



LIFE15 ENV/IT/000396 - LIFE BIOREST  
LIFE ENVIRONMENT AND RESOURCE EFFICIENCY  
WITH THE CONTRIBUTION OF THE LIFE PROGRAMME  
OF THE EUROPEAN UNION

# LIFE BIOREST

## *Linee guida ambientali per il biorisanamento del suolo contaminato*

LA STRATEGIA PER RESTITUIRE ALLA COMUNITÀ NUOVI SPAZI VERDI





# **Linee guida ambientali per il biorisanamento del suolo contaminato**

*La strategia per restituire  
alla comunità nuovi spazi verdi*

## Note

La presente pubblicazione è stata realizzata dal Consorzio Italbiotec ([www.italbiotec.it](http://www.italbiotec.it)) nell'ambito del Progetto europeo LIFE BIOREST - Bioremediation and Revegetation per ripristinare l'uso pubblico di suoli contaminati ([www.lifebiorest.com](http://www.lifebiorest.com)), di cui è leader in collaborazione con Actygea Srl, Agenzia Regionale dell'Emilia-Romagna per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia ARPAE, Università di Torino, Università Cattolica del Sacro Cuore, Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Spagna) e SATT-SAYENS (Francia).

Qualsiasi riutilizzo del presente documento è consentito previa citazione della fonte e conformità con il messaggio originale.

@ Consorzio Italbiotec, 2020

ISBN: 978-88-907628-6-4

Design: UNDERGROUND way Srl

Print: Graphidea Srl

PDF: Linee guida ambientali per il biorisanamento del suolo contaminato

# Indice

Glossario .....	4
Acronimi .....	5
Sommario .....	6
<b>1. Introduzione</b> .....	<b>7</b>
1.1 Scopo di questa linea guida .....	8
1.2 Quadro legislativo europeo sulla contaminazione del suolo .....	8
1.3 Normativa ambientale per la contaminazione del suolo in Italia .....	11
1.4 Normativa ambientale per la contaminazione del suolo in Spagna .....	12
1.5 Normativa ambientale per la contaminazione del suolo in Francia .....	13
<b>2. Mappatura dei siti inquinati nelle aree test EU del progetto Life Biorest</b> .....	<b>14</b>
<b>3. Tecniche di biorisanamento</b> .....	<b>18</b>
3.1 In situ .....	18
3.2 Ex situ .....	19
<b>4. Il biorisanamento del suolo in tre fasi: il metodo LIFE BIOREST</b> .....	<b>20</b>
4.1 Ottimizzazione del biorisanamento del suolo .....	20
4.2 Produzione di biomassa su scala industriale .....	22
4.3 Biorisanamento In situ e rivegetazione .....	22
<b>5. Raccomandazioni sul biorisanamento</b> .....	<b>24</b>
Riferimenti .....	26

