

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ciencias Ambientales

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“Estudio Bibliográfico de los Criterios Base para la  
Selección del Método de Recuperación de un Suelo  
Contaminado”**

**TRABAJO FINAL DE GRADO**

Autor/a:

**Diego José Roqueta Ibert**

Tutor/a:

**Cristina Lull Noguera**

**GANDIA, 2016**

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MÉTODOS DE DESCONTAMINACIÓN .....	4
3. CRITERIOS BASE PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RECUPERACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO .....	9
3.1. TIPO DE SUELO .....	10
3.2. TIPO DE CONTAMINANTE Y SU GRADO DE CONTAMINACIÓN.....	13
3.3. DURACIÓN DEL TRATAMIENTO .....	19
3.4. FACTORES TECNOLÓGICOS.....	23
3.5. GENERACIÓN DE RESIDUOS .....	25
3.6. EFICACIA A CORTO Y LARGO PLAZO.....	26
3.7. EFICACIA EN RELACIÓN AL COSTE.....	28
3.8. ADECUACIÓN A LA NORMATIVA .....	30
3.9. GRADO DE PROTECCIÓN DE LA SALUD HUMANA.....	33
3.10. PARTICIPACIÓN ESTATAL.....	34
3.11. ACEPTACIÓN SOCIAL.....	35
4. CLASIFICACIONES DE LAS TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN TENIENDO EN CUENTA MÚLTIPLES CRITERIOS .....	36
5. SELECCIÓN DE LA TÉCNICA .....	38
6. HERRAMIENTAS PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS .....	38
7. CONCLUSIONES.....	39
8. BIBLIOGRAFÍA.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Origen de la contaminación de los suelos. ....	2
Figura 2. Clasificación de los suelos según el Nivel Genérico de Referencia.....	14
Figura 3. Clasificación de los contaminantes. ....	15
Tabla 1. Técnicas de descontaminación de suelos. ....	5
Tabla 2. Ejemplo de contaminantes y niveles genéricos de referencia para protección de la salud humana en función del uso del suelo.....	13
Tabla 3. Ejemplo de contaminantes y niveles genéricos de referencia para la protección de los ecosistemas. ....	14
Tabla 4. Compuestos y concentraciones óptimas según el tratamiento. ....	19
Tabla 5. Requerimiento tecnológico.....	24
Tabla 6. Generación de residuos. ....	25
Tabla 7. Eficacia a corto y largo plazo de las diferentes técnicas de descontaminación de suelos. ....	27
Tabla 8. Riesgos para la salud humana. ....	34
Tabla 9. Clasificación de las técnicas de remediación teniendo en cuenta distintos criterios base. ....	36
Tabla 10. Opciones de remediación según contaminantes y diferentes criterios base de selección.....	37

## RESUMEN

El proceso de selección de la mejor técnica para la recuperación de un suelo contaminado es complejo y arduo ya que hay que tener en cuenta una gran cantidad de variables. Entre dichas variables se encuentran las propiedades de los suelos, los tipos de contaminantes, el grado de contaminación, la concentración final objetivo, la hidrogeología de la zona, la duración del tratamiento, la generación de residuos, la eficacia de la técnica a corto y largo plazo, su adecuación a la normativa, la seguridad laboral, la posibilidad de convenios con la Administración pública y la aceptación social. Hoy en día existen distintas herramientas informáticas que pueden ayudar en la toma de decisiones. En este trabajo se profundiza en los distintos criterios que se tienen en cuenta a la hora de seleccionar la mejor técnica disponible para la remediación de un suelo así como en herramientas que ayudan a la toma de decisiones en el proceso de remediación.

Palabras clave: Descontaminación de suelos, suelo contaminado, remediación suelos, lavado del suelo, biorremediación, herramientas toma decisión.

## ABSTRACT

The process of selecting the best technique for the recovery of contaminated soil is complex and difficult because there are a lot of variables to take into account. Among these variables we find the properties of soil, types of pollutants, the degree of contamination, the final target concentration, the hydrogeology of the area, the duration of treatment, waste generation, the effectiveness of technical in short and long term, its adaptation to the regulations, job security, the possibility of agreements with the public administration and social acceptance. Today there are various informatic tools that can help in decision-making. This paper inquire into the various criteria taken into account when selecting the best available technique for the remediation of soil as well as tools to help decision making in the remediation process.

Keywords: Soil remediation, contaminated soil, soil washing, biorremediation, making-decision tools.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos y aguas subterráneas por una variedad de compuestos químicos es un problema ambiental reconocido y desafiante en todo el mundo industrializado, que presenta riesgos para la salud humana y el medio ambiente. El número de sitios potencialmente contaminados solamente en Europa asciende a alrededor de 2,5 millones, de los cuales se espera que unos 340.000 estén contaminados y que por tanto, es probable que requieran de remediación (Van Liedekerke y col., 2014).

Antes de profundizar en los criterios a tener en cuenta al seleccionar un método de recuperación para un suelo contaminado, hay que conocer qué se define como suelo contaminado y hacer un breve inciso en la problemática ecológica que este tipo de contaminación conlleva.

Para ello, recurrimos al Real Decreto 9/2005, que define como **suelo contaminado** "aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos de carácter peligroso de origen humano, en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o el medio ambiente, y así se haya declarado mediante resolución expresa".

Un suelo, por tanto, estará contaminado cuando conlleve un riesgo que es inaceptable. Hoy en día, la toma de decisiones y las políticas legisladoras relativas a la gestión de los suelos contaminados se rigen mayoritariamente por la evaluación de riesgos (Reinikainen y Sorvani, 2016).

El Real Decreto 9/2005 define el **riesgo** como la "probabilidad de que un contaminante presente en el suelo entre en contacto con algún receptor con consecuencias adversas para la salud de las personas o para el medio ambiente".

En este sentido, según este Real Decreto, "en términos de protección de la salud humana, se asume que, para sustancias cancerígenas, una situación de riesgo aceptable es aquella en que la frecuencia esperada de aparición de cáncer en la población expuesta no excede en uno por cada cien mil casos; para sustancias con efectos sistémicos, se asume como una situación de riesgo aceptable aquella en que, para cada sustancia, el cociente entre la dosis de exposición a largo plazo y la dosis máxima admisible es inferior a la unidad." Y "en términos de protección de los ecosistemas, se asume como una situación de riesgo aceptable aquella en que, para cada sustancia, el cociente entre el nivel de exposición, expresado como concentración, y el umbral ecotoxicológico, definido por la concentración máxima para la que no se esperan efectos sobre los ecosistemas, es inferior a la unidad".

El grado de contaminación que comporta un riesgo inaceptable dependerá del tipo de contaminante y del uso del suelo (urbano, industrial u otros usos como agricultura, ganadería, etc.). En este sentido, el Real Decreto 9/2005 establece en sus Anexos V y VI un listado de los diferentes contaminantes y sus niveles genéricos de referencia para cada uso del suelo. El nivel genérico de referencia hace referencia a “la concentración de una sustancia contaminante en el suelo que no conlleva un riesgo superior al máximo aceptable para la salud humana o los ecosistemas”.

La contaminación producida en los suelos puede ser física, química o biológica, alterando distintas propiedades del suelo en cada caso y requiriendo de métodos diferentes para su descontaminación, que se explicarán más adelante. El Real Decreto 9/2005 considera sólo la contaminación de los suelos debida a componentes químicos de carácter peligroso de origen humano.

La contaminación de los suelos puede tener distintas procedencias (Mirsal, 2008), como se muestra de forma ilustrativa en la Figura 1.

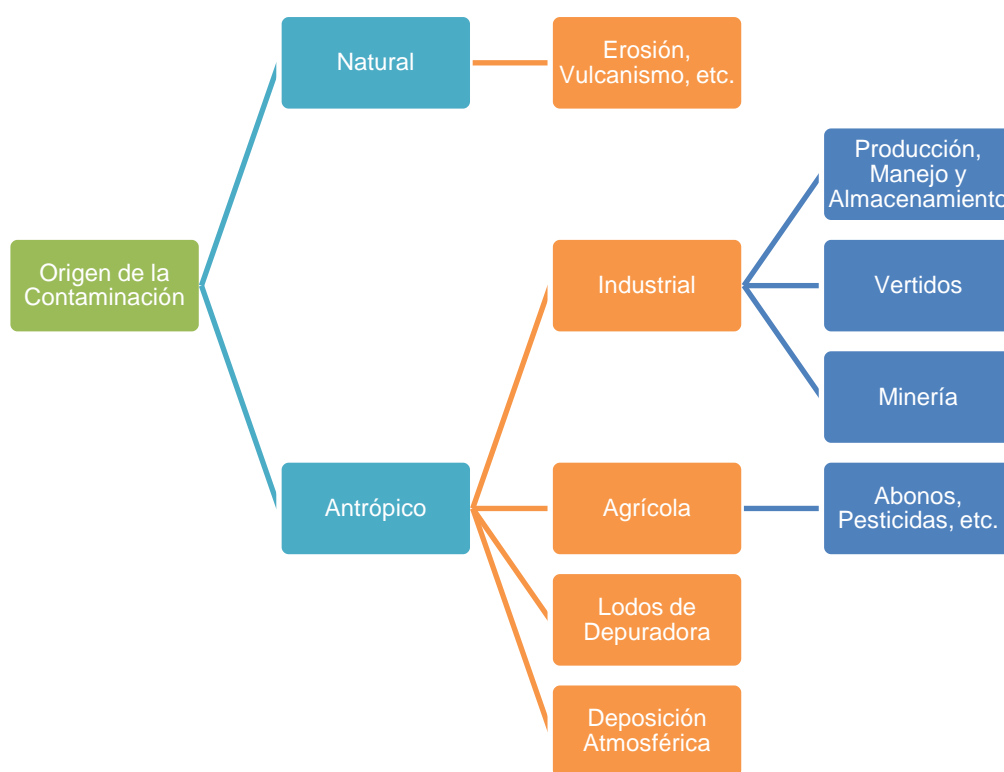


Figura 1. Origen de la contaminación de los suelos.

En relación a la contaminación de origen antrópico, el Real Decreto 9/2005 elabora una lista de actividades potencialmente contaminantes del suelo en su Anexo I, a la vez que especifica que se consideran actividades potencialmente contaminantes aquellas que producen, manejan o almacenan más de 10

toneladas de sustancias peligrosas al año, así como aquellas que almacenen combustible de autoconsumo, siempre que se cumplan dos condiciones: que la capacidad total de almacenamiento sea mayor a 50.000 litros y que se consuman más de 300.000 litros al año.

Por otro lado, cabe hacer mención a la problemática ambiental derivada de los suelos contaminados. En este sentido, un suelo contaminado puede producir daños en múltiples y diversos organismos y ecosistemas (Panagos y col., 2013), siendo los más afectados los siguientes:

- El aire, por volatilización de los contaminantes del suelo o por transporte de polvo procedente del suelo contaminado se puede producir la contaminación de la atmósfera colindante al suelo contaminado.
- Las aguas, tanto superficiales a través de la solubilización de los contaminantes del suelo o por transporte de sedimentos contaminados, como subterráneas a través de la lixiviación e infiltración de las sustancias contaminantes.
- El propio suelo, afectando a los microorganismos, a la materia orgánica y a los nutrientes y disminuyendo su capacidad de producción.
- Directamente a la salud humana y otros organismos, a través de la ingestión, inhalación o el contacto dérmico con los contaminantes. El documento "Science for Environment Policy In-depth Report: Soil Contamination: Impacts on Human Health" producido por la Dirección General de Medio Ambiente de la Comisión Europea en 2013 recoge diferentes estudios que tratan sobre los efectos de los suelos contaminados en la salud humana. Dixit y col. (2016a) recogen en un estudio diferentes herramientas para evaluar el riesgo de los suelos contaminados sobre la salud humana.

Por consiguiente, es obvia la necesidad de tratar un suelo cuando está contaminado, con la finalidad de eliminar o reducir la contaminación a niveles de riesgo aceptables, o al menos contenerla para que no afecte a otros sistemas. En este sentido, ante un suelo contaminado se pueden tomar las siguientes decisiones (Miliarium Aureum, S.L., 2001-2004):

- No recuperarlo, cuando el riesgo es bajo. Esta decisión ahorra los esfuerzos de una actuación correctora, posponiendo la remediación hasta que el suelo adquiera algún tipo de interés.
- Impedir la dispersión de los contaminantes. Esta decisión suele darse en el caso de vertederos no controlados, cuya recuperación es muy compleja y costosa, siendo preferible impedir la extensión de la contaminación.
- Recuperarlo, llevando a cabo las actuaciones necesarias para reducir la contaminación hasta niveles de riesgo aceptables.

