

LIFE BIOREST

Guía medioambiental para la biorremediación de suelos contaminados

ESTRATEGIAS PARA RECUPERAR TERRENOS LIMPIOS EN LA COMUNIDAD



Guía medioambiental para la biorremediación de suelos contaminados

*Estrategias para recuperar
terrenos limpios en la comunidad*

Notas de la versión

Esta publicación ha sido producida por el Consorzio Italbiotec (www.italbiotec.it) en el marco del proyecto europeo LIFE BIOREST - Biorremediación y Revegetación para restaurar el uso público de suelos contaminados (www.lifebiorest.com), de la que es líder en colaboración con Actygea Srl, Agenzia regionale dell'Emilia-Romagna per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia - ARPAE, Università degli Studi di Torino, Università Cattolica del Sacro Cuore, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España) y SATT-SAYENS (Francia).

Se permite la reutilización del presente documento siempre y cuando se cite la fuente y el contenido sea acorde al mensaje original.

@ Consorzio Italbiotec, 2020

ISBN: 978-88-907628-6-4

Diseño: UNDERGROUND way Srl

Impresión: Graphidea Srl

PDF: Guía medioambiental para la biorremediación de suelos contaminados

ÍNDICE

Glosario	4
Acrónimos	5
Resumen ejecutivo	6
1. Introducción	7
1.1 Ámbito de aplicación de la presente guía	8
1.2 Marco legislativo europeo sobre la contaminación del suelo	8
1.3 Derecho ambiental para la contaminación del suelo en Italia	11
1.4 Derecho ambiental para la contaminación del suelo en España	12
1.5 Derecho ambiental para la contaminación del suelo en Francia	13
2. Cartografía de los lugares contaminados en las zonas de ensayo de la UE del proyecto LIFE BIOREST	14
3. Técnicas de biorremediación	18
3.1 In situ	18
3.2 Ex situ	19
4. La biorremediación del suelo en tres pasos: el método LIFE BIOREST	20
4.1 Optimización de la biorremediación de suelos	20
4.2 Producción industrial de biomasa	22
4.3 Biorremediación y revegetación in situ	23
5. Recomendaciones de biorremediación	24
Referencias	26

Glosario

Aeróbico	Ambiente que tiene una presión parcial de oxígeno similar a las condiciones atmosféricas normales.
Anaeróbico	Ambiente libre de oxígeno.
Agente tensoactivo	Pueden añadirse agentes tensoactivos para alterar las propiedades de las interfaces de la solución para permitir el acceso de los hidrocarburos a los microorganismos. Esto se denomina «biorremediación asistida con tensoactivos» o «biorremediación con tensoactivos».
Biodegradación	Descomposición de sustancias orgánicas por microorganismos.
Bioemulsionante	Moléculas capaces de emulsionar eficientemente dos líquidos inmiscibles como hidrocarburos u otros sustratos hidrofóbicos incluso en bajas concentraciones, pero que son menos efectivas en la reducción de la tensión superficial.
Biopila	Montón de suelos contaminados que se utiliza para reducir la concentración de contaminantes p. constituyentes del petróleo en los suelos excavados a través de la biodegradación.
Biorreactor	Cualquier dispositivo o sistema fabricado que soporte un entorno biológicamente activo. Un biorreactor es un recipiente en el que se lleva a cabo un proceso químico en el que intervienen microorganismos o sustancias bioquímicamente activas derivadas de dichos organismos. Este proceso puede ser aeróbico o anaeróbico.
Biorremediación	Proceso utilizado para tratar matrices contaminados, incluyendo agua, suelo y material subterráneo, que altera las condiciones ambientales para estimular el crecimiento de microorganismos que degradan o transforman los contaminantes orgánicos objetivo.
Bioslurping	Combinación de elementos de bioventing y bombeo al vacío para la recuperación de productos libres del agua subterránea y del suelo, y para la biorremediación de suelos.
Biosparging	Tecnología de remediación in situ que utiliza microorganismos autóctonos para biodegradar constituyentes orgánicos en la zona saturada. Se inyecta aire (u oxígeno) y nutrientes (si es necesario) en la zona saturada para aumentar la actividad biológica de los microorganismos autóctonos.
Bioestimulación	Proceso que implica la modificación del entorno para estimular las bacterias existentes que permiten la biorremediación. Un ejemplo de este proceso es la adición de nutrientes, oxígeno u otros donantes y aceptantes de electrones.
Bioventing	Proceso en el que se estimula la biodegradación natural in situ de contaminantes en el suelo mediante el suministro de aire u oxígeno a los microorganismos del suelo existentes. En este proceso se utilizan bajos caudales de aire para estimular la biodegradación y minimizar la volatilización.
Ex situ	Fuera de la posición original (es decir, excavado).
Fitorremediación	Tratamiento de contaminantes o desechos (por ejemplo, en suelos contaminados o en aguas freáticas) a través de la utilización de plantas verdes que eliminan, degradan o estabilizan las sustancias indeseables, como metales tóxicos y otros contaminantes.
Hileras	Técnica específica de remediación ex situ basada en el volteo periódico de suelos contaminados apilados para aumentar la biorremediación mediante el aumento de la actividad de degradación de los microorganismos.
Hongos	Grupo de organismos unicelulares y multicelulares eucariotas diversos y extendidos. Muchas especies son bien conocidas por su capacidad para degradar diferentes tipos de contaminantes aromáticos y elifáticos.
In situ	En el lugar sin excavación.
Landfarming	Proceso de tratamiento de residuos ex-situ que se realiza en la zona superior del suelo o en celdas de biotratamiento. Los suelos, sedimentos o lodos contaminados se transportan al sitio de landfarming, incorporados a la superficie del suelo y volteados periódicamente (labrados) para airear la mezcla.
Micorremediación	Proceso de utilización de hongos para degradar o aislar contaminantes del entorno. Mediante la estimulación de la actividad microbiana y enzimática, el micelio reduce las toxinas in situ.

Acrónimos

BTEX	Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno
CHC	Hidrocarburos clorados
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
DRM	Directiva sobre responsabilidad medioambiental
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
ICPE	Instalación Classée pour la protection de l'environnement (Instalación Clasificada Protección del Medio ambiente)
IPPC	Directiva de Prevención y Control Integrado de la Contaminación
GTIS	Grupo Técnico Intergubernamental de Suelos
MEDDE	Ministerio de Ecología, Desarrollo Sostenible y Energía
ORC	Compuesto liberador de oxígeno
HAP	Hidrocarburo aromático policíclico
PCB	Bifenilos policlorados
DDPC	Dibenzo-p-dioxinas policloradas
DFPC	Dibenzofuranos policlorados
PERC	Percloroetileno o tetracloroetileno
PFOS	Sulfonato de perfluorooctano
COP	Contaminante orgánico persistente
SIN	Sitio de Interés Nacional
STS	Estrategia temática para la protección del suelo
COSV	Compuesto orgánico semivolátil
TCE	Tricloroetileno
COV	Compuesto orgánico volátil

Resumen ejecutivo

La adopción de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) por los 193 países miembros de la ONU en 2015, contribuyó a la definición de soluciones integradas para hacer frente a los principales desafíos globales para proteger el planeta y asegurar un futuro sostenible. La degradación del suelo representa uno de los principales retos que se reconocen tanto a nivel europeo como mundial, y muchos de los ODS hacen referencia a la conservación y protección de la tierra y el suelo. Dado que el suelo se considera un recurso no renovable, su mantenimiento sanitario es esencial para promover las funciones básicas de suministro de nutrientes esenciales, agua, oxígeno y el crecimiento de las plantas. A pesar de su extremada importancia, el uso y la gestión inadecuados del suelo, debido principalmente a las actividades antropogénicas, ha generado altos niveles de contaminación que pueden conllevar graves consecuencias. La gestión insostenible del suelo llevó a que la Comisión Europea adoptase en 2006 la Estrategia temática para la protección del suelo¹ (22 de septiembre de 2006) para proteger los suelos de la UE. En 2014, la Comisión decidió retirar la propuesta de Directiva Marco sobre el suelo pero, con el Séptimo Programa de Acción en materia de Medio Ambiente (7º PMA) de enero de 2014, se reconoció la degradación del suelo como un problema grave.

Como ha informado el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, en el inventario se han registrado 650 000 sitios contaminados en los 28 Estados miembros en los que se han realizado o en los que se están llevando a cabo tratamientos de regeneración. En la actualidad, 65 500 emplazamientos han sido objeto de medidas correctivas. Los principales contaminantes presentes en el suelo son los metales pesados, los aceites minerales, los compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos aromáticos policíclicos. A pesar de estas iniciativas de alto nivel, las políticas dirigidas a la prevención de la degradación de la tierra y del suelo siguen estando fragmentadas y se basan en políticas sectoriales.

Esta guía tiene como objetivo presentar a las autoridades locales las recomendaciones que se han recopilado y elaborado, así como los resultados obtenidos a través del proyecto LIFE BIOREST.

6

El proyecto LIFE BIOREST ha sido concebido para demostrar la eficiencia y rentabilidad de una solución innovadora y sostenible para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos, a partir del uso de cepas bacterianas y fúngicas con un alto potencial degradante, mediante la valorización de subproductos de la industria agroalimentaria. El objetivo final del proyecto es la restauración de las funciones ecológicas del suelo, la prevención de la pérdida de fertilidad, biodiversidad y resiliencia, así como la recuperación de nuevas zonas verdes para la comunidad.

Este documento se ha elaborado para proporcionar un modelo de aplicación de una técnica de biorremediación en aquellos municipios afectados por sitios contaminados, utilizando el estudio de caso de Fidenza, donde se llevó a cabo el proyecto LIFE BIOREST.

La asociación puede contar con la experiencia del Consorcio Italtotec, que actúa como coordinador del proyecto, Actygea Srl, Agenzia regionale dell'Emilia-Romagna per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia - ARPAE, Università degli Studi di Torino, Università Cattolica del Sacro Cuore, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España) y SATT- SAYENS (Francia).

Durante el proyecto LIFE BIOREST, las actividades de divulgación a nivel europeo desempeñaron un papel de gran importancia, para apoyar la Estrategia temática para la protección del suelo y demostrar las ventajas del enfoque biológico a los legisladores, las autoridades públicas, las industrias y la comunidad.

Por este motivo, LIFE BIOREST propone un modelo de aplicación del tratamiento de biorremediación en los sitios contaminados, que presenta un gran potencial de difusión por toda Europa.

¹ Estrategia temática para la protección del suelo (COM(2012) 46) - 2006: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52012DC0046>

1. Introducción

Como han informado la FAO y el GTIS, la contaminación del suelo es la condición en la que puede observarse la presencia de un producto químico o sustancia fuera de lugar y/o presente en una concentración superior a la normal con efectos adversos en cualquier organismo no objetivo.² Como a menudo no puede percibirse visualmente ni evaluarse directamente, la contaminación del suelo se considera un «peligro oculto» que conlleva serias consecuencias.

Altera el metabolismo de las plantas, lo que repercute en la seguridad alimentaria y reduce el rendimiento de los cultivos, además de hacerlos inseguros para el consumo. Las principales fuentes de contaminación del suelo son de origen antropogénico, lo que resulta en la acumulación de contaminantes en suelos que pueden alcanzar niveles preocupantes (Cachada, Rocha-Santos y Duarte, 2018). Los suelos contaminados con elementos peligrosos, como metales pesados y productos químicos orgánicos como los PCB (bifenilos policlorados), los HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) o los productos farmacéuticos, pueden causar graves riesgos para la salud humana. La diversidad de contaminantes está sujeta a una constante evolución debido a los desarrollos agroquímicos e industriales, y la transformación de los compuestos orgánicos del suelo en metabolitos secundarios a través de la actividad biológica hace que la identificación de los contaminantes sea difícil y costosa. Además, las propiedades físicas del suelo como la estructura, textura, disposición de partículas, porosidad, etc. también afectan a la movilidad, biodisponibilidad y al tiempo de permanencia de los contaminantes en el suelo.