## Glossario

<b>Aerobico</b>	Un ambiente che possiede una pressione parziale di ossigeno simile alle normali condizioni atmosferiche.
<b>Anaerobico</b>	Un ambiente privo di ossigeno.
<b>Biodegradazione</b>	Degradazione delle sostanze organiche da parte dei microrganismi.
<b>Bioemulsionante</b>	Molecole in grado di emulsionare efficacemente due liquidi immiscibili come idrocarburi o altri substrati idrofobici anche a basse concentrazioni ma che, al contrario, sono meno efficaci nel ridurre la tensione.
<b>Biopila</b>	Una pila di terreni contaminati utilizzata per ridurre le concentrazioni di inquinanti, ad es. costituenti del petrolio nei terreni scavati attraverso l'uso della biodegradazione.
<b>Bioreattore</b>	Si riferisce a qualsiasi dispositivo o sistema fabbricato che supporta un ambiente biologicamente attivo. Un bioreattore è un contenitore in cui viene effettuato un processo chimico che coinvolge microrganismi o sostanze biochimicamente attive derivate da tali organismi. Questo processo può essere aerobico o anaerobico.
<b>Biorisanamento</b>	Il processo utilizzato per trattare le matrici contaminate, inclusi acqua, suolo e materiale del sottosuolo, alterando le condizioni ambientali per stimolare la crescita di microrganismi che degradano o trasformano i contaminanti organici.
<b>Bioslurping</b>	Combinazione di elementi di bioventing e pompaggio sotto vuoto del prodotto libero per recuperare il prodotto libero dalle acque sotterranee e del suolo e su terreni biorisanati.
<b>Biosparging</b>	Tecnologia di bonifica In situ che utilizza microrganismi per biodegradare costituenti organici nella zona satura. Aria (o ossigeno) e nutrienti (se necessario) vengono iniettati nella zona classificata.
<b>Biostimolazione</b>	Un processo che comporta la modifica dell'ambiente per stimolare i batteri esistenti in grado di effettuare il biorisanamento. Ad esempio, l'aggiunta di nutrienti, ossigeno, o altri donatori e accettori di elettroni.
<b>Bioconversione</b>	Il processo di stimolazione della biodegradazione naturale in situ dei contaminanti nel suolo, fornendo aria o ossigeno ai microrganismi esistenti nel suolo. In questo processo si utilizzano minime portate d'aria, stimolando la biodegradazione e minimizzando la volatilizzazione.
<b>Ex situ</b>	Diverso dalla posizione originale (es. l'escavazione).
<b>Funghi</b>	Un gruppo di diversi e diffusi organismi eucariotici unicellulari e multicellulari. Molte specie sono ben note per la loro capacità di degradare diversi tipi di inquinanti aromatici e alifatici.
<b>In situ</b>	Sul posto, senza escavazione.
<b>Landfarming</b>	Processo di trattamento ex situ dei rifiuti effettuato nella zona superiore del suolo o nelle cellule di biotattamento. I suoli, i sedimenti o i fanghi contaminati sono trasportati al sito agricolo, incorporati nella superficie del suolo e periodicamente rivoltati (lavorati) per aerare la miscela.
<b>Mycoremediation</b>	Processo di utilizzo di funghi per degradare o sequestrare contaminanti nell'ambiente. Attraverso la stimolazione dell'attività microbica ed enzimatica, il micelio riduce le tossine in situ.
<b>Fitodepurazione</b>	Tattamento di inquinanti o rifiuti (ad es. nel suolo o nelle acque sotterranee contaminate) utilizzando piante verdi che rimuovono, degradano o stabilizzano le sostanze indesiderabili, come i metalli tossici e altri contaminanti.
<b>Surfattante</b>	È possibile aggiungere surfattanti per modificare le proprietà delle interfacce di soluzione, consentendo l'accesso degli idrocarburi ai microrganismi. Questo è indicato come "Surfactant Aided Bioremediation" o "Surfactant Enhanced Bioremediation" (SEB).
<b>Windrow</b>	Tecnica specifica di bonifica ex situ basata sulla rotazione periodica del suolo inquinato per aumentare la biobonifica di base migliorando l'attività di degradazione dei microrganismi

## Acronimi

<b>BTEX</b>	Benzene, Toluene, Etilbenzene e Xilene
<b>CHC</b>	Idrocarburi clorurati
<b>CSIC</b>	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
<b>ELD</b>	Environmental Liability Directive
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization
<b>ICPE</b>	Installation Classée pour la protection de l'environnement
<b>IPCC</b>	Integrated Pollution and Prevention Control Directive
<b>ITPS</b>	Intergovernmental Technical Panel on Soils
<b>MEDDE</b>	Ministero dell'Ecologia, dello Sviluppo Sostenibile e dell'Energia
<b>IPA</b>	Idrocarburi policiclici aromatici
<b>PCB</b>	Bifenili policlorurati
<b>PCDD</b>	Policloro-dibenzo-p-diossine
<b>PCDF</b>	Dibenzofurano policlorurato
<b>PCE</b>	Percloroetilene, tetracloroetilene o tetracloroetilene
<b>PFOS</b>	Acido perfluorooottansolfonico
<b>POP</b>	Inquinanti organici persistenti
<b>SIN</b>	Siti di interesse nazionale
<b>STS</b>	Soil Thematic Strategy
<b>SVOC</b>	Composti organici semi-volatili
<b>TCE</b>	Tricloroetilene, tricloroetene
<b>VOC</b>	Composti organici volatili