## 2. MÉTODOS DE DESCONTAMINACIÓN

Antes de analizar los criterios base para la selección de un método, es conveniente conocer algunas clasificaciones que existen acerca de los métodos utilizados en la actualidad para la descontaminación de los suelos (Petruzzelli y col., 2016).

### 1. Según el **objetivo de recuperación** se clasifican en:

- Técnicas de descontaminación, basadas en la eliminación o la reducción de la concentración de contaminantes presentes en el suelo hasta niveles que presentan un riesgo aceptable (extracción de aire, lavado del suelo, deshalogenación, técnicas biológicas, etc.).
- Técnicas de confinamiento, que no persiguen la descontaminación del suelo, únicamente inmovilizan los contaminantes reteniéndolos en un lugar concreto (solidificación, estabilización y vitrificación).
- Técnicas de contención, que también persiguen la contención de los contaminantes en un lugar concreto mediante barreras impermeables que evitan la dispersión (sellado superficial, pantallas de aislamiento, vertederos controlados).

Las técnicas de contención y confinamiento son consideradas como métodos de ingeniería civil (Dixit y col., 2016).

### 2. Según su **principio de acción** se clasifican en:

- Procesos físico-químicos, que estimulan los contaminantes a través de contacto físico o reacciones químicas que facilitan su extracción o eliminación (arrastre de vapores, lavado del suelo, oxidación/reducción, etc.).
- Procesos biológicos, que aprovechan la actividad de los organismos y las plantas que viven en el suelo contaminado (fitorremediación, atenuación natural, bioestimulación, etc.).
- Procesos térmicos, que facilitan la eliminación de contaminantes al hacerlos reaccionar con altas temperaturas (desorción térmica).
- Procesos mixtos, que combinan varios de los procesos anteriores.

### 3. Según el **lugar de aplicación** se clasifican en:

- In situ, se llevan a cabo directamente sobre el suelo contaminado allí donde se encuentre, sin necesidad de excavar o mover el suelo a otro lugar (extracción de aire, lavado del suelo, oxidación/reducción, deshalogenación, tratamiento electroquímico, desorción térmica, atenuación natural, bioaumentación, bioestimulación, fitorremediación, bioventilación, etc.)



- Ex situ, es decir, en un lugar diferente al que se encuentra el suelo. Las técnicas ex situ, a su vez se dividen en on site y off site. Off site son aquellas técnicas que requieren de la excavación del suelo y su posterior traslado al lugar donde recibirá su tratamiento específico. On site son aquellas técnicas que requieren de excavación pero no de traslado del suelo a otro lugar, sino que se trata allí mismo (lavado del suelo, extracción química, oxidación/reducción, deshalogenación, desorción térmica, biopilas, landfarming, etc.)

Cabe destacar que, de entre las técnicas de descontaminación, confinamiento y contención, siempre tendrán preferencia las de descontaminación (RD 9/2005), ya que son las únicas que realmente producen una recuperación del suelo.

Así mismo, entre los procesos físico-químicos, biológicos, térmicos o mixtos, suelen tener preferencia los procesos biológicos por ser los que menos alteran la estructura y características del suelo y a la vez los menos costosos económicamente.

Por último, entre las técnicas in situ y las ex situ, tienen preferencia las que se llevan a cabo in situ (RD 9/2005), ya que producen una menor alteración del suelo, son menos laboriosas y más económicas.

La tabla 1 contiene las técnicas que se utilizan en la actualidad para recuperar un suelo contaminado, clasificadas según su principio de acción y según se realizan in situ o ex situ:

**Tabla 1. Técnicas de descontaminación de suelos.**

<b>TÉCNICAS DE DESCONTAMINACIÓN</b>				
	<b>Físico-químicas</b>	<b>Térmicas</b>	<b>Biológicas</b>	<b>Contención</b>
<b>In Situ</b>	Extracción de Aire	Desorción Térmica	Atenuación Natural	Sellado Superficial
	Lavado del Suelo		Bioaumentación	Pantallas de Aislamiento
	Oxidación/Reducción		Bioestimulación	Sellado
	Deshalogenación		Fitorremediación	Solidificación
	Tratamiento Electroquímico		Bioventilación	Vitrificación
<b>Ex Situ</b>	Lavado del Suelo	Desorción Térmica	Biopilas	Vertederos Controlados
	Extracción Química			Estabilización
	Oxidación/Reducción		Landfarming	Vitrificación
	Deshalogenación			Incineración

A continuación se realiza una breve descripción de cada método (Kuppusamy y col., 2016; Sheoran y col., 2016; Caliman y col., 2011; Colombano y col., 2010; Federal Remediation Technology Roundtable; Gavrilescu, 2009; Hamberg, 2009; Pavel y col., 2008; Khan y col., 2004; Hambi, 1996).

### **Técnicas Físico-Químicas:**

- Extracción de Aire: es una técnica in situ que se aplica esencialmente a la zona no saturada del suelo. Funciona a través de la volatilización de los contaminantes y el arrastre de vapores para eliminarlos del suelo. Es efectivo contra compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles.
- Lavado del Suelo: existen las modalidades in situ y ex situ. La técnica in situ funciona mediante la inyección de líquido al suelo, a menudo con aditivos, con la finalidad de disolver los contaminantes. Finalmente el líquido es extraído. Y la técnica ex situ se basa en el mismo principio, el suelo excavado se expone a un líquido con o sin aditivos que disuelve y extrae los contaminantes, pero de una manera más enérgica e intensa. Ambas modalidades pueden tratar compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles solubles en agua, compuestos inorgánicos, metales pesados y compuestos radiactivos, pero además, la técnica ex situ es eficaz contra fueles y pesticidas.
- Extracción Química: es una técnica que se realiza ex situ y utiliza disolventes para extraer los contaminantes del suelo. Es eficaz para remover contaminantes orgánicos volátiles y semivolátiles, fueles, compuestos inorgánicos y metales.
- Oxidación/Reducción: este método cuenta con las modalidades in situ y ex situ y se basa en la introducción de agentes oxidantes (ozono,  $H_2O_2$  o permanganato) o agentes reductores (ácido sulfhídrico) para destruir los contaminantes mediante procesos oxidantes o reductores. En casos de suelos contaminados por metales, se busca cambiar su estado de valencia para reducir su toxicidad. Esta es una técnica eficaz contra una gran variedad de contaminantes orgánicos y metales.
- Deshalogenación: es posible aplicar esta técnica tanto in situ como ex situ. Se basa en la destrucción de halógenos de los compuestos halogenados a través de reacciones químicas con diversos agentes como hidróxidos de metales alcalinos, glicol polietilénico o hidróxido de sodio. Es eficaz eliminando compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, PCBs, dioxinas, furanos, hidrocarburos clorurados y pesticidas.
- Tratamiento electroquímico: método aplicable in situ basado en la introducción de electrodos en el suelo para crear un campo eléctrico que arrastra los contaminantes junto a los electrodos para, finalmente, ser extraídos. Es eficaz contra metales pesados, compuestos orgánicos cargados positivamente y compuestos inorgánicos iónicos.

### **Técnicas Térmicas:**

- Desorción Térmica: técnica que se aplica tanto in situ como ex situ. Es muy similar a la Extracción de Aire, se basa en la introducción de aire caliente en el suelo con la finalidad de volatilizar los contaminantes y

extraerlos del suelo. En la modalidad ex situ esto se lleva a cabo en cámaras de calor. Es efectiva contra compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles y contra algunos carburantes y pesticidas. Ex situ también pueden eliminarse algunos metales volátiles.

### **Técnicas Biológicas:**

- Atenuación Natural: tratamiento in situ basado en el aprovechamiento de los procesos naturales que tienen lugar en el suelo para degradar y reducir los contaminantes. Es eficaz esencialmente contra hidrocarburos derivados del petróleo.
- Bioestimulación: método de recuperación in situ basado en el aporte de nutrientes y oxígeno al suelo para estimular el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, ayudando así con los procesos de biodegradación de contaminantes. Eficaz para eliminar gasolina, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles y pesticidas.
- Bioaumentación: técnica in situ basada en la introducción de organismos en el suelo que se han adaptado para degradar ciertos contaminantes. Es una técnica efectiva para recuperar suelos contaminados por herbicidas, insecticidas, fenoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, PCBs y metales.
- Bioventilación: tratamiento in situ basado en la estimulación de la actividad biológica a través del aporte de aire en el interior del suelo contaminado con la finalidad de facilitar los procesos de biodegradación. Esta técnica es aplicable en suelos contaminados por compuestos orgánicos biodegradables, como son los hidrocarburos derivados del petróleo, algunos disolventes y los hidrocarburos aromáticos policíclicos ligeros.
- Fitorremediación: método in situ que utiliza las plantas como receptores de las sustancias contaminantes para así extraerlas del suelo. Se puede utilizar para recuperar suelos contaminados con metales pesados, hidrocarburos derivados del petróleo, hidrocarburos aromáticos policíclicos, pesticidas y disolventes.
- Biopilas: tratamiento ex situ que consiste en acumular el suelo contaminado en montones que son aireados para mejorar los procesos de biodegradación de contaminantes. Generalmente es eficaz contra combustibles y compuestos orgánicos volátiles no halogenados.
- Landfarming: técnica ex situ basada en la excavación y aireación del suelo para estimular la actividad microbiológica, ayudando a descomponer los contaminantes. Es eficaz contra compuestos derivados del petróleo.

## **Técnicas de Confinamiento:**

- Vertederos Controlados: método ex situ que consiste en trasladar el suelo contaminado hasta un lugar especialmente preparado para contenerlo de manera controlada. Este tipo de vertederos pueden acoger suelos contaminados por cualquier tipo de contaminante.
- Sellado Superficial: técnica in situ cuya finalidad es evitar la infiltración de agua al suelo a través de su superficie. Para garantizar la eficacia de la impermeabilización se construyen una serie de capas de distintos materiales. Normalmente se utiliza como técnica auxiliar para complementar otro tipo de tratamientos.
- Pantallas de Aislamiento: esta técnica se aplica in situ y se basa en conseguir una menor movilización horizontal de la contaminación del suelo, a través de la instalación de muros impermeables. Al igual que la técnica anterior, se suele utilizar como técnica complementaria a otros tratamientos.
- Sellado: método in situ que, al igual que los anteriores, persigue lograr una reducción de la movilidad de los contaminantes del suelo, pero esta vez en todas direcciones, construyendo protecciones impermeables superficiales, de fondo y en paredes.
- Estabilización: técnica ex situ que pretende disminuir la movilidad de los contaminantes mediante el aporte de aditivos al suelo contaminado, formando una matriz estable que produzca una menor lixiviación. Es una técnica eficaz contra compuestos inorgánicos, especialmente metales pesados.
- Solidificación: técnica aplicable in situ que se basa en el mismo principio que la estabilización, reduciendo la movilidad de los contaminantes mediante el aporte de aditivos orgánicos o inorgánicos. Se aplica en suelos contaminados por compuestos inorgánicos.
- Vitrificación: este método puede ser aplicado tanto in situ como ex situ y se basa en la aplicación de corriente eléctrica para fundir el suelo junto con los contaminantes, originando luego su vitrificación. Es efectivo contra compuestos orgánicos semivolátiles, compuestos inorgánicos, PCBs, pesticidas y dioxinas.
- Incineración: tratamiento ex situ que somete al suelo a elevadas temperaturas con el propósito de destruir los contaminantes, destruyendo también la estructura del suelo. Con esta técnica se tratan compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, PCBs, carburantes, disolventes, pesticidas, compuestos inorgánicos, metales pesados y radioisótopos.

Si bien estas son las técnicas que existen y se emplean hoy en día, hay técnicas que se emplean más a menudo que otras. Es el caso de las técnicas de Extracción de Aire, Lavado del Suelo ex situ, Desorción Térmica ex situ y

técnicas de Biorremediación. En el caso de las técnicas de confinamiento, las más empleadas son, por orden: Incineración, Estabilización/Solidificación, Vertederos Controlados, Vitrificación y Sellado Superficial.

