



Junta de Andalucía

Consejería de Sostenibilidad,  
Medio Ambiente y Economía Azul

# **GUÍA DE LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS**

Versión 0. Octubre 2022





# Índice

<b>1. Antecedentes.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Introducción.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Suelos Contaminados.....</b>	<b>10</b>
3.1 Definición.....	10
3.2 Causas.....	10
3.3 Posibles Efectos.....	11
3.4 Evaluación inicial de estado del suelo.....	12
<b>4. Legislación.....</b>	<b>13</b>
<b>5. Recuperación de suelos contaminados.....</b>	<b>14</b>
5.1 Tipos de tratamiento.....	14
5.2 Técnicas aplicables.....	16
<b>6. Aspectos técnicos en la descontaminación de suelos.....</b>	<b>17</b>
6.1 Tipo de suelo.....	18
6.2 Naturaleza del contaminante.....	19
6.3 Interacción entre el contaminante y el suelo.....	20
6.4 Generación de residuos.....	21
6.5 Eficacia a largo plazo.....	22
6.6 Sensibilidad del entorno.....	23
<b>7. Tipos de contaminantes.....</b>	<b>24</b>
7.1 Contaminantes inorgánicos.....	24
7.2 Contaminantes orgánicos.....	25
<b>8. Técnicas de tratamiento.....</b>	<b>29</b>
<b>8.1 Técnicas fisicoquímicas.....</b>	<b>29</b>
8.1.1 Extracción de vapores del subsuelo.....	29
8.1.2 Extracción multifase.....	31
8.1.3 Lavado - enjuague (soil flushing).....	32
8.1.4 Lavado de suelos (soil washing).....	35
8.1.5 Oxidación/reducción química.....	37
8.1.5.1 Oxidación.....	37
8.1.5.2 Reducción.....	39
8.1.6 Electromigración.....	40
<b>8.2 Técnicas Biológicas.....</b>	<b>42</b>
8.2.1 Atenuación Natural Monitorizada.....	42
8.2.2 Bioventilación (Bioventing).....	44
8.2.3 Biosparging.....	46



8.2.4 Biodegradación mejorada.....	47
8.2.5 Fitorremediación.....	48
8.2.6 Landfarming.....	51
8.2.7 Biopilas.....	52
<b>8.3 Técnicas térmicas o termoquímicas.....</b>	<b>55</b>
8.3.1 Desorción térmica.....	55
8.3.2 Incineración.....	57
8.3.3 Pirólisis.....	59
<b>8.4 Técnicas de confinamiento.....</b>	<b>61</b>
8.4.1 Sellado superficial.....	61
8.4.2 Estabilización Fisicoquímica.....	63
8.4.3 Vitrificación.....	64
<b>9. Criterios de selección de las mejores técnicas disponibles.....</b>	<b>65</b>
9.1 Análisis de las MTDS para el tratamiento de COVs no halogenados.....	70
9.2 Análisis de las MTDs para el tratamiento de COVS halogenados.....	72
9.3 Análisis de las MTDs para el tratamiento de COSVs no halogenados.....	74
9.4 Análisis de las MTDs para el tratamiento de COSVs halogenados.....	76
9.5 Análisis de las MTDs para el tratamiento de CONV.....	78
9.6 Análisis de las MTDs para el tratamiento de metales pesados.....	80
9.7 Criterios cualitativos generales de valoración.....	82
<b>10. Bibliografía.....</b>	<b>83</b>



## Índice de Tablas *(enumeradas según epígrafe)*

Tabla 5.1. Diferencias entre tratamientos In Situ y Ex Situ.....	16
Tabla 5.2. Tratamientos y técnicas asociadas.....	16
Tabla 6.1. Clasificación de las técnicas en función de la generación de residuos.....	21
Tabla 7.1. Clasificación de los compuestos recogidos en el Anexo V del R.D. 9/2005.....	26
Tabla 7.2. Aplicaciones de los principales contaminantes clasificados en cada grupo.....	27
Tabla 9.1. Tabla resumen de todas las técnicas de descontaminación abordadas en la <i>Guía</i> .....	67
Tabla 9.2. Valoraciones para cada categoría característica de la técnica.....	82



## Índice de Figuras *(enumeradas según epígrafe)*

Figura 2.1. Esquema de niveles hidrológicos y horizontes que conforman el subsuelo.....	9
Figura 7.1. Tipos de contaminantes.....	24
Figura 8.1. Esquema de Extracción de Vapores del Subsuelo.....	30
Figura 8.2. Esquema de un sistema electromigración.....	41
Figura 8.3. Esquema de Bioventilación.....	45
Figura 8.4. Esquema de Biopilas.....	53
Figura 8.5. Esquema de los tratamientos pirolíticos.....	59
Figura 9.1. Esquema árbol de decisión para los COVs no halogenados.....	71
Figura 9.2. Esquema árbol de decisión para los COVs halogenados.....	73
Figura 9.3. Esquema árbol de decisión para los COSVs no halogenados.....	75
Figura 9.4. Esquema árbol de decisión para los COSVs halogenados.....	77
Figura 9.5. Esquema árbol de decisión para los CONV .....	79
Figura 9.6. Esquema árbol de decisión para Metales pesados.....	81



# 1. Antecedentes

La elaboración de la presente GUÍA DE LAS MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE SUELOS se inscribe dentro del marco de actuaciones del vigente Programa Andaluz de Suelos Contaminados (2018-2023), que se elaboró teniendo en cuenta la Ley 22/2011, de 28 de julio, el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero y el Decreto 18/2015, de 27 de enero, dando cumplimiento de forma específica a lo dispuesto en el artículo 51 de esta última norma.

Los suelos contaminados constituyen un vector ambiental que, por motivos técnicos y económicos, requiere de herramientas de planificación con las que desarrollar los diferentes aspectos relacionados con su tratamiento, de manera paulatina y ordenada.

La capacidad técnica que exige este ámbito del medio ambiente requiere de diversas actuaciones formativas e informativas a los diferentes agentes implicados, tanto públicos como privados, con el objetivo de sensibilizarlos y formarlos en las acciones de prevención y de corrección necesarias para la gestión adecuada de los suelos contaminados.

Por otro lado, los costes que supone, tanto en el ámbito público como privado, la gestión de los suelos contaminados, obligan a establecer criterios de priorización tanto en las actuaciones a realizar como en los suelos en donde llevar a cabo dichas actuaciones, de manera que se puedan alcanzar los objetivos de manera ordenada y coherente, con el fin de proteger el entorno natural y la salud de las personas.

En lo que se refiere a los objetivos a conseguir, el Programa identifica cuatro objetivos prioritarios:

- Promover la prevención de contaminación de los suelos, a través de los instrumentos de intervención administrativa.
- Promover el estudio y recuperación de los suelos contaminados.
- Implantar mecanismos de información, seguimiento y control.
- Potenciar la coordinación y cooperación entre los diferentes agentes implicados.

Estos cuatro objetivos prioritarios se subdividen en doce líneas de actuación, que, a su vez, se desarrollan en veinticuatro medidas concretas y evaluables, que pretenden dar respuesta a los objetivos propuestos.

Así, dentro de este esquema de objetivos, la elaboración de esta Guía como documento reconocido, que identifique las mejores técnicas disponibles para la descontaminación de suelos en función de diferentes parámetros técnicos y condiciones del entorno, se incluye en la medida doce, perteneciente a la línea de actuación séptima, de impulso a la optimización de la gestión o recuperación de suelos contaminados.



## 2. Introducción

El suelo es uno de los elementos clave para el mantenimiento de la vida en nuestro planeta. Constituye la capa superior de la tierra y está compuesto por minerales, materia orgánica, aire, agua y una gran variedad de organismos. Alberga una cuarta parte de la biodiversidad del planeta, conviviendo en él millones de microorganismos que permiten que el ciclo de la vida continúe. Además, el suelo interviene en el ciclo del agua y en él se desarrolla la vegetación, fundamental para mantener las condiciones climáticas adecuadas, mitigar la contaminación ambiental y proteger al suelo de la erosión.

El Real Decreto 5/2005 define el suelo como “*la capa superior de la corteza terrestre situada entre la zona rocosa y la superficie, compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos y que constituye la interfaz entre la tierra, aire y agua, lo que le concede la capacidad de desarrollar tanto funciones naturales como de uso. No tendrán esta consideración aquellos permanentemente cubiertos por una lámina de agua superficial.*”

Esta capa se ha ido formando lentamente, a lo largo de los siglos, por la intervención de varios factores, como son la desintegración de las rocas de la superficie por la acción del agua, los cambios de temperatura, la acción del viento y la actividad de los microorganismos, que transforman en materia orgánica las plantas y los animales que mueren.

Como cualquier ecosistema, el suelo es un elemento vulnerable que se puede degradar. Esta degradación puede producirse de forma natural, pero sin duda es la acción humana el factor principal que incide en este deterioro. La sobreexplotación, la destrucción de los bosques y la contaminación son las causas fundamentales de la degradación, siendo la última la que da lugar a los suelos contaminados y, por tanto, la que motiva la redacción de esta guía.

La contaminación hace que lleguen al suelo sustancias químicas que son perjudiciales para los vegetales y microorganismos que viven en él, pero también para los animales y la salud humana. Principalmente, esta contaminación puede provenir del vertido accidental o el almacenamiento incorrecto de combustibles, aceites, disolventes u otros productos utilizados. También de residuos generados durante la actividad industrial y minera o de la actividad agrícola y ganadera, por el uso inadecuado de insecticidas, herbicidas, fertilizantes y antibióticos, por el vertido incontrolado de agua contaminada o de la deposición de contaminantes atmosféricos.

Desde un punto de vista legal, la falta de una legislación específica destinada a la protección del suelo y a la recuperación de los suelos contaminados contribuyó históricamente a su degradación. Así, a pesar de la evidente vulnerabilidad ecológica de los suelos, la legislación española ha carecido de instrumentos normativos para promover su protección, y hasta la promulgación de la Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos, en España no se disponía de ninguna norma legal que permitiera proteger eficazmente los suelos contra la contaminación y, en el caso de los ya contaminados, identificarlos y caracterizarlos utilizando para ello métodos normalizados y técnicamente rigurosos.



Para el estudio del suelo contaminado es necesario conocer la composición y distribución de las distintas fases o partes que lo componen, pudiendo diferenciar tres fases: una sólida, formada por fracción orgánica e inorgánica, otra fase líquida, formada por el agua que se encuentra en los poros e intersticios de la fase sólida, y finalmente una fase gaseosa, que abarca el resto de los poros y cavidades no ocupadas por la fase líquida. Dentro de esta distinción, el nivel freático delimita la capa del suelo en la que los poros del terreno están completamente llenos de agua.

A nivel hidrológico, el suelo queda definido de manera descendente por las siguientes partes:

- Zona edáfica: es la parte superficial del terreno que contiene las raíces de las plantas.
- Zona vadosa o no saturada: es el espacio comprendido entre el nivel freático y la superficie, donde no todos los poros están llenos de agua.
- Nivel freático: es el lugar en el que se encuentra el agua subterránea y separa la zona saturada de la no saturada. Éste varía según las circunstancias: descendiendo en épocas secas cuando el acuífero no se recarga o lo hace a un ritmo más lento que su descarga y ascendiendo en épocas húmedas.
- Zona saturada: es la situada por debajo del nivel freático donde el agua rellena completamente los poros intersticiales del suelo.
- Acuífero: estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros o grietas.

Desde el punto de vista estructural, el suelo, en su evolución natural, origina una estructura vertical diferenciada, conocida como perfil. Está formado por una sucesión de capas superpuestas, producto de su movimiento interno y del transporte vertical. Estas estructuras horizontales se llaman estratos u horizontes.

La estratificación del suelo es el resultado de la acumulación de partículas minerales sobre la roca madre hacia arriba y de materia orgánica, que al descomponerse conforma nuevas capas. En un suelo pueden distinguirse genéricamente tres horizontes, denominados A, B y C, que constituyen su perfil. Cada uno de ellos tiene características y propiedades diferentes en cuanto a color, estructura, textura, composición química, biológica o mineralógica. De forma descendente se distinguen:

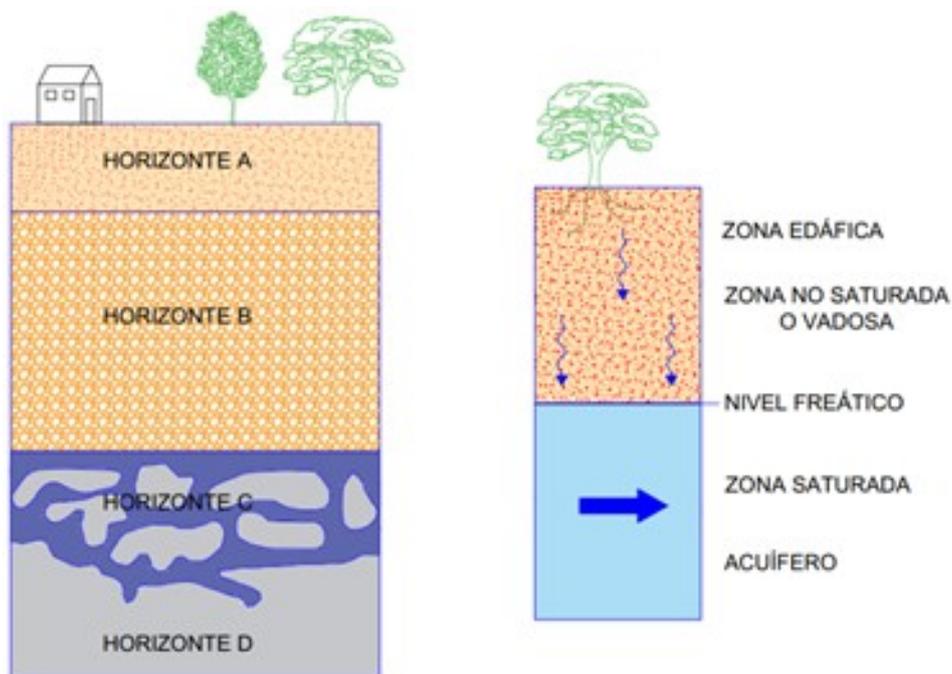
- El horizonte A es el suelo superficial. Es una zona de máxima acumulación de materia orgánica, de tonalidad oscura a causa de tal acumulación.
- El horizonte B incluye las capas en las cuales tiene lugar la sedimentación de materiales provenientes del horizonte A y, a veces, del C. Allí se acumulan materiales como los óxidos de hierro y aluminio, y otras fases minerales. Si el terreno es árido, también se pueden depositar en este estrato distintas sales.



- El horizonte C lo constituyen fragmentos del material primigenio del que se originó el suelo o roca madre. Esta roca aporta el material que por meteorización física y química, contribuye a la formación del suelo.
- El horizonte D Roca consolidada subyacente o roca madre.

En las Figura 2.1 se muestran los diferentes niveles hidrológicos y horizontes que conforman el subsuelo:

**Figura 2.1. Esquema de niveles hidrológicos y horizontes que conforman el subsuelo.**



El alcance de esta Guía se centra exclusivamente en el tratamiento del suelo y sólo incluye técnicas aplicables al tratamiento del agua cuando ésta esté también afectada y dichas técnicas sean estrictamente necesarias para descontaminar el suelo. En este sentido se excluyen todas las técnicas de tratamiento *ex situ* del agua contaminada.



## 3. Suelos Contaminados

### 3.1 Definición

El Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, y la Ley 7/2022, de 8 de abril, definen el suelo contaminado como *“Aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos de carácter peligroso procedentes de la actividad humana, en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente, de acuerdo con los criterios y estándares que se determinen por el Gobierno, y así se haya declarado mediante resolución expresa”*.

Se excluyen expresamente de esta definición los depósitos controlados de residuos y escorias, así como las escombreras controladas de la industria extractiva.

### 3.2 Causas

Son múltiples las situaciones o causas que pueden dar lugar a un suelo contaminado, pudiendo destacar entre ellas:

- Almacenamiento incorrecto de productos o residuos en la actividad industrial.
- La propia actividad industrial, con todos sus aspectos asociados de producción, mantenimiento, almacenamiento...
- Industrias abandonadas en las que no se ha llevado a cabo un correcto desmantelamiento, tanto de los edificios como de las instalaciones.
- Actividad minera.
- Gestión incorrecta de residuos, vertederos incontrolados...
- Accidentes de transporte en los que se ven implicados productos tóxicos y peligrosos.
- Uso abusivo de abonos, insecticidas, plaguicidas y antibióticos.



- Conducciones enterradas de todo tipo, en mal estado, tanto de naturaleza privada como pública.
- Depósito y acumulación de contaminantes procedentes de emisiones atmosféricas.

### 3.3 Posibles Efectos

Un suelo contaminado puede suponer riesgos para el medio ambiente y para la salud humana, generando además pérdida de recursos naturales y deterioro de la actividad económica.

Estos posibles efectos se pueden llegar a materializar a través de diferentes formas de dispersión y difusión de los contaminantes:

- Contaminación de las aguas superficiales y sedimentos de ríos y lagos. Se pueden producir por descarga directa de efluentes contaminados o por la aportación de aguas provenientes de emplazamientos contaminados.
- Contaminación de aguas subterráneas. Los contaminantes existentes en la zona no saturada del terreno terminan filtrando a la zona saturada y de ahí se movilizan por el agua a otras zonas. De esta forma, la contaminación puede propagarse a los pozos utilizados para riego o abastecimiento, tanto animal como humano.
- Evaporación de compuestos volátiles. Los contaminantes presentes en el suelo pueden dar lugar a la emisión de vapores tóxicos. Esta evaporación, que puede ser sensible sobre el terreno, también puede filtrarse al interior de los edificios próximos a través del suelo, las paredes o huecos de instalaciones.
- Acumulación de sustancias tóxicas en la cadena trófica. Por ejemplo, la contaminación del suelo se puede acumular en las plantas, pasando a los animales que se alimentan de ellas o a los alimentos cultivados, incluso pueden acumularse también en el pescado cuando hay afección en las aguas, pasando finalmente al ser humano, como último eslabón en su consumo.
- Posibles accidentes por ingestión y contacto de suelos contaminados o aguas subterráneas afectadas. Por ejemplo, el riesgo de contacto directo e ingesta podría darse principalmente para receptores infantiles, en zonas de juego o jardines, personal de la construcción o con trabajos agrícolas.
- Degradación del paisaje, generando modificaciones estéticas y efectos sociales.



## 3.4 Evaluación inicial de estado del suelo

La investigación y calificación de un suelo contaminado requiere conocer la naturaleza de la contaminación y la intensidad de la misma. De forma general, ya sean estudios reglamentarios o a actuaciones voluntarias de recuperación de suelos, es necesario obtener información sobre los siguientes aspectos:

- Focos de contaminación y tipos de contaminantes presentes
- Litología e hidrogeología del terreno
- Delimitación vertical y horizontal de la zona afectada
- Posibles mecanismos de transporte de la contaminación
- Posibles vías de exposición a la contaminación
- Posibles receptores expuestos, conforme a los usos contemplados
- Cuantificación del riesgo
- Sensibilidad del entorno

Este estudio se lleva a cabo en tres etapas:

- A. Inspección y evaluación preliminar. Se evalúa la información disponible, se hacen las primeras valoraciones de la situación (muestras puntuales, análisis de la concentración de contaminantes en gases mediante detectores de fotoionización (PID)... ) y se elabora el plan de muestreo en detalle.
- B. Caracterización del terreno. Se lleva a cabo el plan de muestreo y se realizan los ensayos analíticos necesarios.
- C. Propuesta de remediación. Se valoran los resultados analíticos y se delimita el alcance de la contaminación. En esta fase se definen los objetivos de descontaminación y se propone la técnica más adecuada.

A la hora de plantear la descontaminación de un suelo hay que diferenciar la zona no saturada y la zona saturada:



- En la zona no saturada los contaminantes se desplazan por gravedad y se originan fenómenos de adsorción.
- En la zona saturada los contaminantes se disuelven parcialmente. Los compuestos que tienden a formar una fase líquida no acuosa ligera (LNAPL), más ligeros que el agua, se acumulan en la superficie y dependiendo de su solubilidad se disuelven en una menor o mayor concentración en el agua, migrando en el sentido del flujo subterráneo por el fenómeno de advección. Por su parte, los compuestos que tienden a formar una fase líquida no acuosa pesada (DNAPL), más densos que el agua, se movilizan por gravedad, depositándose en el fondo del acuífero.

## 4. Legislación

A nivel legislativo, en el contexto de esta Guía se puede destacar la legislación específica de suelos en el ámbito nacional y en el autonómico de la Comunidad de Andalucía:

### a) Legislación nacional

Desde el punto de vista del suelo, es la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular la que tiene como objeto regular el régimen jurídico de los suelos contaminados.

Por su parte, el Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, fija una relación de actividades susceptibles de causar contaminación en el suelo, y determina los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. La Orden PAR/1080/2017 modificó el listado de actividades potencialmente contaminadoras del suelo.

### b) Legislación de la Comunidad Autónoma de Andalucía

En Andalucía, la Ley 7/2007, de 9 de julio, de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental, incluye varias disposiciones sobre suelos contaminados.

Dicha Ley fue desarrollada por el Decreto 18/2015, de 27 de enero, por el que se aprobó el Reglamento que regula el régimen aplicable a los suelos contaminados, así como a las actividades potencialmente contaminantes de los suelos. Es la norma de referencia para la gestión de los suelos contaminados en Andalucía y contempla dos grandes líneas de actuación:

- Prevención de la contaminación potencial
- Recuperación de los terrenos históricamente afectados



Posteriormente, el Decreto-ley 2/2020, de 9 de marzo, de mejora y simplificación de la regulación para el fomento de la actividad productiva de Andalucía, modificó el artículo 37.3 del Decreto 18/2015, permitiendo, en las recuperaciones voluntarias de suelos con determinadas condiciones que garanticen la información a terceros, el confinamiento como técnica de descontaminación en caso de imposibilidad de empleo de otras técnicas por razones ambientales, técnicas o económicas, siempre que el uso previsto no sea el residencial.

Adicionalmente se dispone como documentos reconocidos por la Junta de Andalucía de las siguientes Guías:

- Guía para la clasificación de suelos potencialmente contaminados en función del riesgo. (DRSC-01)
- Guía para la investigación de suelos potencialmente contaminados. (DRSC-02)
- Guía de evaluación de riesgos para salud humana en suelos potencialmente contaminados. (DRSC-03)

## 5. Recuperación de suelos contaminados

La recuperación de suelos contaminados se puede llevar a cabo mediante tratamientos de descontaminación o de confinamiento.

Cada uno de estos tratamientos incluye diferentes técnicas, y la elección final del tipo de tratamiento y de la técnica a emplear está en función del objetivo de recuperación que se plantee. Dicho objetivo dependerá de las características del emplazamiento y de la naturaleza de los contaminantes presentes, estando también condicionada por diversos factores como el tiempo de tratamiento, el coste total del proceso, el entorno, la generación de residuos, etc.