## Sommario

L'adozione dei 17 Sustainable Development Goals (SDGs) da parte dei 193 Stati membri delle Nazioni Unite nel 2015, ha contribuito alla definizione di soluzioni integrate per affrontare le principali sfide globali per proteggere il pianeta e garantire un futuro sostenibile. La degradazione del suolo rappresenta una delle principali sfide riconosciute a livello europeo e mondiale e molti degli SDGs si riferiscono alla conservazione e alla protezione del suolo. Dal momento che il suolo è considerato una risorsa non rinnovabile, il mantenimento della sua salute è essenziale per promuovere le funzioni di base nel fornire nutrienti essenziali, acqua, ossigeno e supporto per le piante. Nonostante l'importanza vitale del suolo, il suo uso improprio e la sua gestione, dovuta principalmente alle attività antropiche, ha portato ad alti livelli di inquinamento che possono causare gravi conseguenze. La gestione non sostenibile del suolo ha spinto la Commissione europea nel 2006 ad adottare la Soil Thematic strategy<sup>1</sup> (22 settembre 2006) per proteggere tutti i suoli nell'UE. Nel 2014 la Commissione ha deciso di ritirare la proposta della direttiva sul suolo ma, con l'adozione nel gennaio 2014 del Settimo Programma d'Azione per l'Ambiente (7° EAP), la degradazione del suolo è stata riconosciuta come un problema davvero grave.

Come riferito dal Joint Research Centre della Commissione europea, 650.000 siti contaminati sono stati registrati negli inventari dei 28 Stati membri in cui sono stati effettuati o sono in corso trattamenti di bonifica. Attualmente, 65.500 siti sono stati sottoposti a misure correttive. I principali contaminanti presenti nel suolo sono metalli pesanti, oli minerali, composti organici volatili e idrocarburi policiclici aromatici. Nonostante queste iniziative di alto livello, le politiche volte a prevenire il degrado dei terreni e del suolo rimangono frammentate, basandosi su politiche settoriali.

Questa linea guida ha l'obiettivo di presentare alle autorità locali le raccomandazioni e i risultati raccolti ed elaborati ottenuti attraverso il progetto LIFE BIOREST.

Il progetto LIFE BIOREST è stato concepito per dimostrare l'efficienza e l'economicità di una soluzione innovativa e sostenibile per il biorisanamento di terreni contaminati da idrocarburi, basata sull'uso di ceppi batterici e fungini ad alto potenziale di degradazione, attraverso la valorizzazione dei sottoprodotti dell'industria agroalimentare. L'obiettivo finale del progetto è quello di ripristinare le funzioni ecologiche dei suoli, prevenire la perdita di fertilità, biodiversità e resilienza e recuperare nuove aree verdi per la comunità.

6

Questo documento è stato sviluppato per fornire un modello per l'applicazione di una tecnica di biorisanamento nei comuni interessati da siti contaminati, utilizzando il caso-studio del sito di Fidenza, dove si è svolto il progetto LIFE BIOREST.

La partnership può contare sull'esperienza del Consorzio Italtotec, in qualità di coordinatore del progetto, Actygea Srl, Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia - ARPAE, Università di Torino, Università Cattolica del Sacro Cuore, Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Spagna) e SATT- SAYENS (Francia).

Durante il progetto LIFE BIOREST, le attività di divulgazione a livello europeo hanno svolto un ruolo molto importante, per sostenere la strategia tematica sul suolo e mostrare i vantaggi di un approccio biologico ai legislatori, alle autorità pubbliche, alle industrie e alla comunità.

Per questo motivo, LIFE BIOREST propone un modello per l'applicazione del trattamento di biorisanamento ai siti contaminati, con la possibilità di diffonderlo in tutta Europa.

<sup>1</sup> Soil Thematic Strategy (COM(2012) 46) - 2006: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52012DC0046>



## 1. Introduzione

Come riferito dalla FAO e dall'ITPS, la contaminazione del suolo è la condizione in cui si può osservare la presenza di una sostanza chimica o di una sostanza che è fuori luogo e/o presente a una concentrazione superiore rispetto alla concentrazione normale, con effetti negativi su qualsiasi sostanza o organismo<sup>2</sup>. Poiché spesso non può essere percepito visivamente o direttamente valutato, la contaminazione del suolo è considerata un "pericolo nascosto", causando gravi conseguenze.