En Europa, las principales técnicas en uso son la biorremediación, el lavado del suelo, tecnologías de la minería, estabilización y tratamiento térmico (Van Deuren y col., 2002). Las principales técnicas utilizadas en Estados Unidos son la incineración, estabilización, extracción de vapor, y desorción térmica (USEPA, 2004). De acuerdo con Grasso y col. (1997) el lavado del suelo parece ser la técnica no destructiva más prometedora debido a su bajo coste económico.

Khan y col. (2004) realizaron un estudio amplio de las limitaciones de las diferentes técnicas de remediación de los suelos. La U.S. Federal Remediation Technology Roundtable (FRTR) Agency describe tanto cada una de las técnicas así como los diferentes contaminantes.

### **3. CRITERIOS BASE PARA LA SELECCIÓN DEL MÉTODO DE RECUPERACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO**

Existen multitud de criterios a tener en cuenta para seleccionar correctamente el método apropiado para recuperar un suelo contaminado (Ram y col., 1993). Se debe tener en cuenta y realizar un estudio, en cada caso, de las siguientes características:

- El tipo de suelo.
- El tipo de contaminante y su grado de contaminación.
- La duración del tratamiento.
- Factores tecnológicos
- La generación de residuos.
- Su eficacia a corto y largo plazo.
- Su eficacia en relación al coste.
- Su adecuación a la normativa.
- Su grado de protección de la salud humana.
- La participación estatal.
- Y su aceptación social.

A continuación se detalla cada criterio a tener en cuenta y sus características principales. La información recogida para cada criterio es fruto de un análisis elaborado de la información obtenida a través de búsquedas bibliográficas. Las palabras utilizadas para la búsqueda han sido las que se indican a continuación o una combinación de ellas (en español o en inglés): soil properties, soil

pollution, soil decontamination, soil remediation, remediation technologies, ex situ, in situ, on site techniques, off site techniques, soil contaminants, soil pollutants, organic contaminants, inorganic contaminants, adsorption, soil pH, soil texture, clay minerals, metal (hydro)oxides, soil organic matter, biological soil treatments, bioremediation, phytoremediation, chemical soil treatments, physical soil treatments, physico-chemical treatments, soil washing, thermal desorption, oxidation, bioventing, landfarming, stabilization/solidification, vitrification, incineration, risk, health, cost, cost effective, effectiveness, less time consuming, duration, waste reduction, risk reduction, community acceptability, removal efficiency, negative environmental impact, scale pilot studies, strategy, decision tree, multi-criteria, etc.

En el apartado Bibliografía se recogen los libros, artículos y páginas web consultadas.

### 3.1. TIPO DE SUELO

Es una característica muy importante a tener en cuenta, ya que nos va a limitar la aplicabilidad de muchas técnicas de descontaminación y va a determinar el comportamiento de los contaminantes presentes en el.

Es necesario hacer un desglose de los factores que determinan las características del suelo e influyen en los contaminantes y las técnicas de remediación a utilizar (Alamgir, 2016). Son los que siguen:

- **Textura:** la textura del suelo viene definida por las partículas de diferentes tamaños (arena, entre 2 y 0,02 mm; limo, entre 0,02 y 0,002 mm; y arcilla, menos de 0,002 mm de diámetro) (United States Department of Agriculture) y su proporción de presencia en el suelo. De este modo pueden existir multitud de suelos con diferentes clases texturales. La importancia de estas clasificaciones a la hora de seleccionar un método de descontaminación reside en el tamaño de las partículas, ya que en función de ello los contaminantes actúan de una determinada manera, diferente para cada textura. En este sentido, los suelos con alto contenido en arena (partículas grandes) presentan un menor potencial de retención, es decir, los contaminantes no se adsorben con facilidad a las partículas del suelo y pueden ser eliminados fácilmente con métodos de arrastre, como podría ser el lavado de suelo. Por el contrario, suelos con alto contenido en arcilla presentan características totalmente opuestas. Los contaminantes se adhieren

con mayor facilidad y fuerza a las partículas del suelo, haciendo mucho más difícil y costosa la descontaminación por métodos de arrastre como el citado anteriormente, llegando a ser en ocasiones ineficaz, requiriendo de métodos diferentes.

- **Porosidad:** entre las partículas del suelo quedan huecos comunicados entre sí, denominados poros. Estos poros pueden ser grandes (macroporos) o pequeños (microporos). La porosidad es la relación entre el volumen total de poros y el volumen total del suelo. Los suelos de textura fina (arcillosos) suelen tener mayor cantidad de poros que los de textura gruesa (arenosos), pero la mayor parte de estos poros son de pequeño tamaño, que aumentan la capacidad de retención del suelo y dificultan su aireación, al contrario que ocurre con los macroporos, predominantes en suelos arenosos. Esta característica del suelo limita la aplicación de ciertas técnicas de descontaminación. En este sentido, en un suelo con predominancia de macroporos será útil la aplicación de la extracción de aire del suelo para eliminar determinados contaminantes, pero sería ineficaz en suelos arcillosos.
- **Permeabilidad:** la permeabilidad del suelo es su capacidad para transmitir y dejar pasar el aire y el agua a través de sí. Esta característica guarda estrecha relación con la porosidad y sus efectos son similares. Un suelo arenoso presenta una gran permeabilidad, deja pasar con gran facilidad tanto agua como aire, facilitando el uso de técnicas de arrastre para eliminar la contaminación, mientras que un suelo arcilloso lo dificulta al presentar nula permeabilidad. Una característica a tener en cuenta al aplicar técnicas de arrastre de contaminantes en un suelo altamente permeable es que existe la posibilidad de arrastrar los contaminantes más allá del suelo contaminado y provocar la contaminación del suelo o las masas de agua adyacentes.
- **Contenido en humedad:** es la cantidad de agua que retiene el suelo. Depende de la textura del suelo, su porosidad y su permeabilidad. Los suelos arcillosos, como ya sabemos, son capaces de retener mayor cantidad de agua que los arenosos. De igual manera, los suelos muy porosos tienen mayor volumen en el que acumular agua que los suelos poco porosos; y los suelos poco

permeables retendrán el agua por mayor tiempo que los suelos permeables.

Suelos con elevado contenido de humedad o en estado de saturación dificultan el empleo de técnicas como la extracción de aire o la desorción térmica, requiriendo ser extraída el agua antes de aplicar la técnica. Del mismo modo, suelos con bajos contenidos en humedad hacen inviables técnicas como el tratamiento electroquímico.

- **pH:** el pH representa el grado de acidez o alcalinidad de una sustancia, en este caso de un suelo. Se mide en una escala que va de 0 a 14, siendo el 7 un pH neutro, de 0 a 7 un pH ácido (más ácido cuanto más cercano a 0) y de 7 a 14 un pH básico o alcalino (más básico cuanto más cercano a 14).

Del pH dependen muchos procesos químicos que tienen lugar en un suelo y de su grado de acidez o alcalinidad depende la disponibilidad de las sustancias que se hallen en el.

El pH es un criterio a tener en cuenta cuando tratamos un suelo contaminado, ya que influye en el comportamiento de algunas sustancias potencialmente contaminantes. Por ejemplo, el Aluminio es un elemento presente en los suelos que no resulta tóxico en condiciones normales de pH. Sin embargo, con elevados grados de acidez, encontramos el ión  $Al^{3+}$ , que resulta altamente tóxico.

Teniendo en cuenta que con pH ácido las sustancias, en este caso los contaminantes, se encuentran más disponibles y a menudo son más solubles, es interesante aplicar esta propiedad en técnicas como el lavado del suelo para conseguir un mayor arrastre de contaminantes, pero se corre el riesgo de provocar la contaminación por el ión  $Al^{3+}$ .

El pH ácido también favorece técnicas como la biorremediación, ya que al estar los contaminantes más disponibles son asimilados más fácilmente por las plantas, eliminándose así del suelo.

- **Contenido en materia orgánica:** el contenido en materia orgánica del suelo procede, generalmente, de la descomposición de restos de animales y plantas, así como de la actividad biológica presente en el suelo. La importancia de este parámetro radica en la propiedad que tiene la materia orgánica para adsorber ciertas sustancias, como pueden ser contaminantes orgánicos o metales pesados, complicando en gran medida su extracción.

En este sentido, altos contenidos en materia orgánica hacen prácticamente inviables algunos métodos de descontaminación,



principalmente los que funcionan por arrastre de contaminantes, como el lavado del suelo o la extracción de vapores, así como técnicas biológicas como la biorremediación o fitorremediación.

En algunos casos se necesita un pre-tratamiento de los suelos que contienen un alto contenido de ácidos húmicos.

- **Profundidad:** es importante tener en cuenta la profundidad del suelo a descontaminar, ya que la contaminación puede hallarse a altas profundidades, lo que hace imposible, o excesivamente costosa, la aplicación de muchas de las técnicas que se aplican en la actualidad.

### 3.2. TIPO DE CONTAMINANTE Y SU GRADO DE CONTAMINACIÓN

Existe una gran cantidad de sustancias que se consideran contaminantes o potencialmente contaminantes y pueden proceder de diversos lugares o actividades. Cada una de estas sustancias tiene su propio Nivel Genérico de Referencia, que se refiere a su grado de concentración máximo que se considera aceptable en el suelo, siendo diferente para cada uso del suelo.

En este sentido, el Real Decreto 9/2005 elabora en su Anexo V un listado de las sustancias contaminantes y sus Niveles Genéricos de Referencia para la protección de la salud humana. La Tabla 2 recoge la concentración en miligramos de contaminante por kilogramo de suelo seco contaminado para diferentes usos de los suelos. En este Anexo se puede observar cómo se admiten mayores concentraciones de contaminantes en suelos industriales, mientras que en suelos destinados a ganadería, agricultura, o en suelos forestales, el nivel de concentración admisible es mucho más restrictivo.

Tabla 2. Ejemplo de contaminantes y niveles genéricos de referencia para protección de la salud humana en función del uso del suelo.

Sustancia	Uso del Suelo		
	Industrial	Urbano	Otros Usos
	(mg/kg peso seco)		
Diclorometano	60	6	0,6
Tricloroetano	10	1	0,1
Acetona	100	10	1
Benceno	10	1	0,1
DDT	20	2	0,2

Del mismo modo, en el Anexo VI del mismo Real Decreto se establece una lista con las sustancias contaminantes y sus Niveles Genéricos de Referencia para la protección de los ecosistemas (Tabla 3), en dicha lista se distingue entre los organismos del suelo, los acuáticos y los vertebrados terrestres.

Tabla 3. Ejemplo de contaminantes y niveles genéricos de referencia para la protección de los ecosistemas.

Sustancia	Organismos del Suelo	Organismos Acuáticos	Vertebrados Terrestres
	(mg/kg peso seco)		
Aldrin	0,01	0,01	0,01
Benceno	1	0,2	0,11
Fenol	0,27	0,03	23,7
Tolueno	0,3	0,24	13,5

En este caso, observamos una mayor tolerancia de concentración de contaminantes en ecosistemas de vertebrados terrestres, al contrario que en los ecosistemas acuáticos, donde se toleran concentraciones mucho menores.

A partir de estas tablas podemos clasificar un suelo como potencialmente contaminado cuando presenta alguno de los elementos definidos en concentraciones superiores a las establecidas, o directamente se clasifica como contaminado cuando supera en 100 veces el Nivel Genérico de Referencia de alguna sustancia.



Figura 2. Clasificación de los suelos según el Nivel Genérico de Referencia.

En este sentido, cuando un suelo se declara como potencialmente contaminado, es necesario llevar a cabo una Valoración de Riesgos, según lo previsto en el Anexo VIII del Real Decreto 9/2005.

Por otro lado, para los casos de suelos contaminados por sustancias no contenidas en las tablas de los Anexos V y VI, el Real Decreto 9/2005 establece en su Anexo VII el camino a seguir para determinar su Nivel Genérico de Referencia, distinguiendo entre la protección de la salud humana y la protección de los ecosistemas.

A la hora de seleccionar un método para llevar a cabo la descontaminación de un suelo hay que tener en cuenta el compuesto o compuestos que están produciendo la contaminación y su concentración presente en el suelo, ya que cada método es eficaz para determinadas sustancias dentro de un rango de concentraciones, resultando ineficaz o poco eficaz en otras condiciones.