En un proceso de recuperación se realiza una selección previa de las técnicas que podrían ser aplicables, y posteriormente se hace el análisis de adecuación, atendiendo a criterios técnicos, económicos y ambientales, para elegir la opción más favorable.

### 5.1 Tipos de tratamiento

Detrás de cada uno de estos tratamientos genéricos, mencionados en el párrafo anterior, subyacen conceptos de actuación diferentes:



- **Tratamientos de descontaminación:** Persiguen la disminución de la concentración de contaminantes en el suelo.
- **Tratamientos de confinamiento:** Persiguen el aislamiento y sellado del suelo contaminado.

Adicionalmente a los tipos de tratamientos existentes, dependiendo de la forma en que se apliquen, se puede distinguir entre tratamientos “*in situ*” y tratamientos “*ex situ*”. Los primeros se aplican en el lugar objeto de la remediación, manteniendo su estado físico natural. En cambio, los tratamientos “*ex situ*” requieren la excavación del suelo o el bombeo del agua afectada, para ser tratados posteriormente, bien en el mismo emplazamiento (tratamientos “on site”), o bien en instalaciones situadas en otro lugar (tratamientos “off-site”), siendo necesario en este último supuesto el transporte de la matriz contaminada.

En la [Tabla 5.1](#) se indican las principales diferencias entre ambos tipos de tratamiento.



**Tabla 5.1. Diferencias entre tratamientos In Situ y Ex Situ**

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
IN SITU	• Operaciones más sencillas (menos manipulación)	• Tratamientos más lentos
	• Menor coste	• Mayor complejidad de tratamiento
EX SITU	• Tratamientos más rápidos	• Coste más alto
	• El grado de recuperación suele ser mayor	• Excavación y transporte del suelo

## 5.2 Técnicas aplicables

La [Tabla 5.2](#) muestra las principales técnicas asociadas a los distintos tipos de tratamiento del suelo.

**Tabla 5.2. Tratamientos y técnicas asociadas.**

Tratamiento	Tipo de técnica	Técnica	Aplicación
Descontaminación	Físico-Químico	Extracción de vapor	In situ
		Extracción multifase	In situ
		Lavado-enjuague (Soil Flushing)	In situ
		Lavado (Soil Washing)	Ex situ
		Oxidación/Reducción química	In situ
		Electrocínética (Electromigración)	In situ
	Biológica	Atenuación natural monitorizada	In situ
		Bioventilación (Bioventing)	In situ
		Biosparging	In situ
		Biodegradación mejorada	In situ
		Fitorremediación	In situ
		Landfarming	Ex situ
		Biopilas	Ex situ
	Térmica	Desorción térmica	Ex situ
		Incineración	Ex situ
Pirólisis		Ex situ	
Confinamiento	Construcción obra civil	Sellado superficial	In situ



Tratamiento	Tipo de técnica	Técnica	Aplicación
		Estabilización fisicoquímica	In situ
		Vitrificación	In situ
		Barrera hidrogeológica	In situ

En lo que se refiere a las técnicas, éstas se pueden clasificar en:

- **Técnicas fisicoquímicas:** Se elimina o reduce el contaminante a través de transformaciones físicas o químicas.
- **Técnicas biológicas:** Tienen el objetivo de estimular la actividad de la biota autóctona (bioestimulación) o alóctona (bioaumentación) con el fin de eliminar el contaminante mediante su incorporación como fuente de carbono a la estructura celular de los organismos vivos.
- **Técnicas térmicas o termoquímicas:** Se hace uso de energía térmica en forma de calor para eliminar, transformar o inmovilizar los contaminantes.
- **Técnicas de construcción / obra civil:** Son las técnicas que se emplean en los tratamientos de confinamiento

En muchas situaciones, es frecuente utilizar, de manera simultánea o sucesiva, dos o más técnicas que se complementen para obtener el objetivo de tratamiento que se persigue.

## 6. Aspectos técnicos en la descontaminación de suelos

En un episodio de descontaminación de suelo, existen factores de distinta índole (tipo de suelo, naturaleza del contaminante, concentración, movilización, características del entorno, costes, impacto ambiental de la técnica, etc.) que condicionan, y en último término determinan, la utilización de una técnica o tipo de técnicas específicas.

Los principales factores a tener en cuenta en el planteamiento del proyecto de descontaminación son:

- Tipo de suelo
- Naturaleza del contaminante



- Interacción entre el contaminante y el suelo
- Generación de residuos
- Eficacia a largo plazo
- Sensibilidad del entorno

## 6.1 Tipo de suelo

Un factor a tener en cuenta a la hora de elegir una técnica u otra es la naturaleza del suelo.

Algunos aspectos importantes de las características de la matriz son:

- **Textura:** Se define por el tamaño de las partículas y la proporción de cada una de ellas, diferenciando ([USDA, 1987](#)):
  - **Arena:** 0,05 – 2 mm
  - **Limo:** 0,002 – 0,05 mm
  - **Arcilla:** menor de 0,002 mm
- **Porosidad:** Son cavidades interiores que confieren a las partículas una mayor superficie de contacto. La porosidad se define como la relación entre el volumen de poros y el volumen total de suelo, pudiéndose diferenciar entre microporos (predominante en suelos arcillosos) y macroporos (predominante en arenas).
- **Permeabilidad:** es la capacidad que tiene un material de permitir que un fluido lo atraviese. El suelo arenoso es muy permeable, mientras que el arcilloso presenta baja permeabilidad.
- **Contenido en humedad:** Se define como la cantidad de agua capaz de quedarse retenida en el suelo. Depende de las características mencionadas anteriormente. A diferencia de los suelos arcillosos, las arenas presentan una baja capacidad de retención de agua.
- **pH:** es la medida de alcalinidad o acidez que presenta una sustancia. Se diferencia entre:
  - **pH < 7** Ácido
  - **pH = 7** Neutro
  - **pH > 7** Base



- **Composición química:** hace referencia al contenido de oxi-hidróxidos de hierro, salinidad y a la mineralogía total y de las arcillas presentes en el suelo.
- **Contenido en materia orgánica:** hace referencia a los componentes orgánicos presentes en el suelo procedentes de la descomposición de restos de seres vivos y de la presencia del propio edafón del suelo.
- **Profundidad:** el alcance vertical de la contaminación en un suelo es un factor determinante a la hora de plantear el tratamiento debido a la dificultad que conlleva normalmente acceder a un foco de contaminación situado a mucha profundidad.

## 6.2 Naturaleza del contaminante

A continuación, se presentan las principales propiedades que determinan la naturaleza del contaminante:

- **Presión de vapor (Pv):** A mayor Pv de un compuesto, más fácil será su volatilización
- **Solubilidad:** Se define como la capacidad de un soluto de disolverse en un disolvente. Cuanto más soluble sea ese soluto en una matriz disolvente, más fácil será extraer el contaminante de la matriz suelo.
- **Densidad:** Relación entre la masa de la sustancia y el volumen que ocupa.
- **Punto de ebullición:** Temperatura a la cual la Pv del líquido es igual a la presión ambiental circundante.
- **Punto de fusión:** Temperatura a la que la sustancia cambia de estado sólido a líquido.
- **Poder calorífico:** Cantidad de energía de una sustancia, por unidad de masa o volumen, que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación.
- **Constante de Henry:** Es un indicador de la cantidad de gas disuelta en un líquido, que a temperatura constante es proporcional a la presión parcial del gas sobre el líquido. Esta constante es indicativa de la volatilidad del compuesto, por lo que cuanto mayor sea su valor mayor será la probabilidad de pasar a la fase gaseosa siendo menor la solubilidad del gas en el agua.



- **Cociente de carbono orgánico (Koc):** Es una medida de la tendencia de un compuesto orgánico a ser adsorbido (retenido) por los suelos, a mayor valor del Koc, mayor afinidad por la matriz suelo en detrimento de la fase acuosa.
- **Coefficiente de difusión:** Movimiento de masa generado por un gradiente de presión y/o concentración. La mayor o menor velocidad estará determinada por la facilidad con la que dicho contaminante se mueve en un disolvente determinado.

## 6.3 Interacción entre el contaminante y el suelo

Los contaminantes interactúan con el suelo de forma diferente, siendo necesario considerar los siguientes aspectos:

- **Difusión:** Es el mecanismo de transporte más importante en zonas de baja permeabilidad, tales como capas de limo y arcilla, así como en la transferencia de masa en la interfaz entre el aire del suelo y el agua subterránea y entre fases líquidas no acuosas y el agua subterránea o el aire del suelo. La difusión de un contaminante, así como también la de nutrientes hacia dentro y fuera de los poros del suelo, controlará la degradación del contaminante.
- **Adsorción:** Es el proceso de adhesión de un compuesto a la superficie de una partícula (ejemplo: suelo o sedimento). Numerosos mecanismos como la transferencia de carga, la formación de enlaces iónicos y de hidrógeno, el intercambio de iones o moléculas que rodean a un metal, las fuerzas de Van der Waals y la interacción hidrofóbica, son responsables de la adsorción de un contaminante a una partícula.
- **Biodisponibilidad:** Los contaminantes en el suelo o en sedimentos no podrán ser biodegradados o extraídos a menos que se encuentren biodisponibles. La biodisponibilidad se puede definir como la cantidad de un compuesto químico que puede ser utilizado por determinados organismos en un tiempo y en un entorno definidos. La biodisponibilidad se ve afectada por numerosos factores, tales como las propiedades de los compuestos y de los suelos, la adsorción, el tiempo de envejecimiento en el suelo, el clima y el organismo biodegradador.
- **Toxicidad:** La toxicidad disminuye la velocidad de las reacciones metabólicas y con frecuencia impide el crecimiento de la nueva biomasa necesaria para estimular la rápida eliminación del contaminante. Asimismo, la toxicidad es especie-dependiente, pudiendo un compuesto ser tóxico para un organismo y no serlo para otro. Normalmente, y debido a una mayor biodisponibilidad, la toxicidad de un compuesto es mayor en agua que en suelo. En suelo, la limitada transferencia de masa del compuesto tóxico permite a los mecanismos de destoxificación competir con la transferencia de



masa y eliminar, en cierta medida, el tóxico de la célula, viéndose reducida la toxicidad del compuesto.

- **Biodegradación:** Generalmente bacterias y hongos son los principales motores de transformación bioquímica en el suelo y tienen un papel crucial tanto en el destino como en la mitigación de muchos contaminantes.
- **Reacciones abióticas y bióticas:** En el ambiente, los contaminantes son sometidos a procesos de degradación, tanto bióticos como abióticos. La contribución de las reacciones abióticas en la transformación de compuestos químicos en el medio ambiente tiene gran relevancia y debe ser tomada en consideración.

## 6.4 Generación de residuos

Algunas de las técnicas de recuperación de suelos contaminados generan residuos, en cantidad y naturaleza variables, en el proceso de descontaminación.

Normalmente, la generación de residuos está relacionada con la propia técnica, es decir, con la tecnología que se emplea para eliminar el contaminante del suelo.

La [Tabla 6.1](#) clasifica las técnicas en función de la generación de residuos:

**Tabla 6.1. Clasificación de las técnicas en función de la generación de residuos.**

Generan residuos	No generan residuos
Biopilas	Atenuación natural monitorizada
Desorción térmica	Biodegradación mejorada
Electromigración	Bioventilación/ Biosparging (siempre y cuando no impliquen la generación de gases que requieran su extracción y su posterior tratamiento)
Extracción multifase	Estabilización fisicoquímica
Extracción vapor	Oxidación / Reducción química
Fitorremediación	
Incineración	



Generan residuos	No generan residuos
Landfarming	
Lavado de suelos (surfactantes)	
Pirólisis	
Vitrificación	

La mayoría de las técnicas, con carácter general, generan residuos en su aplicación.

En igualdad de condiciones, siempre es preferible una técnica que no genere residuos frente a una que sí los genere. En la mayoría de casos el criterio de selección se inclina hacia las técnicas más efectivas con el fin de reducir o contener la contaminación en el emplazamiento y minimizar los daños sobre el medio ambiente. En la aplicación de la técnica seleccionada siempre ha de considerarse la eliminación adecuada de los residuos generados, realizando el tipo de tratamiento específico que sea necesario para eliminarlo. En este sentido:

- La mayoría de los gases generados son fácilmente eliminados al pasar por filtros de carbón activo o columnas de stripping .
- Las aguas contaminadas pueden también tratarse "on site" con filtros de carbón activo o ser enviadas a un separador de hidrocarburos o a planta depuradora, donde serán tratadas para eliminar los contaminantes.
- Los residuos generados serán entregados a gestores autorizados para su correcto tratamiento final.

## 6.5 Eficacia a largo plazo

A la hora de enfrentarse a la recuperación de un suelo contaminado suelen entrar en conflicto tres factores relacionados: rapidez del proceso, coste y la calidad de la descontaminación.

Conforme a la normativa, la mejor solución es aquella que disminuye la concentración de los contaminantes hasta un nivel de riesgo aceptable. De este modo se asegura la eficacia de la descontaminación a largo plazo. Hay que resaltar que, a excepción de algunos casos, la restitución completa de las condiciones originales del suelo es prácticamente imposible, debido a factores técnicos y económicos.



En lo que se refiere a la obtención de resultados perdurables en el tiempo, solamente las técnicas englobadas en los tratamientos de descontaminación garantizan su eficacia a largo plazo, es decir, eliminan la contaminación del suelo de manera permanente, bien porque destruyen los contaminantes o bien porque los extraen del suelo.

Es necesario añadir que en el caso de tratamiento de suelos o aguas contaminados con metales las técnicas de Oxidación o Reducción disminuyen la toxicidad y/o biodisponibilidad cambiando el estado de valencia de los metales, pero estos quedan en el suelo, con un riesgo latente de volver a cambiar su estado de valencia a condiciones tóxicas. En el caso de la Fitorremediación, existen limitaciones de transferencia de masa desde el suelo a la rizosfera o puede haber transferencia de la contaminación desde la biomasa de la planta (tallos, hojas) al entorno (ingesta por animales, etc). La inmovilización de determinados metales asociada a cambios en el pH o reacciones REDOX en la rizosfera también son susceptibles de verse alterados ante un cambio de condiciones en el entorno.

## 6.6 Sensibilidad del entorno

La sensibilidad del entorno que se encuentra alrededor del emplazamiento contaminado es otro de los aspectos que hay que considerar antes de acometer un proyecto de descontaminación.

Escenarios tan dispares para un proyecto de remediación como pueden ser terrenos urbanos, solares entre viviendas, terrenos rurales, espacios protegidos, recintos fabriles o el interior edificios, requerirán actuaciones diferentes y el empleo de alguna de las técnicas puede presentar contraindicaciones.

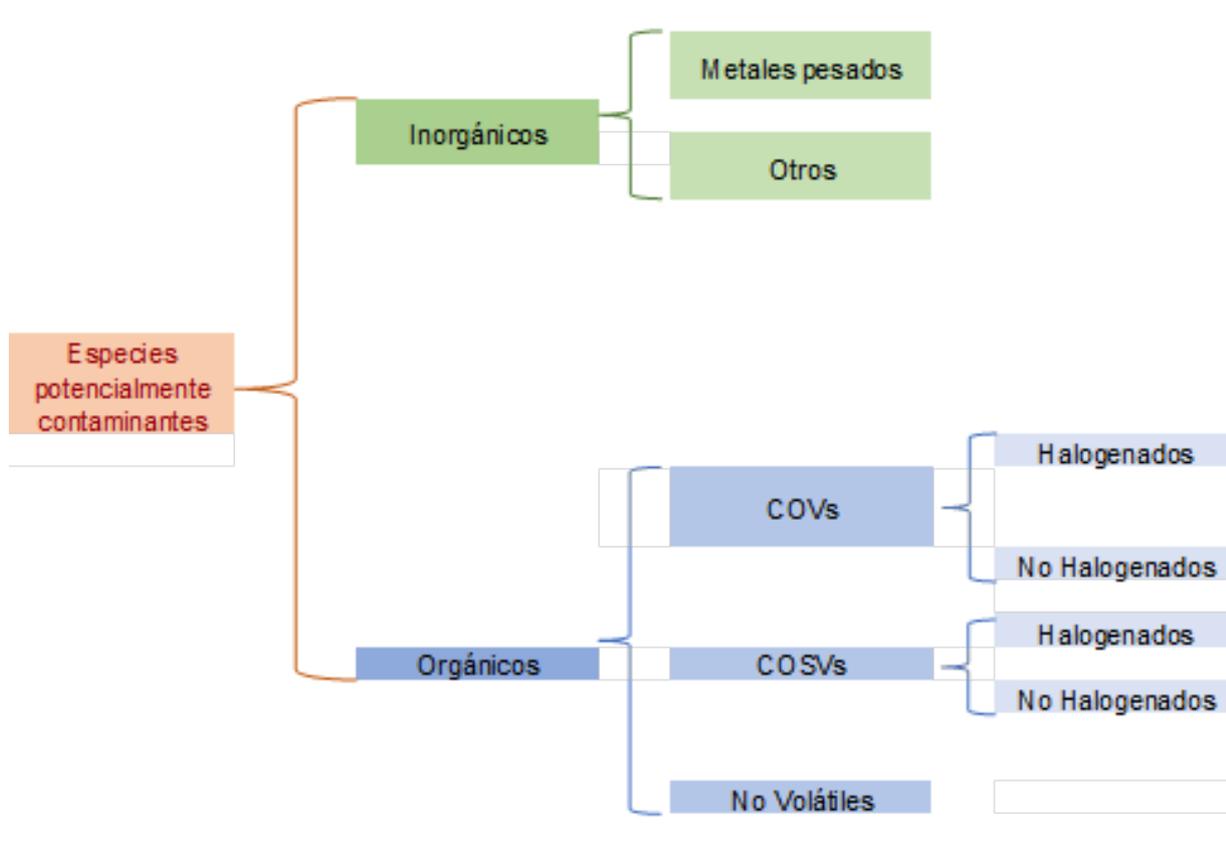
La limitación de espacio puede limitar la viabilidad de técnicas *ex situ*, como la formación de biopilas. Así mismo, la presencia de infraestructuras de todo tipo enterradas en el suelo suponen un obstáculo para la aplicación de ciertas técnicas, como por ejemplo en el caso de la oxidación.



## 7. Tipos de contaminantes

Se describen dentro de este apartado los contaminantes incluidos en esta Guía, que se presentan de forma esquemática en la [Figura 7.1](#):

**Figura 7.1. Tipos de contaminantes.**



Se ha elegido esta clasificación de contaminantes por ser la clasificación que más abunda en la bibliografía disponible y responder a una terminología habitual.

### 7.1 Contaminantes inorgánicos

En los contaminantes inorgánicos destacan los metales pesados. Se define como metal pesado todo aquél que presenta propiedades metálicas y una densidad alta (principalmente metales de transición, algunos se-



mimetales, lantánidos y actínidos). Son en general tóxicos para los seres humanos y perjudiciales para el medioambiente. Entre los más destacados se encuentra el arsénico, cadmio, cinc, mercurio, níquel, cobre, plomo y cromo.

El segundo grupo de contaminantes inorgánicos agrupa principalmente a los aniones sulfuros, cloruros, bromuros y fluoruros.

## 7.2 Contaminantes orgánicos

A continuación, se describe la clasificación considerada en este documento para los contaminantes orgánicos.

- **Contaminantes Orgánicos Volátiles (COV).** El Real Decreto 117/2003, de 31 de enero, sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles debidas al uso de disolventes en determinadas actividades, los definen como todo compuesto orgánico que, a 20 °C tenga una presión de vapor de al menos 0,01 kPa. Adicionalmente, la bibliografía técnica atribuye a estos compuestos una constante de Henry menor de  $10^{-5}$  atm·m<sup>3</sup>/mol.

A su vez, se dividen en COVs Halogenados y COVs No Halogenados:

- ⇒ **COV Halogenados:** Son aquellos que poseen uno o varios átomos de un elemento halógeno. En este grupo se encuentran comúnmente en emplazamientos contaminados disolventes clorados como el Cloruro de Vinilo, el Tricloroetileno o el diclorometano.
- ⇒ **COV No Halogenados:** Son aquellos que no poseen ningún elemento halógeno. En este grupo se encuentran comúnmente en emplazamientos contaminados combustibles como la gasolina y algunos de sus componentes como el benceno, el tolueno, el etilbenceno y el xileno (BTEX).
- **Contaminantes Orgánicos Semi-Volátiles (COSV):** Aquellos que poseen una temperatura de ebullición entre 250 y 325 °C.

Se dividen a su vez en:

- ⇒ **COSV Halogenados:** Aquellos que poseen un elemento halogenado. En este grupo se incluyen aromáticos como el p-diclobenceno (insecticida), los PCBs, el Clordano (pesticida), el dicloro difenil tricloroetano (DDT) (insecticida) o la Aldrina (plaguicida).



⇒ **COSV No Halogenados:** En este grupo destacan hidrocarburos como el gasoil, aromáticos como el bifenilo o el difeniléter y los PAH.

- **Contaminantes Orgánicos No volátiles (CONV):** Están compuestos por cadenas de más de 30 carbonos. Destaca el *Fueloil*, hidrocarburo procedente del petróleo usado como combustible. Es el combustible más pesado que se puede destilar a presión atmosférica.

En la [Tabla 7.1](#) se presentan agrupados en estas categorías los compuestos que recoge el Anexo V del Real Decreto 9/2005.