Tal y como ha informado el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (Van Liedekerke et al., 2014), alrededor del 39 % y 29 % de los contaminantes de los suelos europeos están representados por los metales pesados y aceites minerales, respectivamente (Fig. 1), como consecuencia del transporte, almacenamiento y refinado de petróleo o de accidentes (Gallego et al., 2001). El benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX) representan una categoría de compuestos orgánicos volátiles (COV) que se encuentra en productos derivados del petróleo, como la gasolina, y representan el 11 % de los contaminantes del suelo. Los BTEX tienen una gran movilidad porque son solubles en agua y volátiles. Los hidrocarburos clorados (CHC) se utilizan principalmente para la fabricación de disolventes sintéticos e insecticidas. Al ser también bioacumulables, se pueden encontrar en tejidos humanos. Estos representan el 9 % de los contaminantes del suelo. La principal fuente de contaminación por cianuro se encuentra en los antiguos lugares en los que se trabajaba con gas. Sin embargo, la contaminación por cianuro también está asociada con la industria de la galvanoplastia, las instalaciones de almacenamiento de sal en las carreteras y las minas de oro (Kjeldsen, 1999) y, junto con los contaminantes fenólicos relacionados con la industria del esquisto bituminoso, representan el 2 % de los contaminantes del suelo. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), que representan el 12 % de los contaminantes del suelo, son contaminantes ambientales omnipresentes generados principalmente durante la combustión incompleta de materiales orgánicos (por ejemplo, carbón, petróleo, gasolina y madera). Los HAP se acumulan en los suelos debido a su persistencia e hidrofobia y tienden a quedar retenidos en él durante largos períodos. Por esta razón, la mayoría de los HAP son componentes de los contaminantes orgánicos persistentes (COP) y están muy extendidos en el aire, el agua, los suelos y los sedimentos (Lin et al., 2013). Aunque predominan las emisiones de HAP procedentes de actividades antropogénicas, en el medio ambiente algunos de ellos proceden de fuentes naturales como la quema a cielo abierto, las pérdidas naturales o la filtración de depósitos de petróleo o carbón, y las actividades volcánicas. Las fuentes antropogénicas primarias de HAP incluyen la calefacción residencial, las plantas de gasificación y licuefacción de carbón, el negro de carbón, la producción de asfalto, las actividades relacionadas en la industria del petróleo y los gases de escape de los vehículos de motor. Las emisiones del tráfico y la combustión de combustibles fósiles son las principales fuentes identificadas de HAP en las zonas urbanas (Fabińska et al., 2016; Keyte et al., 2013). Fabińska et al., 2016; Keyte et al., 2013).

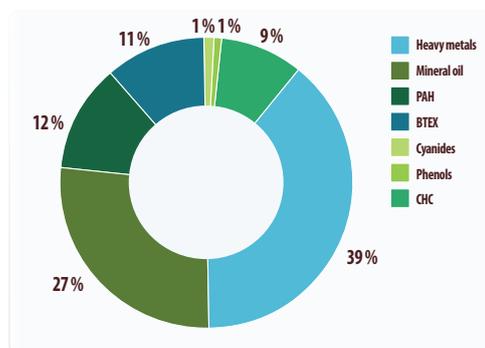


Figura 1 Panorama general de los contaminantes que afectan a los suelos europeos

² Status of the World's Soil Resources (SWRS) - Informe principal. FAO & GTIS, 2015. <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>

1.1 Ámbito de aplicación de la presente guía

Las economías industrializadas y los países en desarrollo se ven afectados por la contaminación del suelo originada por las actividades de extracción e industriales, la eliminación inadecuada de residuos y la agricultura mecanizada, que podría tener repercusiones en la productividad de los cultivos y la salud humana. Dado que la contaminación del suelo representa una cuestión importante y, a veces, subestimada, la presente guía tiene por objeto presentar a las autoridades locales las recomendaciones recogidas y elaboradas, así como los resultados obtenidos a través del proyecto LIFE BIOREST. El proyecto ha sido concebido para demostrar la eficiencia y rentabilidad de una solución innovadora y sostenible para la biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos, basada en el uso de cepas bacterianas y fúngicas de alto potencial degradante, mediante la valorización de subproductos de la industria agroalimentaria.

La información contenida en este documento no pretende proporcionar una orientación detallada sobre el diseño de un programa de tratamiento de biorremediación, sino que pretende proporcionar un modelo de aplicación de una técnica de biorremediación en aquellos municipios afectados por emplazamientos contaminados, utilizando el estudio de caso del sitio de Fidenza, donde se llevó a cabo el proyecto LIFE BIOREST.

Además, la guía tiene por objeto apoyar la colaboración público-privada y mostrar las ventajas e inconvenientes de la técnica implantada que puede presentarse a las industrias, los organismos públicos, los gobernadores y la comunidad.

Se ha analizado el marco legislativo europeo en materia de contaminación del suelo con el fin de comparar la adaptación legislativa de los tres países en los que se ha implantado LIFE BIOREST (Italia, España y Francia) a las directivas europeas.

Tal y como se analiza más detalladamente en el documento, en estos tres países de la UE, la contaminación por hidrocarburos es la emergencia más común en lo que se refiere a la contaminación y la necesidad de remediación.

La probabilidad de que estos contaminantes sean degradados por microorganismos y plantas es mayor en comparación con los oligoelementos. Por esta razón, LIFE BIOREST podría representar un modelo de aplicación del tratamiento de biorremediación en los sitios contaminados, con un gran potencial de difusión por toda Europa.

1.2 Marco legislativo europeo sobre la contaminación del suelo

8

En la Unión Europea (UE) no se han acordado requisitos legales para la protección general del suelo, y, en la actualidad, sólo unos pocos Estados miembros de la UE poseen legislación específica sobre la protección del suelo.

Por lo tanto, el suelo no está sujeto a un conjunto completo y coherente de normas en la UE. Las políticas actuales de la UE en ámbitos como la agricultura, el agua, los residuos, los productos químicos y la prevención de la contaminación industrial contribuyen indirectamente a la protección del suelo, pero no son suficientes para garantizar un nivel adecuado de protección de todos los suelos de Europa. Dado que el suelo se utiliza continuamente de forma insostenible, la Comisión Europea adoptó en 2006 la denominada Estrategia temática para la protección del suelo³ (22 de septiembre de 2006) para proteger todos los suelos de la UE. En 2014, la Comisión decidió retirar la propuesta de Directiva Marco sobre el suelo pero, con el Séptimo Programa de Acción en materia de Medio Ambiente⁴ de enero de 2014, se reconoció la degradación del suelo como un problema grave. En él se indica que, de aquí a 2020, las tierras tendrían que gestionarse de forma sostenible en todos los Estados miembros de la UE, el suelo estar protegido adecuadamente y la remediación de los sitios contaminados tendría haberse desarrollado correctamente. Diferentes directivas europeas proporcionan controles indirectos sobre la contaminación del suelo y asesoramiento para su gestión, como la Directiva relativa a la prevención y control integrados de la contaminación (IPPC 2008/1/CE), la Directiva sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas (2008/98/CE) y la Directiva relativa al vertido de residuos (99/31/CE)). Además, la Directiva sobre las emisiones industriales (DEI 2010/75/UE), que derogó la Directiva IPPC en 2014, establece un marco regulador para evitar las emisiones al suelo de las grandes instalaciones industriales.

La tabla que figura a continuación presenta una visión general de los objetivos existentes a nivel nacional. Estos incluyen una variedad de formas, como la inclusión de plazos para remediar la contaminación histórica, medidas de gestión específicas o listas de emplazamientos prioritarios nacionales. En total, 17 países publican informes con objetivos políticos oficiales para la gestión de sitios contaminados.

³ Estrategia temática para la protección del suelo (COM(2012) 46) - 2006: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52012DC0046>

⁴ 7º PMA - 2013: <https://ec.europa.eu/environment/action-programme/>

Tabla 1. Panorama general de las políticas nacionales y las directivas de la UE que abordan específicamente la contaminación del suelo (Fuente: Status of local soil contamination in Europe - Informe técnico del CCI, 2018).

1986	Directiva sobre la utilización de lodos de depuradora en agricultura ⁵ Regulación del uso de los lodos de depuradora en la agricultura para evitar efectos nocivos en el suelo y establecimiento de valores límite de metales pesados en los suelos.
1987	Países Bajos - Ley de protección del suelo (Wet bodembescherming)
1988	
1989	Austria - Ley de restauración de sitios contaminados (Altlastensanierungsgesetz)
1990	
1991	Directiva de nitratos ⁶ Protección de las aguas superficiales y subterráneas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura.
1992	Directiva Hábitats ⁷ Conseguir un estado de conservación favorable en toda la zona de distribución natural de la UE y reducir la contaminación de los hábitats, disminuyendo así la contaminación del suelo.
1993	
1994	Finlandia - Ley de Residuos (Waste Act) Estonia - Gestión de sitios contaminados
1995	Bélgica (Flandes) - Decreto sobre recuperación y protección del suelo (Decreet betreffende bodembeheer en bodemsanering) Suiza - Ley de Protección del Medio Ambiente (Environmental Protection Act, EPA) Hungría - La Decisión nº 2205/1996 (VII.24) adoptó el programa nacional de remediación medioambiental (antes de formar parte de la UE)
1996	Eslovenia - Decreto sobre valores límite, umbrales de alerta y niveles críticos de sustancias peligrosas en el suelo (Decree on limit values, alert thresholds and critical levels of dangerous substances into the soil)
1997	
1998	Alemania - Ley federal de protección del suelo (Bodenschutzgesetz)
1999	Directiva relativa al vertido de residuos ⁸ Prevención/reducción de los efectos negativos del vertido de residuos sobre el medio ambiente durante todo el ciclo de vida del vertedero. Dinamarca - Ley sobre la contaminación del suelo (Act on soil contamination) Italia - Reglamento por el que se establecen los criterios, procedimientos y métodos para la seguridad, la regeneración y la restauración de los sitios contaminados (Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati) Luxemburgo - Ley sobre establecimientos clasificados (loi relative aux établissements classés)
2000	Directiva Marco del Agua ⁹ Prevención y reducción de la contaminación; se enumeran los principales contaminantes y se establecen umbrales. Francia - Código del medio ambiente (code de l'environnement) Reino Unido - Régimen de tierras contaminadas (Parte 2A de la Ley de protección del medio ambiente de 1990) (Contaminated-land Regime (Part 2A of environmental protection act, 1990)) Finlandia - Ley de protección del medio ambiente (Environmental Protection Act)

⁵ Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura <https://eurlex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:31986L0278>

⁶ Directiva 91/676/CEE del Consejo relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex:%3A31991L0676>

⁷ Directiva 92/43/CEE del Consejo relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres: <https://eurlex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:31992L0043>

⁸ Directiva 1999/31/CE del Consejo relativa al vertido de residuos: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>

⁹ Directiva 2000/60/CE por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas: <https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32017R0852>

2001	Directiva de Evaluación Ambiental Estratégica ¹⁰ Reducción de los impactos ambientales de los planes y programas en el medio ambiente, incluidos los suelos. Letonia - Ley sobre contaminación (Law on pollution)
2002 2003	Chipre - Ley de control de la contaminación del agua y del suelo (Water and soil-pollution control Law)
2004	Directiva sobre responsabilidad medioambiental (DRM) ¹¹ Establecimiento de un marco basado en el principio de «quien contamina paga» con el fin de prevenir y remediar los daños ambientales al suelo, los ecosistemas y los recursos hídricos, si se ve afectada la salud humana. Bélgica (Bruselas-Capital) - Ordenanza sobre la gestión y la limpieza de los suelos (Ordonnance relative à la gestion et à l'assainissement des sols pollués) Bélgica (Valonia) - Decreto sobre la gestión de los suelos (Arrêté relatif à la gestion et l'assainissement des sols) Eslovaquia - Ley de protección del suelo (Soil-protection Act) Suecia - Reglamento relativo a la indemnización por daños causados por la contaminación y a las ayudas estatales de reparación (Regulation on compensation for contamination damage and state aid for remedial) (aplicación del Código medioambiental sueco de 1999)
2005	Hungría - Decreto sobre las leyes relativas a las inspecciones de detección de las investigaciones de los lugares de reparación (Decree on rules concerning the screening surveys of remedial site investigation) España - Real Decreto por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados
2006	Estrategia temática para la protección del suelo ¹² Protección de los suelos mediante la prevención de la degradación del suelo y la restauración de los suelos degradados, incluidos los contaminados. Gestión de los residuos de las industrias de extracción ¹³ Introducción de medidas para prevenir o reducir cualquier efecto nocivo que la gestión de los residuos de las industrias de extracción puedan tener para el medio ambiente y la salud. Irlanda - Ley de Energía (Energy Act). Sitios históricos de minas - inventario y clasificación de riesgos Italia - Código del Medio Ambiente (Codice dell'ambiente) Lituania - Reglamentación de los procedimientos de tratamiento de los lugares contaminados (Regulations on contaminated-sites treatment procedures)
2007	Bulgaria - Ley del suelo (Soil Act) Finlandia - Decreto del Gobierno sobre la evaluación de la contaminación del suelo y las necesidades de remediación (Government Decree on the assessment of soil contamination and remediation needs) Rumanía - Decreto sobre la remediación (Decree on remediation) Eslovaquia - Ley de prevención y reparación de daños medioambientales (Act on the prevention and remedying of environmental damage)
2008	Directiva marco sobre residuos Provisión de las bases para la remediación de emplazamientos históricos contaminados mediante la eliminación de residuos. ¹⁴ República Checa - Ley relativa a la prevención y corrección de los daños ambientales (Act concerning the prevention of environmental harm and its rectification)