De este modo, cabe profundizar en la identificación de los distintos grupos de contaminantes, sus propiedades fisicoquímicas, su concentración y sus productos de degradación.

La enorme cantidad y variedad de compuestos potencialmente contaminantes que existen en la actualidad es demasiado extensa como para estudiarlos aisladamente, por lo que se estudian los grupos más característicos e importantes de contaminantes. El siguiente esquema muestra dichos grupos de contaminantes:

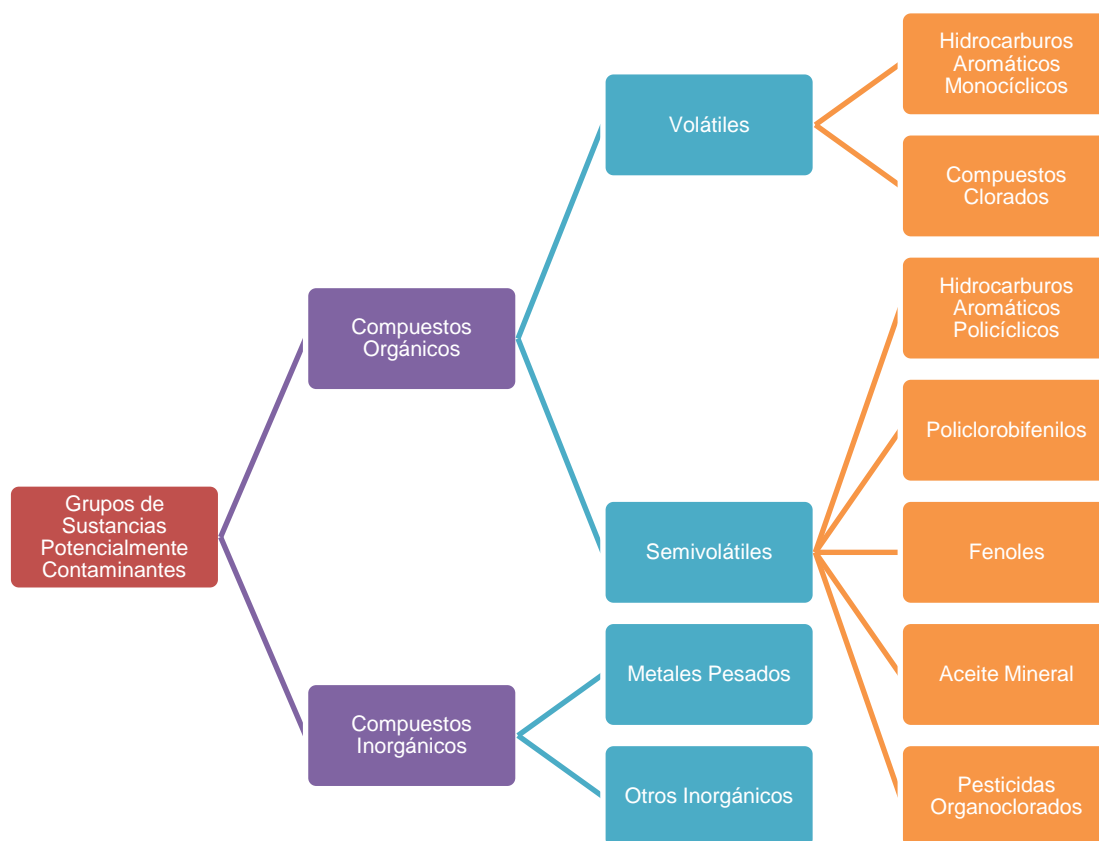


Figura 3. Clasificación de los contaminantes.

Una vez conocidos los grandes grupos en los que se clasifican las sustancias potencialmente contaminantes, es preciso conocer sus propiedades físico-químicas, ya que estas determinan su comportamiento en el medio ambiente y la posibilidad de eliminarlos con las técnicas disponibles. Es necesario acudir a fuentes fiables para la obtención de las propiedades físico-químicas de los contaminantes, como son la Environmental Protection Agency (EPA), el American Petroleum Institute (API), etc.

En el caso de los Contaminantes Orgánicos, deben conocerse las siguientes propiedades:

- **Solubilidad:** cuanto más soluble sea el compuesto contaminante, más fácil será eliminarlo del medio mediante una solución acuosa y menos quedará adsorbido a las partículas del suelo.
- **Presión de Vapor:** cuanto más elevada sea la presión de vapor, más fácilmente se volatilizará el compuesto.
- **Constante de Henry:** altos valores de esta constante indican un alto potencial del compuesto contaminante para volatilizarse del suelo húmedo. Una constante de Henry baja indica una alta lixiviación del contaminante.
- **Coefficiente de Difusión:** la difusión de los contaminantes se produce desde las zonas de mayor concentración hacia zonas de menor densidad de contaminantes. El coeficiente de difusión mide la facilidad con la que cada sustancia se mueve en un disolvente en particular.
- **Densidad de Vapor:** una densidad de vapor inferior a 1 significa que el vapor es menos denso que el aire y, por tanto, tiende a ascender. Al contrario, una densidad de vapor inferior a 1 implica que el vapor es más denso que el aire y tiende a descender hacia el suelo.
- **Coefficiente de Reparto Suelo/Agua:** representa la relación entre la cantidad de contaminante que se encuentra adsorbida a las partículas del suelo y la que se encuentra en solución en el agua del suelo.
- **Coefficiente de Reparto Octanol/Agua:** cuanto mayor sea este coeficiente, mayor tendencia tendrá el contaminante a bioacumularse en los organismos.

- **Coefficiente de Reparto Carbono Orgánico/Agua:** a mayor coeficiente, con mayor firmeza se fijará el contaminante a la materia orgánica del suelo, por lo que menor cantidad de contaminante se moverá al agua, y viceversa.

Conocidos los parámetros fisicoquímicos más influyentes en el comportamiento de los Contaminantes Orgánicos, a continuación se detalla el comportamiento de los grandes grupos de contaminantes derivados de los compuestos orgánicos según sus propiedades:

Los Hidrocarburos Aromáticos Monocíclicos tienden a lixiviarse fácilmente, presentan una moderada adsorción a la materia orgánica (coeficiente de reparto Carbono Orgánico/agua moderado), se volatilizan rápidamente (alta presión de vapor y alta constante de Henry) y son susceptibles de sufrir degradación biológica. Por todo esto, una buena forma de eliminarlos del suelo es a través de la extracción de vapores o mediante técnicas biológicas.

Los Compuestos Clorados suelen tener una alta presión de vapor, suelen ser solubles en agua, una elevada constante de Henry, bajo coeficiente de reparto Carbono Orgánico/agua y bajo coeficiente de reparto octanol/agua. Por estas características, suelen tener buenos resultados las técnicas de extracción de aire y el lavado del suelo.

Los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos se caracterizan por ser poco solubles, tienen una baja presión de vapor, baja constante de Henry, elevado coeficiente de reparto Carbono Orgánico/agua y de octanol/agua. Una buena forma de eliminar este tipo de contaminantes es mediante técnicas de biorremediación.

Los Policlorobifenilos son los contaminantes orgánicos más persistentes, son lipofílicos y poco solubles en agua, tienen una baja constante de Henry y una moderada presión de vapor. Tienden a bioacumularse. Un buen método de eliminación de estos compuestos en el suelo es la deshalogenación.

Los Aceites Minerales son una mezcla de hidrocarburos alifáticos y aromáticos, metales y aditivos (Galán, 2003). Según su composición y el uso que hayan tenido, varían sus características y su potencial de contaminación, así como la técnica más adecuada para eliminarlos del suelo. A pesar de esto, una buena manera de eliminar los aceites del suelo es mediante técnicas biológicas como por ejemplo la atenuación natural.

En cuanto a los Contaminantes Inorgánicos, únicamente cabe distinguir entre metales pesados y el resto de contaminantes inorgánicos.

En el caso de los Metales Pesados, los parámetros a tener en cuenta son diferentes a los anteriores. Ciertos metales son necesarios para los organismos en bajas concentraciones. A estos metales se les llama elementos esenciales. También existen metales que son necesarios para los organismos en determinadas circunstancias y que están presentes en el suelo de forma natural en bajas concentraciones. Estos son conocidos como metales traza. Todos ellos se vuelven altamente tóxicos cuando se presentan en concentraciones elevadas, así como aquellos metales que no forman parte de los elementos esenciales ni de los metales traza, sea cual sea su concentración. Tradicionalmente, se considera metal pesado todo elemento metálico o metaloide que produzca efectos nocivos en la salud o el medio ambiente.

En cuanto a su comportamiento, los metales en su forma esencial no son solubles en agua, pero pueden reaccionar con el medio y formar aniones o cationes solubles. También influyen en el comportamiento de los metales algunos factores como el pH del suelo, su potencial redox y los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes, así como la forma química en que se encuentre el metal. Debido a la gran variedad de metales pesados y su diferente comportamiento en el medio según las condiciones en que se halle, es muy difícil establecer una técnica de recuperación que sea eficaz para todos los casos. Sin embargo, la técnica de lavado ex situ, al utilizar aditivos específicos, puede lograr muy buenos resultados de descontaminación para metales pesados.

El resto de Compuestos Inorgánicos están formados principalmente por bromuros, cloruros, fluoruros o sulfuros y se suelen eliminar mediante técnicas como el lavado del suelo o la extracción química.

En el caso de que un suelo esté contaminado, que es lo usual, por una mezcla de contaminantes de propiedades físico-químicas diferentes, aumenta la dificultad de la descontaminación, así como su coste.

Por último, a continuación se presenta una tabla-resumen de los contaminantes que se pueden tratar, en general, con cada técnica y su rango de concentraciones:

**Tabla 4. Compuestos y concentraciones óptimas según el tratamiento.**

Método	Contaminantes tratables	Rango de concentración
Extracción de aire	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles.	Menos de 10.000 ppm
Lavado in situ	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles solubles en agua, compuestos inorgánicos, metales pesados y contaminantes radiactivos.	De moderada a baja concentración.
Lavado ex situ	Determinados compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, fueles, pesticidas, metales pesados y contaminantes solubles en agua.	Admite altas concentraciones.
Extracción química	Contaminantes orgánicos volátiles y semivolátiles, fueles, contaminantes inorgánicos y metales pesados.	Admite altas concentraciones.
Oxidación/Reducción	Contaminantes orgánicos volátiles y semivolátiles, compuestos orgánicos con comportamiento iónico, aldehídos, ácidos orgánicos, fenoles, combustibles, pesticidas, herbicidas, plaguicidas organoclorados y cianuros.	Admite altas concentraciones.
Deshalogenación	Contaminantes orgánicos volátiles y semivolátiles, compuestos orgánicos con comportamiento iónico, aldehídos, ácidos orgánicos, fenoles, combustibles, pesticidas, herbicidas, plaguicidas organoclorados y cianuros.	Admite altas concentraciones en general, pero muy baja concentración de compuestos orgánicos clorados.
Tratamiento electroquímico	Metales, compuestos orgánicos polares, compuestos inorgánicos con comportamiento iónico, benceno, tolueno, etilbenceno, xileno, cetonas, fenantreno, fenol, hidrocarburos, PAHs.	Admite altas concentraciones.
Desorción térmica in situ	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, así como algunos pesticidas y carburantes.	Admite altas concentraciones.
Desorción térmica ex situ	Compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles, combustibles, PCBs, PAHs, pesticidas y metales pesados volátiles.	Admite altas concentraciones, pero se optimiza en bajas concentraciones.
Fitorremediación	Metales, pesticidas, disolventes, hidrocarburos derivados del petróleo e hidrocarburos aromáticos policíclicos.	De moderada a baja concentración.
Atenuación natural	Hidrocarburos derivados del petróleo y compuestos volátiles y semivolátiles no halogenados.	Concentraciones inferiores a 10.000 ppm
Bioestimulación	Hidrocarburos derivados del petróleo, pesticidas, disolventes y sustancias químicas orgánicas.	De moderada a baja concentración.
Bioaumentación	Herbicidas, insecticidas, fenoles, PCBs, hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales.	De moderada a baja concentración.
Bioventilación	Hidrocarburos derivados del petróleo, disolventes no clorados, pesticidas y algunos compuestos orgánicos.	Concentraciones inferiores a 10.000 ppm
Biopilas	Compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos no halogenados y pesticidas.	Admite altas concentraciones.

