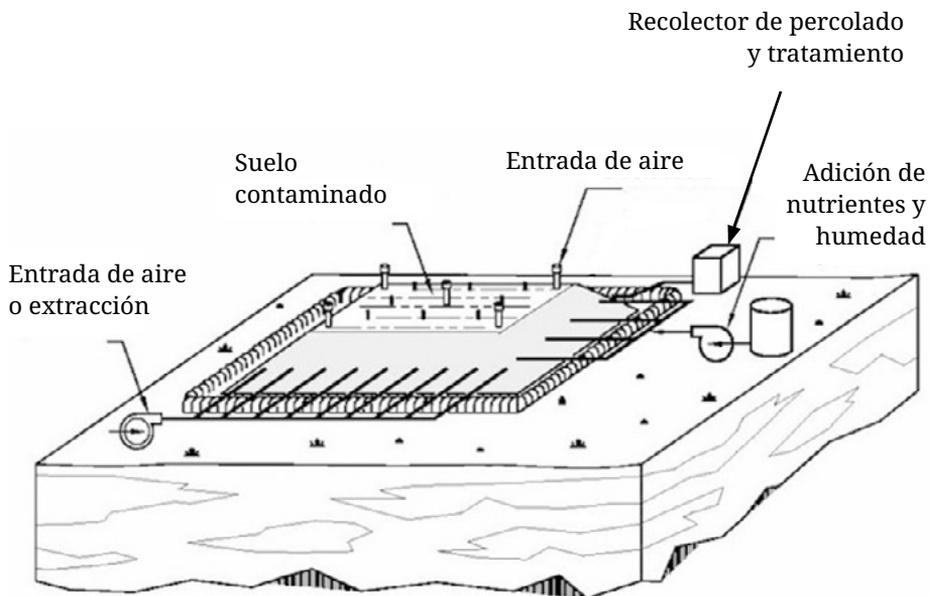


Figura 6.36. Esquema de proceso de biopilas

Fuente: Wikipedia, 2017

Por último, en la tabla 6.37 se destacan algunas de las ventajas y desventajas de este proceso.

Tabla 6.37. Ventajas y desventajas de las biopilas

Ventajas	Desventajas
Periodos de tratamiento cortos	Es únicamente para degradar compuestos del petróleo.
El tratamiento se lleva en el sitio y tiene costos de operación bajos	Se necesita de suelos muy permeables para una buena circulación de aire, agua y nutrientes.

Fuente: Elaboración propia, 2021

■ Referencias bibliográficas

- 10 conceptos básicos para la contabilidad de Pymes. (2019, 9 octubre). *El Periódico de Aragón*. Recuperado el 21 de marzo de 2021, de <https://www.elperiodicodearagon.com/el-mostrador/2022/07/14/10-conceptos-basicos-contabilidad-pymes-46598347.html>
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. (s. f.). EPA. Recuperado 27 de abril de 2021, de <https://www.epa.gov/>
- Azman, S. (2018). Tecnologías físico-químicas en la regeneración de suelos contaminados. 11/05/2021, de Dep. Ingeniería Química y Ambiental Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- Candia, J. (Ed.). (2015). *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. Fundación Chile. Recuperado de <https://fch.cl/publicacion/manual-de-tecnologias-de-remediacion-de-sitios-contaminados/>
- Comisión Nacional de Derechos Humanos. (s.f.). Legislación Nacional (Leyes, Reglamentos y Normas). https://desca.cndh.org.mx/normatividad/Legislacion_Nacional#
- Das, B. M. (2014). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4ª). Cengage Learning.
- Dorroso, C. (s. f.). *Descontaminación de suelos*.
- Fuentes de contaminación en México. (2007, 15 noviembre). INECC. Recuperado el 7 de marzo de 2021, de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/372/fuentes.html>
- Ibáñez, J. (2012, 16 julio). Contaminación radiactiva de los suelos: Un tercio de Japón afectados tras el Accidente de Fukushima (la tragedia continua). Un Universo invisible bajo nuestros pies. Madrid Blogs. <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2012/07/16/140853>