¹⁰ Directiva 2001/42/CE relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX:32001L0042>

¹¹ Directiva 2004/35/CE sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM:l28120>

¹² Estrategia temática para la protección del suelo [SEC(2006)620][SEC(2006)1165]: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/?uri=celex%3A52006DC0231>

¹³ <https://ec.europa.eu/environment/waste/mining/index.htm>

¹⁴ Directiva 2008/98/CE relativa a los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas: <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/ES/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>

2009	<p>Directiva marco para el uso sostenible de los plaguicidas¹⁵ Prevención de la contaminación del medio ambiente por pesticidas. Bélgica (Bruselas-Capital) - Decreto sobre recuperación y gestión del suelo de 5 de marzo de 2009 modificado el decreto de 23 de junio de 2017 (Ordonnance du 23 juin 2017 modifiant certaines dispositions de l'ordonnance du 5 mars 2009 relative à la gestion et à l'assainissement des sols pollués)</p>
2010	<p>Directiva sobre Emisiones Industriales¹⁶ Prevención, reducción y eliminación (siempre que sea posible) de la contaminación derivada de las actividades industriales. Los Estados miembros se han comprometido a inventariar las emisiones de dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y polvo y a elaborar un informe de referencia para determinar el estado de la contaminación del suelo y de las aguas freáticas. Serbia - Reglamento sobre el programa de seguimiento sistemático de la calidad del suelo, indicadores para la evaluación de la degradación del suelo y metodología para la preparación del programa de remediación</p>
2011	<p>Directiva de evaluación de impacto ambiental¹⁷ Evaluación de los efectos medioambientales de los proyectos públicos y privados que puedan tener efectos significativos en el medio ambiente. Estrategia de biodiversidad¹⁸ Reducción de la pérdida de biodiversidad y de servicios ecosistémicos en la UE, así como contribución a detener el declive de la biodiversidad mundial de aquí a 2020, a través de la promoción de suelos sanos. España - Ley de residuos y suelos contaminados</p>
2012	Malta - Política Nacional de Medio Ambiente (National Environment Policy)
2013	
2014	Croacia - Ordenanza sobre la protección de las tierras agrícolas contra la contaminación (Ordinance on the protection of agricultural land against pollution)
2015	Serbia - Ley de protección del suelo (Law in soil protection)
2016	<p>Regulación sobre el mercurio¹⁹ Identificación y evaluación de sitios contaminados con mercurio, incluyendo un inventario de sitios contaminados e inclusión de una lista de los principales compuestos de mercurio. Grecia - Ley para la protección y el uso sostenible del suelo (en preparación) Polonia - Evaluación de la contaminación de la superficie del suelo (en preparación)</p>
2017	<p>Portugal - Régimen jurídico de prevención de la contaminación y recuperación del suelo (en preparación) Eslovenia - Decreto sobre el estado del suelo y normas sobre el estado del suelo (en preparación)</p>

1.3 Derecho ambiental para la contaminación del suelo en Italia

En Italia, la contaminación del suelo representa un problema generalizado debido a las zonas industriales, los vertederos y las zonas comerciales y de extracción. A pesar de que la literatura científica evidencie la gravedad de la incidencia y de los daños en la salud (Brevik, 2013; Burgess, 2013; Jordão et al., 2006), parece que la opinión pública no percibe el problema de la contaminación del suelo de la misma manera que la contaminación del aire y del agua, aunque se relacione indirectamente con ellos. El informe de la FAO confirma la menor percepción de emergencia ambiental por parte de la opinión pública (Rodríguez-Eugenio et al. 2018), y define la contaminación del suelo como una «realidad oculta», cuya identificación, medición y estudio ha sido más complicada a lo largo de los años.

¹⁵ Directiva 2009/128/CE por la que se establece el marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas:
[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/627113/EPRS_STU\(2018\)627113_ES.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/627113/EPRS_STU(2018)627113_ES.pdf)

¹⁶ Directiva 2010/75/UE sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación):
<https://eurlex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>

¹⁷ Directiva 2004/35/CE sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales:
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32004L0035>

¹⁸ Comunicación de la Comisión {COM/2011/0244 final} Nuestro seguro de vida y capital natural: Estrategia de la UE sobre la biodiversidad hasta 2020
<https://ec.europa.eu/environment/nature/info/pubs/docs/brochures/2020 Biod brochure finallowres.pdf>

¹⁹ Reglamento (UE) 2017/852 sobre el mercurio y por el que se deroga el Reglamento (CE) nº 1102/2008
<https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32017R0852>

La evolución de las disposiciones legales, en materia de reducción y tratamiento de la contaminación, adolece de esta percepción diferente. El primer paso contra la contaminación ambiental está incluido en la Ley italiana 615/1966²⁰, relativa a las medidas contra la contaminación atmosférica (Provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico), que tiene por objeto regular y reducir las emisiones de humos, gases, polvo y olores de las industrias y los medios de transporte, al reconocer los daños indirectos a la salud humana. Con la introducción de la Ley italiana n° 319/1976²¹ (derogada por el Decreto Legislativo n° 152/2006²²), se definió el reglamento para la protección del agua contra la contaminación, lo que representó un punto de partida para el aumento de atención sobre las cuestiones ambientales que llevaron a la constitución de un Ministerio específico de política ambiental.

El Ministerio de Medio Ambiente, Protección del Territorio y del Mar (Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare) se creó en 1986 a raíz de la medida n° 349²³, tiene la función de velar por que la promoción, conservación y recuperación de las condiciones ambientales se ajusten a los intereses fundamentales de la comunidad y su calidad de vida, así como a la conservación y valorización del patrimonio natural nacional y a la defensa de los recursos naturales contra la contaminación (Art. 1).

La creación de este órgano rector coincide con la definición de un marco político para una vigilancia territorial constante en materia de contaminación ambiental.

Con la Ley italiana n° 22/1997²⁴ (derogada también por el Decreto Legislativo n° 152/2006) se han transpuesto las Directivas de la UE en materia de residuos, introduciendo el concepto de residuo como un recurso.

La primera ley relativa a la recuperación ambiental del suelo está representada por el Decreto Ministerial italiano n° 471/1999²⁵, que define los criterios y procedimientos para la identificación, seguridad, recuperación y restauración ambiental de los sitios contaminados.

El Decreto Legislativo n° 152/2006²⁶, relativo a la legislación ambiental, sustituyó al anterior Decreto n° 471/1999. La nueva normativa vuelve a definir los procedimientos administrativos que tienen como objetivo primordial promover un nivel de vida de calidad. Este deberá alcanzarse por medio de la protección y mejora de las condiciones ambientales y la utilización racional de los recursos naturales (Art. 2).

En virtud del Decreto Legislativo 152/2006, un sitio contaminado se define como un emplazamiento en el que se superan los valores de los umbrales de concentración de riesgo, que se determinan mediante la aplicación del procedimiento de análisis de riesgos.

Esta definición alude a todas las zonas en las que, debido a actividades humanas en curso o concluidas, se han alterado las características del suelo, subsuelo y de las aguas subterráneas, suponiendo un riesgo para la salud humana. El Decreto Legislativo 152/2006 especifica la tipología de los suelos contaminados presentes en el territorio y los procedimientos administrativos para su identificación y gestión.

1.4 Derecho ambiental para la contaminación del suelo en España

En España, la legislación principal relativa a la regulación de la contaminación del suelo están recogidas en la Ley 22/2011²⁷ de residuos y suelos contaminados, y en el Decreto 9/2005²⁸ por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

La Ley del Suelo en España presenta un marco regulatorio en el que se definen las actividades industriales potencialmente contaminantes y se indica la metodología para determinar los puntos de referencia genéricos de contaminantes, que derivan principalmente de la aplicación del análisis de riesgos. La Ley incluye una lista de puntos de referencia para 60 sustancias prioritarias. Además, tiene en cuenta la diversidad ecológica y geológica de los suelos

²⁰ https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1966-08-13&atto.codiceRedazionale=066U0615&elenco30giorni=false

²¹ http://www.reteambiente.it/repository/normativa/761_legge_merli.pdf

²² https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171

²³ https://www.minambiente.it/sites/default/files/legge_08_07_1986_349.pdf

²⁴ http://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1997_0022.htm

²⁵ <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1999/12/15/099G0540/sg>

²⁶ https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171

²⁷ Residuos y suelos contaminados <https://www.global-regulation.com/translation/spain/1436517/law-22-2011%2c-28-july%2c-waste-and-contaminated-soils.html>

²⁸ <https://www.global-regulation.com/translation/spain/1448611/royal-decree-9-2005%252c-of-14-january%252c-which-establishes-the-relationship-of-potentially-polluting-activities-of-the-soil-and-the-criteria-and-standa.html>

en las diferentes regiones españolas, desafiando un enfoque flexible que comprende niveles más profundos.

En el Decreto se tienen en cuenta 3 tipologías diferentes de usos del suelo: industrial, residencial y natural, en las que se tienen en cuenta los objetivos humanos y, para la tercera tipología, también los objetivos ecosistémicos.

La Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados incluye requisitos para el establecimiento de un registro de sitios remediados. Las responsables de este registro son las autoridades autonómicas. Otras leyes abordan la contaminación del suelo desde diferentes perspectivas, como el Real Decreto Legislativo nº 1/2016²⁹, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación, y la Ley nº 26/2007³⁰ de Responsabilidad Medioambiental.

La declaración de suelo contaminado, que se basa en el concepto del riesgo (para la salud humana o el medio ambiente) y los usos del suelo, la realizarán las autoridades autonómicas según los criterios establecidos en el Decreto nº 9/2005, en el que se distingue entre usos industriales, urbanos o de otro tipo del suelo.

Las personas que tienen la obligación de limpiar el sitio son los contaminadores, el propietario del lugar contaminado y, finalmente, el poseedor.

La declaración de suelo contaminado debe incluirse en el Registro de la Propiedad y sólo podrá retirarse cuando las autoridades autonómicas confirmen que la limpieza se ha llevado a cabo debidamente y que no existe riesgo para la salud humana o el medio ambiente.

1.5 Derecho ambiental para la contaminación del suelo en Francia

La única ley de gestión y remediación de la contaminación del suelo en Francia está representada por la Ley 19/1976³¹ sobre Instalaciones Clasificadas para la Protección del Medio Ambiente (Ley ICPE) (Loi nº76-663 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement), integrada a la Ley de Medio Ambiente de 21 de septiembre de 2000³² y por la Directiva 2004/35/CE³³ sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales (Directiva sobre responsabilidad ambiental). Esta última se implementó en Francia gracias a la Ley de responsabilidad medioambiental (loi relative à la responsabilité environnementale) y la adaptación de varias disposiciones a la Ley de Medio Ambiente de la UE de 2008³⁴ que aborda los daños ambientales causados al suelo que presentan un riesgo para la salud humana.

13

En el caso de la ley ICPE, se ha introducido una estrategia nacional que incluye el inventario de sitios contaminados y directrices para su caracterización. Esta ley define las actividades productivas, tales como industrias, laboratorios o patios, que podrían tener inconvenientes para la salud pública, la agricultura, el medio ambiente y la protección del paisaje.

La política nacional y las medidas que deben aplicarse se definen en dos documentos clave representados en las circulares del Ministerio de Medio Ambiente de diciembre de 1993 y de diciembre de 1999³⁵ en las que se definen las principales características de una política nacional en materia de sitios contaminados. Más específicamente, la circular de 1999 indica los principios para la identificación de objetivos de remediación, basados en un análisis de riesgo detallado y en la evaluación técnico-económica de las alternativas de intervención.

El Ministerio de Ecología, Desarrollo Sostenible y Energía (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie, MEDDE) es responsable de definir la política pública en materia de suelos contaminados, tanto si la contaminación es natural como causada por personas y si está relacionada o no con la política del ICPE.