### 3.3. DURACIÓN DEL TRATAMIENTO

La duración de cada tratamiento es muy relativa, pues depende de multitud de factores y no es posible determinar un tiempo exacto para cada técnica de recuperación. El tiempo que una técnica tarda en alcanzar el nivel de descontaminación deseado depende, entre otros factores, de las sustancias

contaminantes a tratar, de su grado de concentración, del área afectada, de la profundidad alcanzada por los contaminantes, de las características del suelo (contenido en humedad y en materia orgánica, porcentaje de las diferentes partículas, permeabilidad, conductividad hidráulica, temperatura, etc.).

La mejor forma de obtener información sobre la duración de cada método es consultando informes de tratamientos ya realizados. Así pues, en la página oficial de la EPA se puede realizar una consulta de dichos informes y obtener información relativa a la duración de cada método en casos concretos. Se incluyen también la duración de varios tratamientos realizados por la empresa EMGRISA.

#### **Extracción de aire:**

- Confidential Commercial Site, New Jersey: se trataron 204 m<sup>2</sup> y hasta 13,72 metros de profundidad de un suelo contaminado por tricloroetano y tetracloroetano. La duración del tratamiento fue de 100 días.
- Former Industrial Site, Queens, New York: no se especifica el área afectada, pero sí la profundidad, de 7,62 a 12,8 metros, contaminado por hidrocarburos totales del petróleo, tricloroetano y fueles, siendo la duración del tratamiento de 8 meses.
- Santa Fe County Judicial Complex: no especifica la extensión ni la profundidad del suelo tratado. La contaminación está producida por gasolina y su tratamiento duró 14 meses.

#### **Lavado in situ:**

- Alameda Point, California: fue una prueba piloto en la que se trataron 37 m<sup>2</sup> de suelo, con una profundidad de entre 3,96 y 5,18 metros, contaminado por dicloroetano y tricloroetano. La duración fue de 1 mes.
- Ninth Avenue Dump Superfund Site in Indiana: se trataron alrededor de 2.000 m<sup>3</sup> de un suelo contaminado por benceno, tolueno, hidrocarburos totales del petróleo y tricloroetano, con una duración de 2 años de tratamiento.
- Byron Barrel and Drum Superfund Site in New York: se trataron 8.000 m<sup>2</sup> de suelo, con una profundidad de 1,22 metros, contaminado por residuos peligrosos, durando el tratamiento 2 años y 3 meses.

#### **Oxidación/Reducción:**

- Alameda DoD Site at IT Project 15: alrededor de 4500 m<sup>3</sup> de suelo contaminado por compuestos orgánicos semivolátiles e



hidrocarburos aromáticos policíclicos fueron tratados en alrededor de 1 año.

- American Chemical Service Superfund Site: se descontaminó un suelo de 4.650 m<sup>2</sup> contaminado por clorobenceno, gasolina, cloroetano, BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) y diesel en 1 año y 7 meses.
- Active Shopping Mall Complex: se trataron 900 m<sup>2</sup> de suelo contaminado por dicloroetano, tricloroetano, tetracloroetano y cloruro de vinilo. Fueron necesarios 11 meses para su descontaminación.

#### **Tratamiento electroquímico:**

- Sediments at the Erie Pier, Minnesota: fue tratado un suelo contaminado por hidrocarburos aromáticos policíclicos, sin especificar el tamaño del suelo, requiriéndose menos de 1 año para su descontaminación.
- Georgia Pacific, Inc. Log Pond, Washington: tratamiento llevado a cabo en 23 m<sup>2</sup> de suelo contaminado por hidrocarburos aromáticos policíclicos, mercurio y fenoles. Se completó la recuperación en 7 meses.

De acuerdo con Vázquez y col. (2004), la técnica de electroremediación implica un tratamiento relativamente largo (varias semanas).

Del mismo modo, de la Rosa-Pérez y col. (2007) mencionan tres ejemplos de zonas en las que se ha aplicado el tratamiento electroquímico, con duraciones de 30 semanas (algo más de 6 meses), 18 meses y 12 meses respectivamente.

#### **Biorremediación:**

- Hunters Point Naval Shipyard, Parcel C: fueron tratados 458 m<sup>3</sup> de suelo contaminado por tetracloroetano y clorobenceno, necesitando de 4 meses para completar el tratamiento.
- Boone Dry Cleaners, Tennessee: se trató un volumen de 164 m<sup>3</sup> de suelo contaminado por dicloroetano, tetracloroetano, naftaleno y otros compuestos similares. El tratamiento fue de 11 meses.

#### **Landfarming:**

- La empresa EMGRISA llevó a cabo la descontaminación de suelos afectados por presencia de hidrocarburos. El volumen estimado de material a tratar fue de 162 m<sup>3</sup>. El tiempo de tratamiento

transcurrido entre la instalación y el desmantelamiento del dispositivo fue de 13 meses. Cabe destacar que la concentración fijada como valor objetivo se alcanzó anteriormente, pero se realizaron varios muestreos de certificación de que se había alcanzado definitivamente el objetivo de remediación.

#### **Fitorremediación:**

- Bus Depot in Finland: se llevó a cabo el tratamiento de 28 m<sup>2</sup> de suelo contaminado por hidrocarburos totales del petróleo, siendo su duración de 3 años y 3 meses.
- Crude Oil Spill Site, Texas: el tratamiento se realizó en 648 m<sup>2</sup> de suelo contaminado por hidrocarburos totales del petróleo, sien su duración de 2 años y 3 meses.
- Former Fuel Loading Facility, Ontario: se trataron 20.000 m<sup>2</sup> de suelo contaminado por BTEX, siendo necesarios 7 años de tratamiento.

#### **Incineración:**

- Former Gateway Cleaners, Missouri: se incineró un suelo con altos niveles de Policlorobifenilos, con una duración de tratamiento de 6 días.

#### **Solidificación/Estabilización:**

- Former Wood Preserving in United States: se realizó el tratamiento en un suelo contaminado por hidrocarburos aromáticos policíclicos, naftaleno y pentaclorofenol durante 1 mes.
- Camp Stanley Storage Activity, Texas: en este caso, se descontaminó de Plomo un suelo de alrededor de 2300 m<sup>3</sup>, durando el tratamiento 1 año.

#### **Vitrificación:**

- Hazen Research Center, Wisconsin: se trató un suelo de tamaño no especificado, contaminado por dioxinas, furanos, policlorobifenilos y metales. El tratamiento se prolongó durante 7 meses.

#### **Excavación selectiva y gestión:**

- Afección asociada a un antiguo depósito subterráneo de almacenamiento de combustible debida a fugas. Se detectaron elevadas concentraciones de hidrocarburos totales en suelo, y presencia de hidrocarburo en fase libre sobrenadante. El volumen

de tierras excavadas fue de 5.500 m<sup>3</sup> sobre perfil. El tiempo de tratamiento transcurrido entre la instalación y el desmantelamiento del dispositivo fue de 10 meses. Este trabajo fue realizado por la empresa EMGRISA.

Como se puede observar, existen grandes diferencias temporales al emplear una misma técnica, debido a diferencias en las condiciones del lugar de aplicación de la técnica, así como entre las diferentes técnicas, debido al diferente principio de acción del tratamiento.

En algunos casos, la selección de la técnica depende de la necesaria rapidez para descontaminar un suelo. Así, por ejemplo en el caso de los suelos contaminados de lo que fue la cabecera de ENSIDESA en Avilés (Asturias), las actividades de descontaminación de suelos fueron profundamente condicionadas por el desarrollo del proyecto de urbanización del polígono. Por una parte, los ajustados plazos de ejecución de la reurbanización no permitieron aplicar procedimientos in situ que supusieran períodos de tratamiento altos, tales como los biológicos. Por otra parte, el proyecto de urbanización implicaba importantes movimientos de tierras para la adecuación de la topografía al nuevo diseño del polígono, resultando afectada por los desmontes la mayor parte de las áreas contaminadas. Por estas causas decidieron la excavación de todos los suelos contaminados, para abordar en una fase posterior su tratamiento ex situ. Esto último conllevó, la necesidad de construir una celda de almacenamiento temporal de suelos contaminados con hidrocarburos. La celda se apoyó en un muro de contención de hormigón previamente existente, y disponía de una impermeabilización inferior y un recubrimiento superior mediante láminas de PEAD, para evitar la generación y fugas de lixiviados contaminados. Las aguas infiltradas, la mayoría de las cuales procedían de la humedad del propio material, se recogían en el fondo de la celda mediante un sistema de drenaje y se acumulaban en un tanque de recogida de lixiviados, que se controlaba periódicamente (del Río y Pérez, 2002).

### **3.4. FACTORES TECNOLÓGICOS**

Hay que tener en cuenta que cada método de recuperación de suelos requiere de un nivel tecnológico diferente, desde la simplicidad de los métodos de biorremediación hasta la complejidad técnica de los vertederos controlados o los equipos necesarios para la extracción de aire del suelo.

En este sentido, es fundamental tener en cuenta la disponibilidad y aplicabilidad de la tecnología necesaria para la aplicación de cada método. Es posible que criterios como el tipo de suelo, el tipo de contaminante a tratar, o el tiempo de tratamiento deseado, sugieran un método como el más apropiado para remediar el suelo, pero debido a limitaciones tecnológicas no sea viable aplicarlo.

Por esto, cabe hacer una clasificación de las técnicas de recuperación de suelos según sus requerimientos tecnológicos.

**Tabla 5. Requerimiento tecnológico.**

<b>Complejas</b>	<b>Simples</b>
Extracción de Aire	Lavado in situ
Lavado ex situ	
Extracción Química	
Oxidación/Reducción	Biorremediación
Deshalogenación	
Tratamiento Electroquímico	
Desorción Térmica	Atenuación Natural
Bioventilación	
Biopilas	
Vertederos Controlados	Bioestimulación
Sellado Superficial	
Pantallas de Aislamiento	
Sellado in situ	Bioaumentación
Estabilización	
Solidificación	
Vitrificación	Fitorremediación
Incineración	

Además de la complejidad tecnológica requerida, también debe tenerse en cuenta la disponibilidad en el mercado de dicha tecnología. Por ejemplo, a pesar de la complejidad técnica del método de extracción de aire, los equipos necesarios están completamente desarrollados por marcas comerciales, por lo que están disponibles en el mercado.

Del mismo modo, las técnicas ex situ que requieren de la movilización del suelo contaminado a una planta o instalación específica para su tratamiento no suponen una dificultad tecnológica puesto que, en muchos casos, dichas plantas de tratamiento no se instalan específicamente para un solo uso, sino que ya existían con anterioridad y se siguen utilizando.

Generalmente, las técnicas que más dificultades pueden plantear a la hora de instalar la tecnología necesaria son las técnicas ex situ que se realizan on site, dado que este tipo de tratamientos exige la instalación para el uso exclusivo de la técnica a realizar, y posteriormente se desmantela. En este sentido, puede ser difícil conseguir la tecnología necesaria.

### 3.5. GENERACIÓN DE RESIDUOS

Algunas de las técnicas de recuperación de suelos contaminados que se utilizan actualmente presentan el inconveniente de generar cierta cantidad de residuos tras haber llevado a cabo la descontaminación del suelo. Generalmente, esta generación de residuos está relacionada con el principio activo de la técnica, es decir, tiene que ver con la forma de eliminar el contaminante del suelo.

En este sentido, las técnicas que generan mayor cantidad de residuos son, principalmente, las que funcionan por arrastre del contaminante. No obstante, otras técnicas con diferente principio activo también pueden generar residuos.

En la siguiente tabla se muestran las técnicas que generan residuos y las que no:

Tabla 6. Generación de residuos.

Generan Residuos	No Generan Residuos
Extracción de Aire	Atenuación Natural
Lavado In Situ	Bioestimulación
Lavado Ex Situ	Bioaumentación
Extracción Química	Bioventilación
Oxidación/Reducción	Pantallas de aislamiento
Deshalogenación	Estabilización
Tratamiento Electroquímico	Solidificación
Desorción Térmica	
Biopilas	
Fitorremediación	
Vertederos Controlados	
Sellado Superficial	
Sellado In Situ	
Vitrificación	
Incineración	

Como se puede apreciar, son más las técnicas que generan residuos que las que no lo hacen.