**Tabla 7.1. Clasificación de los compuestos recogidos en el Anexo V del R.D. 9/2005.**

No Volátiles	COVs No Halogenados	COVs Halogenados	COSVs o Halogenados	COSVs Halogenados
Fueles	Metano	Tricloroetileno	Gasoil	p-Cloroanilina
	Aceta fnaftaleno	Tetracloroetireno	Fluoreno	p,p'DDE
	Benceno	Diclorometano	Fluoranteno	p,p'DDT
	Etano	1,3-Dicloroetileno	Cresol	p,p'DDD
	Fenol	1,2-Diclorometano	Criseno	Dieldrin
	Estireno	1,1-Diclorometano	Antraceno	Endosulfan
	Etilbenceno	1,2,3-Tricloroetano	Benzo(a)antraceno	Endrin
	Tolueno	1,1,2,2-Tetracloroetano	Benzo(b)fluoranteno	2,4-Diclorofenol
	Xileno	Clorobenceno	dibenzo(a,h)antraceno	2,4,5-Triclorofenol
	Gasolina y todos sus compuestos	2-Clorofenol	Benzo(k)fluoranteno	2,4,6-Triclorofenol
		Cloroformo	Benzo(a)pireno	Heptacloro epóxido
		Cloruro de vilino	Pireno	Heptaclorobenceno
		1,2-dicloroetireno	Indeno(1,2,3-cd) Pireno	Heptacloro butadieno
		Tetracloruro de carbono	Bifenilo	Hexaclorociclohexano-alfa
		Para - diclorobenceno	Difeniléter	Hexaclorociclohexano-beta
		1,2 - Diclorobenceno		Hexaclorociclohexano-gamma
		1,4 - Diclorobenceno		Hexacloroetano



No Volátiles	COVs No Halogenados	COVs Halogenados	COSVs o Halogenados	COSVs Halogenados
		1,2,4- Triclorobenceno		Naftaleno
				PCBs
				1,3-Dicloropropeno
				1,2-Dicloropropano
				Adrín
				Clordano

**Tabla 7.2. Aplicaciones de los principales contaminantes clasificados en cada grupo.**

	Ejemplos	Aplicaciones
COV No halogenados	Metano	Gas natural, fermentaciones anaeróbicas
	Etano	Producción de plásticos como polietileno (PE)
	Gasolina y todos sus componentes	Combustible
COV Halogenados	Tricloroetileno	Componente de refrigerantes, disolvente desengrasante de equipos metálicos
	Tetracloroetileno	Disolvente en limpieza de textiles y metales
	1,2 - dicloroetileno	Comonomero la polimerización de CV, acrilonitrilo y acrilatos.
		Fabricación de dispositivos semiconductores para el cultivo de películas de SiO <sub>2</sub>
	Cloruro de Vinilo Clorobenceno	Fabricación de PVC (Policloruro de Vinilo) Disolvente para la obtención de colorantes e insecticidas
Para-diclorobenceno	Insecticida, repelente para polillas, fumigante contra el moho	
COSV No halogenados	Gasoil	Combustible
	Bifenilo	Producto inicial en la producción de PCBs. También usado en la producción de emulsificantes, iluminadores ópticos, insecticidas y plásticos
	Difeniléter	Trasmisor del calor, elaboración de perfumes y fabricación de poliésteres. La mezcla eutéctica formada por un 73% de difeniléter y un 27% de bifenilo forma el llamado aceite térmico, utilizado como fluido caloportador en las plantas termosolares
COSV Halogenados	Clordano	Plaguicida (Prohibido)



	<b>Ejemplos</b>	<b>Aplicaciones</b>
	PCBs	Líquido refrigerante, lubricante en transformadores y condensadores
No volátiles	Fuel	Combustible para plantas de energía eléctrica, calderas y hornos
	Asfaltenos	Material para la construcción de caminos, impermeabilización y recubrimiento de techados. También como agentes inhibidores de corrosión.
	Alquitranes	Material utilizado en la producción de sustancias químicas refinadas.



## 8. Técnicas de tratamiento

### 8.1 Técnicas fisicoquímicas

En el siguiente apartado, se presentan las distintas técnicas fisicoquímicas disponibles para el tratamiento de los suelos.

#### 8.1.1 Extracción de vapores del subsuelo

Esta técnica se lleva a cabo a partir de una bomba de vacío situada en la superficie que permite generar un gradiente de presión/concentración a través de canales depresores o soplantes. Esta diferencia de presión/concentración provoca que la fase vapor situada en los intersticios de la matriz suelo en la zona vadosa e incluso contaminantes disueltos en la zona saturada más próxima a la misma, se volatilicen y asciendan por los pozos de extracción (Figura 8.1). Es recomendable ejecutar previamente ensayos de viabilidad para determinar los radios de influencia.

Posteriormente, se tratan los contaminantes de tal forma que se pueda verter el gas a la atmósfera libre de contaminación.

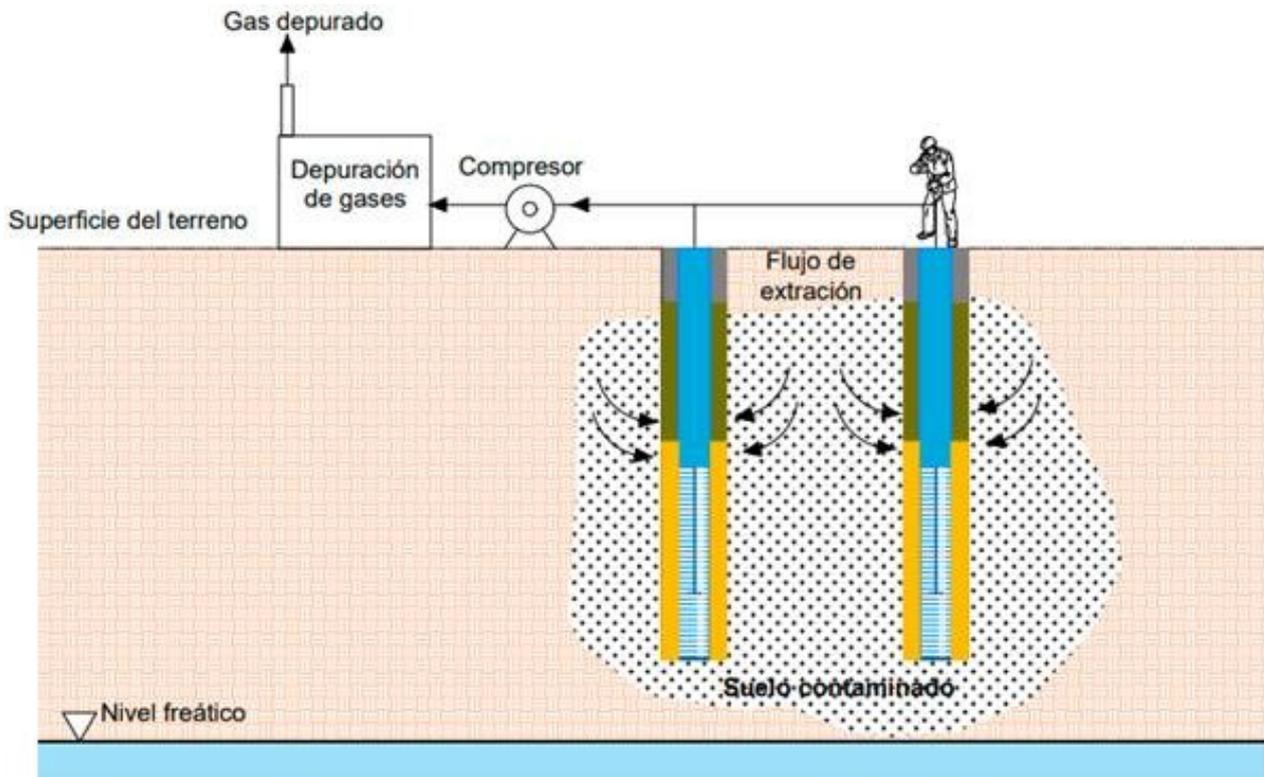
La transferencia de masa está influenciada por las propiedades tanto del contaminante como de las condiciones del subsuelo. En cuanto a las propiedades del contaminante, hay que tener en cuenta la constante de la Ley de Henry, la presión de vapor, el punto de ebullición, y el coeficiente de adsorción del suelo. Las características más relevantes del suelo son la litología y heterogeneidad, el contenido de carbono orgánico natural y la profundidad del agua subterránea en función de los cuales se definirá el número de pozos necesarios, así como su localización y profundidad.

Puede ser necesario bombear agua de tal forma que disminuya el nivel freático y poder aumentar así la efectividad del tratamiento.

Se suele utilizar en paralelo a otras tecnologías como burbujeo de aire, *Sparging*, Bombeo y tratamiento y/o tratamientos térmicos (EPA, *September 1997*).



**Figura 8.1. Esquema de Extracción de Vapores del Subsuelo.**



**- Campo de aplicación**

Este tratamiento es aplicable a aquellos contaminantes con menor densidad que el agua, encontrándose sobrenadantes con respecto al nivel freático. Los vapores se encuentran contenidos en la zona no saturada de la matriz suelo, con una textura con porcentaje medio – bajo en finos y con permeabilidad alta. Se aplica principalmente para COV's halogenados y no halogenados.

**- Coste y periodo de tratamiento**

El coste de este tratamiento puede oscilar entre los 100 y los 400 € por m<sup>3</sup> de suelo tratado, incluyendo el tratamiento posterior de los vapores, mientras que el periodo de tratamiento está comprendido entre 1 y 3 años.

**- Aspectos ambientales**

Posteriormente a la extracción de la fase gas contaminada, y de cara a evitar emisiones contaminantes a la atmósfera, se hace circular la corriente por distintos tratamientos como filtros de carbón activo, catalizadores oxidativos o incineración etc. (USEPA, 1997)



### 8.1.2 Extracción multifase

La extracción multifase, o también extracción en doble fase por alto vacío, es una técnica que permite la extracción simultánea mediante pozos, de fase gaseosa (COVs), fase líquida (en disolución) y compuestos no acuosos en fase libre (LNAP).

En el caso de suelos contaminados con hidrocarburos en fase libre, situados por encima del nivel freático, normalmente se realiza la extracción mediante pozos verticales por los que fluye el contaminante pudiéndose extraer la fase libre, la fase libre y el agua simultáneamente, o una mezcla de ambos.

Existe una variante de esta técnica, denominada “Bioslurping” que consiste en introducir aire a la matriz contaminada al mismo tiempo que se realiza la extracción multifase, de tal forma que se favorece la biodegradación de los contaminantes presentes.

El sistema de extracción multifase utiliza una bomba de alto vacío que genera depresión en una serie de pozos, extrayendo los vapores y fluidos del subsuelo hacia un separador de fases. Se recomienda realizar ensayos previos de viabilidad para determinar los radios de influencia.

Los vapores reciben tratamiento pasando a través de un filtro de carbón activo, mientras que el líquido se impulsa hacia un separador de hidrocarburos donde se lleva a cabo el tratamiento. Este proceso de extracción del agua y su posterior tratamiento es lo que se conoce habitualmente como Bombeo y Tratamiento o, por su denominación en inglés, como “Pump and Treat”.

#### - **Campo de aplicación**

La extracción multifase se utiliza principalmente para el tratamiento de suelos contaminados con COV's y COSV's halogenados y no halogenados tanto:

- En estado gaseoso
- En disolución
- No acuosos en fase libre.

En cuanto a las especificaciones del suelo, se requiere que la matriz tenga una permeabilidad baja a media, un contenido equilibrado de humedad y que la temperatura no sea muy baja. El contenido en humedad constituye un factor determinante debido a que un porcentaje alto provoca una disminución en la difusión de los gases, limitando la tasa de extracción de volátiles.

#### - Coste y periodo de tratamiento



El coste vendrá marcado por diversos factores como el número de pozos o el tipo y concentración de contaminantes. De forma orientativa se pueden considerar los siguiente rangos:

- Instalación de equipos: 30.000 – 100.000 €
  - Operación y mantenimiento: 3.000 – 8.000 €/mes
  - Coste total del tratamiento: 66.000- 196.000 € considerando en total 1 año de operación.
- El volumen de agua bombeada y tratada para un mismo periodo de tiempo dependerá de la permeabilidad del terreno. En el caso de emplazamiento con mayor permeabilidad y un periodo de 18 meses de tratamiento los costes del tratamiento pueden oscilar entre los 2,5 – 5 €/m<sup>3</sup> de agua tratada y 9 - 67 €/m<sup>3</sup> de producto recuperado.

El periodo de tratamiento está comprendido entre 1 y 3 años.

- Aspectos ambientales

Para evitar un impacto ambiental derivado del tratamiento, una vez que tanto la fase líquida como gaseosa son extraídas del suelo ambas se someten a un proceso tratamiento para eliminar los contaminantes (normalmente haciéndolas pasar a través de un filtro de carbón activo), implicando un elevado consumo de energía. (USACE, 1999)

### 8.1.3 Lavado - enjuague (soil flushing)

Esta técnica se aplica *in situ* y consiste en infiltrar en el suelo agua, o una solución acuosa con compuestos químicos específicos (surfactantes, disolventes; según la naturaleza del contaminante), que favorezcan la desorción del contaminante acumulado en el suelo.

La extracción y posterior tratamiento de la fase líquida es una de las técnicas más empleadas para la descontaminación tanto de la zona saturada como de la zona no saturada. En el caso de actuar sobre la zona no saturada, es necesario un lavado previo de la capa superior del terreno (flushing), que arrastre los contaminantes y los transporte a la zona saturada, para desde allí el flujo de agua pueda ser bombeado para tratarse *ex situ* en superficie mediante la técnica más apropiada en función de los contaminantes presentes.

Una vez tratada el agua, puede ser parcial o totalmente reinyectada en el acuífero, bien como medio de movilizar el contaminante hacia los puntos de extracción y acelerar el ciclo de remediación, o bien exclusivamente para mantener el equilibrio natural compensando los posibles efectos adversos, tales como descenso del nivel freático, asentamientos del terreno o afección a humedales.



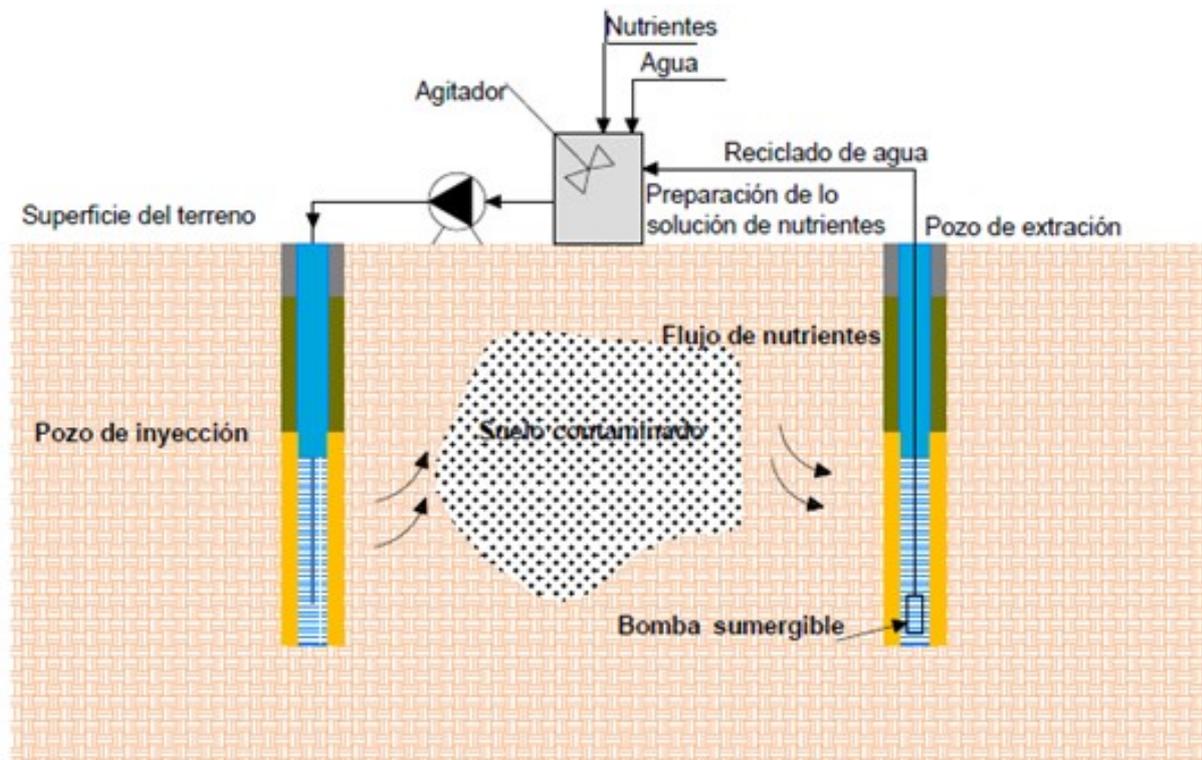
La inyección o infiltración del agua con aditivos se puede hacer utilizando diferentes sistemas, como pozos, zanjas drenantes o sistemas de aspersión. En emplazamientos donde la contaminación del suelo es poco profunda, el aporte de agua puede conseguirse mediante riego con aspersores, nebulizadores, etc.

La extracción del agua se puede llevar a cabo mediante pozos, sistemas de drenaje o zanjas. Estos dos últimos métodos se emplean en terrenos poco permeables y con niveles freáticos de escasa profundidad.

Con este sistema de bombeo y tratamiento, bien dimensionado para las características del emplazamiento y la afección identificada, se consigue, tanto la eliminación o reducción significativa de los contaminantes presentes en el agua, como la contención de la pluma de contaminación para evitar su migración.

El tratamiento *ex situ* del agua generalmente requiere períodos de tiempo más cortos que los tratamientos *in situ* y proporciona mayor certeza sobre la uniformidad del tratamiento debido a la capacidad de homogeneizar y monitorizar continuamente el agua subterránea.

**Figura 8.2. Esquema de Lavado de Suelos.**





### - **Campo de aplicación**

El flushing se aplica a todo tipo de contaminantes, siendo especialmente efectivo en COV's halogenados y no halogenados e inorgánicos, estando su efectividad más limitada en el caso de COSV's halogenados y no halogenados, y CONV.

En ocasiones es frecuente combinarlo con otras técnicas como la biodegradación. Asimismo, es difícil de aplicar en suelos de baja permeabilidad o ricos en elementos finos y requiere un buen diseño de la extracción y control continuo para impedir que los contaminantes sobrepasen la barrera hidráulica. También puede requerir en determinados casos, antes de realizar la infiltración de los compuestos, realizar un control hidráulico mediante barrera de bombeo, para evitar dispersión de la pluma.

La efectividad del tratamiento disminuye drásticamente cuando en el emplazamiento hay roca fracturada (EPA, 1995). En este tipo de acuíferos, los contaminantes viajan preferentemente a través de las zonas de mayor permeabilidad, mientras, por difusión, migran hacia las zonas de permeabilidad menor. Una vez eliminada el agua contaminada desde las zonas de mayor conductividad hidráulica, el contaminante vuelve a movilizarse por difusión, pero esta vez en sentido inverso, desde los depósitos de menor conductividad hacia el agua limpia (EPA, 1997). Es decir, las zonas de baja permeabilidad se transforman en una fuente de contaminación muy difícil de eliminar. Asimismo, las fracturas de las rocas pueden almacenar importantes cantidades de contaminantes, que difícilmente serán extraídas mediante bombeo (NRC, 1994).

### - **Coste y periodo de tratamiento**

El coste de aplicación de esta técnica varía considerablemente en función del tipo de contaminante, emplazamiento, superficie y profundidad de la zona afectada, naturaleza del terreno, puntos de extracción, posibilidad de reinyección, etc. El rango de costes oscila de 40 a 225 € por m<sup>3</sup> de suelo, aunque en casos favorables por tipo de suelos y contaminantes se puede situar entre 40 y 100 € por m<sup>3</sup> de suelo.

El periodo de tratamiento está comprendido entre 1 y 3 años.

### - **Aspectos ambientales**

Los aspectos ambientales principales están asociados al consumo de energía, tanto para la inyección de las soluciones extractantes como para el bombeo y posterior depuración del agua contaminada que arrastra los contaminantes.



#### 8.1.4 Lavado de suelos (soil washing)

El lavado de suelos es una técnica de tratamiento *ex situ*, de gran rapidez y alta capacidad, en la que se aplica agua junto con reactivos químicos a una matriz sólida contaminada para su descontaminación.

En esta técnica se realiza una separación de la fracción granulométrica del rango arenas o limos, partiendo de la premisa de que la contaminación estará concentrada en la fracción fina. Se recomienda realizar ensayos previos de viabilidad en laboratorio.

En este proceso, en primer lugar se realiza un cribado de la matriz sólida aplicando agua con un determinado reactivo químico (surfactante, disolvente, etc) para facilitar la separación del contaminante de la matriz sólida. Este cribado tiene dos objetivos, el primero es retirar la fracción de sólidos más gruesa, como bolos o piedras de gran tamaño y como segundo objetivo la humectación del material hasta hacerlo bombeable. Posteriormente, el material ya bombeable se envía a un proceso de separación de la fracción granulométrica intermedia, es decir las arenas y determinadas fracciones gruesas de limos, mediante hidrociclado o decantación. Si el reactivo químico ha funcionado correctamente, tanto el material retirado en esta etapa como en el pretratamiento, estarán limpios y cumplirán con los límites de concentración admisibles fijados en la legislación. Por último, la fracción fina junto con el contaminante se envía a un proceso de decantación con reactivos químicos (coagulación-floculación o sólo floculación), precipitándose los sólidos por gravedad, deshidratándolos a continuación y generando al final del proceso una fracción sólida de rechazo y agua clarificada que se retorna a cabecera de proceso.

La elección del agente químico (surfactante, disolvente o aditivo) es objeto de un estudio de viabilidad previo a la ejecución del tratamiento, ya que el éxito de la técnica y su economía depende en gran medida de ello.

Cabe destacar que, si se requiriese una descontaminación integral de la matriz, la fracción fina concentrada, debido a su alta concentración de contaminantes, deberá ser tratada mediante otras técnicas como desorción térmica o incineración si el contaminante fuera de tipo orgánico, o a estabilización y envío a vertedero si fueran contaminantes inorgánicos persistentes como metales pesados.

##### - **Campo de aplicación**

El campo de aplicación óptimo para las plantas de lavado de suelos son grandes volúmenes de matrices sólidas de granulometría intermedia (rango arenas), que hayan sido contaminadas con COV's y COSV's no halogenados e inorgánicos.

Aunque el lavado de suelos es una técnica de remediación de suelos contaminados, en realidad el tratamiento se realiza en base agua, por lo que las técnicas de abatimiento del contaminante son aquellas que se aplican para el tratamiento de aguas, a excepción de la etapa primaria de separación del contaminante de la matriz sólida.



Si se requieren descontaminaciones integrales de emplazamientos con grandes volúmenes de tierra contaminada, el lavado se presenta como una buena alternativa para la reducción de volumen de material contaminado, y se puede asociar a plantas de tratamiento térmico para descontaminar el rechazo del lavado.

El contenido en partículas finas debe ser limitado (diámetro inferior a 63 micras) ya que la eliminación de los contaminantes adsorbidos a las mismas es de gran dificultad. El contenido en finos suele estar limitado a un 20 – 30 %. En general, el rango óptimo de tamaño de partículas se sitúa alrededor de 0,25 y 2 mm.

Altos contenidos en sustancias húmicas y una elevada capacidad de intercambio catiónico del suelo, dificultan la desorción de los contaminantes, reduciendo la efectividad del tratamiento e incrementando su coste. Se recomiendan la realización de pruebas previas para determinar su viabilidad.

Las ventajas del lavado de suelo frente a tecnologías de tratamiento de suelos son la capacidad de procesamiento, sencillez mecánica de equipos y la madurez de la tecnología con un coste de inversión contenido.

La principal desventaja que presenta es que no es un tratamiento completo y el rechazo ha de ser gestionado o tratado posteriormente.

#### - **Coste y periodo de tratamiento**

El coste de tratamiento es muy variable, pues depende del nivel objetivo de la descontaminación así como de la granulometría del suelo contaminado; siendo viable para grandes volúmenes de suelos a tratar (>10.000t).