²⁹ <https://gettingthedealthrough.com/area/13/jurisdiction/21/enviromentspain/#targetText=There%20is%20a%20system%20of,industries%20that%20meet%20certain%20parameters>

³⁰ <https://icdg.com/practice-areas/environment-and-climate-change-laws-and-regulations/spain>

³¹ https://aida.ineris.fr/consultation_document/2193

³² [http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183a=1y=3ocID=BocTitle=Policy_and_regulatory=France#targetText=France has no specific legislation,, 1977 \(ver más abajo\).](http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183a=1y=3ocID=BocTitle=Policy_and_regulatory=France#targetText=France has no specific legislation,, 1977 (ver más abajo).)

³³ Directiva 2004/35/CE sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=LEGISSUM:l28120>

³⁴ https://www.citizensinformation.ie/en/environment/environmental_law/eu_environmental_law.html#targetText=Environmental%20crime%20covers%20acts%20that,the%20environment%20and%20human%20health.&targetText=Directive%202008%20F99%20FEC%20on,adopted%20on%2028%20October%202008.

³⁵ http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy_and_regulatory&T=France

2. Cartografía de los lugares contaminados en las zonas de ensayo de la UE del proyecto LIFE BIOREST

El proyecto LIFE BIOREST es el autor de una imagen en la que se detalla la extensión de los sitios contaminados en Italia, España y Francia, donde se ha implementado el proyecto. La situación es fragmentada, en particular, en términos de armonización de los criterios y de la información disponible en los registros nacionales y regionales.

Los sitios contaminados más importantes de Italia son los Sitios de Interés Nacional (Siti di Interesse Nazionale, SIN), clasificados según la extensión de la contaminación ambiental, el riesgo para la salud y la alarma social (DM 471/1999³⁶). Estas áreas están definidas por el Decreto Legislativo 152/2006³⁷, que indica las características del sitio, la concentración y los peligros de los contaminantes presentes, así como el impacto ambiental tanto a nivel sanitario como ambiental. El programa nacional de remediación, establecido por el Ministerio de Medio Ambiente, proporciona periódicamente un marco actualizado sobre el estado de contaminación del SIN. Actualmente, se han clasificado 41 SIN (actualizados hasta el 2018), entre los que se incluye Fidenza, donde se llevan a cabo las actividades de prueba del proyecto LIFE BIOREST.

Los SIN incluyen los sitios industriales en desuso, en los que se llevan a cabo actividades de conversión, aquellos que están expuestos a accidentes que implican el vertido de contaminantes químicos, y las zonas sujetas a la eliminación incontrolada de residuos, incluso peligrosos. Casi todas las 20 regiones italianas albergan al menos un SIN, excepto Molise. El suelo contaminado ocupa una superficie total de 51 403,5 hectáreas, lo que equivale a unas tres veces la extensión del área metropolitana de Milán. Los planes de caracterización han afectado hasta ahora al 57,3 % de la superficie total del perímetro (29.453,9 hectáreas), y en el 94,7 % de los casos se han ejecutado. Hay 1 574,5 hectáreas afectadas por medidas de prevención, alrededor del 3 % del perímetro total, donde se aplican soluciones para reducir el impacto de las sustancias tóxicas en el medio ambiente y la salud humana.

En resumen, las actividades de remediación hasta ahora sólo han afectado al 12,6 % del total de los SIN (6.513,1 hectáreas, según el último análisis nacional de junio de 2018).

14

Tabla 2. Áreas más avanzadas para la matriz de suelos en relación con los 41 SIN. Las cifras hacen referencia a las áreas en hectáreas (ha) y el porcentaje de remediación se calcula sobre el total de áreas (datos elaborados a partir del informe SIN del Ministerio del Ambiente, 2018³⁸).

SIN	% de remediación en 2018	Medidas de prevención	Proyecto de remediación Presentado	Proyecto de remediación Aprobado	Áreas Remediadas	Áreas Totales
1 - Venecia	15%	0	1146	1,055	241	1618
2 - Napoli Orientale	6%	89	174	127	50	834
3 - Gela	0%	0	120	101	4	795
4 - Priolo	8%	11	1000	733	449	5814
5 - Manfredonia	18%	8	67	42	38	216
6 - Brindisi	6%	0	723	692	378	5851
7 - Tarento	8%	12	341	335	347	4383
8 - Cengio y Saliceto	0%	0	77	77	0	77
9 - Piombino	45%	0	239	121	422	931
10 - Massa y Carrara	5%	0	46	29	5	116
11 - Casal Monferrato	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.
12 - Balangero	0%	305	52	16	0	314
13 - Pieve Vergonte	0%	0	42	42	0	42
14 - Sesto San Giovanni	32%	56	215	113	82	255
15 - Pioltello-Rodano	13%	36	72	28	11	85
16 - Napoli Bagnoli Coriglio	0%	0	234	234	0	249

³⁶ <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/1999/12/15/099G0540/sg>

³⁷ https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171

³⁸ <https://annuario.isprambiente.it/ada/downreport/html/6798>

17 - Tito	4%	25	25	25	13	315
18 - Crotone-Cassano-Cerchiara	13%	7	150	135	69	544
19 - Fidenza	8%	11	23	23	2	25
20 - Caffaro Torviscosa	0.49%	0	200	10	1	201
21 - Trieste	7%	0	162	124	29	435
22 - Cogoleto	0%	0	33	10	0	45
23 - Bari	0%	1	11	11	0	14,5
24 - Sulcis Iglesias Guspinese	8%	117	1029	922	904	19751
25 - Biancavilla	1%	25	25	25	0	330
26 - Livorno	0%	0	206	0	0	206
27 - Terni	28%	638	6	6	181	655
28 - Emarese	0%	15	16	16	0	23
29 - Norte de Trento	0%	0	11	11	0	24
30 - Brescia	1%	0	43	43	4	262
31 - Broni	1%	13,5	9,8	9,8	0,1	15
32 - Falconara Marittima	0%	0	3	3	0	101
33 - Serravalle Scrivia	0%	0	7	7	0	74
34 - Lago de Mantua	3%	0	188	63	19	614
35 - Orbetello	0%	0	0	0	0	204
36 - Porto Torres	12%	0	944	157	226	1874
37 - Val Basento	88%	96	30	23	2925	3330
38 - Milazzo	20%	59	110	110	111	549
39 - Bussi sul Tirino	1%	50	12	0	2	232
40 - Bacino del Fiume Sacco	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.
41 - Bologna Officina Grandi Riparazioni ETR	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.	s.f.
TOTAL	13%	1574,5	7791,8	5478,8	6513,1	51403,5

Las principales causas de contaminación en el 66 % de los SIN están relacionadas con las actividades industriales (46 %) y antiguas zonas industriales abandonadas (20 %). El 12 % del los SIN está formado por las antiguas zonas de extracción de amianto: Casale Monferrato, Broni, Emarese y Baliano Amiantifera en Piamonte, son las minas de amianto más grandes de Europa que cuentan con un alto riesgo de aparición de cánceres pulmonares. El 10 % de los SIN son zonas portuarias (Taranto y Venecia, Falconara Marittima y Trieste), que presentan una amplia contaminación por metales pesados e hidrocarburos. También se incluyen los vertederos (5 %) y las áreas de actividad industrial y minera compleja (7 %), que se encuentran contaminadas por varios contaminantes diferentes (Val Basento, Crotone-Cassano-Cerchiara).

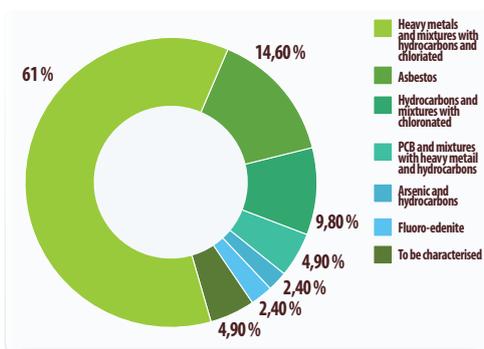


Figura 2 Contaminación de los SIN según la tipología de los contaminantes principales

El análisis químico de los SIN evidenció la predominancia de metales pesados, compuestos clorados, hidrocarburos, pesticidas y herbicidas, que representan globalmente el 61 % del total de contaminantes (Fig. 2). Los contaminantes más extendidos son el amianto (presente en el 14,6 % de los SIN), los hidrocarburos (9,8 %), los bifenilos policlorados (4,9 %), el arsénico (2,4 %) y la fluoro-edenita (2,4 %). Los hidrocarburos están presentes en el 53,7 % de los SIN. Los sitios de Gela, Fidenza, Laghi di Mantova, Val Basento y Sulcis Iglesias Guspinese presentan una contaminación importante por hidrocarburos. Se trata de datos procesados a partir de la evaluación de las fuentes de contaminación registradas en los informes de caracterización técnica realizados en los SIN y de la información facilitada por las oficinas regionales de registro.

En cuanto a la cartografía de la contaminación del suelo en España, la siguiente tabla recoge el número total de sitios contaminados censados en Andalucía, dividido en provincias: Córdoba, con 5 676 sitios, es la provincia con más sitios contaminados, seguida de Sevilla (4 986) y Granada (4 238).

Tabla 3. Número total de sitios contaminados censados en las 8 provincias de Andalucía.
(Datos de <http://descargasrediam.cica.es/>)

	Almería	Cádiz	Córdoba	Granada	Huelva	Jaén	Málaga	Sevilla	TOTAL
N. emplazamientos inventariados	2.841	2.404	5.676	4.238	1.580	2.540	4.712	4.986	29.277

La información detallada relativa a la tipología de la contaminación no está incluida. Sin embargo, un mapa a nivel nacional del Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital (Figura 3) muestra una amplia distribución de áreas con concesiones de hidrocarburos. El mapa muestra varios focos destinados a actividades relacionadas con los hidrocarburos en España, con una concentración muy alta en zonas de Andalucía. Este resultado es especialmente relevante en actividades del proyecto LIFE BIOREST, puesto que la unidad del CSIC está ubicada en esta comunidad autónoma. Por tanto, su situación permite un mejor alcance de los protocolos que se desarrollarán en las siguientes etapas del proyecto.