En igualdad de condiciones, siempre es preferible una técnica que no genere residuos frente a una que sí los genere, pero en la mayoría de casos las condiciones favorecen el uso de técnicas que producen residuos, bien porque son más eficaces, más rápidas, más fiables, etc.

Entrando a explicar el contenido de la Tabla 6, los métodos que generan residuos se pueden desglosar de la siguiente manera:

- Métodos que generan residuos gaseosos: extracción de aire, oxidación/reducción, deshalogenación, desorción térmica, biopilas, vertederos controlados, sellado superficial, sellado in situ, vitrificación e incineración.
- Métodos que generan aguas contaminadas: lavado in situ y ex situ, extracción química, biopilas y vertederos controlados.
- Métodos que generan residuos sólidos: tratamiento electroquímico, fitorremediación e incineración.

Según el tipo de residuo generado, se debe realizar un tipo de tratamiento específico para eliminarlo. En este sentido, la mayoría de los residuos gaseosos son fácilmente eliminados al pasar por filtros de carbón activo, por lo que se puede considerar una buena técnica complementaria para aquellas que generan este tipo de residuos.

En cuanto a las aguas contaminadas, una buena opción es trasladarlas hasta una planta depuradora de aguas, donde serán tratadas para eliminar los contaminantes.

Y por último, en cuanto a los residuos sólidos, existe la posibilidad de trasladarlos a un vertedero controlado o a una planta de tratamiento de residuos capaz de gestionar el tipo de residuo en cuestión.

Cabe mencionar que, en casos aislados, el tratamiento de bioventilación puede generar residuos gaseosos, así como el tratamiento de estabilización puede requerir la movilización de la totalidad del suelo tratado a un vertedero.

### **3.6. EFICACIA A CORTO Y LARGO PLAZO**

Esta es una cuestión fundamental a tener en cuenta al seleccionar una técnica para recuperar un suelo contaminado. A menudo, cuando hay que descontaminar un suelo, se busca una solución que ofrezca resultados rápidamente, pero a veces estas soluciones no son las más adecuadas, ya que

puede ser que no eliminen el agente causante de la contaminación y propicien que en un futuro se deba volver a solucionar el problema.

Cuando se busca descontaminar un suelo, la mejor solución es aquella que disminuye la concentración de los contaminantes hasta un nivel de riesgo aceptable. De este modo se garantiza que el suelo queda libre de agentes tóxicos o contaminantes (hasta cierto punto) y se puede asegurar la eficacia de la descontaminación a largo plazo. La eliminación completa de los contaminantes es prácticamente imposible, debido a factores técnicos y económicos.

Como ya hemos visto anteriormente, las técnicas de descontaminación se clasifican en varios grupos según el objetivo que persiguen. Estos son: técnicas de descontaminación, técnicas de contención y técnicas de confinamiento. Únicamente las técnicas de descontaminación ofrecen soluciones que perduran en el tiempo. El resto de técnicas tienen un tiempo máximo de duración.

De acuerdo con el Real Decreto 9/2005, han de utilizarse técnicas que den soluciones permanentes. En este sentido, cabe realizar una recopilación de los métodos que son efectivos a largo plazo y los que no (Tabla 7).

**Tabla 7. Eficacia a corto y largo plazo de las diferentes técnicas de descontaminación de suelos.**

Métodos Efectivos a Largo Plazo	Métodos NO Efectivos a Largo Plazo
Extracción de Aire	Oxidación/Reducción
Lavado In Situ	
Lavado Ex Situ	
Extracción Química	
Oxidación/Reducción	
Deshalogenación	Métodos de Confinamiento
Tratamiento Electroquímico	
Desorción Térmica	
Biorremediación	
Atenuación Natural	
Bioestimulación	Incineración
Bioaumentación	
Bioventilación	
Biopilas	
Fitorremediación	

Como se puede observar en la Tabla 7, la mayoría de los métodos de recuperación 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.

Las únicas excepciones son la técnica de Oxidación/Reducción, que en caso de tratar un suelo contaminado por metales, disminuye su toxicidad cambiando el estado de valencia de los mismos, pero estos quedan en el suelo, con un riesgo latente de volver a cambiar su estado de valencia y producir nuevamente la contaminación; los métodos de confinamiento, ya que en ningún caso eliminan la contaminación del suelo, tan solo la contienen; y la incineración, que aunque sí destruye los contaminantes y los elimina completamente, también destruye la estructura del suelo, luego no se puede considerar una técnica de recuperación de suelos.

### 3.7. EFICACIA EN RELACIÓN AL COSTE

Ya hemos hablado anteriormente sobre la eficacia a corto y largo plazo de los métodos de recuperación de suelos. Para establecer una relación entre la eficacia y el coste económico, ahora debemos conocer los costes de cada método.

En este sentido, el II Plan Nacional de Suelos Contaminados (2007-2015) elabora unas estimaciones económicas del coste medio según el tipo de técnicas utilizadas, de la siguiente manera:

- Tratamientos biológicos: entre 30 y 75 euros por tonelada de suelo tratado.
- Tratamientos térmicos: entre 60 y 90 euros por tonelada de suelo tratado.
- Tratamientos físico-químicos: entre 70 y 100 euros por tonelada de suelo tratado.
- Descontaminación de terrenos con metales pesados: entre 120 y 200 euros por metro cúbico de suelo.
- Descontaminación de terrenos con hidrocarburos: entre 120 y 180 euros por metro cúbico de suelo.
- Descontaminación in situ de terrenos contaminados con metales pesados hasta una profundidad de 1 metro: entre 0,8 y 1,9 millones de euros por hectárea.
- Descontaminación in situ de terrenos contaminados por hidrocarburos hasta una profundidad de 1 metro: entre 0,8 y 1,8 millones de euros por hectárea.

Pero buscando datos más concretos, acudimos de nuevo a la página web oficial de la EPA, donde encontramos lo siguiente:



Para la descontaminación por Extracción de Aire de un suelo contaminado por Tricloroetano (TCE), en Groveland, el coste económico fue de aproximadamente 6.264.500 dólares, con una eficacia de descontaminación del 97%, bajando la concentración de TCE desde 11.000 ppb (partes por billón) hasta 15 ppb. Como hemos visto anteriormente, la eficacia de esta técnica es a largo plazo.

En el caso de la técnica de Lavado del Suelo in situ, en Nueva York se utilizó esta técnica para recuperar un suelo contaminado por Tricloroetano y Tricloroeteno, reduciendo las concentraciones de estos desde 860 y 3.300 ppb hasta 57 y 7 ppb respectivamente. El coste económico fue de, aproximadamente, 140.000 dólares. La eficacia de este tratamiento se mantiene a largo plazo.

En cuanto a la técnica de Oxidación/Reducción, en Missouri se trató un suelo contaminado por Tetracloroetano, consiguiendo bajar la concentración del contaminante desde 424 mg/kg hasta 6 mg/kg, siendo el coste económico de 187.276 dólares. La eficacia de esta técnica es a largo plazo para el tipo de contaminante tratado.

Para el Tratamiento Biológico, según el artículo "*Abstracts of Remediation Case Studies (Volume 11)*", de la Federal Remediation Technologies Roundtable ([www.frtr.gov](http://www.frtr.gov)), en Pennsylvania (Palermton Zinc Superfund Site) se trataron alrededor de  $3,44 \times 10^6$  m<sup>2</sup> de suelo contaminado por metales pesados mediante la técnica de fitorremediación, con un coste aproximado de 9 millones de dólares.

En el caso de la Extracción Química, en Alaska (Sparrevohn Long Range Radar Station), se llevó a cabo la recuperación de un suelo contaminado por PCBs, lográndose una alta tasa de descontaminación (desde una media de 80 mg/kg hasta 3,27 mg/kg). El coste económico del tratamiento fue de 828.719 dólares.

En cuanto al tratamiento de Oxidación/Reducción, se llevó a cabo en Portsmouth para tratar Tricloroetileno (TCE) en una planta de difusión gaseosa. Este tratamiento consiguió reducir la concentración de TCE desde 176,7 hasta 41 mg/L, con un coste económico de 562.000 dólares.

Por otro lado, en Tennessee se utilizó la técnica de Desorción Térmica para tratar un suelo contaminado por metales pesados y pesticidas, consiguiendo una eficacia de descontaminación superior al 99% con un coste económico total de 5.586.376 dólares.

En cuanto a Métodos de Contención y Confinamiento, se utilizó la técnica de Estabilización Físico-química en Illinois para tratar un suelo contaminado por metales, con un coste aproximado de 2 millones de dólares. Por otro lado, se

utilizó la técnica de Incineración en Missouri para tratar un suelo contaminado por sustancias explosivas (TNT y DNT) y bajas concentraciones de plomo, PCBs y HAPs, con un coste de 13 millones y medio de dólares.

Como se ha mencionado antes, las técnicas de contención y confinamiento no son efectivas a largo plazo, y viendo los resultados de estos casos concretos, resulta evidente que tampoco son económicamente más asequibles. Por esto, debe evitarse el uso de este tipo de técnicas, en favor de otro tipo de tratamientos que resulten eficaces a largo plazo.

Por otro lado, para ayudar a seleccionar la técnica correcta, o simplemente para obtener información adicional sobre la técnica seleccionada, a menudo se lleva a cabo un estudio de tratamiento con materiales contaminados extraídos del suelo a tratar. Este estudio puede ser de tres tipos (Miliarium Aureum, S.L., 2001-2004), en función de la complejidad con que quiera analizarse los resultados:

- Prueba preliminar de laboratorio: es el más rápido y económico. Su finalidad es obtener información sobre las características de los contaminantes con la finalidad de determinar si pueden tratarse con una determinada técnica. Generalmente esta prueba se concluye en cuestión de días y suele costar entre 10.000 y 50.000 euros.
- Prueba de laboratorio a pequeña escala: simula el proceso de tratamiento con una pequeña cantidad de suelo contaminado. Proporciona información relativa a la eficacia de una técnica, de modo que permite determinar si será efectiva para tratar este tipo de contaminante. Suele llevar más tiempo que la anterior y su coste es de entre 50.000 y 250.000 euros.
- Estudio piloto de tratamiento: se usa para establecer objetivos de costo, eficacia y para perfeccionar la concepción de la técnica seleccionada. Este estudio requiere la instalación del equipo de tratamiento y su coste económico supera los 250.000 euros.

### **3.8. ADECUACIÓN A LA NORMATIVA**

Toda actuación que se lleve a cabo en un suelo contaminado con la finalidad de recuperarlo debe realizarse de forma que se adecue a la normativa vigente. En este caso, existe normativa referente a suelos contaminados a nivel europeo, a nivel nacional y a nivel autonómico.

A nivel europeo, encontramos la siguiente normativa:

- La 'Directiva relativa a la prevención y al control integrado de la contaminación', de 1996. En ella se dan definiciones relacionadas

con la contaminación y el medio ambiente y a continuación se describen los principios generales de las obligaciones del titular con respecto a actividades potencialmente contaminantes. Finalmente, se citan valores límite de emisiones comunitarias para ciertas actividades, nombradas en su Anexo I.

- La 'Directiva de residuos peligrosos (91/6897CEE)'. Esta directiva trata sobre la gestión de residuos peligrosos para evitar, en la medida de lo posible, generar contaminación, con lo que esto conlleva en relación a la materia de suelos contaminados.
- La 'Directiva 2008/98/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre residuos'. Trata sobre la gestión de residuos en general, desde un punto de vista de prevención y reducción de impactos. Con tal fin, plantea una jerarquía de prioridad en las medidas de gestión de residuos, poniendo en primer lugar la prevención, la reutilización y el reciclaje y en último lugar la eliminación.
- Encontramos también directivas para contaminantes específicos, como son la 'Directiva 96/59/CE', sobre PCBs; las 'Directivas 73/439/CE y 87/101/CE' sobre aceites usados; la 'Directiva 94/62/CE' sobre envases; la 'Directiva 91/676/CE', sobre nitratos; y las 'Directivas 86/278/CE y 91/271/CE', sobre lodos de depuradora.
- Del mismo modo, encontramos la 'Directiva 85/337/CE', de evaluación de impacto ambiental; la 'Directiva 1257/99/CE', sobre buenas prácticas agrícolas; la 'Directiva 1259/99/CE' sobre política agraria común; la 'Directiva 2004/35/CE', sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales; y finalmente la 'Directiva Marco sobre Residuos 2008/98/CE'.