1

2

3

4

5

6

- Isidro, A. (2017). *"Tecnologías para la rehabilitación de un sitio contaminado con 1,2-dicloroetano"*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Iturbe, R. (1998). Técnicas de rehabilitación de suelos y acuíferos. *Series del Instituto de Ingeniería* 612. ISSN 0185-2345.
- Juárez, E. (1974). *Mecánica de suelos I. Fundamentos de la mecánica de suelos* (3ª.) Limusa.
- Legislación Ambiental en México. (2017, 18 septiembre). GlobalSTD. Recuperado el 21 de marzo de 2021 de <https://www.globalstd.com/blog/legislacion-ambiental-en-mexico/>
- Legorreta, H. (2016). *Comportamiento de suelos. Exploración y muestreo*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería., UNAM.
- Legorreta, H. (2016). *Comportamiento de suelos. Flujo de agua*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Lobo, P. (2013). *Evaluación de la sostenibilidad de las diferentes técnicas de recuperación de suelos contaminados*. (Trabajo de Máster). Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/18166>
- Mulligan, C., Yong, R. & Gibbs, B. (2001). Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review. *Engineering Geology*, 2001. Vol. 60, 371-380.
- Navarro, S. y Bessi, R. *Con licencia para contaminar*. Recuperado de: <https://www.connectas.org/especiales/minera-cuzcatlan-con-licencia-para-contaminar/>
- Ortiz, I.; Sanz, J.; Dorado, M. y Villar, S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. Madrid. Universidad de Alcalá.
- Pérez, A., Ariza, M., Rodríguez, A., y Muñoz, S. (2017). Técnicas para el mejoramiento de la inyección continua de vapor. *Revista Fuentes: El reventón energético*, 15 (1), 109-117. DOI: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/6507/6720>

1

2

3

4

5

6

- Pérez, N. (2005). *Eficiencia de la bioestimulación, bioaumentación y adición de composta vegetal para remediar un suelo contaminado con diésel* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Pescados con olor a diésel y cultivos destruidos, denuncian indígenas de la Amazonía en Ecuador. Vistazo. Recuperado de: <https://www.vistazo.com/seccion/ambiente/pescados-con-olor-diesel-y-cultivos-destruidos-denuncian-indigenas-de-la-amazonia>
- Pino, N., Carvajal, S., Gallo, A., y Peñuela, G. (2012). Comparación entre bioestimulación y bioaumentación para la recuperación de suelos contaminados con diésel. Medellín, Colombia.
- Ramírez, R. (1997). *Propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos*. Produmedios. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/387532>
- Raquel Alonso, Riesco. (2012, mayo). Proyecto de recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos (No. 1). Universidad Autónoma de Barcelona.
https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_206396/PFC_RaquelAlonsoRiesco.pdf
- Rioja, R., y Florero, E. Landfarming-Biorremediación. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/erlanandresfloreromaldonado/landfarming-biorremediacion>
- Rodríguez, N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Roma, FAO.
- Santoyo, L. (2002). *Manual para un curso de técnicas de restauración de suelos contaminados*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sanzano, A. (2019). *Los factores de formación de suelo* (Vol. 1). Facultad de Agronomía y Zootécnica UNT.
- Silva, S. y Correa, F. (20019, 7 junio). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*. 12 (23), 13-14. Recuperado el 21 de marzo

1

2

3

4

5

6

de 2021, de <https://revistas.udem.edu.co/index.php/economico/article/view/1156>

Sistemas de tratamiento. (s. f.). Miteco. Recuperado 5 de mayo de 2021, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-compostaje.aspx>

Takai, A.; Inui, T. y Katsumi, T. (2016, abril). Evaluating the hydraulic barrier performance of soil-bentonite cutoff walls using the piezocone penetration test. *Soils and Foundations*, Vol. 56, Issue 2, 277-290.

U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *Bioventing Principles and Practices*. Vol. 1. Bibliogov.

Una sustancia altamente tóxica y cancerígena se derrama por una carretera en EE. UU. RT. Recuperado de: <https://actualidad.rt.com/actualidad/337613-derramarse-carretera-eeuu-sustancia-toxica>

Volke, T. y Velasco, J. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos contaminados*. México, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).

1

2

3

4

5

6



Apuntes de suelos contaminados
se publicó en el repositorio de la Facultad
de Ingeniería en noviembre de 2022.
Primera edición provisional electrónica de un
ejemplar (5 MB) en formato PDF.

El cuidado de la edición y diseño estuvieron
a cargo de la Unidad de Apoyo Editorial de la
Facultad de Ingeniería. Las familias tipográficas
utilizadas son Bree y Noto Serif con
sus respectivas variantes.