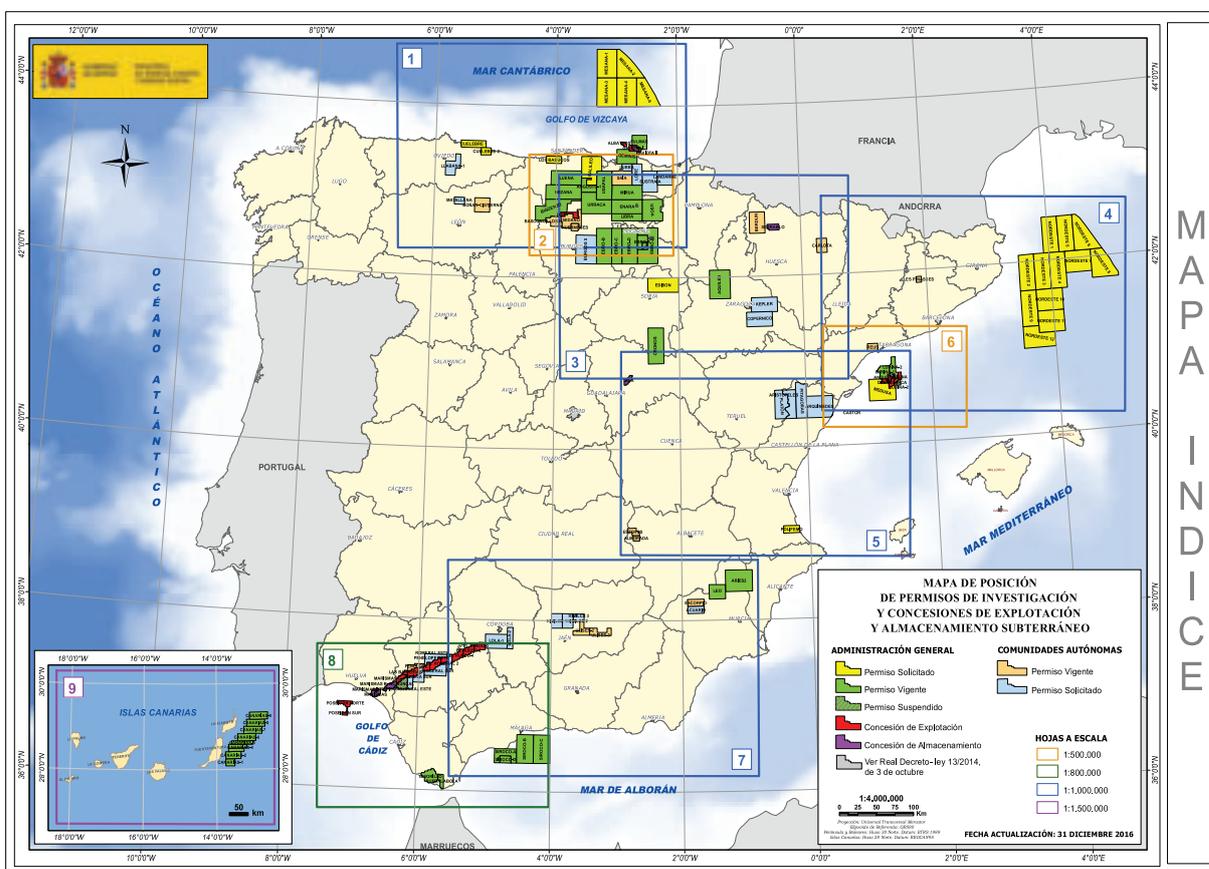
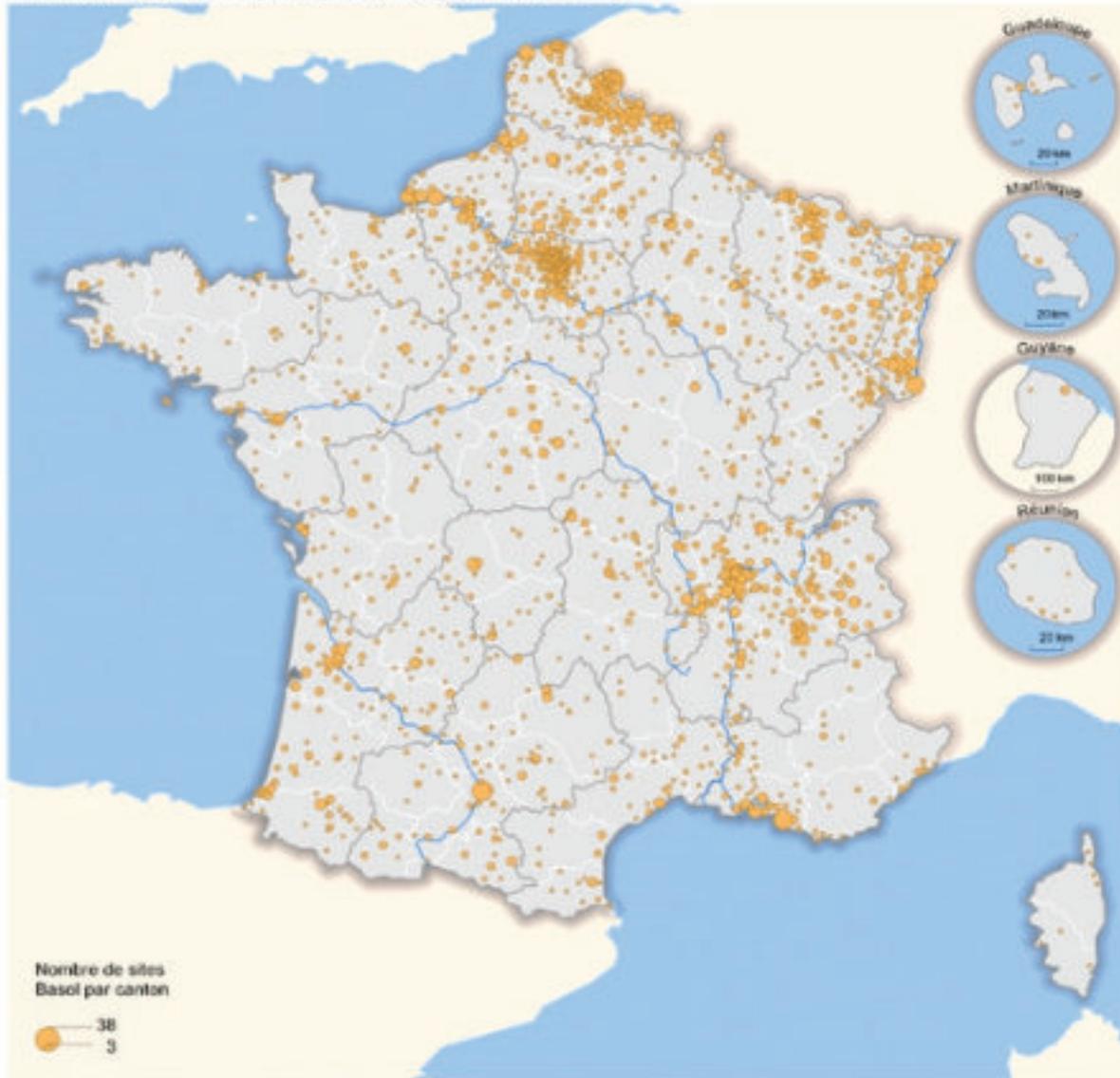


Figura 3 Mapa de España en el que se muestra el total de concesiones y licencias de hidrocarburos.

Un inventario de la contaminación del suelo en Francia registra 4.142 sitios (actualización del año 2012) distribuidos en todo el territorio nacional. Los hidrocarburos son la principal causa de contaminación, puesto que dañan al 33 % de los suelos y aguas contaminados. Sin embargo, este porcentaje se refiere sólo a los hidrocarburos lineales: al incluir los hidrocarburos aromáticos, los hidrocarburos clorados y los BTEX, el número aumenta hasta el 67 % tanto para los suelos como para las zonas acuáticas.

Les sites et sols pollués début 2012
 (sites sur lesquels l'état a entrepris des actions de remédiation au 16 janvier 2012)



Note: sites de la base de données Basol faisant l'objet d'action de surveillance ou de réhabilitation.
 Source: Medde, DGPR (Basol au 16 janvier 2012), 2012. Traitements: SOeS, 2012

Figura 4 Mapa de Francia en el que se muestra la ubicación de los sitios contaminados.

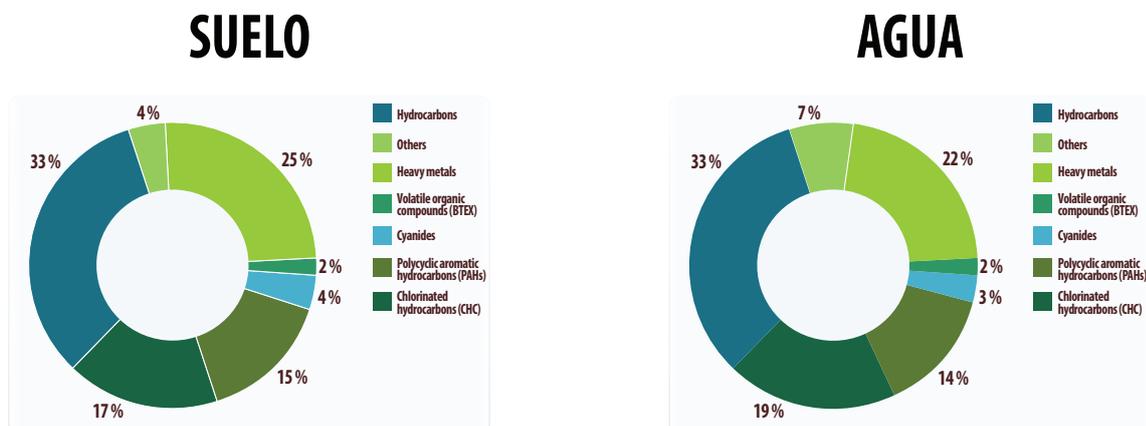


Figura 5 Clasificación de los sitios contaminados según la categoría química: los suelos se sitúan a la izquierda, el agua a la derecha.

3. Técnicas de biorremediación

Se puede explotar la versatilidad nutricional de los microorganismos para el proceso de biodegradación de contaminantes, al asumir el término biorremediación. Este proceso se basa en la capacidad de ciertos microorganismos para convertir, modificar y utilizar contaminantes tóxicos para su desarrollo y crecimiento (Tang et al., 2007). La biorremediación representa una actividad microbiológica bien organizada que se aplica para descomponer o transformar los contaminantes en compuestos menos tóxicos o no tóxicos (Abatenh et al., 2017). La para seleccionar la técnica de biorremediación se debe tener en cuenta la naturaleza de los contaminantes (por ejemplo, agroquímicos, compuestos clorados, hidrocarburos, metales pesados), la profundidad de la contaminación, la concentración de contaminantes, las propiedades físico-químicas del suelo que debe tratarse, el coste del tratamiento y las políticas medioambientales.

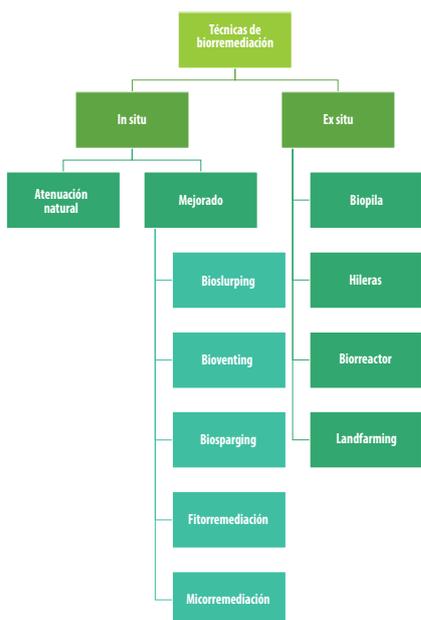


Figura 6 Técnicas de remediación de suelos in situ y ex situ.

Los microorganismos representan una alternativa ecológica a los procesos de remediación convencionales y un material genético prometedor y valioso para resolver las amenazas ambientales.

La biorremediación puede llevarse a cabo mediante técnicas in situ o ex situ, dependiendo de varios factores como el coste, las características del sitio, así como el tipo y la concentración de contaminantes.

In situ estas técnicas de biorremediación incluyen el tratamiento de sustancias contaminadas en el lugar contaminado, sin necesidad de excavar. Se trata de una alternativa más económica en comparación con las tecnologías ex situ, ya que no se requiere ningún coste por excavación y la dispersión de contaminantes es insignificante. Las técnicas de biorremediación in situ se han aplicado con éxito para el tratamiento de suelos contaminados por disolventes clorados, tintes, metales pesados e hidrocarburos (Azubuike et al., 2016; Frascari et al., 2015; Kim et al., 2014).

Ex situ estas técnicas de biorremediación consisten en la excavación de contaminantes procedentes de lugares contaminados y su posterior transporte a otro lugar para someterlos a tratamiento. La consecución de los objetivos de remediación, en lo que a costes y tiempos competitivos se refiere, depende de una amplia serie de parámetros de optimización, cuya supervisión requiere una gran experiencia en aplicaciones (Sofo, 2010).

18

3.1 In situ

Entre las técnicas de biorremediación in situ se pueden distinguir dos categorías principales:

Atenuación natural: los contaminantes se dejan en el sitio con la finalidad de que sean los procesos naturales que tienen lugar los que purifiquen el sitio. El éxito de la atenuación natural depende de la geología, la hidrología y la microbiología del subsuelo y está sujeta a cambios hidrológicos, por lo que el tiempo de desaparición de los contaminantes del suelo es elevado. Se utiliza principalmente para los BTEX e hidrocarburos clorados (Mulligan, 2004).

Biorremediación mejorada: Para acelerar el proceso de biodegradación natural, se añaden hongos, bacterias y plantas o nutrientes (oxígeno, nitratos). Estas técnicas se han aplicado con éxito para remediar suelos y aguas freáticas contaminadas con combustible, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles (COV y COSV), perclorato y pesticidas.³⁹ Las técnicas de biorremediación mejoradas incluyen diferentes alternativas, que se enumeran a continuación.

Bioventing: también llamada bioventilación del suelo, es una tecnología in situ basada en la estimulación natural de la actividad biológica normal presente en el suelo mediante la inyección de oxígeno a través de un flujo de aire. El aire se inyecta directamente y de forma progresiva a través de uno o más pozos conectados a bombas de vacío, que aseguran la circulación forzada de aire en el suelo no saturado contaminado. Cuando el suelo está muy contaminado, puede producirse una obstrucción de los poros del suelo, con la consiguiente reducción de los niveles de oxígeno. Para superar este tipo de problemas, se han desarrollado diferentes estrategias como el aumento de los niveles de oxígeno a través de inyecciones⁴⁰ de aire continuo. Las ventajas son los bajos costes de realización y gestión de la planta, en detrimento del tiempo requerido, que varía de algunos meses a años. Sin embargo, es capaz de aumentar la capacidad normal de biodegradación del suelo hasta 40 veces⁴¹.