Todas estas directivas europeas establecen y fijan una serie de objetivos que todos los países miembros deben cumplir, pero cada país elabora su propia legislación en base a este marco legislativo europeo.

En cuanto a la normativa estatal sobre suelos contaminados, en España encontramos la siguiente:

- Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
- Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Estas son las leyes que deben seguirse en todo lo referente a suelos contaminados en el territorio español.

Y por último, a nivel autonómico, cada comunidad autónoma ha desarrollado su propia normativa referente a suelos contaminados, siguiendo siempre las

directrices de la legislación nacional. En el caso de la Comunidad Valenciana, la normativa desarrollada es la siguiente:

- Ley 10/2000, de 12 de diciembre, sobre residuos de la comunidad valenciana.

Las técnicas de descontaminación de suelos deben adaptarse a los criterios que desarrolla esta legislación. En este sentido, los aspectos a destacar sobre la adecuación de las técnicas a la normativa son los siguientes:

En primer lugar, las leyes sobre suelos contaminados insisten en una serie de principios básicos a seguir en materia de contaminación de suelos, el principio de prevención y el principio de quien contamina paga.

- **PREVENCIÓN:** las medidas preventivas se dividen en medidas de diseño, medidas defensivas y medidas de gestión y organización (IHOBE S.A., 2008), y su importancia radica en que una buena labor preventiva conduce a un menor riesgo de que una determinada actividad termine produciendo la contaminación de un suelo.  
La prevención en el diseño pasa por la construcción de las maquinarias y herramientas según las normas UNE, usando materiales adecuados al uso que se les va a dar, introduciendo elementos de seguridad y control en las instalaciones, prefiriendo siempre un diseño cerrado con alto grado de automatización, etc.  
Por otra parte, la prevención en las medidas defensivas debe caracterizarse por una buena pavimentación impermeable, sistemas de contención con detección de fugas y alarma, sistemas de drenaje para casos de fuga, controles de las aguas subterráneas y vapores del suelo, etc.  
Y por último, las medidas de gestión y organización, es decir, programación del mantenimiento y la inspección de las instalaciones, formación de los operarios, utilización de sustancias lo menos contaminantes posible, reutilización y reciclaje de los materiales, inventariado y gestión adecuada de los productos, implantación de un sistema integrado de gestión ambiental, etc.
- **QUIEN CONTAMINA PAGA:** este es un principio de responsabilidad medioambiental a través del cual se establece que quien produce la contaminación ha de llevar a cabo las actuaciones necesarias para remediarla.

Por otro lado, y ya concretando en la legislación estatal española, el Real Decreto 9/2005 establece una serie de directrices encaminadas a dirigir las

actuaciones de recuperación de suelos contaminados. Las especificaciones más importantes se resumen en las siguientes:

- La declaración de un suelo como contaminado obligará a la realización de las actuaciones necesarias para proceder a su recuperación ambiental en los términos y plazos dictados por el órgano competente.
- El alcance y ejecución de las actuaciones de recuperación será tal que garantice que la contaminación remanente, si la hubiera, se traduzca en niveles de riesgo aceptables de acuerdo con el uso del suelo.
- La recuperación de un suelo contaminado se llevará a cabo aplicando las mejores técnicas disponibles en función de las características de cada caso.
- Las actuaciones de recuperación deben garantizar que materializan soluciones permanentes, priorizando, en la medida de lo posible, las técnicas de tratamiento in situ que eviten la generación, traslado y eliminación de residuos.
- En el caso de que por razones justificadas de carácter técnico, económico o medioambiental no sea posible esa recuperación, se podrán aceptar soluciones de recuperación tendentes a reducir la exposición, siempre que incluyan medidas de contención o confinamiento de los suelos afectados.

Es decir, al escoger una técnica para recuperar un suelo contaminado, debe priorizarse un tratamiento in situ que garantice una descontaminación hasta niveles de riesgo aceptables de forma permanente.

### **3.9. GRADO DE PROTECCIÓN DE LA SALUD HUMANA**

Es importante conocer los riesgos que cada técnica puede generar para la salud humana, o en otras palabras, su grado de protección de la salud humana. En este sentido, cada método de descontaminación, debido a su principio de acción o a los productos que utiliza, puede generar una serie de riesgos para la salud derivados de su labor de descontaminación.

A continuación se presenta en la Tabla 8 un resumen de los riesgos que se desprenden de cada técnica de recuperación de suelos.

Tabla 8. Riesgos para la salud humana.

TÉCNICA	RIESGOS
Extracción de Aire	Gases en proporciones explosivas
	Ruidos y malos olores
Lavado del Suelo	Aguas contaminadas
Extracción Química	Aguas contaminadas
Oxidación/Reducción	Gases tóxicos
Deshalogenación	Gases y aguas contaminadas
Electrorremediación	Gases tóxicos*
Desorción Térmica	Gases contaminados
Biorremediación	La contaminación puede alcanzar a los organismos receptores (incluyendo los humanos)
Vertedero Controlado	Gases contaminados
	Malos olores
Sellado Superficial	Gases contaminados
Sellado In Situ	Gases contaminados
Estabilización	Gases contaminados
Vitrificación	Gases contaminados
Incineración	Generación de gases y cenizas

\* La técnica de electrorremediación puede generar gases tóxicos en casos determinados, pero no es lo habitual.

Como podemos observar en la Tabla 8, los riesgos para la salud que se desprenden de las técnicas de remediación de suelos están, en su mayoría, estrechamente ligados a los residuos que generan (ya vistos anteriormente).

Por otra parte, cabe señalar que normalmente las técnicas de remediación cuentan con sistemas de contención o tratamiento para los residuos que generan, de modo que en raras ocasiones escapen al ambiente. No obstante, el riesgo de fuga o accidente durante el manejo o tratamiento de estos residuos es algo que siempre existe y por eso se han catalogado aquí como riesgos para la salud humana.

### 3.10. PARTICIPACIÓN ESTATAL

Otro factor que puede influenciar en la decisión de aplicar un determinado método de descontaminación u otro diferente es el apoyo que se pueda recibir por parte del estado. Normalmente este apoyo se traduce en subvenciones económicas que ayudan a financiar los costes de operación del método seleccionado.

En este sentido, es complicado encontrar información exacta sobre ayudas económicas que el gobierno haya podido prestar en casos concretos, sin embargo, en el II Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados (IIPNRSC) (2007-2015) podemos encontrar las cantidades exactas de dinero que se han destinado, desde distintos organismos, a la remediación de suelos. Así pues, según este documento, el Ministerio de Medio Ambiente ha destinado a la descontaminación de suelos 117.585 millones de euros en el periodo comprendido entre 1995 y 2005. Del mismo modo, las Comunidades Autónomas han destinado al mismo propósito y en el mismo periodo de años, una cantidad de 52.444 millones de euros, con cargo a los fondos FEDER.

Por último, el IIPNRSC menciona que el gasto privado en materia de suelos contaminados para el mismo periodo de tiempo se estima alrededor de 115 o 120 millones de euros.

Conociendo estos datos ofrecidos por el PNRSC, sabemos que existe una cierta participación del estado en el tratamiento de suelos contaminados, por lo que tener esto en cuenta puede ayudar a tomar una decisión a la hora de seleccionar un método de remediación.

### **3.11. ACEPTACIÓN SOCIAL**

Por último y para finalizar con los criterios de selección, ha de tenerse en cuenta que no todos los métodos de recuperación de suelos gozan de buena fama entre la gente.

Generalmente la sociedad suele mostrar mayor rechazo por las técnicas que producen más molestias en sus alrededores, es decir, aquellas que producen malos olores, ruidos, aquellas que generan residuos visibles, humo, etc.

En este sentido, las incineraciones, los vertederos controlados, la extracción de vapores y técnicas similares a estas son bastante rechazadas por la gente.

Sin embargo, aquellas técnicas que también producen residuos pero no resultan visibles, pasan más 'inadvertidas' y tienen mejor aceptación social. Este es el caso de técnicas como el lavado del suelo, la extracción química, la electrorremediación, etc., que aunque generan residuos que deben ser tratados, estos no producen molestias directas como los casos anteriores.

Y en el otro extremo se encuentran las técnicas que tienen buena fama por no causar molestias a sus alrededores. Generalmente la sociedad ve con buenos ojos las técnicas biológicas, ya que en su mayoría usan métodos naturales que no generan molestias por ruido, ni malos olores ni contaminación alguna.

## 4. CLASIFICACIONES DE LAS TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN TENIENDO EN CUENTA MÚLTIPLES CRITERIOS

Critto y col. (2006) realizan una clasificación de las técnicas de remediación teniendo en cuenta algunos de los criterios mencionados anteriormente. Dicha clasificación queda recogida en la Tabla 9, en la que observamos que la técnica de lavado de suelo se puntúa como la más efectiva, con una gran fiabilidad y un bajo coste. Sin embargo la fitorremediación se presenta como una técnica de baja efectividad, de gran aceptación social y de bajo coste. La disposición de suelo contaminado en vertedero tiene una efectividad muy baja, así como una nula aceptación social.

**Tabla 9. Clasificación de las técnicas de remediación teniendo en cuenta distintos criterios base.**

Técnica de Remediación	Efectividad	Aceptación Social/Impactos	Fiabilidad	Condiciones de Intervención	Peligrosidad	Coste
Separación Electroquímica	4	3	4	5	3	3
Solidificación/Estabilización in situ	4	1	5	4	3	3
Fitorremediación	1	4	1	5	5	4
Separación	4	2	5	4	2	2
Lavado del Suelo	5	2	5	4	3	2
Solidificación/Estabilización ex situ	4	1	5	1	2	2
Vertedero	1	1	5	3	4	2
Alternativas de Vertedero	1	1	4	3	4	2
Excavación, recuperación y deposición off site	1	1	4	1	1	2

Dixit y col. (2016) realizan una clasificación de las diferentes técnicas de remediación teniendo en cuenta para cada tipo de contaminante los criterios siguientes: eficiencia-coste, duración y reducción del riesgo (Tabla 10).



Tabla 10. Opciones de remediación según contaminantes y diferentes criterios base de selección.

Contaminante	Coste/Eficiencia	Duración	Reducción del Riesgo
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos	Biopilas Fitorremediación Lavado del Suelo in situ	Lavado del Suelo ex situ Biotratamiento Bioventilación	Lavado del Suelo ex situ Extracción de aire Inyección de Vapor
Metales Pesados	Lavado del Suelo in situ Fitorremediación Desorción Térmica	Electrorremediación Lavado del Suelo ex situ Desorción Térmica	Electrorremediación Vitrificación Desorción Térmica
Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno	Lavado del Suelo in situ Bioventilación Landfarming	Lavado del Suelo in situ Bioventilación Vitrificación	Bioventilación Extracción de Vapores Vitrificación
Compuestos Orgánicos Halogenados (PCBs)	Desorción Térmica Fitorremediación Lavado del Suelo in situ	Deshalogenación Lavado del Suelo in situ y ex situ	Extracción de Vapores Deshalogenación Bioventilación
Compuestos Orgánicos no Halogenados	Biopilas Fitorremediación Lavado del Suelo in situ	Lavado del Suelo in situ y ex situ Extracción de Vapores	Extracción de Vapores Oxidación Química Extracción por Solventes
Pesticidas	Biopilas Fitorremediación Lavado del Suelo in situ	Lavado del Suelo ex situ Biotratamiento Bioventilación	Bioventilación Lavado del Suelo ex situ Biopilas
Compuestos Orgánicos Volátiles	Biopilas Fitorremediación Lavado del Suelo in situ	Biotratamiento Lavado del Suelo in situ Desorción Térmica	Biotratamiento Extracción de Vapores Desorción Térmica
Compuestos Orgánicos Semivolátiles	Bioventilación Landfarming Extracción de Vapores	Lavado del Suelo ex situ Bioventilación Landfarming	Lavado del Suelo ex situ Extracción de Vapores Bioventilación
Hidrocarburos Totales del Petróleo	Bioventilación Fitorremediación Biorremediación	Lavado del Suelo ex situ Bioventilación Extracción de Vapores	Extracción de Vapores Calentamiento Eléctrico Extracción Subterránea

## 5. SELECCIÓN DE LA TÉCNICA

Como hemos podido ver a lo largo de este trabajo, cuando abordamos el tema de suelos contaminados nos encontramos con una amplia variedad de conceptos. Existen multitud de compuestos potencialmente contaminantes, multitud de técnicas de remediación, multitud de parámetros que determinan las condiciones del suelo, etc. Por ello, cuando un suelo se declara como potencialmente contaminado, o directamente como contaminado, debe llevarse a cabo un estudio detallado de las características de dicho suelo, de las causas de la contaminación y las sustancias contaminantes, del riesgo que conlleva la contaminación para la salud humana y para los ecosistemas teniendo en cuenta el uso actual y futuro del suelo, etc. En base a este estudio, debe seleccionarse posteriormente un método de recuperación del suelo y establecer los objetivos de la recuperación.