Así, para matrices muy finas se obtendrán altas cantidades de rechazos. Para matrices arenosas o arenolimosas contaminadas con hidrocarburos de hasta el rango de diésel, el coste de tratamiento puede situarse entre 75 -100€/t, mientras que para matrices arcillosas contaminadas con metales o hidrocarburos de cadenas más largas el rango alto de tratamiento puede alcanzar los 190 €/t.

El periodo de tratamiento suele ser inferior a 6 meses.

#### - **Aspectos medioambientales**

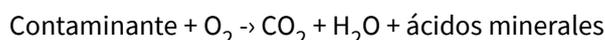
El lavado es una técnica de concentración de contaminante, por lo que el rechazo debe ser gestionado como residuo, o bien ser tratado o bien ser enviado a vertedero, con el consiguiente impacto medioambiental. No obstante, para una matriz contaminada bien estudiada y seleccionada, esta técnica es muy eficaz y reduce los volúmenes de tierras contaminadas considerablemente. (*Feng, W. et al 2020*)



## 8.1.5 Oxidación/reducción química

### 8.1.5.1 Oxidación

La técnica (*ISCO – In Situ Chemical Oxidation*) se lleva a cabo *in situ* aplicando un oxidante químico en el suelo. El objetivo de la oxidación química es transformar los contaminantes en especies de alto grado de oxidación, estado en el que suelen ser menos peligrosas y reactivas. El proceso de oxidación química implica la pérdida de electrones por parte de la especie a oxidar, lo que aumenta su nivel de oxidación, al mismo tiempo que se reduce la especie oxidante, que actúa como aceptor de electrones. Esta mineralización produce  $\text{CO}_2$  y agua, y en el caso de que el compuesto contenga heteroátomos, ácidos inorgánicos ([García et al. 2009](#)):



Los oxidantes más utilizados son permanganato sódico ( $\text{NaMnO}_4$ ) o potásico ( $\text{KMnO}_4$ ), percarbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{H}_3\text{CO}_6$ ), peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), persulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ), peróxido de calcio ( $\text{CaO}_2$ ) y ozono ( $\text{O}_3$ ) ([Villalba Villalba, 2013](#)). El usar uno u otro dependerá de las características de la matriz a tratar, así como de la posibilidad de existir riesgo estructural o estructuras enterradas en el emplazamiento, siendo recomendable la realización de ensayos de viabilidad en laboratorio para determinar el mejor oxidante o combinación de los mismos.

#### - Campo de aplicación

La aplicación de oxidantes se utiliza en la degradación de COV's y COSV's halogenados y no halogenados (hidrocarburos, pesticidas, dioxinas, PCBs) e inorgánicos como metales ([Wu et al., 2004](#); [Tiburtius et al., 2005](#)). Se suele aplicar cuando la concentración del contaminante es media-alta. Se aconseja que los suelos sean permeables de tal forma que el radio de acción en los piezómetros en los que se inyecta el oxidante tenga el mayor alcance posible.

El **permanganato sódico o potásico** es muy reactivo con los alcanos, por lo que se utiliza para oxidar etenos clorados. También es efectivo en el tratamiento de isómeros de dicloroetileno, cloruro de vinilo, fenoles y algunos hidrocarburos poliaromáticos ([Watts & Teel, 2006](#)). Sin embargo, durante la reacción se produce una elevada cantidad de  $\text{MnO}_2$  que precipita formando un residuo.

El **peróxido de hidrógeno** es el oxidante utilizado más comúnmente en emplazamientos con afección por hidrocarburos. Cuando se inyecta en las aguas subterráneas es inestable, produce radicales hidroxilos ( $\text{OH}^\cdot$ ) que actúan destruyendo las cadenas de los hidrocarburos. Capacidad para oxidar benceno y metil tert-butil eter (MTBE). Además, aumenta el nivel de oxígeno disuelto en las aguas, permitiendo la posterior biodegradación aeróbica.



El **ozono** es muy inestable y es por ello que debe generarse en el mismo momento. Tiene la ventaja de poder utilizarse en la zona vadosa sin generar el riesgo de arrastrar la contaminación hasta el acuífero si éste no está afectado (Yu, D. et al., 2007).

El **persulfato sódico** presenta una mayor solubilidad, permitiendo su inyección en un menor volumen de agua y siendo idóneo para emplazamientos con baja permeabilidad. El inconveniente que presenta es que es altamente corrosivo, no pudiéndose utilizar en emplazamientos que presenten estructuras enterradas.

En cuanto al **percarbonato sódico**, presenta características opuestas, no es soluble en agua pero tampoco es corrosivo, por lo que aunque sería necesaria una mayor cantidad de producto, podría utilizarse allí dónde hubiese estructuras enterradas.

La duración del tratamiento dependerá de distintos factores como puede ser la homogeneidad de la matriz, la conductividad hidráulica del suelo o el caudal/flujo de las aguas subterráneas y la concentración de partida del contaminante. Puede variar entre unos meses y varios años.

#### - **Coste y periodo de tratamiento**

El coste de este tratamiento depende de las características de la matriz a tratar, del contaminante y de la técnica que se requiera para inyectar el producto, pudiendo oscilar entre los 40 y los 300 €/m<sup>3</sup> de suelo.

El periodo de tratamiento suele oscilar entre 1-2 años.

#### - **Aspectos ambientales**

En cuanto a los aspectos ambientales, todos los oxidantes deben manipularse y almacenarse de forma segura. Por ejemplo, la presencia de ozono aumenta la inflamabilidad de muchos materiales, es por ello que debe mantenerse alejado de llamas o chispas que puedan generar incendios o reacciones exotérmicas descontroladas.

A su vez, las especies oxidantes pueden generar problemas a nivel respiratorio en seres humanos, por lo que debe estar almacenado con seguridad, y los técnicos deberán llevar equipos de protección que protejan piel, ojos y nariz (Ranges, S.A. 2005).

No se aplicará la técnica ISCO en el caso de que estén presentes metales cuya especie más oxidada sea más tóxica que la reducida (por ejemplo, posible oxidación del Cr III a Cr VI).



### 8.1.5.2 Reducción

La reducción química *in situ* (ISCR del inglés “*in situ chemical reduction*”) consiste en la transformación abiótica de los contaminantes por sustancias químicas reductoras como metales de valencia cero. El más utilizado es el hierro cero valente (ZVI del inglés “*zero valent iron*”), pero también se puede usar zinc cero valente (ZVZ) ([Dolfing et al., 2008](#)).

Estos metales deben aplicarse con un tamaño de partícula adecuado para potenciar su grado de reactividad ([Rodrigues et al., 2020](#); [Dovletyarova et al. 2022](#)). El tamaño de las partículas ZVI suele conferir a este producto una alta capacidad de dispersión y estabilidad, permitiéndole una elevada distribución, reactividad y longevidad en el acuífero. Esta característica tiene especial importancia en emplazamientos con baja permeabilidad, donde los radios de acción en los puntos de inyección son bajos. Esta vía abiótica también tiene la ventaja de limitar la acumulación de productos secundarios no deseados durante la reducción de productos organoclorados, como por ejemplo el cis-1-2-dicloroetano (DCE) y el cloruro de vinilo (CV).

Adicionalmente a la inyección de las partículas ZVI también se estimula la eliminación de oxígeno en el agua para alcanzar condiciones reducidas a través de la adición de sustratos orgánicos en forma de emulsiones o microemulsiones.

En este sentido, la emulsión tiene la función de mantener un ambiente reducido en el agua (libre de aceptores de electrones como el oxígeno), requisito indispensable para que tanto las partículas ZVI (vía reducción química) como las bacterias anaeróbicas degradadoras de compuestos orgánicos halogenados (vía deshalogenación reductora) puedan llevar a cabo la eliminación de los contaminantes. Dependiendo de las características del acuífero y de la concentración inicial de los contaminantes, el efecto reductor de este tipo de productos dura entre 3-5 años tras su inyección.

#### - **Campo de aplicación**

La ISCR es una técnica ampliamente utilizada en la remediación de emplazamientos contaminados con COVs halogenados, como etenos clorados [tetracloroetileno (PCE), tricloroetileno (TCE), DCE, CV] o etanos clorados [tricloroetano (TCA), dicloroetano (DCA)].

Además de los compuestos organoclorados, también se puede usar la técnica ISCR para reducir compuestos inorgánicos a formas menos tóxicas como ocurre con los metales pesados. Por ejemplo, el cromo hexavalente [Cr(VI)] es muy tóxico y puede ser transformado en Cr(III) que es una especie mucho menos tóxica y también menos móvil debido a su menor solubilidad en agua ([Gueye, M.T., et al., 2015](#)).



#### - **Coste y periodo de tratamiento**

El coste de este tratamiento depende de las características de la matriz a tratar, así como del tipo de contaminante. Para la eliminación de una mezcla de PCE y TCE los costes pueden oscilar entre los 40 y los 200 €/m<sup>3</sup> de suelo dependiendo de la técnica que se requiera para inyectar el producto.

El periodo de tratamiento suele oscilar entre 1-3 años.

#### - **Aspectos ambientales**

La ISCR es una técnica con poco impacto ambiental ya que apenas genera residuos.

Durante el tratamiento hay un cambio importante en el ambiente del acuífero, transformándolo en un medio estrictamente anaerobio. De esta manera, la microbiota autóctona puede verse alterada debido a que los microorganismos aerobios son incapaces de proliferar bajo estas condiciones. Sin embargo, una vez finalizado el tratamiento y consumido todo el sustrato inyectado, el acuífero es capaz de volver a sus condiciones originales, reactivándose la microbiota autóctona. Se recomienda la realización de ensayos previos en laboratorio para determinar su viabilidad.

### 8.1.6 Electromigración

La electromigración o electrocinética provoca la desorción de los contaminantes al aplicar corriente eléctrica, generándose un movimiento de iones hacia el electrodo de carga opuesta. Esto favorece la movilización del agua y de los compuestos iónicos e ionizables.

Para la aplicación de una diferencia de potencial, o una corriente directa, se requiere el empleo de electrodos (ánodo y cátodo), los cuales son colocados en pozos excavados en el suelo, usualmente estos se humectan con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído. Esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento (*De la Rosa-Pérez et al., 2007*).

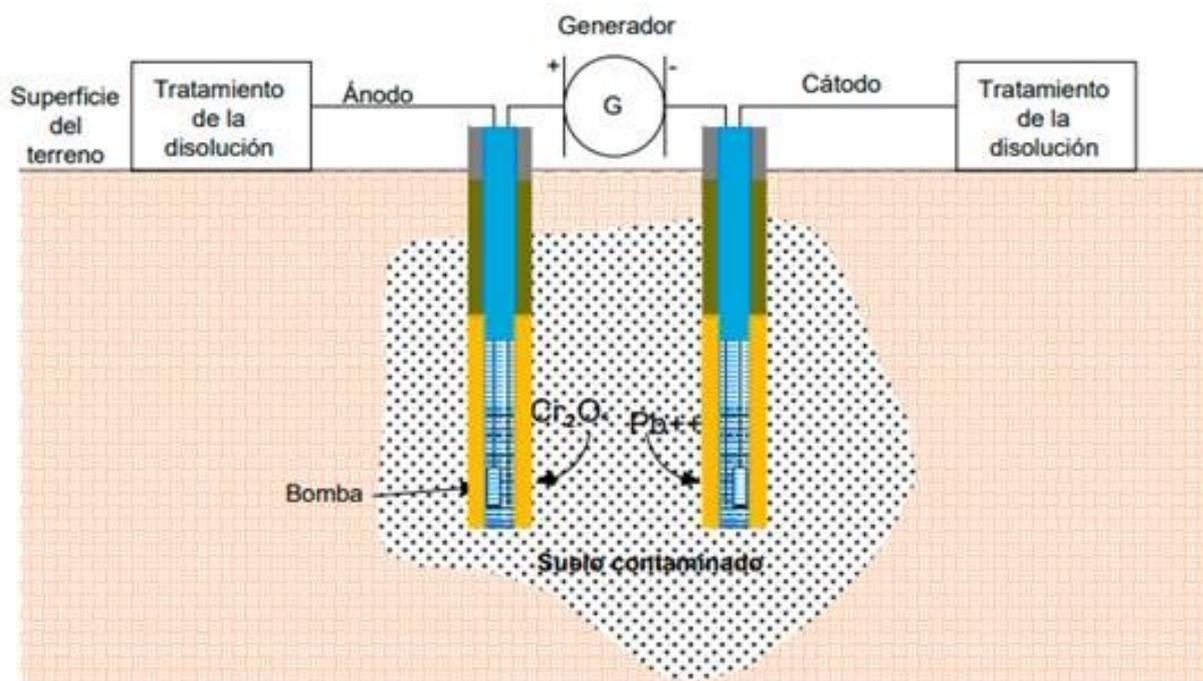
Destacan 3 mecanismos:

- **Electroforesis:** separación de moléculas en base al movimiento inducido en un campo eléctrico.
- **Electromigración:** movimiento de iones disueltos cargados a través de un medio acuoso hacia un electrodo con una polaridad opuesta a la carga de iones.



- **Electroósmosis:** movimiento tanto del fluido contenido en los poros como de los componentes disueltos inducido por una diferencia de potencial entre los dos electrodos. Este movimiento ocurre del ánodo al cátodo debido a la característica carga negativa de las partículas del suelo ( *Cameselle, C. S et al., 2013*).

**Figura 8.2. Esquema de un sistema electromigración.**



#### - **Campo de aplicación**

Esta técnica, resulta efectiva en el tratamiento de suelos con una baja permeabilidad hidráulica en los que el uso de otra técnica resultaría ineficiente. Es especialmente efectiva en estratos ricos en arcilla y/o limos con una humedad entre el 15 y el 18%, disminuyendo drásticamente la eficacia para suelos con una humedad menor al 10%. También puede usarse en suelos de grano fino con permeabilidades variadas, alto contenido en humedad y baja salinidad.

Esta técnica ha demostrado su capacidad de eliminar algunos contaminantes orgánicos como tricloroetileno e hidrocarburos, aunque su principal aplicación se da en suelos contaminados con metales como Cr, Cd, Hg, Pb, Mn, Zn y As (*Pazos et al, 2006*). La extracción de metales puede tener un rendimiento del 85 – 95%.

Entre sus ventajas predomina el bajo consumo energético y el fácil control de la dirección del agua, así como de los contaminantes disueltos que se quedan depositados en los electrodos, facilitando el trata-



miento posterior de los mismos. Sin embargo, aunque este mecanismo se ha utilizado para eliminar el agua de suelos en la industria petroquímica, su aplicación está principalmente implementada a escala piloto.

#### - **Coste y periodo de tratamiento**

El coste del tratamiento de suelos con esta tecnología varía entre 75 y 125 € por m<sup>3</sup> de suelo. El periodo de tratamiento suele oscilar entre 1-3 años.

#### - **Aspectos ambientales**

El uso de este tipo de tecnología tiene un volumen de residuos generados entre 0,001 y 0,005 m<sup>3</sup> por m<sup>3</sup> de suelo tratado. Adicionalmente, puede que parte de los electrodos se queden disueltos en el terreno donde se realiza el tratamiento, introduciendo elementos corrosivos en el mismo. Esto se evitaría usando electrodos de materiales inertes. Otro problema añadido que se puede presentar es la aparición de productos no deseables (como Cl<sub>2</sub> en forma de gas) en las reacciones redox inducidas.

## 8.2 Técnicas Biológicas

Las técnicas biológicas (o biorremediación) utilizan organismos vivos (bacterias, hongos, microalgas, plantas o enzimas producidas por los mismos) capaces de eliminar contaminantes del suelo y del agua mediante reacciones de oxidación-reducción que forman parte de sus rutas metabólicas. En este proceso, los contaminantes son utilizados por los microorganismos para su propio crecimiento celular como fuente de carbono y/o energía.

Para asegurar el éxito en un proceso de biorremediación, es fundamental evaluar el tipo y la concentración en la que se encuentra el contaminante y la biodisponibilidad de los nutrientes, la humedad y los aceptores de electrones que forman parte del proceso degradativo. Así mismo, son clave factores ambientales como la textura de suelo, el pH, la temperatura o la conductividad, entre otros. Por todo ello, es imprescindible antes de proponer la biorremediación como técnica de tratamiento llevar a cabo ensayos de viabilidad a escala laboratorio y piloto que descarten una posible inhibición sobre el metabolismo de la biología involucrada en el proceso ([Ancona, Vet. Al 2022](#)).

### 8.2.1 Atenuación Natural Monitorizada

La atenuación natural monitorizada (MNA del inglés “*monitored natural attenuation*”) es un sistema de recuperación pasivo basado en aprovechar todo el conjunto de procesos naturales físicos, químicos y biológi-



cos que se desarrollan en suelos y aguas subterráneas, y que bajo condiciones favorables contribuyen a la reducción de la masa, toxicidad, movilidad, volumen o concentración de los contaminantes en el medio, sin intervención humana. Este proceso *in situ* debe reducir el riesgo potencial que presentan los contaminantes mediante biodegradación, dispersión, dilución, sorción, precipitación, volatilización y/o estabilización química o bioquímica de los contaminantes ([U.S. EPA 1999](#)).

Dentro de esta técnica los procesos naturales son controlados y monitorizados con el objetivo de alcanzar el objetivo de remediación dentro de un período de tiempo razonable en comparación con otras técnicas alternativas. Para estudiar la viabilidad de esta opción es necesario realizar modelos para caracterizar el emplazamiento en relación a las tasas de degradación y movilización de los contaminantes. Los resultados de la atenuación natural dependen de la presencia o ausencia de los microorganismos degradadores adecuados y en una cantidad óptima, de oxígeno disuelto, del nivel de nutrientes y de la biodisponibilidad de los contaminantes ([Gómez et al., 2009](#)).

De esta forma, la MNA sólo es un método de remediación apropiado si protege a la salud humana y medioambiental, y alcanza los objetivos de remediación específicos del emplazamiento en un período de tiempo razonable.

#### - **Campo de aplicación**

La MNA es eficaz esencialmente con COVs y COSVs no halogenados, en una concentración inferior a 10.000 mg/kg ([Ibert, 2016](#)), pero requiere condiciones geológicas y geoquímicas favorables. En áreas que no pueden ser excavadas para su tratamiento es una medida correctiva importante.

La MNA será efectiva en la consecución de los objetivos de remediación en ciertos emplazamientos sin la ayuda de otras técnicas de remediación activas, siempre y cuando previamente se hayan tomado medidas de control sobre la fuente de contaminación. Normalmente, la MNA se utiliza en conjunción o posteriormente a otras técnicas de remediación más activas.

También hay que tener en cuenta el potencial de migración y/o transferencia de contaminantes a otros medios. Los contaminantes pueden migrar antes de ser degradados o los productos intermedios pueden ser más móviles y tóxicos que el contaminante original. Es necesario evaluar esta hipótesis, y determinar si la implementación de la MNA es adecuada y no representa ninguna amenaza a largo plazo.

#### - **Coste y periodo de tratamiento**

Los costes de aplicación de esta solución son muy inferiores a los de tratamientos activos y están asociados a la caracterización del emplazamiento para la realización de modelos de las tasas de degradación en el estudio de viabilidad, así como a los muestreos y análisis periódicos durante el control y seguimiento para comprobar la evolución espacial y temporal de la contaminación. Pueden oscilar entre los 15 y los 25 € por m<sup>3</sup> de suelo monitorizado.



El periodo de seguimiento suele oscilar entre 3 y 5 años.

- **Aspectos ambientales**

No existe generación de residuos en esta técnica, ya que no hay intervención antropológica y se basa en procesos naturales.

## 8.2.2 Bioventilación (Bioventing)

La bioventilación es una técnica biológica de aplicación *in situ*, que implica la inyección de aire (u oxígeno) a bajo caudal en la zona no saturada, a través de pozos.

La base de esta tecnología consiste en incrementar la concentración de oxígeno en el suelo contaminado para estimular la actividad de la biota autóctona responsable de degradar los compuestos orgánicos adsorbidos en los suelos de la zona no saturada.

A diferencia de la técnica de extracción de vapor del suelo, en la bioventilación se debe inyectar exclusivamente el volumen de aire necesario para favorecer la actividad biológica, minimizando de esta forma la volatilización de los contaminantes. Además de la biodegradación de los hidrocarburos adsorbidos al suelo, el suministro directo de aire sobre la zona contaminada da lugar a la generación de un flujo lento de los compuestos volátiles a través de la matriz, pudiendo ser degradados al atravesar el suelo biológicamente activo.

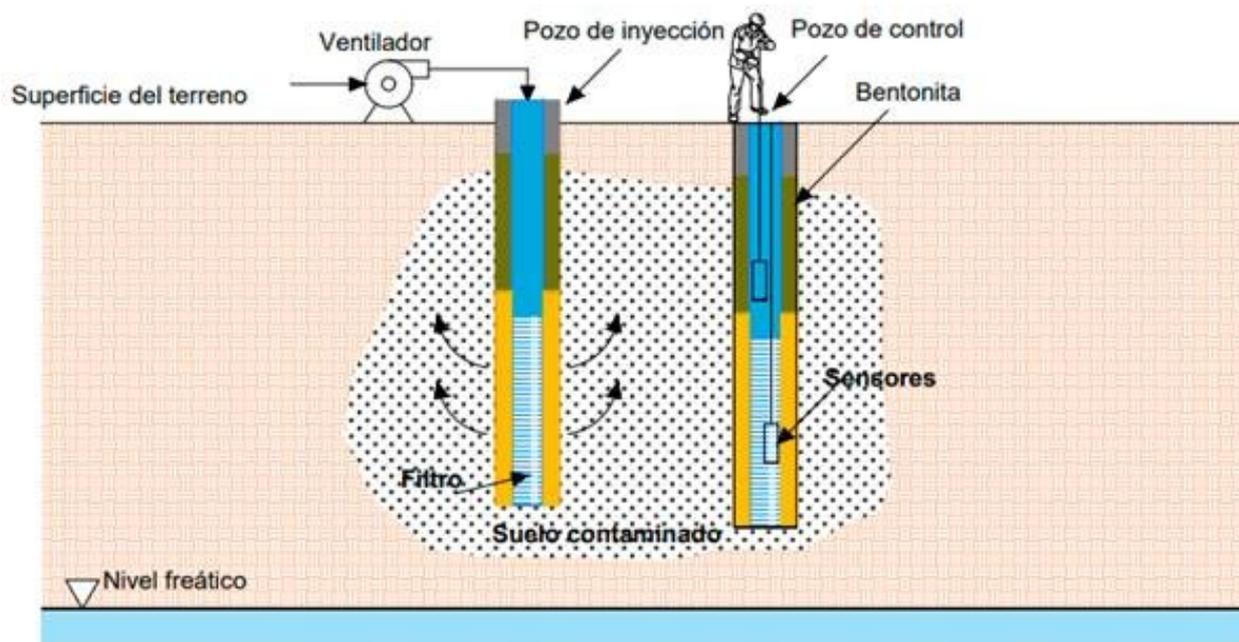
Los dos factores que fundamentalmente controlan el funcionamiento de este sistema son la permeabilidad del suelo, que determina la difusión del oxígeno en la matriz, y la biodegradabilidad del compuesto orgánico, que determina la velocidad y el grado de mineralización.