³⁹ FRTR - Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0:

<https://frtr.gov/matrix2/section4/4-2.html#targetText=Description%3A,them%20to%20innocuous%20end%20products.>

⁴⁰ https://www.crccare.com/files/dmfile/CTechguide_Bioremediation_Rev0.pdf

⁴¹ http://www.arpa.umbria.it/Resources/docs/micron%2025/micron_25_45.pdf

Bioslurping: es una técnica que aplica tecnologías de deshidratación mejoradas al vacío a la remediación de sitios contaminados con hidrocarburos, mediante la combinación de la extracción de vapores del suelo y la bioventilación mediante el suministro indirecto de oxígeno y la posterior estimulación de la biodegradación del contaminante actual (Gidakaros et al., 2007). Este sistema funciona por medio de «sorbos» que se alargan en el estrato, y extrae líquidos (productos libres y gas del suelo) y otras sustancias. Este mecanismo permite la recuperación de compuestos libres, compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles y líquidos en fase no acuosa ligera (LNAPL) (Kim et al., 2014). Aunque el bioslurping no suele utilizarse para suelos de baja permeabilidad, permite ahorrar costes debido a la menor cantidad de aguas freáticas resultantes de la operación, y minimiza los costes de almacenamiento, tratamiento y eliminación (Philip et al, 2005).

Biosparging: es una técnica análoga a la bioventilación, en la que se produce una inyección de aire en el subsuelo del suelo. Esta acción es capaz de estimular las actividades microbianas para permitir la eliminación de las sustancias contaminantes de los sitios contaminados. En el biosparging, el aire (u oxígeno) y los nutrientes se inyectan en la zona saturada para aumentar la actividad biológica de los microorganismos, y promover, de este modo, el aumento de compuestos orgánicos volátiles hacia el área no saturada para aumentar la biodegradación.

Existen dos factores principales que regulan la eficiencia: la biodegradabilidad del contaminante y la permeabilidad del suelo que regula la biodisponibilidad de los contaminantes para los microorganismos. A menudo se aplica para tratar acuíferos contaminados con productos petrolíferos, pero también con el benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX) (Kao et al., 2008).

Fitorremediación: la técnica se basa en utilizar plantas en las áreas contaminadas para reducir la concentración de sustancias contaminantes.

Los compuestos orgánicos se eliminan por degradación, rizoremediación, estabilización y volatilización, mientras que los metales pesados se eliminan por transformación, extracción y secuestro (Azubuike et al., 2016).

En el proceso de fitorremediación se utilizan los siguientes mecanismos:

- biodegradación mejorada de la rizosfera: las raíces de las plantas liberan sustancias naturales para suministrar nutrientes a los microorganismos que potencian la actividad biológica;
- fitoacumulación: la planta absorbe las sustancias contaminantes a través de las raíces y las transfiere a los brotes y hojas de la planta;
- fotodegradación: metabolismo de los contaminantes en los tejidos vegetales;
- fitoestabilización: la planta produce productos químicos que inmoviliza los contaminantes en la interfase entre las raíces y el suelo (Azubuike et al., 2016).

Remediación microbiana: se utilizan bacterias y/u hongos para transformar los contaminantes del suelo y de las aguas subterráneas. Microorganismos también son capaces de liberar enzimas oxidativas específicas que son capaces de descomponer los contaminantes orgánicos. El tipo de microbios que se utiliza está estrechamente relacionado con la temperatura, el pH del suelo y la disponibilidad de oxígeno. Microorganismos son capaces de degradar los hidrocarburos del petróleo y compuestos clorados, pero también pueden acumular metales pesados dentro de la pared celular.

3.2 Ex situ

Biopilas: es una aplicación ex situ de la tecnología de remediación que se sirve de los microorganismos del suelo para eliminar la contaminación.

Generalmente, esta técnica se aplica a suelos impactados por hidrocarburos de petróleo en los que la excavación se lleva a cabo y, posteriormente, se mezcla el suelo con sus enmiendas, originando montones de compost que permiten que el microorganismo mejore el proceso de degradación. Pese a que los productos de petróleo más ligeros tienden a evaporarse debido a la aireación, los hidrocarburos de petróleo medios y pesados se degradan aeróbicamente. Para que los procesos sean más eficaces y productivos, se pueden controlar algunos parámetros y características como la temperatura, el oxígeno, el pH, la aireación y los nutrientes.

La biopila es una de las técnicas de biorremediación ex situ más utilizadas, principalmente por su rentabilidad, aunque se deben controlar muchos parámetros para establecer una biodegradación efectiva (Whelan et al., 2015).

Hileras (windrow): es una técnica específica de remediación ex situ basada en el volteo periódico de suelos contaminados apilados para aumentar la biorremediación mediante el aumento de la actividad de degradación de los microorganismos. La rotación periódica del suelo contaminado, junto con la adición de agua, puede aumentar la aireación y uniformizar la distribución de contaminantes, nutrientes y de las actividades de degradación microbiana. Como resultado, la biorremediación puede acelerarse (Barr, 2002). Por el contrario, en presencia de compuestos volátiles, puede que no sea la mejor opción. La utilización de este tratamiento repercute en la liberación de CH₄ (gases de efecto invernadero) debido al desarrollo de zonas anaeróbicas en los suelos contaminados apilados, lo que generalmente ocurre después de la reducción de la aireación (Hobson et al., 2005).

Biorreactor: Cuando el material se retira del medio ambiente, se puede colocar en biorreactores, representados por grandes recipientes en los que se puede supervisar el material contaminado y establecer las condiciones para la biorremediación. Los biorreactores funcionan de distintas maneras: discontinuo (batch), semicontinuo (fed-batch), por lotes secuenciales (sequencing batch), continuos (continuous) y multietapa (multi-stage). En los biorreactores, se puede controlar la tasa de mezcla, la temperatura, el pH y los niveles de nutrientes, apoyando el proceso natural de los microorganismos imitando y manteniendo su entorno natural para proporcionar las condiciones óptimas de crecimiento (Azubuike et al., 2016).

Landfarming: representa un sistema de biorremediación de ingeniería útil para el tratamiento de sitios remotos debido al mínimo de equipo requerido, el cual generalmente utiliza aireación pasiva al labrar el suelo contaminado para reducir los niveles de sustancias contaminantes (EPA 2014). La biorremediación por landfarming se considera una de las técnicas más sencillas y fáciles de diseñar e implementar, lo que hace posible tratar un área amplia de suelo contaminado con un bajo impacto ambiental y energético (Azubuike et al., 2016).

4. La biorremediación del suelo en tres pasos: el método LIFE BIOREST

El proyecto LIFE BIOREST, en el que participan tres países europeos (Italia, Francia y España), se ha desarrollado para demostrar la eficiencia y la rentabilidad de la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), benceno, tolueno, etilbenceno, xileno (BTEX) y alcanos de cadena larga, contribuyendo así al conocimiento científico necesario para el desarrollo de la política europea de protección del medio ambiente y del suelo. El proyecto ha previsto la colaboración del Consorcio Italtotec, que actúa como coordinador del proyecto, Actygea Srl, Agenzia regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia - ARPAE, Università degli Studi di Torino, Università Cattolica del Sacro Cuore, la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (España) y SATT- SAYENS (Francia).

El enfoque biotecnológico desarrollado se basa en microorganismos, derivados agrícolas y plantas, y tiene como objetivo lograr la revegetación, la restauración del suelo contaminado y su devolución al uso público. Las actividades experimentales de LIFE BIOREST tienen como objetivo validar un modelo de biorremediación sostenible capaz de tratar HAP, BTEX y alcanos que junto con los metales pesados, representan el 45 % del total de contaminantes en Europa. Este también es el caso de Fidenza (Emilia Romagna, Italia), el sitio en el que se está llevando a cabo la biorremediación.

20

Las actividades experimentales se iniciaron en julio de 2016, en el área de «ex-Carbochimica», Sitio de Interés Nacional (SIN) en Fidenza, gracias al apoyo del Municipio que proporcionó las infraestructuras y los espacios ya tratados por otras actividades de recuperación.

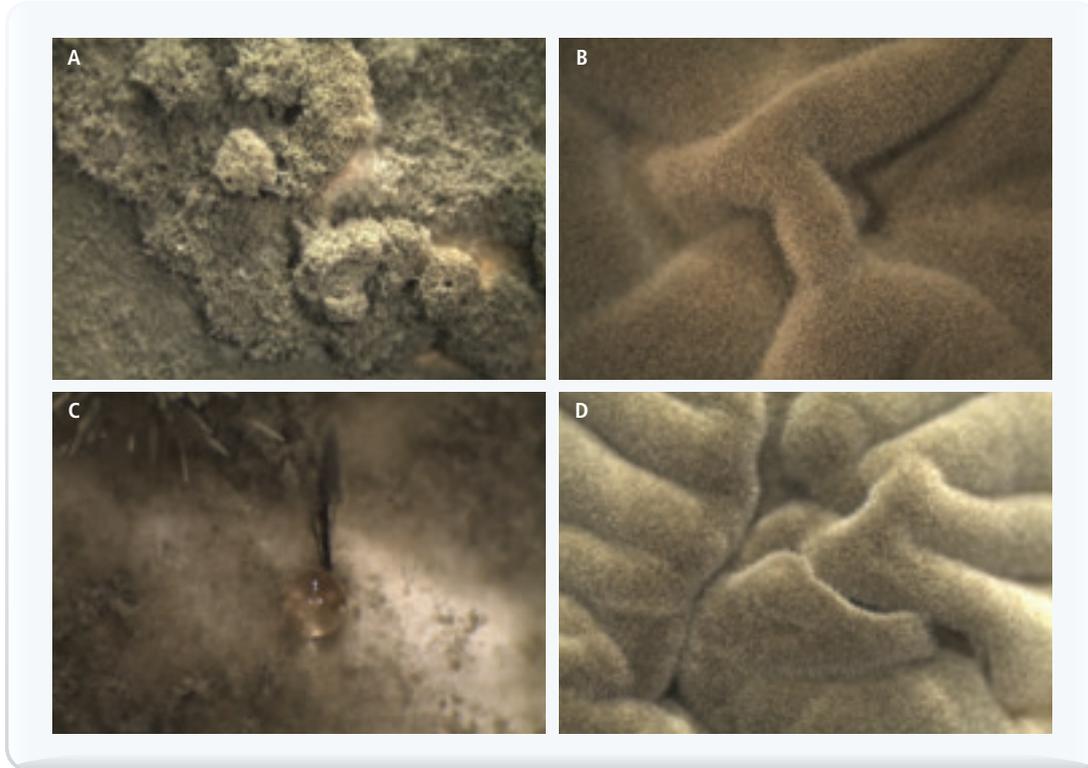
4.1 Optimización de la biorremediación de suelos

El primer paso del proyecto LIFE BIOREST concentró sus esfuerzos en la selección de cepas microbianas que se han explotado para el tratamiento de los contaminantes. El enfoque de la biorremediación previó el uso de microorganismos autóctonos, que pueblan naturalmente el sitio contaminado. Por el contrario, no se seleccionaron cepas alóctonas ya que sus efectos pueden ser impredecibles al introducirse en el ecosistema. Aunque el suelo contaminado está comprometido en comparación con el suelo limpio, su bioma vivo puede incluir microorganismos que estén muy adaptados a condiciones extremas.

A través de estudios preliminares, se evaluó la vitalidad del suelo recolectado en Fidenza. Su comunidad bacteriana y fúngica es menos abundante que la de un suelo no antropizado, pero probablemente está poblado del siguiente nicho ecológico: Se detectan 10^7 y 10^4 ufc/100g de bacterias y hongos respectivamente. Los contaminantes son capaces de crear un ambiente extremo, pero la naturaleza ha aprendido a adaptarse a estas duras condiciones. Por esta razón, el interés del proyecto se ha centrado en la selección de aquellas cepas que son capaces de sobrevivir en condiciones extremas y que también son capaces de colonizar el suelo contaminado.