Para poder seleccionar correctamente la técnica más apropiada en función de las características del suelo, de la contaminación, de los objetivos a cumplir y de la normativa vigente, existen las herramientas que hemos visto anteriormente para simplificar el proceso de toma de decisión, ofreciendo las mejores alternativas en función de los parámetros a tener en cuenta.

Dicha toma de decisión contempla los criterios de selección que hemos visto anteriormente de una forma ponderada, es decir, dando más importancia a unos criterios que a otros, según las características del sitio y según los objetivos a cumplir, obteniendo como resultado la técnica de recuperación de suelos más apropiada según cada caso.

## 6. HERRAMIENTAS PARA LA SELECCIÓN DE TÉCNICAS

Debido al gran número de posibles contaminantes que se pueden presentar en el suelo y a la multitud de tecnologías de remediación disponibles, ha sido necesario desarrollar metodologías para ayudar en el proceso de toma de decisiones (Lopes y col., 2010). Principalmente se toman en consideración las siguientes metodologías:

- Sistemas de apoyo de decisiones basados en matrices: son los más simples de todos y permiten al usuario limitar a unos pocos, de entre todos los existentes, los criterios de selección, para así estudiarlos con más detalle. Un ejemplo de este sistema es la herramienta TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Idea Solutions) (Dagdeviren y col., 2009).
- Inteligencia artificial: esta herramienta de selección la componen grupos de expertos en la materia, a través de la difusión de

conocimientos. En este sentido, se puede encontrar la información a través de libros, artículos científicos o páginas web. Un ejemplo de este tipo de herramienta de selección lo encontramos en la página web de la EPA ([www.epa.gov](http://www.epa.gov)) y en la Federal Remediation Technologies Roundtable ([www.frtr.gov](http://www.frtr.gov)).

- Sistemas de análisis multicriterio: estos sistemas son los más complejos y permiten al usuario ir seleccionando uno a uno los criterios de selección y las características del suelo contaminado. A través de complejas ecuaciones, el programa ofrece una solución sobre cuál es la técnica adecuada en función de los parámetros seleccionados. Un buen ejemplo de esta herramienta es el programa informático DARTS (Decision Aid for Remediation Technology Selection) (Khelifi y col., 2004).
- Sistemas de soporte de decisiones basados en Sistemas de Información Geográfica (GIS) como el software DESYRE, desarrollado para la remediación de grandes zonas contaminadas o áreas afectadas que se caracterizan por múltiples propietarios de los sitios y múltiples partes interesadas (Carlson y col., 2007).

Hoy en día, hay un gran interés por el desarrollo de herramientas para la selección de la técnica de descontaminación más adecuada para un determinado suelo.

## 7. CONCLUSIONES

La remediación de suelos contaminados es una labor compleja que requiere de laboriosos estudios y complicadas decisiones que determinan cuál es la mejor actuación posible a desarrollar en cada caso de descontaminación.

Este largo proceso pasa por conocer las características del emplazamiento, las características de la contaminación, cómo pueden afectar las condiciones del suelo a los contaminantes presentes, las técnicas de remediación disponibles, sus características y limitaciones, la normativa vigente, las herramientas de ayuda en el proceso de toma de decisión, etc.

Una vez se conoce toda la información anterior, se lleva a cabo la actuación más conveniente sobre el suelo contaminado, pudiendo desarrollar la descontaminación del suelo, una contención o confinamiento de los contaminantes, el traslado del suelo contaminado a vertedero o en algunos casos la no actuación sobre el suelo.

Hoy en día, existen distintas herramientas que ayudan a la selección de la técnica más adecuada teniendo en cuenta los criterios base de selección que se han comentado en este manuscrito.

Indicar que es mucha la información disponible en relación al tema tratado, lo cual hace más complicado el análisis y resumen de dicha información. Este trabajo tenía como objetivo la recopilación y síntesis de los criterios base para la selección del método de recuperación de un suelo contaminado.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Alamgir, M. (2016). The effects of soil properties to the extent of soil contamination with metals. En: *Environmental Remediation Technologies for Metal-Contaminated Soils* (pp. 1-19). Springer Japan.

Asante-Duah, K. (1995). *Management of contaminated site problems*. CRC Press.

Asante-Duah, D. K. (1997). *Managing contaminated sites*. Wiley and Sons, Inc., New York.

Caliman, F.A., Robu, B.M., Smaranda, C., Pavel, V.L., Gavrilescu, M. (2011). Soil and groundwater cleanup: benefits and limits of emerging technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(2), 241-268.

Carlón, C., Critto, A., Ramieri, E., Marcomini, A. (2007). DESYRE: Decision support system for the rehabilitation of contaminated megasites. *Integrated environmental assessment and management*, 3(2), 211-222.

*CLU-IN | Technologies > Remediation*. *Clu-in.org*. Retrieved 10 July 2016, from <http://clu-in.org/remediation/>

Colombano, S., Saada, A., Guerin, V., Bataillard, P., Bellenfant, G., Beranger, S., Hube, D., Blanc, C., Zornig, C., Girardeau, I. (2010). *Quelles techniques pour quels traitements—Analyse coûts-bénéfices*. Rapport final BRGM-RP-58609-FR.

Critto, A., Cantarella, L., Carlón, C., Giove, S., Petruzzelli, G., Marcomini, A. (2006). Decision support-oriented selection of remediation technologies to rehabilitate contaminated sites. *Integrated environmental assessment and management*, 2(3), 273-285

Dağdeviren, M., Yavuz, S., Kılınç, N. (2009). Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8143-8151.

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.

Del Río R., Pérez, M. Gestión ambiental del desmantelamiento de la antigua cabecera de ENSIDESA (Avilés, Principado de Asturias). I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. 2002. Madrid.

Dixit, A., Mishra, R., Nigam, M. (2016a). A Study on Different Human Health Risk Assessment Tools for Contaminated Soil. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 3(6), 14-19.

Dixit, A., Nigam, M., Mishra, R. (2016b). A development of a Decision Support System for Remediation Option Selection for Contaminated Sites. *Advanced Engineering and Applied Sciences: An International Journal*, 6(1), 34-45.

Federal Remediation Technology Roundtable.

[https://frtr.gov/matrix2/top\\_page.html](https://frtr.gov/matrix2/top_page.html)

Galán E. (2003). Contaminación de suelos a partir de residuos peligrosos En: Contaminación de suelos por compuestos orgánicos. Informe final. Consejería del medio ambiente de la junta de Andalucía España. [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques\\_Tematicos/Estado\\_Y\\_Calidad\\_De\\_Los\\_Recursos\\_Naturales/Suelo/Contaminacion\\_pdf/Contaminacion.pdf](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Estado_Y_Calidad_De_Los_Recursos_Naturales/Suelo/Contaminacion_pdf/Contaminacion.pdf)

Gavrilescu, M. (2009). Emerging processes for soil and groundwater cleanup-potential benefits and risks. *Environmental Engineering and Management Journal*, 8(5), 1293-1307.

Grasso, D., M.A. Butkus, O'Sullivan, D., Nikolaidis, N.P. (1997). Soil Washing Design Methodology for a Lead-Contaminated Sandy-Soil. *Water Research*, 31(12), 3045-3056.

Hamberg, R. (2009). In situ and on-site soil remediation techniques— a review. Luleå University of Technology.

Hamby, D.M. (1996). Site remediation techniques supporting environmental restoration activities—a review. *Science of the Total Environment*, 191(3), 203-224.

IHOBE. Guía Técnica De Identificación De Medidas Preventivas Contra La Contaminación Del Suelo. 2008.

Khan, F. I., Husain, T., Hejazi, R. (2004). An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of environmental management*, 71(2), 95-122.

Khelifi, O., Zinovyev, S., Lodolo, A., Vranes, S., Miertus, S. (2004). Decision support tools for evaluation and selection of technologies for soil remediation and disposal of halogenated waste. *Organohalogen Compounds*, 66, 1226-1232.

Kuppusamy, S., Palanisami, T., Megharaj, M., Venkateswarlu, K., Naidu, R. (2016). In-situ remediation approaches for the management of contaminated sites: a comprehensive overview. In *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 236* (pp. 1-115). Springer International Publishing.

Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado nº181. Referencia: BOE-A-2011-13046.

Lopes, D., Kamalakaran, M., Johnston, C., Costain, C., Galindo, A., Lee, B., Easa, S.M., Joksimovic, D. Development of Screening Model for Evaluating Soil Remediation Technologies. 11<sup>th</sup> International Environmental Specialty Conference. Winnipeg, Manitoba. Junio 9-12, 2010.

Miliarium Aureum, S.L. (2001-2004). Madrid, España. Retrieved 4 August 2016 from: [www.miliarium.com](http://www.miliarium.com)

Mirsal, I. (2008). Sources of Soil Pollution. En: *Soil pollution: origin, monitoring & remediation*. Springer Science & Business Media.

Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y., Montanarella, L. (2013). Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network. *Journal of environmental and public health*. pp. 11.

Pavel, L.V., Gavrilescu, M. (2008). Overview of ex situ decontamination techniques for soil cleanup. *Environmental engineering and management journal*, 7(6), 815-834.

Petruzzelli, G., Pedron, F., Grifoni, M., Barbafieri, M., Rosellini, I., Pezzarossa, B. (2016). Soil Remediation Technologies towards Green Remediation Strategies. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 10(6), 571-575.

Ram, N. M., Bass, D. H., Falotico, R., Leahy, M. (1993). A decision framework for selecting remediation technologies at hydrocarbon-contaminated sites. *Soil and Sediment Contamination*, 2(2), 167-189.

Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados. Boletín Oficial del Estado nº15, 1833-1843.

Reinikainen, J., & Sorvari, J. (2016). Promoting justified risk-based decisions in contaminated land management. *Science of The Total Environment*, 563, 783-795.

*Remediation Technologies for Cleaning up Contaminated Sites | Technologies for Cleaning Up Contaminated Sites | US EPA. Epa.gov.* Retrieved 10 July 2016, from <https://www.epa.gov/remedytech/remediation-technologies-cleaning-contaminated-sites>

Resolución de 28 de abril de 1995, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda, por la que se dispone la publicación del acuerdo del Consejo de Ministros de 17 de febrero de 1995, por el que se aprueba el Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados. Boletín Oficial del Estado nº 114. Referencia: BOE-A-1995-11463.

Sheoran, V., Sheoran, A.S., Poonia, P. (2016). Factors affecting phytoextraction: A review. *Pedosphere*, 26(2), 148-166.

Suthersan, S.S. (1996). *Remediation engineering: design concepts*. CRC Press.

*US Environmental Protection Agency. Epa.gov.* Retrieved 10 July 2016, from <http://www.epa.gov>

USEPA. (2004). *Treatment technologies for site clean-up: annual status report*. United States Environmental Protection Agency, EPA-542-R-03-009, Cincinnati, Ohio. pp. 50.

Van Deuren, J., Lloyd, T., Chhetry, S., Liou, R., Peck, J. (2002). *Remediation technologies screening matrix and reference guide—version 4.0*.

Van Liedekerke, M., Prokop, G., Rabl-Berger, S., Kibblewhite, M., Louwagie, G. (2014). *Progress in the management of contaminated sites in Europe. Reference Report by the Joint Research Centre of the European Commission*.

Vázquez, M. V., Hernández-Luis, F., Lemus, M., Arbelo, C. D. (2004). Integral analysis of the process of electro-remediation of Andisols polluted by heavy metals. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 22(4), 387-398.

Watts, R. J. (1998). *Hazardous wastes: sources, pathways, receptors*. Wiley and Sons, Inc., New York.