Para poder asegurar el éxito de esta técnica, es fundamental tener en cuenta como parámetro de diseño clave el radio de influencia (máxima distancia a la que, desde un pozo de inyección o extracción, se puede inducir un caudal de aire suficiente para mantener tasas de degradación biológicas en el suelo). El radio de influencia suele variar entre 3 y 30 metros dependiendo de diversos factores, como la estructura litológica, la permeabilidad, la granulometría, la porosidad efectiva, la humedad del suelo o el tipo, la concentración y la distribución espacial de los contaminantes a degradar.

Además, parámetros como el pH, los nutrientes, la temperatura y la tasa de respiración microbiana son críticos a la hora de determinar la tasa de degradación del contaminante. Por todo ello es fundamental llevar a cabo ensayos piloto en el propio emplazamiento que permitan establecer los parámetros de diseño antes de plantear la propuesta de recuperación a escala real ([Chakrabarty, M. 2021](#)).



**Figura 8.3. Esquema de Bioventilación.**



#### - **Campo de aplicación**

Esta técnica, está especialmente indicada para COVs halogenados y no halogenados como las fracciones ligeras de los hidrocarburos derivados del petróleo ( $< C_{12}$ ), algunos disolventes no clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos ligeros (de 2 anillos) y compuestos organoclorados volátiles. Los hidrocarburos más ligeros tienden a volatilizarse rápidamente por lo que se tratan mejor con la extracción de vapor. De forma general, la bioventilación es aplicable en suelos contaminados con compuestos con una presión de vapor de al menos  $100 \text{ N/m}^2$  y una constante de Henry superior a 0,01 (*Guía Madrid, 2001-2006; Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR)*).

En cuanto a las características del emplazamiento, el suelo debe tener una permeabilidad suficiente (orientativamente, una conductividad hidráulica mínima de  $0,1 \text{ m/día}$ ) para permitir el paso del flujo de aire inyectado. En condiciones óptimas (suelos con una permeabilidad mayor de  $3 \text{ m/día}$  y una concentración de contaminantes orgánicos inferior a  $3.000 \text{ mg/kg}$ ) se pueden alcanzar rendimientos de recuperación del 90-95% para compuestos volátiles (BTEX) y superiores al 40% para hidrocarburos de más de 15 carbonos.



#### - **Coste y periodo de tratamiento**

El rango típico de coste de aplicación de la bioventilación varía de 30 a 60 € por m<sup>3</sup> de suelo, de los cuales 10 a 35 € corresponden a la inyección y extracción de aire propiamente dichas (excluyendo su tratamiento).

El periodo de seguimiento suele oscilar entre 1 y 2 años.

#### - **Aspectos ambientales**

La carga contaminante del efluente gaseoso es menor que en el caso de inyectar aire comprimido, no teniendo que depurar en muchos casos el gas de extraído.

### 8.2.3 Biosparging

Esta técnica consiste en inyectar alto caudal de aire comprimido en la zona saturada del suelo, lo que consigue la volatilización de COVs halogenados y no halogenados en disolución en el agua subterránea. En esta variante predominan los procesos de degradación biológica más que los físico-químicos.

Desde un punto de vista teórico, en la aplicación de la inyección de aire comprimido para la biodegradación, no sería necesaria la instalación de pozos de extracción, ya que si se inyecta la cantidad de aire necesaria para la correcta biodegradación, los compuestos que quedasen en la fase vapor no tendrían porqué depurarse con métodos posteriores. Sin embargo, debido a que en la práctica, la cantidad de aire a inyectar en el caso de fomentar los procesos biológicos, es siempre superior a la calculada estequiométricamente, es recomendable instalar pozos de extracción de aire, ya que una pequeña proporción de contaminantes puede arrastrarse sin degradar. Para garantizar la viabilidad de la técnica es recomendable realizar estudios piloto que permitan establecer los parámetros de diseño (*Albu, M. 2021*).

#### - **Campo de aplicación**

Al igual que la bioventilación, esta técnica es aplicable a suelos y sobre todo a aguas subterráneas contaminadas con sustancias volátiles y semivolátiles con una presión de vapor de al menos 100 N/m<sup>2</sup> y una constante de Henry superior a 0,01. A estas condiciones responden algunos hidrocarburos derivados del petróleo (los de cadena inferior a 12 carbonos), algunos disolventes no clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos ligeros (de 2 anillos) y los compuestos organoclorados volátiles.

La velocidad del proceso de biodegradación depende del tipo de contaminante a tratar, de las características del suelo (permeabilidad, tamaño de las partículas, humedad, etc.) y de la temperatura. (*Marley, M. et al. 1995; USEPA 1996*).



#### - **Coste y periodo de tratamiento**

El rango típico de coste de aplicación de esta técnica varía de 30 a 70 €/m<sup>3</sup> de suelo, excluyendo el tratamiento del aire extraído.

En general, el rendimiento de esta técnica suele ser menor que la variante físico-química, donde se pone el énfasis en la extracción de los compuestos y su depuración sin buscar la biodegradación, consiguiendo una reducción del 75% de la contaminación en un plazo de aproximadamente dos años, aunque depende de las concentraciones iniciales.

#### - **Aspectos ambientales**

Los efluentes gaseosos suelen tener una carga contaminante menor que mediante la simple extracción del aire, no teniendo que depurar en muchos casos el gas de extraído.

### 8.2.4 Biodegradación mejorada

La biodegradación mejorada es una técnica *in situ* que acelera los procesos de biodegradación natural proporcionando nutrientes y aceptores de electrones para que la asimilación del contaminante orgánico sea rápida y produzca productos finales inocuos.

Dependiendo de la presencia de biota autóctona en la matriz a descontaminar se plantean fundamentalmente dos estrategias de biodegradación: la bioestimulación o la bioaumentación. La bioestimulación consiste fundamentalmente en la adición de los aceptores de electrones, los nutrientes (fundamentalmente nitrógeno y fósforo) y elementos traza necesarios para iniciar la degradación del contaminante. El proceso de biodegradación puede ser aerobio o anaerobio. En el primer caso el proceso se estimula generalmente mediante la inyección de aire, siendo el oxígeno el aceptor de electrones. En los procesos anaerobios (anóxico si hay presencia de nitrato) los aceptores de electrones habituales son el  $\text{NO}_3^-$ , el  $\text{Mn}^{+4}$ , el  $\text{Fe}^{3+}$ , el  $\text{SO}_4^{-2}$  y el  $\text{CO}_2$ .

La bioaumentación consiste en la adición (además de los nutrientes) de microorganismos degradadores del contaminante objetivo. Dichas cepas son cultivadas en presencia del contaminante, desarrollándose de esta forma inóculos con una elevada avidez por el mismo. La adición de dichos microorganismos degradadores específicos permite disminuir el tiempo requerido en la mineralización del contaminante.

#### - **Campo de aplicación**

La biodegradación mejorada es aplicable en suelos contaminados con COVs y COSVs halogenados y no halogenados: hidrocarburos derivados del petróleo monoaromáticos (BTEX), hidrocarburos alifáticos y



aromáticos medios ( $< C_{25}$ ), hidrocarburos aromáticos policíclicos con menos de tres anillos y compuestos organoclorados (por ejemplo, per, tri y dicloroetano) presentes en concentraciones del orden de cientos de mg/Kg.

En cuanto a las características del suelo es necesario que sea homogéneo y que tenga una permeabilidad igual o superior a 0,5-1 m/día de cara a evitar la aparición de vías preferenciales y garantizar la biodisponibilidad de todos los compuestos implicados en el proceso degradativo.

#### - **Coste y periodo de tratamiento**

El coste de aplicación de esta técnica depende mucho del tipo y concentración de los contaminantes implicados y su distribución espacial en el emplazamiento. El rango de costes oscila entre los 40 y los 100 €/m<sup>3</sup> de suelo dependiendo del tipo de aditivos y microorganismos utilizados.

En el caso de suelos homogéneos y permeables los plazos de recuperación requeridos suelen ser inferiores al año.

#### - **Aspectos ambientales**

La generación de residuos de esta técnica es baja o incluso nula, ya que las dosis de nutrientes y microorganismos aplicadas se calculan para ser consumidas en el emplazamiento en función de la carga contaminante.

### 8.2.5 Fitorremediación

La fitorremediación es una tecnología de descontaminación *in situ* que consiste en la aplicación de especies vegetales para extraer, transformar o descomponer los contaminantes presentes en suelos o aguas. Posee además la ventaja de ser una técnica que altera mínimamente la estructura del suelo y lo protege de la erosión.

Dentro de la fitorremediación se incluyen varias técnicas, las cuales se diferencian en los mecanismos de actuación de las especies vegetales utilizadas (*Ghosh et al., 2005*):

- **Fitoextracción:** consiste en la utilización de especies vegetales capaces de absorber los contaminantes presentes en el suelo y acumularlos en sus partes aéreas. Como etapa final del proceso, las plantas deben ser retiradas y gestionadas como residuo. Es especialmente recomendable para el caso de metales pesados como el arsénico o el plomo.



- **Fitodegradación:** consiste en el uso de plantas para degradar contaminantes orgánicos. Los metales pesados no son susceptibles de ser eliminados por este método.
- **Rizofiltración:** consiste en el uso de plantas para reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo mediante su acumulación en partes inertes de las raíces de las propias plantas. Tiene como inconveniente que los contaminantes permanecen en el suelo a no ser que se extraigan las raíces, un proceso en general mucho más costoso que la extracción de las partes aéreas.
- **Fitoestabilización:** consiste en el uso de las plantas para la fijación o inmovilización de los contaminantes en el suelo, impidiendo o dificultando su efecto sobre los seres vivos presentes. En este caso, a diferencia de la rizofiltración, los contaminantes permanecen en la matriz del suelo. La reducción de la biodisponibilidad tiene lugar en el entorno de las raíces por efecto de sustancias segregadas por las plantas y la microbiota asociada. Tiene como inconveniente el hecho de que los contaminantes permanecen en el suelo, siendo posible su reactivación si se da un cambio en las condiciones del mismo.
- **Fitovolatilización:** consiste en el uso de plantas para eliminar los contaminantes del suelo mediante su volatilización. En este caso, los contaminantes son absorbidos por la planta, circulan por los tejidos de la misma, y son liberados a la atmósfera a través de las hojas. Este problema es especialmente importante en el caso del mercurio, debido a su volatilidad relativamente alta, pero puede darse sobre otras sustancias, como el arsénico. Tiene como inconveniente el hecho de que la contaminación es transportada del suelo a la atmósfera, donde puede provocar efectos adversos.

Los métodos biológicos de descontaminación, como la fitorremediación, están sujetos a mucha variabilidad según las condiciones particulares de cada emplazamiento, por lo que se recomienda estudiar su viabilidad de forma escalonada. Así, es recomendable comenzar con un estudio de laboratorio, realizar después una prueba piloto sobre el terreno y, finalmente, si los resultados indican la viabilidad de la técnica, proceder a su aplicación en las zonas del emplazamiento susceptibles de ser descontaminadas mediante fitorremediación. ([Liu, Z et al. 2021](#))

#### - **Campo de aplicación**

La técnica de fitorremediación puede aplicarse para el tratamiento de COSVs halogenados (pesticidas) y no halogenados (PAH) e hidrocarburos pesados derivados del petróleo, así como una amplia variedad de metales pesados (cadmio, cobre, plomo, arsénico, selenio, níquel, cobalto, etc.).

Sin embargo, existen ciertas limitaciones generales a la hora de implementar esta técnica:



### ⇒ **Especies vegetales**

Un primer factor para considerar a la hora de diseñar un tratamiento por fitorremediación es la posibilidad de encontrar variedades vegetales aplicables al terreno afectado, esto es, capaces de crecer en las condiciones particulares de la zona (o tras un acondicionamiento mínimo del terreno) y de desarrollar la función pretendida contra los contaminantes de interés. También hay que tener en cuenta las características climatológicas de la zona una vez que pueden impedir o limitar estacionalmente el crecimiento de las plantas.

### ⇒ **Profundidad del suelo afectado**

La movilización del contaminante necesita del contacto directo entre raíces con la región contaminada del suelo, por lo que la elección de las variedades de plantas a utilizar dependerá de su capacidad de crecimiento radicular. De esta forma, la fitorremediación normalmente sólo se utiliza cuando la contaminación se encuentra en las capas superficiales del suelo (orientativamente, hasta 0,5-1 metro de profundidad).

### ⇒ **Invasión de cadenas tróficas**

Los contaminantes acumulados en tejidos vegetales pueden invadir las cadenas tróficas si las plantas son ingeridas por fauna herbívora y pasar a acumularse en el organismo de ésta y de sus depredadores, con posibles efectos tóxicos y riesgo de bio-magnificación.

### ⇒ **Concentraciones de los contaminantes**

La concentración de los contaminantes no debe ser tan alta que alcance niveles tóxicos para el crecimiento vegetal. Para suelos muy contaminados la implementación de esta tecnología puede necesitar algún otro método de descontaminación previo que disminuya los niveles de los contaminantes a niveles no tóxicos para las plantas.

### ⇒ **Características del terreno**

Puede ser necesaria una corrección de las características del suelo como por ejemplo la corrección del pH, del contenido en nutrientes o la aireación. Se pueden aplicar distintos aditivos tales como enmiendas calizas, nutrientes, fertilizantes, sustancias quelantes, etc. Sin embargo, estos pueden alterar el comportamiento de los contaminantes, modificando su solubilidad o biodisponibilidad.

Esta técnica en la mayor parte de los casos necesita largos periodos de tratamiento para alcanzar los objetivos de descontaminación, que pueden ser desde varias estaciones hasta décadas.



#### - **Coste y periodo de tratamiento**

El coste medio de esta tecnología depende en gran medida de las características del terreno y del entorno, que condicionará el desarrollo de la vegetación que realizará el proceso de fitorremediación. Del mismo modo, la selección del tipo de vegetación apropiada para realizar el proceso determinará el tiempo de tratamiento y, con ello, los costes del mismo. Éste oscila enormemente dependiendo de la técnica a aplicar. Si no hay que cosechar/podar y gestionar las especies utilizadas el coste se encuentra entre 5 – 8 €/m<sup>3</sup> suelo tratado. De lo contrario, el gasto puede ascender hasta 180 – 600 €/m<sup>3</sup> para tratamientos en terrenos de gran superficie (*Federal Remediation Technologies Roundtable, 2006*).

El tiempo de tratamiento suele ser superior a los 3 años.

#### - **Aspectos ambientales**

La fitorremediación puede tener algunos impactos ambientales que deben ser evitados o reducidos. Respecto a la atmósfera, puede haber una posible emisión de gases contaminantes por fitovolatilización. La siembra en zonas desprovistas de vegetación puede inducir una modificación en la circulación de las aguas superficiales, así como un cambio en la composición química del agua.

También puede existir un impacto ambiental en el caso de ser necesaria la aplicación de enmiendas orgánicas y/o químicas en el suelo para favorecer la fitorremediación, que puede ser evitado si la dosificación de enmiendas se realiza de forma controlada para que no afecte al entorno. En el caso de la fitoextracción, será necesario gestionar como residuo la parte aérea de la planta para evitar una posible incorporación a la cadena trófica de los contaminantes.

### 8.2.6 Landfarming

El landfarming es una técnica de biorremediación *ex situ* definida como un proceso biológico controlado en el que los contaminantes orgánicos son mineralizados por microorganismos aerobios, transformándolos finalmente en CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O según la siguiente ecuación:



Durante la aplicación de esta técnica el suelo afectado se excava y dispone sobre una superficie impermeable y estanca, conformando parcelas de unos 50 cm de altura sobre las que se aplica una serie de tratamientos con el fin de estimular la actividad microbiológica responsable de la degradación del contaminante. Entre estos tratamientos destacan la aplicación de agua y nutrientes, el acondicionamiento edafológico y la homogenización y aireación del suelo mediante labores de arado con maquinaria agrícola con el fin de maximizar la disponibilidad y el contacto entre el contaminante, los nutrientes, la humedad, el oxígeno y los microorganismos (bioestimulación). Adicionalmente, en caso de ausencia de microbiota autóctona capaz



de mineralizar el contaminante se aplica un inóculo bacteriano previamente aclimatado con el fin de iniciar el proceso biodegradativo (bioaumentación). (*Sierra Gómez, J. S. 2021*)

#### - **Campo de aplicación:**

Esta técnica está indicada para COSVs de peso molecular medio ( $< C_{25}$ ) que no pueden ser eliminados por evaporación, pero sí vía degradación biológica. En su aplicación para los más volátiles será preciso controlar las emisiones de estos a la atmósfera, siendo en la mayoría de estos casos más recomendable utilizar la técnica de Biopilas estáticas.

Así mismo, en casos en los que exista una limitación de espacio en el emplazamiento disponible o cuando se persiga acelerar el proceso de biorremediación será necesario plantear la técnica en Biopilas.

#### - **Coste y periodo de tratamiento**

Los rangos típicos para el landfarming se sitúan entre 30 y 60 €/t de suelo dependiendo de la concentración de partida del contaminante y de la cantidad de suelo a tratar.

El tiempo de recuperación de esta técnica para los compuestos indicados está comprendido entre los 6 y 12 meses.

#### - **Aspectos ambientales**

Los residuos generados durante este tratamiento son fundamentalmente las lonas utilizadas para impermeabilizar la zona de trabajo sobre las que se forman las parcelas de suelo contaminado. El uso de esta técnica puede provocar molestias como pueden ser olores o emisiones de polvo y partículas durante las labores de arado, por ello, esta técnica debe aplicarse con productos de volatilidad media – baja, siendo recomendable realizar ensayos previos de viabilidad en laboratorio.

### 8.2.7 Biopilas

Al igual que en el proceso de landfarming, el tratamiento mediante biopilas es una técnica de biorremediación *ex situ* donde los contaminantes orgánicos son mineralizados en  $CO_2$  y  $H_2O$  por microorganismos aerobios.

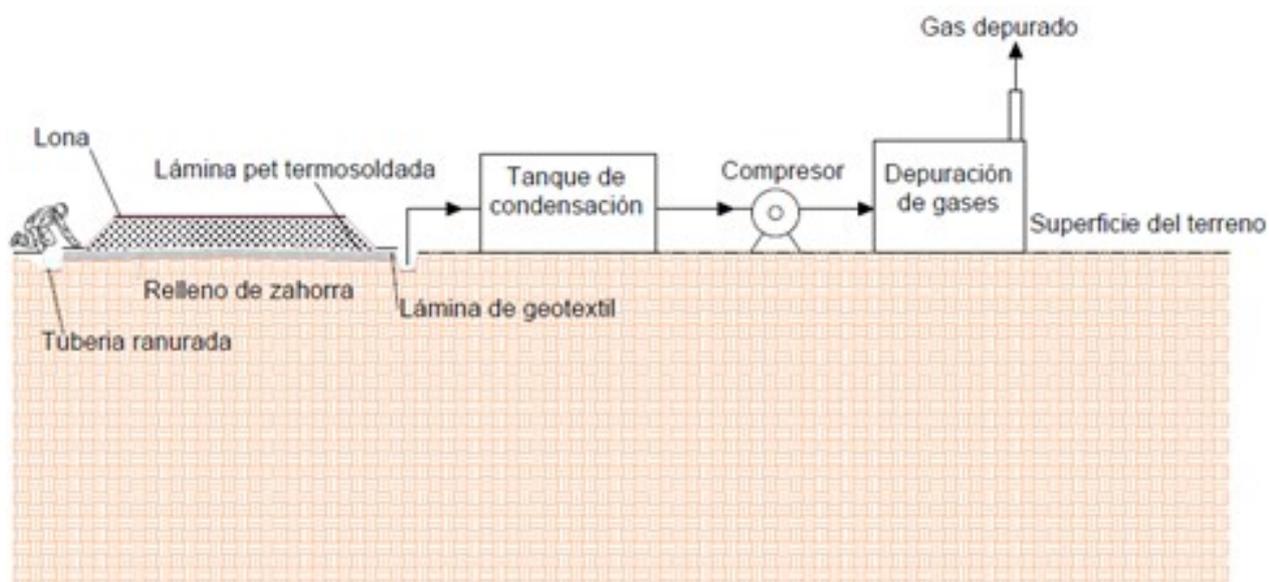
El proceso consiste en formar pilas con el suelo contaminado y estimular la actividad microbiana, aireando y adicionando nutrientes y humedad.



Existen dos tipos de estrategias a seguir en función del tipo de contaminante: tratamiento mediante biopilas dinámicas o estáticas.

La principal diferencia entre las biopilas dinámicas y estáticas radica en la forma de suministrar el oxígeno. En las biopilas dinámicas se suministra el oxígeno volteando el suelo mediante máquina retroexcavadora, mientras que en la biopilas estáticas el aire se inyecta o extrae a través de parrillas de aireación formadas por tubos perforados o ranurados que atraviesan la biopila. Así mismo, durante el proceso de biorremediación, en las biopilas dinámicas la aplicación de nutrientes y microorganismos se lleva a cabo mediante sistemas de riego o pulverización acompañado del volteo del suelo con el fin de homogenizar y oxigenar la matriz, optimizando la biodisponibilidad de todos los compuestos involucrados en el proceso biodegradativo. En las biopilas estáticas, la solución de nutrientes (y el inóculo en el caso de bioaumentación) se aporta a través de las parrillas de tubos ranurados distribuidos longitudinalmente y a distintas alturas en la biopila. En ambos casos, una vez formadas, las biopilas se protegen de la lluvia y el viento mediante lonas de cubrición que a su vez previenen la pérdida de compuestos volátiles y calor durante el proceso. ([Zhang, K. et al. 2021](#))

**Figura 8.4. Esquema de Biopilas.**



La altura de diseño de la biopila vendrá marcada por la textura del suelo a descontaminar, pudiendo alcanzar hasta 1,5 m de altura en las biopilas dinámicas y hasta 2 ó 3 m de altura en las biopilas estáticas.

Los parámetros clave durante el tratamiento microbiológico que van a determinar el máximo rendimiento metabólico de las bacterias implicadas en el proceso son:

- **Estructura:** debe ser homogénea y con una porosidad que permita la correcta difusión del oxígeno.