La aplicación de una presión selectiva durante el procedimiento de aislamiento permitió el aislamiento de 309 hongos y 256 bacterias pertenecientes a una amplia biodiversidad (por ejemplo, 78 taxones fúngicos y 46 bacterianos). Esta riqueza microbiana heterogénea se redujo, identificando las pocas cepas que podrían utilizarse para tratar el suelo. La evaluación de este gran número de cepas y variables es necesaria para progresar en los métodos analíticos tradicionales, que consumen demasiado tiempo y dinero. Originalmente se desarrolló y optimizó una innovadora técnica de miniaturización para probar la tasa de crecimiento de los microorganismos en presencia de contaminantes objetivo (pireno, fenanteno, naftalina, benceno, aceite de parafina, heptadecano). Varias cepas mostraron la capacidad de utilizar eficientemente al menos uno de los contaminantes como única fuente de carbono, destacando su capacidad para explotar fuentes de ali-

mentación complejas, así como otras simples y biodisponibles (por ejemplo, la glucosa). Además, muchas cepas también son capaces de producir tensioactivos que pueden mejorar la biodisponibilidad de los contaminantes orgánicos en el suelo. Este proyecto ayuda a revelar una riqueza microbiana oculta, cuya aplicación podría realizarse en diferentes campos biotecnológicos. Estos resultados confirman las habilidades de adaptación que llevó a los microorganismos a desarrollar una vía metabólica única a raíz del ambiente extremadamente tóxico del suelo de Fidenza.



Panel 1 (A) *Penicillium crustosum*; (B) *Cladosporium subuliforme*; (C) *Cephalotrichum stemonitis*; (D) *Cladosporium*



Panel 2 (E) *Rhodococcus ruber*; (F) *Aspergillus terreus*; (G) *Cladosporium perangustum*

Se seleccionaron más de 30 bacterias y hongos. Los microorganismos se consideraron no sólo por su capacidad de degradar contaminantes de alto impacto, sino también por su capacidad de producir biosurfactantes, bioemulsionantes y enzimas. De hecho, estos compuestos podrían ser relevantes para algunos aspectos de la biodegradación de los contaminantes y también para la estimulación de otros microorganismos relevantes. Los mejores 5 consorcios microbianos se aplicaron a mayores volúmenes de suelo: la bioaumentación ha conducido a una mejor degradación que los controles. Se ha elegido el consorcio capaz de maximizar la degradación de los hidrocarburos de cadena larga y los HAP, reducing the soil toxicity en la toxicidad interna del suelo.

4.2 Producción industrial de biomasa

El objetivo principal del proyecto LIFE BIOREST ha sido aumentar la prueba de concepto obtenida en experimentos de micro y mesocosmos a una biopila real con el suelo del sitio contaminado de Fidenza. Las cepas microbianas se utilizan para la bioaumentación de una porción de una biopila de aproximadamente 530 toneladas en colaboración con el Municipio de Fidenza. Para alcanzar este objetivo, se necesitaba una cantidad considerable de microorganismos. Por esta razón, en el segundo paso del proyecto LIFE BIOREST se anticipó la consecución de las condiciones económicas y prácticas para el crecimiento de los microorganismos más adecuados, lo que permitió que la técnica también pudiera aplicarse aplicación para aplicaciones de campo. La realización de una producción rentable, la producción de microorganismos en plantas de fermentación multipropósito, así como la adaptación de los equipos y la logística disponibles a la producción de hongos fueron los principales objetivos de la segunda etapa. Gracias

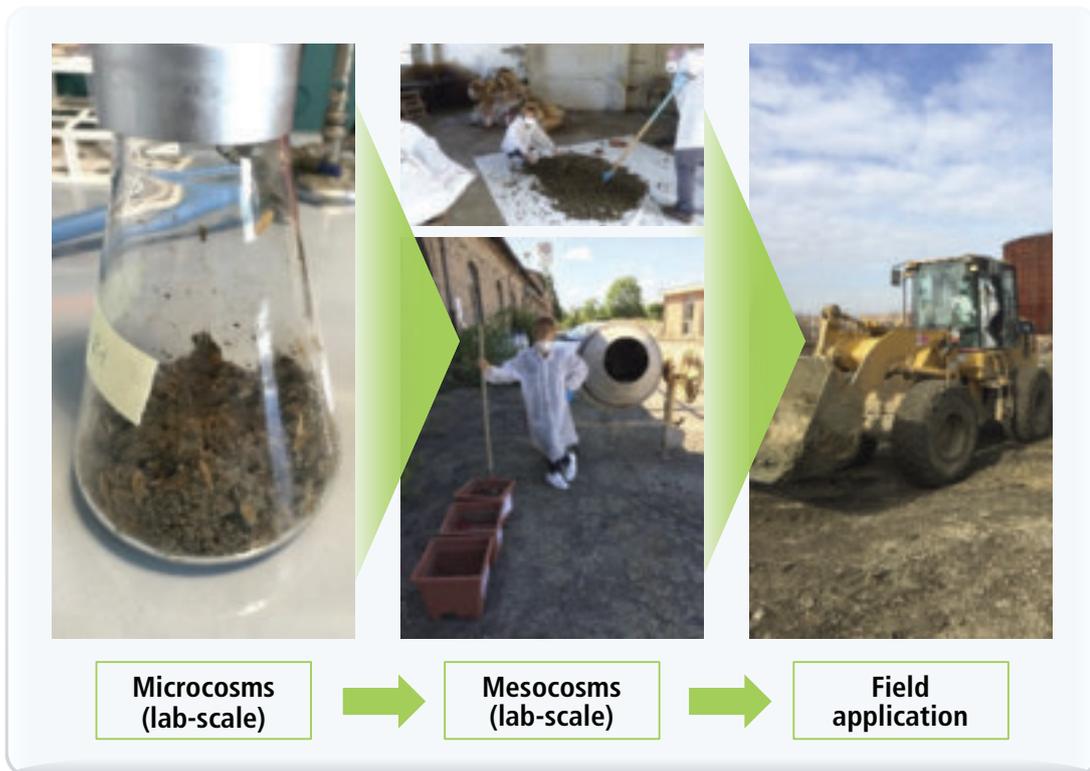


Figura 7 La ampliación del proceso

a la disponibilidad de un sistema para la selección de medios de fermentación para la producción industrial (la base de datos patentada ActyMedDat), el coste de los productos de fermentación se redujo a menos de 10 € para la producción de los microorganismos necesarios para el tratamiento de 1 tonelada de suelo. En la fermentación se utilizaron residuos vegetales (como la celulosa, la cascarilla de arroz o el aceite vegetal usado). Los resultados permitieron la identificación de los mejores microorganismos, no sólo por su potencial de biodegradación sino también por la posibilidad de poder producirse a gran escala y a bajo costo. Se consiguió una mayor producción de microorganismos y se permitió la aplicación en campo del proceso de biorremediación. Se elaboró un protocolo general de ampliación que está listo para probarse en otros sitios que se han de remediar.

4.3 Biorremediación y revegetación in situ

En el tercer paso, el proyecto LIFE BIOREST se ha centrado en la preparación de biopilotes con el mejor consorcio microbiano previamente seleccionado. La biopila se preparó con 530 toneladas de suelo contaminado, y las bacterias y hongos que se aplicaron al suelo pertenecían al consorcio de mayor rendimiento. El suelo se formó en una biopila estándar de 3 m de altura. La biopila se airea continuamente y la humedad del suelo se controla a lo largo de todo el período de incubación.

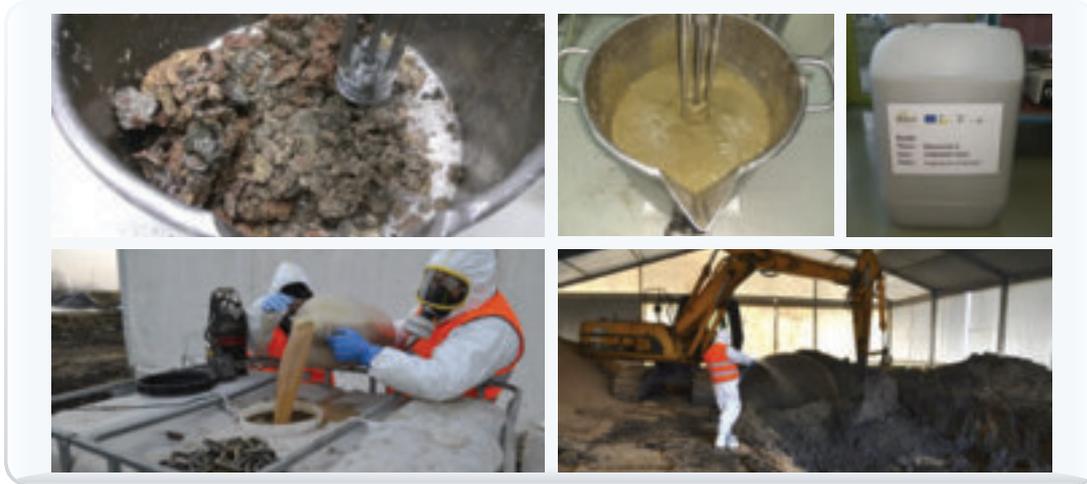


Figura 8 Aplicación de los microorganismos producidos a los mesocosmos y a la biopila



Figura 9 Preparación de biopila



Figura 10 Experimentos en macetas de invernadero

Figura 11 Área de revegetación LIFE BIOREST

La fracción bioaumentada mostró una eliminación más rápida de los contaminantes. Por ejemplo, aunque después de 60 días, la concentración total de hidrocarburos no se muestra alterada en el control, el tratamiento microbiano permite eliminar hasta un 40 %. Los cambios en la composición química del suelo también están correlacionados con la toxicidad total del suelo. Una vez más, la bioaumentación condujo a una disminución más rápida de la toxicidad. Por ejemplo, en el caso del sorgo y de la bacteria luminiscente *Vibrio fischeri*, la toxicidad era hasta dos veces menor en presencia del suelo tratado con microbios.

Para acoplar la biorremediación con la fitorremediación, se llevaron a cabo experimentos en macetas para seleccionar las tres especies de plantas más adecuadas para la revegetación después del tratamiento de biopila. El resultado fue que tres especies se consideraron como las más indicadas para la fitorremediación en suelos contaminados con HAP y BTEX: Sorgo bicolor, *Trifolium pratense* y *Festuca arundinacea*.

5. Recomendaciones de biorremediación

El suelo se considera un recurso cuyo mantenimiento sanitario es esencial para promover las funciones básicas de suministro de nutrientes esenciales, agua, oxígeno y apoyo a las plantas. Los suelos representan una parte crítica del ciclo hidrológico y contienen grandes cantidades de carbono que, si se liberan a la atmósfera, pueden acelerar el ritmo del calentamiento global y, en consecuencia, del cambio climático.

A pesar de la gran importancia del suelo en la vida cotidiana, su uso y gestión inadecuados, como la agricultura industrializada insostenible, el desconocimiento y otros factores socio-económicos han sido los principales desencadenantes de la destrucción de buenos suelos.

Por este motivo, el impulso cada vez más creciente hacia la consecución de la sostenibilidad en todas sus declinaciones y matices ha situado la cuestión de la contaminación y la protección del suelo en primer lugar del marco europeo. De hecho, el 7º PMA ha seguido fomentando el uso sostenible del suelo: «Las tierras se gestionarán de manera sostenible en la Unión, el suelo se protegerá adecuadamente y la remediación de los terrenos contaminados estará muy avanzada»⁴².

En los últimos años se han realizado progresos significativos en la mayoría de los países europeos en lo que se refiere a la contaminación histórica de sitios y a la fijación de objetivos para la gestión o la remediación completa de estos lugares. Según los datos del Centro Común de Investigación, se han registrado 650 000 terrenos contaminados en los inventarios de los 28 Estados miembros en los que se han llevado a cabo o están en curso tratamientos de recuperación. Se han registrado más de 76 000 nuevos sitios desde el anterior análisis de 2014. En la actualidad, 65 500 emplazamientos han sido objeto de medidas correctivas (Pérez et al., 2018).

Para los países industrializados, la remediación de los sitios contaminados representa un verdadero desafío, gracias al desarrollo de una «conciencia ecológica» que ha servido para concienciar sobre la gravedad de la situación actual.

La gestión de la contaminación del suelo presenta aspectos particulares vinculados a la alta variabilidad de los casos y a la disponibilidad de los recursos económicos, que permiten la adopción de tecnologías más innovadoras y sostenibles.

La remediación de suelos es una compleja combinación de diferentes tecnologías y enfoques que han evolucionado a lo largo de los años. Las técnicas tradicionales de remediación se basan en la transferencia del suelo contaminado a los vertederos, lo que representa una simple reubicación de la contaminación que resulta técnicamente limitada, ineficiente y poco sostenible desde el punto de vista ambiental, teniendo en cuenta también los plazos de gestión y los impactos ambientales involucrados. Las técnicas tradicionales de remediación siguen siendo frecuentes para el tratamiento de suelos contaminados, en particular la excavación y la eliminación de suelos, que representan aproximadamente el 30 % de estas actividades. Las medidas in situ y ex situ se aplican con la misma frecuencia. Los costes de excavación y transporte de grandes cantidades de materiales contaminados para su tratamiento ex situ encarecen los métodos físicos actualmente disponibles.

Sin embargo, el aumento de los controles reglamentarios de las operaciones de los vertederos y el consiguiente aumento de los costes, junto con el desarrollo de técnicas innovadoras de remediación ex situ e in situ, está cambiando el modelo de las prácticas de remediación.

El alto coste ha llevado a un creciente interés en las tecnologías alternativas para aplicaciones in situ, en particular las basadas en la capacidad de degradación biológica de plantas y microorganismos (Chaudhry et al., 2005).

⁴² El Séptimo Programa de Acción en materia de Medio Ambiente (PMA) - 2013
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013D1386>

La biorremediación ofrece una alternativa interesante a los enfoques tradicionales, con sus limitaciones y beneficios. Los hongos, las bacterias y las plantas pueden desarrollar habilidades de adaptación que les ayuden a poblar el nicho ecológico contaminado. Entre las ventajas de preferir las técnicas de biorremediación se encuentran los requerimientos mínimos de equipamiento y el bajo costo de tratamiento por unidad de volumen de suelo en comparación con otras tecnologías de remediación. Además, la importancia del suelo como recurso no renovable que debe ser protegido y preservado, hace que la biorremediación sea una opción más sostenible con beneficios a largo plazo, aunque lleve más tiempo que otras alternativas como el vertido en vertederos y la incineración. El beneficio más significativo para recurrir al proceso de biorremediación es su contribución al medio ambiente, ya que utiliza la naturaleza para reparar la propia naturaleza. La biorremediación también presenta limitaciones en su aplicación, ya que el control de los compuestos orgánicos volátiles (COV) puede ser difícil cuando se utiliza un proceso *ex situ*, y las condiciones (el pH, la temperatura, el oxígeno) tienen que estar controladas y supervisadas para mantener la viabilidad y la actividad del microorganismo.

Además de los conocimientos y aplicaciones actuales, la biorremediación siempre ha cubierto una parte consistente de la restauración de la calidad del suelo. En efecto, los microorganismos (el motor de la biorremediación) evolucionan, actúan y remedian de forma invisible desde el inicio del proceso de contaminación. Sólo en los últimos años, hemos empezado a ser conscientes del trabajo de dichas máquinas invisibles. Por otro lado, también hemos adquirido conciencia sobre cómo alimentar nuestras máquinas microbianas para hacerlas funcionar más rápidamente y permitirles alcanzar nichos que son incompatibles con su trabajo. El objetivo del proyecto LIFE BIOREST era suministrar combustible a los microorganismos indígenas en su acción contra los contaminantes de Fidenza. El proyecto ha reproducido, a un ritmo acelerado, la evolución natural de un medio ambiente perturbado que lucha por volver a la naturaleza. La aplicación de los microorganismos autóctonos ha permitido una degradación más rápida de los contaminantes objetivo.

Cuando el proceso de biorremediación que se realiza en las biopilas está razonablemente terminado, la colonización forzada del suelo con vegetales ha impulsado aún más la restauración de un medio ambiente saludable. En efecto, la acción mecánica de las raíces de las plantas ha generado «autopistas del suelo» a lo largo de las cuales los microorganismos han continuado su acción de degradación de los contaminantes.

Hay que señalar que el enfoque utilizado en el proyecto LIFE BIOREST es totalmente compatible con las tecnologías de biopilas (probadas dentro del proyecto) o de *landfarming* (no probadas en este proyecto). Por lo tanto, al impacto económico mínimo del propio proceso de remediación, sólo se le añaden los costes de producción de los microorganismos (calculados en el rango de 10 a 50 € por tonelada de suelo que tiene que recibir el tratamiento).

Incluso si el enfoque LIFE BIOREST se puede trasladar fácilmente a otros sitios contaminados, uno de los problemas más significativos en el desarrollo de la información económica es que los costes que se han dado en un sitio con unas condiciones específicas son muy difíciles de extrapolar a otros sitios. Al igual que el rendimiento de la tecnología, los costes de la tecnología son sensibles a las condiciones geológicas, geoquímicas y de contaminantes específicas del sitio, más particularmente en el caso de las tecnologías *in situ*. La recuperación de suelos contaminados con un enfoque de biopilas estándar (como el que se utilizó inicialmente en el emplazamiento de Fidenza) tiene un coste que está muy influenciado por el tipo de contaminantes presentes y por los requisitos de contención que se deben aplicar (el coste podría oscilar aproximadamente entre los 200 y los 1 000 € por tonelada de suelo).

Sin embargo, si excluimos los contaminantes clorados, la aplicación de microorganismos mediante el enfoque LIFE BIOREST es uniforme e independiente del tipo de contaminante presente en el suelo. En conclusión, al ser conscientes de que la remediación de los suelos es un enfoque integrado, el potencial de los microorganismos autóctonos y de la flora local es de suma importancia en la restauración de la calidad del suelo y tiene un impacto marginal o incluso positivo en los costes de la remediación.

El modelo de recuperación de suelos propuesto por el proyecto LIFE BIOREST ha incluido la comprensión de la profunda importancia del suelo para la vida humana, con el objetivo de educar al público sobre el papel crucial de la tierra. Por este motivo, se han organizado numerosas actividades para los estudiantes. Más de 1 000 de ellos ya han participado en actividades de investigación y comunicación sobre la prevención y el tratamiento del suelo, y se les ha animado a participar activamente en la sensibilización de la opinión pública.

Referencias

- Abatenh E, Gizaw B, Tsegaye Z, et al. (2017) Application of microorganisms in bioremediation-review *Journal of Environmental Microbiology*. 1(1):02-09.
- Azubuikwe C.C., Chikere C.B., Okpokwasili G.C. (2016) Bioremediation techniques - classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol*. 32(11):180. doi: 10.1007/s11274-016-2137-x.
- Barr D., Finnamore J.R., Bardo R.P., Weeks J.M., Nathanail C.P. (2002) Biological methods for assessment and remediation of contaminated land: case studies. Construction Industry Research and Information Association, London
- Brevik, E.C. (2013) Soils and human health: An overview. En E.C. Brevik & L.C. Burgess, eds. *Soils and human health*, pp. 29–58
- Burgess, L.C. (2013) Organic pollutants in soil. *Soils and human health*, pp. 83–106. Boca Raton, Fla, CRC Press.
- Cachada A., Rocha-Santos T., Duarte A.C. (2018) Chapter 1 - Soil and Pollution: An Introduction to the Main Issues. *Soil Pollution*, pp. 1-28. Academic Press.
- Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S et al. (2005) Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. *Env Sci Pollut Res* 12:34-48.
- Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S et al. (2005) Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. *Env Sci Pollut Res* 12:34-48.
- Chaudhry Q, Blom-Zandstra M, Gupta S et al. (2005) Utilising the synergy between plants and rhizosphere microorganisms to enhance breakdown of organic pollutants in the environment. *Env Sci Pollut Res*, 12:34-48.
- Conte, P., Zena, A., Pilidis, G. & Piccolo, A. (2001) Increased retention of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils induced by soil treatment with humic substances. *Environmental Pollution*, 112(1): 27-31. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00101-9)
- EPA - United States Environmental Protection Agency, 2014 <http://www.epa.nsw.gov.au/resources/clm/140323landfarmbpn.pdf>
- Fabiańska, M.J., Kozielska, B., Koniecznyński, J. & Kowalski, A. (2016) Sources of organic pollution in particulate matter and soil of Silesian Agglomeration (Poland): evidence from geochemical markers. *Environmental Geochemistry and Health*, 38(3): 821-842. <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9764-2>
- Frasconi D., Zanolli G., Danko A.S. (2015) In situ aerobic co-metabolism of chlorinated solvents: a review. *J Hazard Mater* 283:382–399. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.09.041
- Gallego J.L.R., Loreda J., Llamas J.F., Vázquez F., Sánchez J. (2001) Bioremediation of diesel-contaminated soils: evaluation of potential in situ techniques by study of bacterial degradation. *Biodegradation*, vol. 12, no. 5, pp. 325–335
- Gidaracos E., Aivalioti M. (2007) Large scale and long-term application of bioslurping: the case of a Greek petroleum refinery site. *J Hazard Mater* 149:574-581. doi:10.1016/j.jhazmat.2007.06.110
- Hobson A.M., Frederickson J., Dise N.B. (2005) CH₄ and N₂O from mechanically turned windrow and vermicomposting systems following in-vessel pre-treatment. *Waste Manag* 25:345-352. doi:10.1016/j.wasman.2005.02.015
- Jordão, C.P., Nascentes, C.C., Cecon, P.R., Fontes, R.L.F., Pereira, J.L. (2006) Heavy Metal Availability in Soil Amended with Composted Urban Solid Wastes. *Environmental Monitoring and Assessment*, 112(1–3): 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-1072-y>
- Kao C.M., Chen C.Y., Chen S.C., Chien H.Y., Chen Y.L. (2008) Application of in situ bioremediation to remediate a petroleum hydrocarbon spill site: field and microbial evaluation. *Chemosphere* 70:1492–1499. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.08.029
- Keyte, I.J., Harrison, R.M. & Lammel, G. (2013) Chemical reactivity and long-range transport potential of polycyclic aromatic hydrocarbons - a review. *Chemical Society Reviews*, 42(24): 9333. <https://doi.org/10.1039/c3cs60147a>
- Kim S., Krajmalnik-Brown R., Kim J.O., Chung J. (2014) Remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated sites by DNA diagnosis-based bioslurping technology. *Sci Total Environ* 497:250–259. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.08.002

- Kjeldsen P. (1999) Behaviour of cyanides in soil and groundwater: a review. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 115, no. 1-4, pp. 279-307
- Kuppusamy S., Thavamani P., Venkateswarlu K., Lee Y.B., Naidu R., Megharaj M. (2017) Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: Technological constraints, emerging trends and future directions. *Chemosphere*, 168: 944–968.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.115>
- Lin, C., Liu, J., Wang, R., Wang, Y., Huang, B. & Pan, X. (2013) Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils of Kunming, China: Concentrations, Distribution, Sources, and Potential Risk. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 22(7): 753–766.
<https://doi.org/10.1080/15320383.2013.768201>
- Mulligan C.N., Yong R.N. (2004) Natural attenuation of contaminated soils. *Environment International*. 4:587-601.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.001>
- Pérez A.P. and Rodríguez Eugenio N. (2018) Status of local soil contamination in Europe: Revision of the indicator "Progress in the management Contaminated Sites in Europe", EUR 29124 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi:10.2760/093804, JRC107508
- Philp J.C., Atlas R.M. (2005) Bioremediation of contaminated soils and aquifers. In: Atlas RM, Philp JC (eds) *Bioremediation: applied microbial solutions for real-world environmental cleanup*. American Society for Microbiology (ASM) Press, Washington, pp 139-236
- Rodríguez-Eugenio N., McLaughlin M. and Pennock D. 2018. *Soil Pollution: a hidden reality*. Rome, FAO. 142 pp.
- Sofo A. (2010) *Tecniche di biorisanamento in situ ed ex situ, con particolare riferimento alla biodegradazione in siti contaminati da idrocarburi*. Editore Adriano Sofo
- Tang CY, Criddle QS, Fu CS, Leckie JO (2007) Effect of flux (trans membrane pressure) and membrane properties on fouling and rejection of reverse osmosis and nano filtration membranes treating perfluorooctane sulfonate containing waste water. *J Environ Sci Tech*. 41:2008-14.
- 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, Institute for Environment and Sustainability - European Commission. Luxembourg: Publications Office of the European Union, doi:10.2788/4658
- Whelan M.J., Coulon F., Hince G., Rayner J., McWatters R., Spedding T., Snape I. Fate and transport of petroleum hydrocarbons in engineered biopiles in polar regions. *Chemosphere*. 2015;131:232-240. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.10.088.
- Zouboulis A.I., Moussas P.A., Nriagu E. (2001) Groundwater and soil pollution: Bioremediation. *Encyclopedia of Environmental Health*, pp. 1037 - 1044.

www.lifebioest.com



ISBN 978-88-907628-6-4



9 788890 762864