- **Temperatura:** la velocidad de crecimiento de las poblaciones bacterianas desciende significativamente por debajo de 10 y por encima de los 45 °C. Se recomienda mantener el suelo durante el tratamiento a una temperatura comprendida entre 20 y 40°C.
- **pH:** debe mantenerse en torno a pH neutro (entre 6 y 8). Si es necesario, se pueden añadir al suelo agentes correctores del pH, aunque en ocasiones, la capacidad buffer del suelo hace inviable este ajuste.
- **Contenido en nutrientes:** Se recomienda que la relación C:N:P entre 100:10:1 y 100/1/0,5.
- **Humedad:** los microorganismos requieren un determinado grado de humedad para llevar a cabo las reacciones bioquímicas que tienen lugar en el agua. Esta cantidad dependerá de la temperatura y la humedad ambiente en la zona y la capacidad de campo del suelo. El rango óptimo suele estar entre el 40 y el 85% de la capacidad de campo.
- **Población de bacterias heterótrofas totales:** se encuentran típicamente en el rango  $10^4$ - $10^7$  CFU/gramo de suelo. Por debajo de 1.000 CFU/g de bacterias heterótrofas la biodegradación es prácticamente inviable. Por tanto, si las poblaciones indígenas del suelo a tratar son insuficientes, pueden inocularse bacterias alóctonas que permitan acelerar el proceso biodegradativo.

#### - **Campo de aplicación**

Las biopilas han demostrado ser eficaces para tratar suelos contaminados por COVs y COSVs halogenados y no halogenados como hidrocarburos derivados del petróleo monoaromáticos (BTEX), alifáticos y aromáticos medios ( $< C_{25}$ ), hidrocarburos aromáticos policíclicos con menos de tres anillos y algunos pesticidas.

En el caso de concentraciones no inhibitorias, también se podrán tratar hidrocarburos pesados como los CONV. Los compuestos orgánicos más volátiles deberán tratarse en biopilas estáticas, donde será necesario colocar un filtro a la salida del aireador, para tratar los gases antes de ser liberados a la atmósfera.

Aunque el tiempo necesario para dar por finalizado el tratamiento dependerá fundamentalmente del tipo y concentración del contaminante, de la textura del suelo, así como de los objetivos concretos de descontaminación establecidos, el periodo de biorremediación mediante biopilas suele estar entre los 6 y los 9 meses. En el caso de contaminantes orgánicos pesados el tiempo de tratamiento puede sobrepasar el año. Se recomienda realizar ensayos previos de viabilidad en laboratorio.

#### - **Coste y periodo de tratamiento**

Los costes de este tipo de tratamiento oscilan entre 40 y 80 €/t. El tratamiento de suelos con compuestos menos biodegradables o con una estructura molecular más compleja puede costar hasta 120 €/t de suelo.



## - Aspectos ambientales

Los residuos generados durante este tratamiento son fundamentalmente las lonas utilizadas para impermeabilizar la zona de trabajo y cubrir las biopilas, no obstante, si se utilizan carpas de cubrición especialmente construidas para tal efecto, las cuales podrían ser utilizadas nuevamente en futuros tratamientos. En el caso de biopilas estáticas con alta carga contaminante será necesario también gestionar el carbón activo que se haya utilizado para depurar los gases intersticiales extraídos de la biopila. El uso de esta técnica puede provocar molestias como pueden ser olores o emisiones de polvo y partículas durante las labores de montaje y/o volteo.

## 8.3 Técnicas térmicas o termoquímicas

### 8.3.1 Desorción térmica

El proceso de desorción térmica es un tratamiento térmico de descontaminación de suelos de alta capacidad y rapidez, que presentan contaminaciones de compuestos orgánicos y determinados metales pesados con bajo punto de ebullición.

La técnica requiere la excavación previa del suelo, y consiste en aplicar calor, en condiciones de oxígeno restrictivas, de manera que la matriz de suelo alcance temperaturas de entre 250 y 550°C, alcanzándose el punto de ebullición del contaminante que pasa a fase gas. De esta forma la matriz sólida se extrae del proceso descontaminada y la fase gaseosa que contiene el contaminante se dirige a su oxidación térmica en presencia de oxígeno en cámaras de postcombustión u oxidadores térmicos, con el objetivo de cumplir las condiciones de temperatura y tiempos de residencia exigidos en la normativa medioambiental para evitar la generación de dioxinas y furanos. Parte de los gases de la combustión se utilizarán para el proceso de desorción, mientras que los gases restantes serán enviados a sistemas de limpieza y tratamiento de gases previamente a ser expulsados a la atmósfera.

Existen diversas configuraciones de plantas de desorción térmica, con condensación de contaminantes de la fase gas, sin condensación, con recuperación de calor, con sistemas de pretratamiento de secado para matrices húmedas, etc. Aunque la principal distinción o clasificación entre tipos de desorción se basa en el modo de contacto de los gases de combustión con la matriz contaminada y por tanto, el modo de intercambio de calor. De esta forma, será desorción directa cuando entren en contacto entre ellos e indirecta cuando no haya contacto y el intercambio de energía térmica se haga a través de la pared metálica del equipo que trasiega el material contaminado.

Salvo contadas excepciones, los equipos de desorción térmica van acompañados de sistemas de tratamiento de gases consistentes en ciclados, lavado de gases en vía húmeda o vía seca y filtros de mangas para poder dar cumplimiento a la normativa de emisiones. (*USEPA 1994; Ilyas, N. et al. 2021*)



## - **Campo de aplicación**

La desorción es un tipo de tratamiento finalista, en el que la matriz se descontamina y no requiere tratamientos posteriores. Habitualmente la fracción orgánica del suelo se verá afectada, por lo que se requiere un cierto periodo de tiempo para que el suelo adquiera de nuevo la materia orgánica y permita el crecimiento de vegetación.

Se aplica a grandes volúmenes de suelo de diversa granulometría, como arenas, limos y arcillas, aunque las fracciones muy finas pueden exigir equipos adicionales de retirada de polvo.

En cuanto a contaminantes, admite una amplia tipología de COVs y COSVs halogenados y no halogenados como hidrocarburos de cualquier cadena, clorados como PCB's, aceites industriales, hidrocarburos pesados y metales en concentraciones diversas que pueden alcanzar incluso un 10-15% sms (sobre masa seca), aunque las altas concentraciones penalizan habitualmente la capacidad de procesamiento de la instalación.

La presencia de metales pesados (en especial, los más volátiles) y disolventes clorados en los suelos a tratar suele representar un problema, al requerir sistemas más sofisticados de depuración de gases y a los elevados puntos de ebullición de algunos metales. La presencia de cloruros y sulfuros puede incrementar la volatilidad de ciertos metales como el plomo. Por tanto, aunque algunos metales de bajo punto de ebullición, como el mercurio, podrían ser tratados mediante esta técnica, se deben extremar las precauciones, por los riesgos asociados a su posible transmisividad a la fase gas.

Los suelos más adecuados para la aplicación de esta técnica son los que presentan contenidos relativamente bajos de arcilla y sustancias húmicas, orientativamente hasta un 30% y 2% respectivamente. Los de alto contenido dan lugar a la aglomeración de las partículas y requieren mayor tiempo para la desorción. En todo caso, se aconseja que las concentraciones de contaminantes a tratar no sean superiores al 2-3% en peso, para evitar indeseables reacciones espontáneas en el horno. En cuanto a la humedad del suelo, esta debe permanecer por debajo del 15-20%, recomendándose no exceder un 30 % para no disparar el coste del tratamiento.

La principal ventaja de la desorción frente a otras técnicas de tratamiento térmico en descontaminación de suelos es la rapidez de tratamiento, menor complejidad de equipos y por tanto, menor inversión, además de presentar una madurez tecnológica contrastada.

Como la principal desventaja frente a la incineración, son las limitaciones de tratamiento de matrices muy contaminadas o pastosas. Frente a la pirólisis, la principal desventaja es la pérdida de propiedades orgánicas del suelo.



#### - **Coste de tratamiento**

El coste de tratamiento medio para tierras contaminadas con hidrocarburos puede situarse entre 70 y 200 € por tonelada de suelo procesado, dependiendo este rango de la concentración y poder calorífico del contaminante de entrada y la concentración objetivo, del tratamiento de gases y de la eficiencia térmica del proceso.

#### - **Aspectos medioambientales**

La desorción térmica se considera en base a la normativa medioambiental nacional como incineración, a pesar de no ser procesos iguales en concepción ni en finalidad. Esto afecta directamente a la parte de emisiones gaseosas, que se igualan en medición y en concentración emitida a las incineradoras, por lo que los sistemas de abatimiento de contaminantes gaseosos deberán ser muy eficaces.

En cuanto a la operación, se considerará de manera profunda un estudio de atmósferas explosivas al manejar matrices con contaminantes en presencia de altas temperaturas. Con compuestos muy volátiles será especialmente importante un buen control de emisiones para evitar atmósferas explosivas durante el proceso.

### 8.3.2 Incineración

La incineración es la transformación exotérmica de los compuestos orgánicos consecuencia de aplicar altas temperaturas (superiores a 850°C) en presencia de oxígeno, dando como productos resultantes CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O y otros compuestos minoritarios.

El objetivo de la incineración en suelos contaminados, previamente excavados, es por un lado acometer el tratamiento de un suelo contaminado con compuestos de difícil tratamiento con otras tecnologías, aprovechar el Poder Calorífico Inferior (PCI) del contaminante para el proceso y reducir el volumen de residuos.

Durante la incineración el suelo contaminado pasa por diferentes fases de manera casi simultánea. En primer lugar, se produce el calentamiento de la matriz y la evaporación del agua, siendo este último el proceso más costoso a nivel energético. Posteriormente se incrementa la temperatura de la matriz de manera que los contaminantes pasan a fase gaseosa, liberando su energía durante su oxidación, quedando como productos resultantes CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O y otros compuestos minoritarios en función del contaminante (Cloro, Flúor, Azufre, etc.).

Las instalaciones de incineración van acompañadas de sistemas de tratamiento de gases complejos para dar cumplimiento a la normativa medioambiental vigente. Estos suelen ir encaminados a la reducción de contaminantes halogenados, azufre, NO<sub>x</sub>, metales pesados, dioxinas, furanos y partículas.



Las configuraciones que pueden presentar las plantas de incineración son diversas en función del tipo de residuo, de la tipología de planta o de la tecnología utilizada. Así, se pueden encontrar instalaciones móviles consistentes en trómeles rotativos, instalaciones fijas de parrilla móvil o de lecho fluidizado. Dados los altos valores de inversión y operación y mantenimiento, es habitual utilizar instalaciones existentes de incineración de residuos, hornos de cementeras (co-incineración) o similares. (*Latosińska, J. 2020*)

#### - **Campo de aplicación**

El campo de aplicación de esta técnica de descontaminación es diverso, aunque suele utilizarse para matrices de granulometría variada con altas concentraciones de contaminantes orgánicos, como COVs o COSVs halogenados y no halogenados y CONV que no puedan superar los límites de admisibilidad mediante la aplicación de otras técnicas finalistas tales como la desorción, la oxidación química, etc.

En cuanto a las características del material a procesar, se recomienda que el grado de humedad no sea muy elevado (inferior al 15-20%) para que el balance térmico de la instalación no se vea afectado, por lo que para humedades superiores es recomendable realizar pretratamientos de deshidratación o secado.

Los vertidos de crudos de petróleo, fueles, fondos de tanque previamente deshidratados o matrices con concentraciones altas (superiores al 10-15% de TPH sms) tienen cabida en este tipo de tratamiento.

#### - **Coste de tratamiento**

El coste de tratamiento es muy dispar en función de la tecnología de incineración y del tipo de contaminante procesado, pudiéndose encontrar rangos de tratamiento de entre 100 € por tonelada para tierras contaminadas con bajas concentraciones de hidrocarburos y 2.000 € por tonelada para residuos peligrosos.

#### - **Aspectos medioambientales**

La incineración es una tecnología finalista muy eficaz para la reducción del volumen de residuos que evita el almacenamiento de residuos sin procesar en vertederos y por tanto, su colmatado. Además, la recuperación de calor puede contribuir a generar energía eléctrica. No obstante, el consumo energético de este tipo de instalaciones es elevado en comparación con otras tecnologías térmicas como desorción. Puede estar limitada su aplicación en presencia de determinados compuestos que deriven presencia de sustancias peligrosas a la fase vapor, como por ejemplo, la presencia de PCB.

No obstante, la incineración debe ser aplicada de tal forma que abata la emisión a la atmósfera de compuestos peligrosos para la salud humana como dioxinas y furanos, metales pesados, compuestos azufrados o NOx.



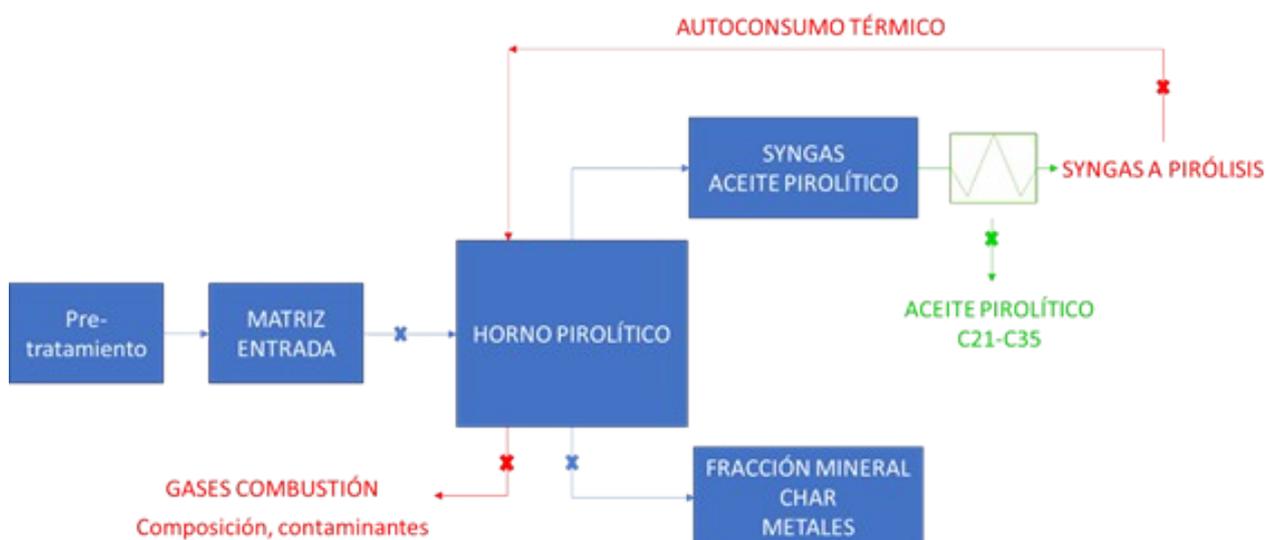
### 8.3.3 Pirólisis

Existen diferentes tipos de pirólisis en función de las condiciones termodinámicas en las que tiene lugar el proceso, pero en líneas generales podría definirse la pirólisis como un proceso termolítico de descomposición química de una gran variedad de materiales, excepto metales y vidrio, a temperaturas entre 400 y 1.300°C, alta presión y ausencia de oxígeno, cuyos productos resultantes son calor, aceite pirolítico, gases de síntesis y biochar. La pirólisis de biomasa residual se usa comúnmente en la producción de biocarbón o biochar, el cual se ha estudiado por sus beneficios cuando es agregado a agroecosistemas como enmienda edáfica.

En resumen, las transformaciones químicas que tienen lugar dentro del reactor pirolítico son las siguientes:

- La desorción de los hidrocarburos más ligeros es el proceso dominante inicial durante el ascenso de temperaturas en un rango entre 150 y 350 °C.
- Las reacciones pirolíticas dominan en el rango de 400-500 °C liberando productos de pirólisis (como hidrógeno, metano y olefinas).
- Finalmente, la fracción orgánica a temperaturas superiores a 300 °C y en condiciones anóxicas conduce a la formación de un material sólido carbonoso (char) que permanece en el suelo tratado. (Kim, Y. et al. 2019)

**Figura 8.5. Esquema de los tratamientos pirolíticos.**





#### - **Campo de aplicación**

La pirólisis se puede aplicar para el tratamiento de suelos contaminados con COVs o COSVs halogenados y no halogenados y CONV. A diferencia de la desorción térmica o la incineración, la pirólisis ofrece el potencial de una rápida remediación de suelos contaminados con hidrocarburos, sin destruir las propiedades edáficas del suelo, permitiendo así un subsecuente proceso de restauración del ecosistema terrestre. Esto se logra a partir de la transformación química de los hidrocarburos residuales y la materia orgánica del suelo, en un “*biochar*” obteniéndose un sustrato final formado por una mezcla de suelo y “*biochar*”.

En cuanto a las características del material a procesar, se recomienda que el grado de humedad no sea muy elevado (inferior al 15-20%) para que el balance térmico de la instalación no se vea afectado, por lo que para humedades superiores es recomendable realizar pretratamientos de deshidratación o secado.

Los vertidos de crudos de petróleo, fueles, fondos de tanque previamente deshidratados o matrices con concentraciones altas (superiores al 10-15% de TPH sms) tienen cabida en este tipo de tratamiento.

#### - **Coste de tratamiento**

El coste de someter al suelo contaminado a incineración se encuentra en un rango del orden de 200 a 300 € por tonelada de suelo.

Suelen caracterizarse por bajos rendimientos de m<sup>3</sup>/h, incluso con equipos de gran capacidad.

#### - **Aspectos ambientales**

El tratamiento de la contaminación de los suelos con este tipo de técnica genera otro tipo de contaminantes como: partículas en suspensión, dióxido de carbono, aguas contaminadas, metales pesados etc. Será necesario acometer una serie de postratamientos que reduzcan esa carga contaminante emitida a la atmósfera.



## 8.4 Técnicas de confinamiento

### 8.4.1 Sellado superficial

El sellado superficial se concibe para aislar un foco contaminado, de forma que se impida la exposición directa a la contaminación, se eviten las posibles emisiones gaseosas y se limiten o eliminen las filtraciones de agua a la zona contaminada.

Habitualmente se utilizan tres tipos de sellado o cobertura:

- Sellado con materiales naturales. Utiliza suelos de textura arcillosa o una mezcla de textura arenosa o limosa con bentonita.
- Sellado con obra civil. Utiliza aglomerados asfálticos o cubiertas de hormigón.
- Sellado con láminas sintéticas, de poco espesor, fabricadas con materiales termoplásticos.

La elección del tipo de sellado a realizar depende de las características específicas del lugar. Algunas de estas características son el clima, los suelos, la naturaleza de los contaminantes, la hidrogeología, la generación de gases, el entorno sísmico y la posible reutilización de las áreas selladas.

Los sistemas de sellado se suelen complementar con una capa de tierra del orden de medio metro y otra capa superior de tierra vegetal de unos quince o veinte centímetros de espesor, de forma que se posibilite el crecimiento y desarrollo de flora autóctona que integre el espacio en el entorno y evite la erosión, cuidando también de esta forma el factor estético. (*Di Prima, S. et al. 2018*)

#### - **Campo de aplicación**

Usado como técnica principal de contención, el sellado superficial es aconsejable siempre que se pretenda evitar la posibilidad de contacto directo con el suelo contaminado o bien disminuir la infiltración de agua de lluvia en el suelo.

Si existe un riesgo de dispersión lateral de la contaminación a través del aire intersticial del suelo, se debe evitar este tipo de sellado como solución exclusiva, siendo más efectiva una contención lateral y un sistema de captación de los contaminantes volátiles que, por su parte, puede requerir un sellado superficial (total o parcial) del emplazamiento.



Debido a la rigidez estructural que las caracteriza, las soluciones de sellado con obra civil tienen una aplicación limitada si se prevén asentamientos diferenciales del suelo tras la recuperación del emplazamiento, por ejemplo, en vertederos. No obstante, soluciones menos rígidas, como las placas prefabricadas de hormigón, pueden ser aceptables, siempre y cuando se garantice la estanqueidad de las juntas. En todo caso, las soluciones de sellado con obra civil no garantizan la contención de los compuestos orgánicos volátiles.

Las láminas sintéticas utilizadas en sellados superficiales deben tener al menos 1 mm de espesor. Su colocación exige rigurosos controles, en particular, de la ejecución de las uniones de piezas por soldadura. Al igual que en los sellados con materiales naturales, sobre la lámina debe habilitarse una capa de drenaje del agua de lluvia, una protección que impida que las raíces alcancen la lámina y, frecuentemente, una capa de suelo soporte de vegetación. Si la presencia de compuestos organoclorados volátiles en el suelo contaminado es significativa, la elección del material constitutivo de la lámina ha de ser cuidadosamente analizada, ya que pocos materiales plásticos son compatibles con estos compuestos.

#### - **Costes**

Los costes orientativos de algunas soluciones típicas de sellado con materiales naturales (excluyendo capas de drenaje, soporte de vegetación y protecciones) son los siguientes:

- Sellado con arcilla: 6-8 €/m<sup>2</sup>, para espesor de unos 40 cm.
- Sellado con mezcla arena-bentonita: 12-15 €/m<sup>2</sup>, para espesor de unos 25 cm.
- Sellado con lámina sintética y mezcla arena-bentonita: 20-25 €/m<sup>2</sup>.
- Sellado con lámina geotextil-bentonita prefabricada: 12-15 €/m<sup>2</sup>.
- Los costes orientativos de las soluciones de sellado con obra civil se sitúan entre los 20 y 40 €/m<sup>2</sup>.
- Para las soluciones de sellado con láminas sintéticas, estos costes pueden ser de 15 a 20 €/m<sup>2</sup>.

Los costes de los elementos de drenaje, capa soporte de vegetación y protección del sellado frente a raíces (necesarios en las soluciones de sellado con materiales naturales y con láminas sintéticas) se sitúan en órdenes de 10 a 12 €/m<sup>2</sup>.



#### - Aspectos ambientales

La aplicación de las técnicas de sellado superficial produce residuos (asociado principalmente a mantenimientos) y suelen afectar a una gran superficie.

### 8.4.2 Estabilización Físicoquímica

Esta técnica se lleva a cabo mezclando el suelo con especies estabilizantes que inhiban la acción del contaminante de tal forma que se obtenga finalmente una matriz estable y con menor probabilidad de presentar lixiviación.

Existen distintas técnicas que consiguen este fin, a continuación, se describen tres de ellas:

- **Alcalinización:** adición de fosfatos y/o álcalis que aumenten el pH, y fomenten la formación de complejos de baja solubilidad.
- **Mezcla con cemento Portland/puzolánico:** permite que el suelo adquiera forma de una matriz cementada al mismo tiempo que aumenta el pH, favoreciendo la precipitación e inmovilización de metales pesados. Será necesaria la presencia de agua.
- **Bituminización:** el suelo es mezclado con asfalto en caliente, reduciéndose el contenido en humedad en un 0,5% y consiguiendo que, al enfriarse el suelo, quede retenido en el asfalto. ([USEPA 1997](#); [Huang, J. et al. 2021](#))

#### - Campo de aplicación

Esta técnica se usa principalmente para tratamiento de suelos con contaminantes inorgánicos, como metales pesados. Su rendimiento disminuye en el tratamiento de contaminantes orgánicos.

Posteriormente a ser tratado, la mezcla resultante bien podrá ser en algunos casos reutilizada y en otros, enviada a vertedero una vez esté estabilizado.

#### - Coste de tratamiento

El rango de coste de esta técnica va de 90 a 225 euros/m<sup>3</sup> de suelo tratado, siempre dependiendo del proceso elegido, así como la forma seleccionada para la dosificación de los estabilizantes.



## - Aspectos ambientales

Debido a que los compuestos orgánicos volátiles no van a ser tratados pueden ser susceptibles de emitirse a la atmósfera ya que no se pueden estabilizar. En este contexto, el contenido orgánico no podrá superar el 5-10%, pudiendo requerir ensayos y controles de las posibles emisiones mediante la instalación de captadores.

Al adicionar distintas especies en el suelo se provoca que la matriz aumente su tamaño, lo cual implica costes más altos en el caso de tener que ser gestionado posteriormente en vertedero.

Una ventaja que presenta es el hecho de que disminuye la posibilidad entre el 90-95% de que los contaminantes inorgánicos lixivien (*Guía Madrid 2001-2006*).

Suelen requerir actuaciones de vigilancia y control tras su ejecución para asegurar su eficacia en el tiempo.

### 8.4.3 Vitrificación

Se presenta como técnica de vitrificación el plasma, que consiste en la utilización de un arco eléctrico de alta tensión en atmósfera oxidante, que ioniza la atmósfera colindante generando altas temperaturas, lo que produce el calentamiento súbito de la matriz contaminante (1.100 °C – 1.700 °C), volatilizando los compuestos volátiles y cristalizando los no volátiles, siendo la matriz resultante una estructura vitrificada y estable a nivel químico.

El objetivo es reducir la movilidad de los contaminantes de tipo orgánico o metales pesados, reduciendo considerablemente el volumen de residuo. Como producto resultante del proceso y dependiendo del tipo de contaminante y tecnología de plasma aplicada, se obtienen en la fase gaseosa los contaminantes volátiles orgánicos, conformando un combustible tipo gas de síntesis o “*syngas*”, con cierto poder calorífico que tendría usos térmicos previamente acondicionado o que, en caso contrario, ha de pasar por un proceso de limpieza previamente a su vertido a la atmósfera.

La estabilidad del producto resultante de la vitrificación depende en gran medida de la composición de la matriz sólida, siendo matrices favorables para ello las matrices con compuestos salinos como el sodio o el potasio. (*USEPA 1995; McNiel, K. et al. 1992*)

## - Campo de aplicación

El campo de aplicación es muy variado, pudiendo tener aplicación a contaminantes de tipo orgánico (hidrocarburos, PCB's, pesticidas, etc) así como contaminantes inorgánicos (arsénico, plomo, zinc, mercurio, etc).



Se pueden procesar matrices de tipo líquido, pastosas, sólidas o gaseosas, aunque matrices muy húmedas pueden limitar la capacidad de procesamiento.

Dado que el proceso requiere una gran cantidad de energía, se recomienda procesar residuos que pudieran dar lugar a otros compuestos con posible beneficio económico al proceso, como la obtención de syngas. Por ello, se recomienda tratar residuos complejos con altos contenidos en compuestos orgánicos y de elevado poder calorífico (*Trifunović, V. 2021*)

#### - **Costes de tratamiento**

Aunque existen pocas experiencias en el tratamiento de suelos contaminados y la mayor parte de ellas son a escala piloto o semi-industrial, los costes medios de tratamiento se sitúan en una horquilla de entre 500 y 1000 euros/m<sup>3</sup>, siendo la mayor parte del coste de tratamiento el asociado a la generación del arco eléctrico.

#### - **Aspectos ambientales**

La vitrificación exige un tratamiento de lavado de gases exhaustivo para evitar verter a la atmósfera sustancias peligrosas. Por otra parte, es un proceso de alta demanda energética, aunque puede ser una solución a determinados emplazamientos con contaminaciones complejas.

## 9. Criterios de selección de las mejores técnicas disponibles

Por la variada casuística, y posibles combinaciones de factores que pueden llegar a presentarse en la definición y caracterización de un suelo como contaminado, a priori es complejo establecer directrices generales sobre qué técnica disponible es la mejor, porque depende de múltiples factores como son las características de la matriz suelo, de los contaminantes o del entorno, además de los propios objetivos a cumplir derivados de la normativa vigente.

Por este motivo, a la hora de seleccionar la mejor técnica disponible (MTD) para un problema de contaminación del suelo concreto, en primer lugar, es imprescindible identificar las técnicas que son viables y aplicables. Posteriormente, tienen que ser comparadas, y tras su evaluación y valoración, se debe identificar la mejor técnica disponible de un modo razonablemente trazable, tanto para el responsable de ejecutar la descontaminación, como por parte de la administración competente que debe aprobarla.



Con este objetivo se ha descrito previamente en esta Guía las técnicas de tratamiento disponibles, identificados los principales requisitos técnicos que deben darse para su aplicación, así como sus posibles impactos ambientales.

Para facilitar su comparación, a continuación se presenta una síntesis de las características descriptivas de cada una de las técnicas, en relación con el tipo de aplicación, sus costes, su periodo de tratamiento, el tipo de suelo donde puede aplicarse, los contaminantes para los que es eficaz y la generación de residuos que deriva su aplicación.



**Tabla 9.1. Tabla resumen de todas las técnicas de descontaminación abordadas en la Guía.**

Tipo de técnica	Técnica	Aplicación	Costes	Periodo tratamiento	Tipo de suelo	Contaminantes	Generación residuos
FISICOQUÍ-MICA	Extracción de vapor	In situ	100 - 400 € por m <sup>3</sup> de suelo tratado	1 - 3 años	Textura con porcentaje medio - bajo en finos y con permeabilidad alta	COV's halogenados y no halogenados en una concentración inferior a 10.000 mg/kg	Baja
	Extracción multifase	In situ	2,5 - 5 €/m <sup>3</sup> de agua tratada 9 - 67 €/m <sup>3</sup> de producto recuperado	1 - 3 años	Permeabilidad, humedad y granulometría media	COV's y COSV's halogenados y no halogenados y CONV	Media
	Lavado - Enjuague (Soil Flushing)	In situ	40 - 225 €/m <sup>3</sup> suelo (40 - 100 €/ m <sup>3</sup> suelo alta permeabilidad)	1 - 3 años	Terreno homogéneo. Permeabilidad baja-media y granulometría media	COV's halogenados y no halogenados e inorgánicos	Baja
	Lavado (Soil Washing)	Ex situ	25 - 75 €/t suelo con permeabilidad media Hasta 190 €/t suelo con matrices arcillosas	< 0,5 años	Matrices sólidas de granulometría media	COV's y COSV's no halogenados e inorgánicos	Alta
	Oxidación / Reducción química	In situ	50 - 300 €/m <sup>3</sup> suelo	1 - 2 años	Permeable. Ausencia de riesgo estructural	COV's y COSV's halogenados y no halogenados, metales pesados	Baja
	Electromigración	In situ	75 - 125 €/m <sup>3</sup> suelo	1 - 3 años	Poco permeable. Humedad 15-18%	Metales pesados	Baja



Tipo de técnica	Técnica	Aplicación	Costes	Periodo tratamiento	Tipo de suelo	Contaminantes	Generación residuos
BIOLÓGICA	Atenuación natural monitorizada	In situ	15 - 25 €/m <sup>3</sup> suelo	3 - 5 años	Alcance de la contaminación controlado	COVs y COSVs no halogenados en una concentración inferior a 10.000 mg/kg	Inexistente
	Bioventilación	In situ	30 -60 €/m <sup>3</sup> suelo	1 - 2 años	Terreno homogéneo. Permeabilidad y granulometría media	COVs halogenados y no halogenados en una concentración inferior a 10.000 mg/kg	Inexistente
	Biosparging	In situ	30 -70 €/m <sup>3</sup> suelo	1 - 2 años	Terreno homogéneo. Permeabilidad y granulometría media	COVs halogenados y no halogenados en una concentración inferior a 10.000 mg/kg	Inexistente
	Biodegradación mejorada	In situ	40 - 100 €/m <sup>3</sup> suelo	1 - 2 años	Terreno homogéneo. Permeabilidad y granulometría media	COVs y COSVs halogenados y no halogenados y CONV	Inexistente
	Fitorremediación	In situ	5 - 8 €/m <sup>3</sup> suelo sin cosechado y gestión 180 - 600 €/m <sup>3</sup> con cosechado y gestión	>3 años	Profundidad máxima d la contaminación 0,5 - 1 m	COSVs halogenados y no halogenados, hidrocarburos pesados y metales pesados	Media
	Landfarming	Ex situ	30 - 60 €/t suelo	< 1 año	Suelos con baja permeabilidad requerirán más tiempo de tratamiento	COSVs no halogenados	Baja
	Biopilas	Ex situ	40 - 80 €/t suelo	< 1 año	Suelos con baja permeabilidad requerirán más tiempo de tratamiento	COVs y COSVs halogenados y no halogenados y CONV	Baja



Tipo de técnica	Técnica	Aplicación	Costes	Periodo tratamiento	Tipo de suelo	Contaminantes	Generación residuos
TÉRMICA	Desorción térmica	Ex situ	70 - 200 €/t suelo	Inmediato	Concentración $2\% < [\text{Contaminante}] < 15\%$ sms. Humedad $< 15-20\%$	COVs y COSVs halogenados y no halogenados y CONV	Media
	Incineración	Ex situ	100 €/t (tierras con hidrocarburos halogenados y no halogenados) 2.000 €/t (tierras con PCBs o dioxinas)	Inmediato	Concentración contaminante $> 15\%$ sms. Humedad $< 15-20\%$	COVs o COSVs halogenados y no halogenados y CONV	Media
	Pirólisis	Ex situ	200 - 300 €/t suelo	Inmediato	Concentración $[\text{Contaminante}] > 15\%$ sms. Limitado por presencia de PCB. Humedad $< 15-20\%$	COVs o COSVs halogenados y no halogenados y CONV	Media



Sobre esta base de características definitorias, se pueden identificar las mejores técnicas a aplicar para cada grupo de contaminantes, presentadas a modo de árboles de decisión, definidos para COVs y COSVs halogenados y no halogenados, metales y compuestos orgánicos no volátiles.

La elaboración de dichos árboles impone forzosamente una serie de simplificaciones en beneficio de la sencillez y la claridad de uso. Por este motivo, cada árbol presenta a su vez matizaciones específicas de adecuación para las diferentes técnicas, por la complejidad asociada al hecho de tratar de establecer patrones homogéneos de aplicación a una casuística muy heterogénea y variada de posibles casos de suelos contaminados.

Se recogen preferentemente las técnicas de descontaminación, por considerarse siempre prioritarias frente a las técnicas de confinamiento que generan un pasivo ambiental, conforme establece la normativa aplicable en materia de suelos (*Artículo 7.3 del Real Decreto 9/2005, de 14 de enero*).

Asimismo, para propiciar la comparación y evaluación de las técnicas recogidas en cada árbol, se han establecido unos criterios de valoración generales para cada una de las características descriptivas de las técnicas, con el objeto de poder identificar la MTD de una forma cualitativa, por resultar ser la mejor valorada.

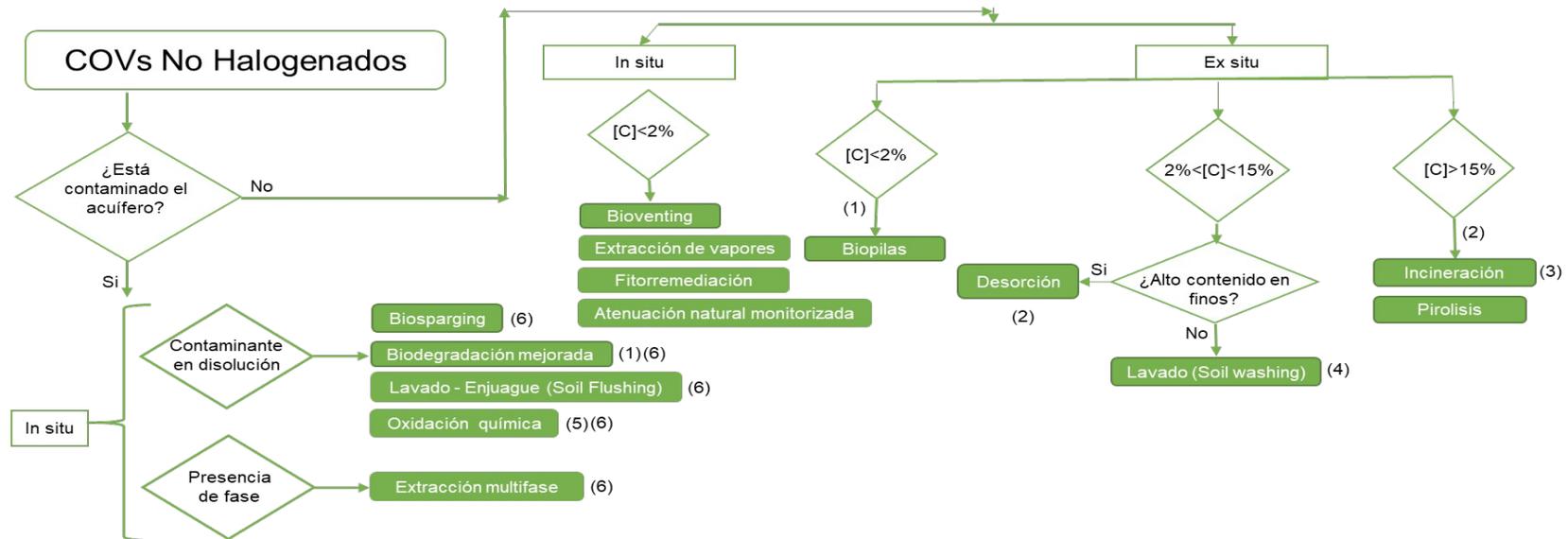
La aplicación justificada de estos criterios de valoración permitiría trazar la selección final de la mejor técnica disponible, pudiendo quedar reflejado su análisis cualitativo y cuantitativo en los correspondientes proyectos de recuperación voluntaria o de descontaminación.

## 9.1 Análisis de las MTDS para el tratamiento de COVs no halogenados

A continuación se presenta el árbol de decisión para los COVs no halogenados:



Figura 9.1. Esquema árbol de decisión para los COVs no halogenados.



[C]: Concentración de contaminante expresado en contenido de carbono.

(1) Es necesario la realización de pruebas de laboratorio previas para descartar condiciones inhibitorias para los microorganismos biodegradadores del contaminante objetivo. Si la permeabilidad de la matriz es alta se puede tratar concentraciones de hasta un 5% de contaminación.

(2) Es recomendable realizar un secado previo en caso de que la matriz presente un grado de humedad > 15% para mejorar el balance térmico de la instalación.

(3) Altos costes de inversión y tratamiento. Se recomiendan para matrices con altos PCI y en el caso de altas cantidades de suelo (> 100.000 t).

(4) Mejor en grano grueso, rango arenas o limos. Desaconsejado en arcillas. Con compuestos muy volátiles será especialmente importante un buen control de emisiones para evitar atmósferas explosivas durante el lavado.

(5) Oxidación no aplicable en caso de existencia de infraestructuras enterradas o presencia de metales cuya especie más oxidada sea más tóxica que la reducida.

(6) Técnica limitada en suelos con baja permeabilidad, elevado % humedad o heterogéneos.

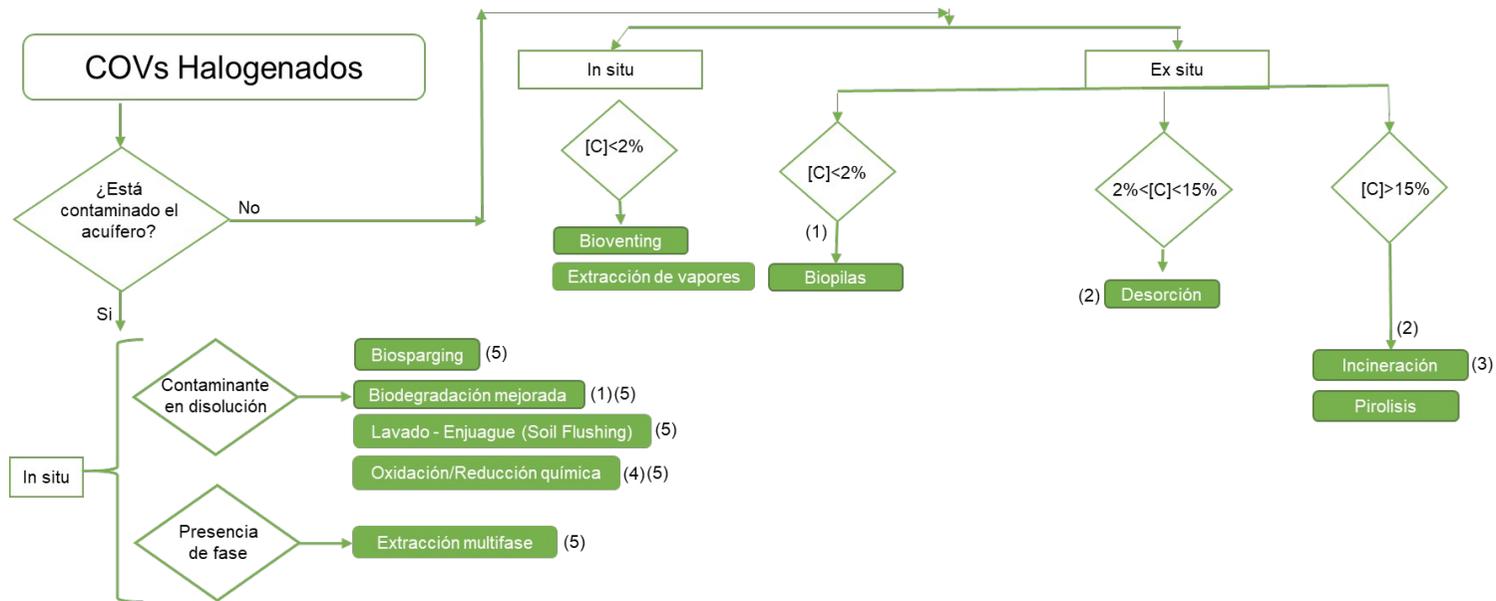


## 9.2 Análisis de las MTDs para el tratamiento de COVs halogenados

A continuación se presenta el árbol de decisión para los COVs halogenados:



**Figura 9.2. Esquema árbol de decisión para los COVs halogenados.**



[C]: Concentración de contaminante expresado en contenido de carbono.

(1) Es necesario la realización de pruebas de laboratorio previas para descartar condiciones inhibitorias para los microorganismos biodegradadores del contaminante objetivo. Si la permeabilidad de la matriz es alta se puede tratar concentraciones de hasta un 5% de contaminación.

(2) Es recomendable realizar un secado previo en caso de que la matriz presente un grado de humedad > 15% para mejorar el balance térmico de la instalación.

(3) Altos costes de inversión y tratamiento. Se recomiendan para matrices con altos PCI y en el caso de altas cantidades de suelo (> 100.000 t).

(4) Oxidación no aplicable en caso de existencia de infraestructuras enterradas o presencia de metales cuya especie más oxidada sea más tóxica que la reducida.

(5) Técnica limitada en suelos con baja permeabilidad o elevado % humedad.

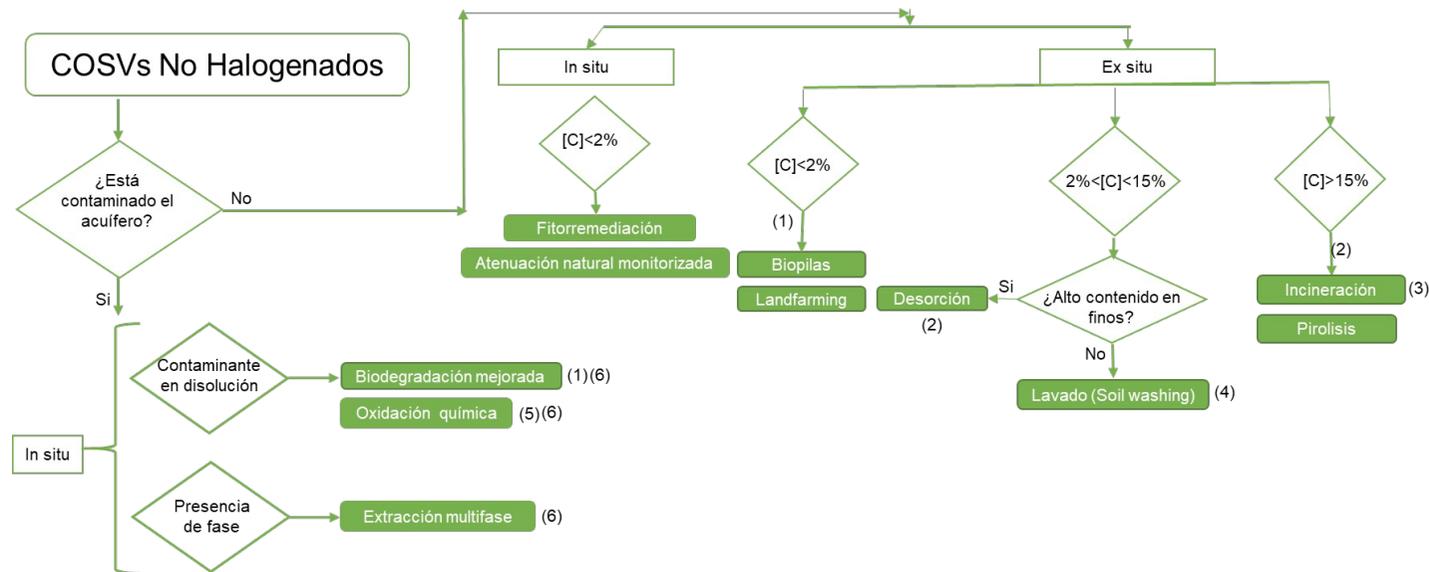


### **9.3 Análisis de las MTDs para el tratamiento de COSVs no halogenados**

A continuación se presenta el árbol de decisión para los COSVs no halogenados:



**Figura 9.3. Esquema árbol de decisión para los COSVs no halogenados.**



[C]: Concentración de contaminante expresado en contenido de carbono.

(1) Es necesario la realización de pruebas de laboratorio previas para descartar condiciones inhibitorias para los microorganismos biodegradadores del contaminante objetivo. Si la permeabilidad de la matriz es alta se puede tratar concentraciones de hasta un 5% de contaminación.

(2) Es recomendable realizar un secado previo en caso de que la matriz presente un grado de humedad > 15% para mejorar el balance térmico de la instalación.

(3) Altos costes de inversión y tratamiento. Se recomiendan para matrices con altos PCI y en el caso de altas cantidades de suelo (> 100.000 t).

(4) Mejor en grano grueso, rango arenas o limos. Desaconsejado en arcillas. Con compuestos muy volátiles será especialmente importante un buen control de emisiones para evitar atmósferas explosivas durante el lavado.

(5) Oxidación no aplicable en caso de existencia de infraestructuras enterradas o presencia de metales cuya especie más oxidada sea más tóxica que la reducida.

(6) Técnica limitada en suelos con baja permeabilidad, elevado % humedad o heterogéneos.

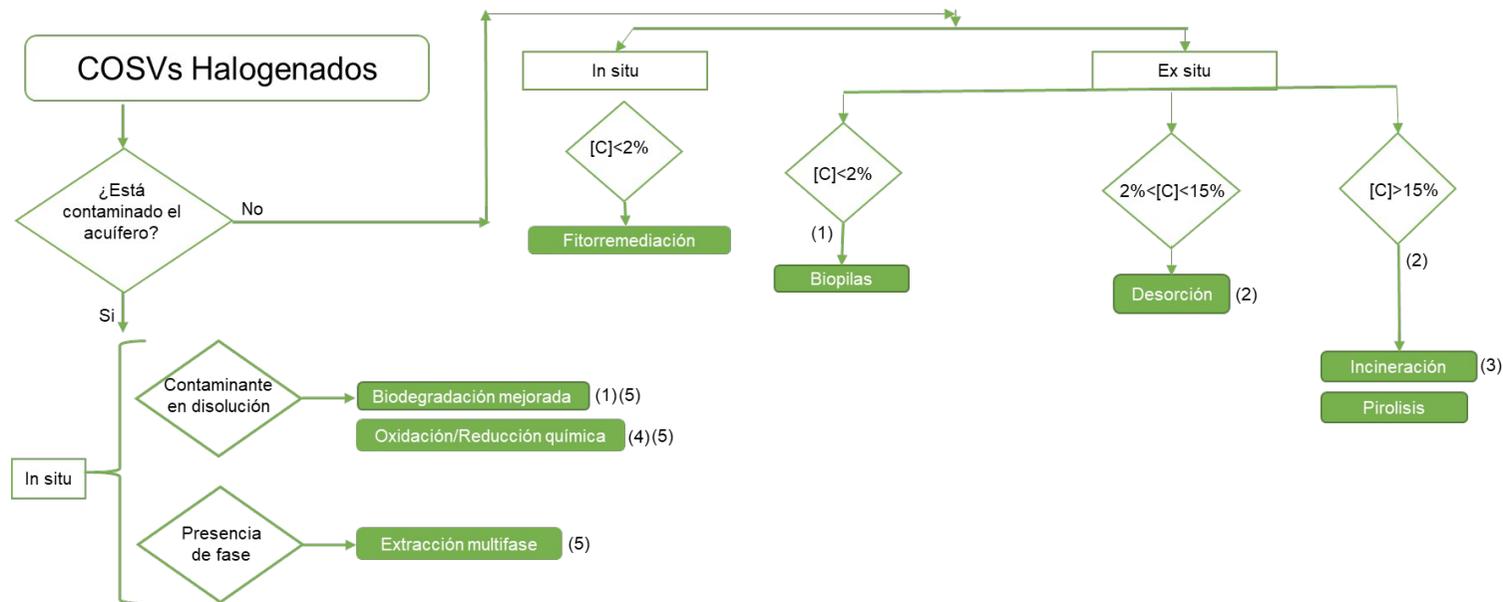


## 9.4 Análisis de las MTDs para el tratamiento de COSVs halogenados

A continuación se presenta el árbol de decisión para los COSVs halogenados:



Figura 9.4. Esquema árbol de decisión para los COSVs halogenados



[C]: Concentración de contaminante expresado en contenido de carbono.

(1) Es necesario la realización de pruebas de laboratorio previas para descartar condiciones inhibitorias para los microorganismos biodegradadores del contaminante objetivo. Si la permeabilidad de la matriz es alta se puede tratar concentraciones de hasta un 5% de contaminación.

(2) Es recomendable realizar un secado previo en caso de que la matriz presente un grado de humedad > 15% para mejorar el balance térmico de la instalación.

(3) Altos costes de inversión y tratamiento. Se recomiendan para matrices con altos PCI y en el caso de altas cantidades de suelo (> 100.000 t).

(4) Oxidación no aplicable en caso de existencia de infraestructuras enterradas o presencia de metales cuya especie más oxidada sea más tóxica que la reducida.

(5) Técnica limitada en suelos con baja permeabilidad, elevado % humedad o heterogéneos.

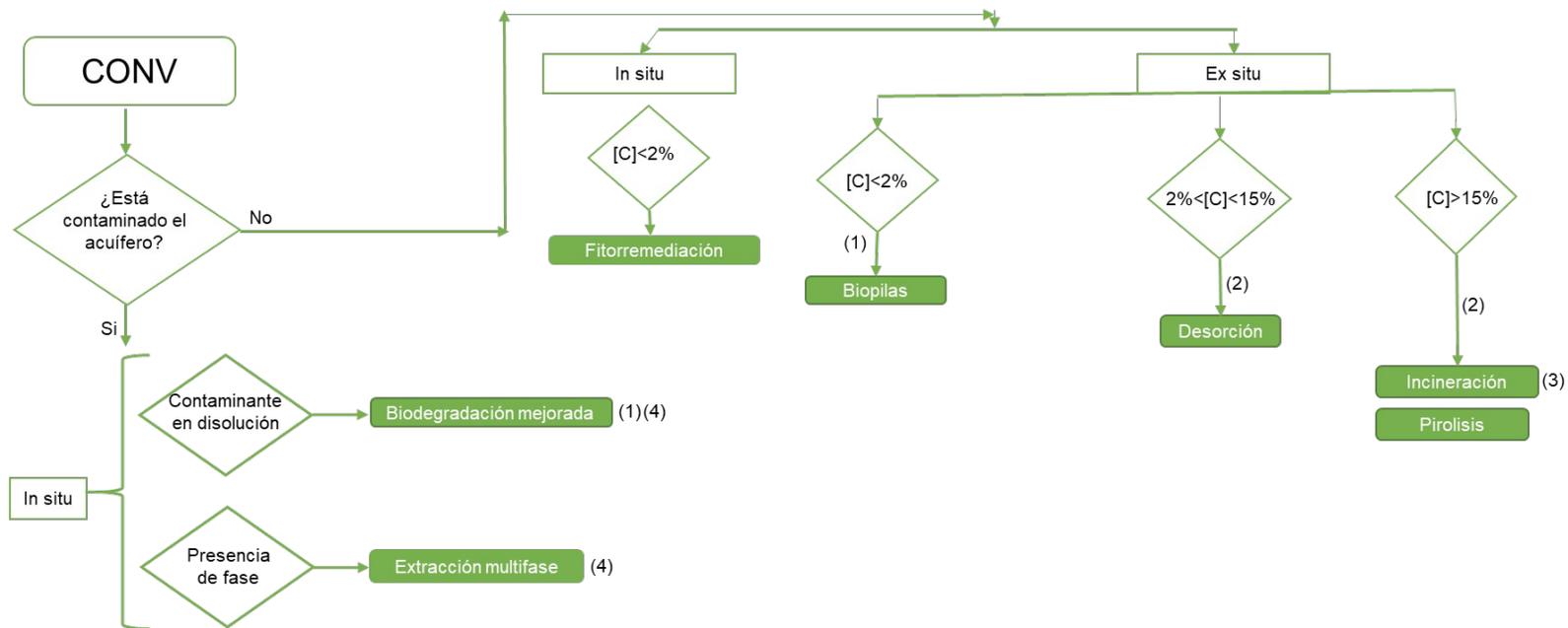


## 9.5 Análisis de las MTDs para el tratamiento de CONV

A continuación se presenta el árbol de decisión para los CONV:



Figura 9.5. Esquema árbol de decisión para los CONV .



[C]: Concentración de contaminante expresado en contenido de carbono.

- (1) Es necesario la realización de pruebas de laboratorio previas para descartar condiciones inhibitorias para los microorganismos biodegradadores del contaminante objetivo. Si la permeabilidad de la matriz es alta se puede tratar concentraciones de hasta un 5% de contaminación.
- (2) Es recomendable realizar un secado previo en caso de que la matriz presente un grado de humedad > 15% para mejorar el balance térmico de la instalación.
- (3) Altos costes de inversión y tratamiento. Se recomiendan para matrices con altos PCI y en el caso de altas cantidades de suelo (> 100.000 t).
- (4) Técnica limitada en suelos con baja permeabilidad, elevado % humedad o heterogéneos.

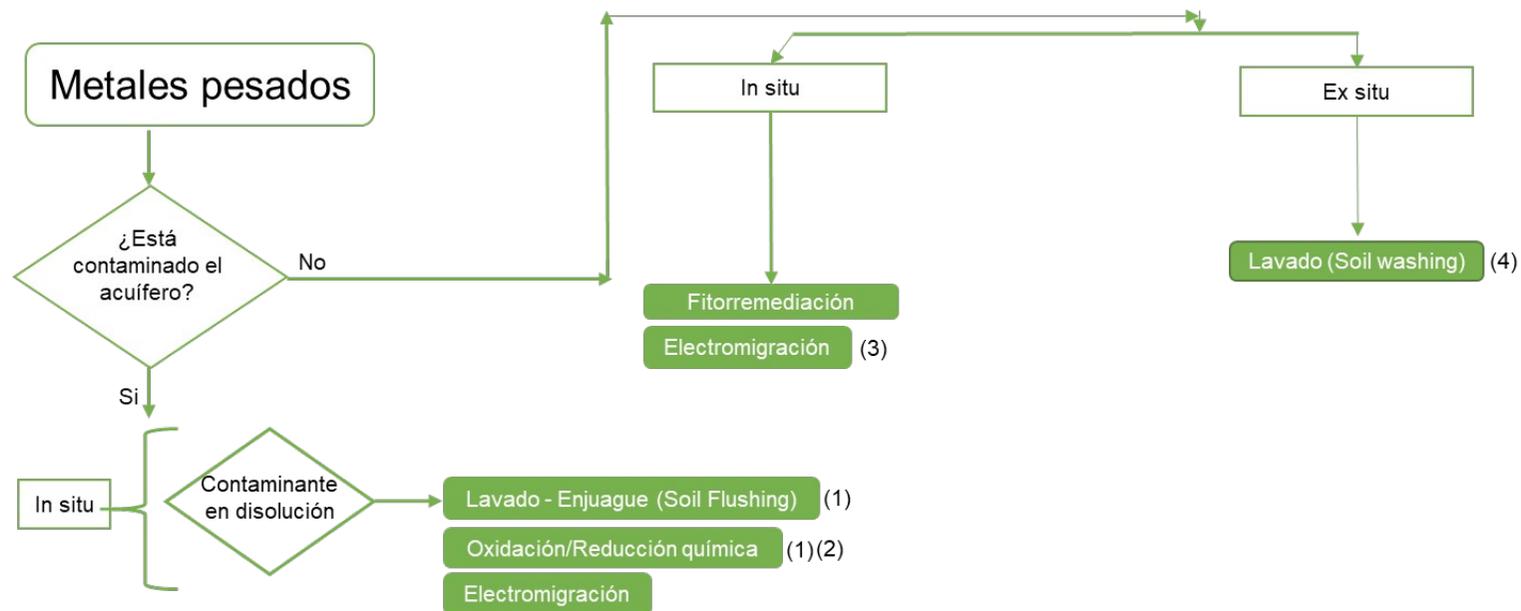


## **9.6 Análisis de las MTDs para el tratamiento de metales pesados**

A continuación se presenta el árbol de decisión para metales pesados:



Figura 9.6. Esquema árbol de decisión para Metales pesados



- (1) Técnica limitada en suelos con baja permeabilidad, elevado % humedad o heterogéneos.
- (2) Oxidación no aplicable en caso de existencia de infraestructuras enterradas o presencia de metales cuya especie más oxidada sea más tóxica que la reducida.
- (3) Efectividad óptima en suelos poco permeables, con alto contenido en arcillas. Humedad requerida 15 – 18%
- (4) Mejor en grano grueso, rango arenas o limos. Desaconsejado en arcillas. Con compuestos muy volátiles será especialmente importante un buen control de emisiones para evitar atmósferas explosivas durante el lavado.



## 9.7 Criterios cualitativos generales de valoración

En aras de facilitar una herramienta que permita comparar y evaluar las técnicas recogidas en cada árbol de decisión, se establecen unos criterios generales de valoración cualitativa, para identificar la mejor técnica disponible por sus características descriptivas; en definitiva, por ser la mejor considerada en cuanto a su coste, su tiempo de tratamiento, la cantidad de residuos generados y su posible repercusión en el entorno.

A partir de estas características descriptivas, la técnica será valorada en comparación con las de otras técnicas viables desde el punto de vista técnico, y finalmente clasificada en cuatro posibles niveles de valoración, en función del rango en el que se encuentre, como: valoración muy positiva, buena, baja y una valoración negativa.

**Tabla 9.2. Valoraciones para cada categoría característica de la técnica.**

Valoración	Coste	Tiempo de tratamiento	Generación residuos	Mantiene propiedades suelo
<b>Muy positiva</b>	<i>In situ:</i> <25 €/m <sup>3</sup> suelo <i>Ex situ:</i> <80 €/t suelo	T≤1 año	Inexistente	Sí
<b>Buena</b>	<i>In situ:</i> 25-100 €/m <sup>3</sup> <i>Ex situ:</i> 80-200 €/t	1>T<3 años	Baja (Cantidad total < 1 t Residuos peligros)	Parcialmente
<b>Baja</b>	<i>In situ:</i> 100-300 €/m <sup>3</sup> <i>Ex situ:</i> 200-300 €/t	-	Media (1-10 t Residuos peligros)	Altera
<b>Negativa</b>	<i>In situ:</i> > 300 €/m <sup>3</sup> <i>Ex situ:</i> > 300 €/t	T>3 años	Alta (> 10 t Residuos peligros)	Destruye

La aplicación justificada de estos criterios de valoración permitiría trazar la selección final de la mejor técnica disponible, pudiendo quedar recogido su análisis cualitativo, e incluso cuantitativo si se puntuaba cada categoría de valoración, en los correspondientes proyectos de recuperación voluntaria o de descontaminación.



## 10. Bibliografía

**Albu, M. (2021).** Sustainable Remediation of Soils Contaminated with Petroleum Products. In *Advanced Engineering Forum* (Vol. 42, pp. 151-158). Trans Tech Publications Ltd.

**Ancona, V., Rascio, I., Aimola, G., Caracciolo, A. B., Grenni, P., Uricchio, V. F., & Borello, D. (2022).** Plant-assisted bioremediation: Soil recovery and energy from biomass. In *Assisted Phytoremediation* (pp. 25-48). Elsevier.

**Cameselle, C. S. Gouveia, D.E. Akretche and B. Belhadj.** Advances in Electrokinetic Remediation for the Removal of Organic Contaminants in Soils (2013) (PDF) (23 pp, 604 KB) Open Access Book Chapter in Organic Pollutants - Monitoring, Risk and Treatment, DOI: 10.5772/54334

**Chakrabarty, M., & Harun-Or-Rashid, G. M. (2021).** Feasibility Study of the Soil Remediation Technologies in the Natural Environment. *American Journal of Civil Engineering*, 9(4), 91.

**Comisión Técnica de Prevención y Reparación de Daños Medioambientales (2018);** Estructura y contenidos generales de los proyectos de reparación de daños medioambientales. Anexo III: Catálogo de técnicas de reparación del Modelo de Oferta de Responsabilidad Ambiental (MORA), y Procedimiento de selección, Dirección General de Biodiversidad y Calidad Ambiental, Ministerio para la Transición Ecológica.

**EPA,** Cohen, R. M., Mercer, J. W., Greenwald, R. M., & Beljin, M. S. (1997). *Design guidelines for conventional pump-and-treat systems*.

**De La Rosa-Pérez, D. A.,** TEUTLI-LEÓN, M., Margarita, M., & RAMÍREZ-ISLAS, M. E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 23(3), 129-138.

**Di Prima, S., Concialdi, P., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Pirastru, M., Cerda, A., & Keesstra, S. (2018).** Laboratory testing of Beerkan infiltration experiments for assessing the role of soil sealing on water infiltration. *Catena*, 167, 373-384. verUnited States. Environmental Protection Agency (**EPA**). Office of Solid Waste, & Emergency Response. **(1997).** *Analysis of selected enhancements for soil vapor extraction*. DIANE Publishing.

**Dovletyarova et al. 2022.** “Choose your amendment wisely: Zero-valent iron nanoparticles offered no advantage over microparticles in a laboratory study on metal immobilization in a contaminated soil” (*Applied Geochemistry* Volume 143, August 2022, 105369)



**Federal Remediation Technologies Roundtable** (FRTR). United States. <https://frtr.gov/> (accedido 26/01/2021)

**Federal remediation technologies roundtable, 2006.** Phytoremediation. <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-3.html>. (accedido 26/01/2021)

**Federal remediation technologies roundtable.** Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0 <https://frtr.gov/matrix2/section4/4-7.html>.

**García-Delgado C., Yunta F., Eymar E., 2015.** Bioremediation of multi-polluted soil by spent mushroom (*Agaricus bisporus*) substrate: Polycyclic aromatic hydrocarbons degradation and Pb availability, *Journal of Hazardous Materials*, 300, pp. 281–288. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.07.008

**Ghosh M., Singh S.P., 2005.** A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied ecology and environmental research* 3(1): 1-18, Penkala Bt., Budapest, Hungary.

**Gómez, W., Gaviria, J. y Cardona, S., 2009.** Evaluación de la Bioestimulación frente a la Atenuación Natural y la Bioaumentación en un suelo contaminado con una mezcla gasolina-diésel. *Dyna*, Nr. 160, pp. 83-93.

**Gueye, M. T., Petrucci, E., & Di Palma, L. (2015).** Chemical reduction of hexavalent chromium (VI) in soil slurry by nano zero valent iron. *Chemical Engineering Transactions*, 43.

**Guía Madrid, 2001-2006,** Guía de Tecnologías de Recuperación de Suelos Contaminados. Comunidad de Madrid (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.).

**Hinchee, R. E. (2017).** Bioventing of petroleum hydrocarbons. In *Handbook of bioremediation* (pp. 39-60). CRC Press.

**Huang, J., Kogbara, R. B., Hariharan, N., Masad, E. A., & Little, D. N. (2021).** A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 305, 124685.

**Huling & Pivetz (2006).** "In Situ Chemical Oxidation." *CIRP Encyclopedia of Production Engineering* (2014): 469. Environmental Issue. United States Environmental Protection Agency. Web.

**Ibert, D. J., 2016.** Estudio Bibliográfico de los Criterios Base para la Selección del Método de Recuperación de un Suelo Contaminado. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Gandía, Gandía.



**Ilyas, N., Shoukat, U., Saeed, M., Akhtar, N., Yasmin, H., Khan, W., & Iqbal, S. (2021).** Comparison of plant growth and remediation potential of pyrochar and thermal desorption for crude oil-contaminated soils. *Scientific reports*, 11(1), 1-13.

**Kim, Y., Oh, J. I., Lee, S. S., Lee, K. H., Lee, J., & Kwon, E. E. (2019).** Decontamination of petroleum-contaminated soil via pyrolysis under carbon dioxide atmosphere. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117724.

**Latosińska, J. (2020).** Risk assessment of soil contamination with heavy metals from sewage sludge and ash after its incineration. *TC*,1(1), 3.

**Liu, Z., & Tran, K. Q. (2021).** A review on disposal and utilization of phytoremediation plants containing heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 226, 112821.

**Marley, M. C., Bruell, C. J., & Hopkins, H. H. (1995).** Air sparging technology: A practice update. *In situ aeration: Air sparging, bioventing, and related remediation process*.

**Mayans B., Camacho-Arévalo R., García-Delgado C., Alcántara C., Nagele N., Anton-Herrero R., Escolástico C., Eymar E, 2021.** Mycoremediation of Soils Polluted with Trichloroethylene: First Evidence of Pleurotus Genus Effectiveness. *Applied Sciences-Basel*. 11(4), 1354. DOI: 10.3390/app11041354.

**McNiel, K. et al. 1992.** Vitrification of contaminated soil. In, Rees, J. Contaminated land treatment Technologies, Elsevier Applied Sciences, London, UK. Monografieën informatiesysteem technieken,

**National Research Council. (1994).** *Alternatives for ground water cleanup*. National Academies Press.

**Padmavathiamma P.K., Li L.Y., 2007.** Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. *Water, Air, & Soil Pollution* 184: 105-126.

**Pazos, M., Sanroman, M. A., & Cameselle, C. (2006).** Improvement in electrokinetic remediation of heavy metal spiked kaolin with the polarity exchange technique. *Chemosphere*, 62(5), 817-822.

**Ranges, S. A. F. (2005).** Technical Guideline.

**U.S. Army Corps of Engineers (USACE) 1999.** Multiphase Extraction: Engineering and design. EM 1110-1-4010.

**USEPA, 1994. *Thermal Desorption Treatment*,** Engineering Bulletin, EPA, OERR and ORD, Washington, DC, EPA/540/5-94/501. USEPA 1995. Remediation case studies: Thermal desorption, soil washing and in situ vitrification. Federal



**USEPA, 1996.** [A Citizen's Guide to Soil Vapor Extraction and Air Sparging](#), EPA/542/F-96/008.

**USEPA 1997.** Analysis of selected Enhancements for Soil Vapor Extraction. EPA OSWER, EPA/542/R-97/007.

**USEPA 1997.** Innovative site remediation technology: Solidification/stabilization. Office of Waste and Emergency Response, EPA/542/B-97/007.

**Rodrigues, R., Betelu, S., Colombano, S., Tzedakis, T., Masselot, G., & Ignatiadis, I. (2020).** In Situ Chemical Reduction of Chlorinated Organic Compounds. *Environmental Soil Remediation and Rehabilitation*, 283-398.

**Tiburtius, E. R. L., Peralta-Zamora, P., & Emmel, A. (2005).** Treatment of gasoline-contaminated waters by advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 126(1-3), 86-90.

**Trifunović, V. (2021).** Vitrification as a method of soil remediation. *Zaštita materijala*, 62(3), 166-179.

**Watts et al. (2006).** "Treatment of Contaminated Soils and Groundwater Using ISCO." Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management

**Yu, D. Y., Kang, N., Bae, W., & Banks, M. K. (2007).** Characteristics in oxidative degradation by ozone for saturated hydrocarbons in soil contaminated with diesel fuel. *Chemosphere*, 66(5), 799-807.

**Zhang, K., Wang, S., Guo, P., & Guo, S. (2021).** Characteristics of organic carbon metabolism and bioremediation of petroleum-contaminated soil by a mesophilic aerobic biopile system. *Chemosphere*, 264, 128521.