Danneggia il metabolismo delle piante, influenzando così la sicurezza alimentare e riducendo le rese delle colture, rendendo le colture non sicure per il consumo. Le fonti primarie di contaminazione del suolo sono antropogeniche, con conseguente accumulo di contaminanti nei suoli che possono raggiungere livelli preoccupanti (Cachada, Rocha-Santos e Duarte, 2018). Il terreno contaminato con elementi pericolosi, come i metalli pesanti e i prodotti chimici organici come i PCB (bifenili policlorurati), gli IPA (idrocarburi policiclici aromatici) o i prodotti farmaceutici, contribuiscono a provocare gravi rischi per la salute umana. La diversità dei contaminanti è soggetta a costante evoluzione a causa degli sviluppi agrochimici e industriali e la trasformazione dei composti organici nei terreni in metaboliti secondari attraverso l'attività biologica che rendono l'identificazione dei contaminanti un processo difficile e costoso. Inoltre, le proprietà fisiche del suolo come struttura, texture, disposizione delle particelle, porosità, ecc. influenzano anche la mobilità, la biodisponibilità e il tempo in cui i contaminanti rimangono presenti nel suolo.

Come riportato dal Joint Research Centre della Commissione europea (Van Liedekerke et al., 2014), circa il 39% e il 29% dei contaminanti nei suoli europei sono metalli pesanti e oli minerali, rispettivamente (Fig. 1), in seguito al trasporto, stoccaggio e raffinazione del petrolio o eventuali incidenti (Gallego et al., 2001). Il benzene, il toluene, l'etilbenzene e lo xilene (BTEX) costituiscono la categoria dei composti organici volatili (VOCs), presenti nei prodotti derivati dal petrolio come la benzina e rappresentano l'11% dei contaminanti del suolo. Le sostanze BTEX hanno un'elevata mobilità perché sono solubili in acqua e volatili. Gli idrocarburi clorurati (CHCs) sono utilizzati principalmente per la produzione di solventi sintetici e insetticidi. Poiché sono in grado di bioaccumularsi, possono anche essere trovati nei tessuti umani. Essi rappresentano il 9% dei contaminanti del suolo. La fonte più comune di contaminazione da cianuro sono gli ex siti di lavoro a gas.

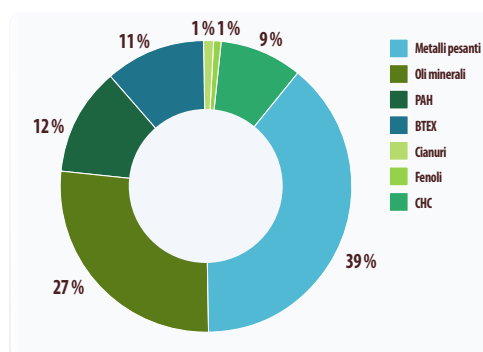


Figura 1. Panoramica dei contaminanti che colpiscono i suoli europei

Tuttavia, la contaminazione da cianuro è anche associata a impianti di galvanoplastica, impianti di stoccaggio di sale stradale, e miniere d'oro (Kjeldsen, 1999) e, insieme agli inquinanti fenolici associati all'industria dello scisto bituminoso, rappresentano il 2% dei contaminanti del suolo. Gli idrocarburi policiclici aromatici (PHA), che rappresentano il 12% dei contaminanti del suolo, sono inquinanti ambientali onnipresenti generati principalmente durante la combustione incompleta di materiali organici (ad es. carbone, petrolio, benzina e legno). I PHA si accumulano nei suoli a causa della loro persistenza e idrofobicità; tendono ad essere trattenuti nel suolo per lunghi periodi. Per questo motivo, la maggior parte degli PHA sono componenti di inquinanti organici persistenti (POP) e sono diffusi nell'aria, nell'acqua, nei suoli e nei sedimenti (Lin et al., 2013). Sebbene predominino le emissioni di PHA derivanti da attività antropiche, alcuni PHA presenti nell'ambiente provengono da fonti naturali quali bruciature a cielo aperto, perdite naturali o infiltrazioni di petrolio o depositi di carbone e attività vulcaniche. Le fonti antropogeniche primarie di PHA comprendono riscaldamento residenziale, impianti di gassificazione e liquefazione del carbone, produzione di asfalto, attività connesse nell'industria petrolifera e impianti di scarico. Le emissioni provenienti dal traffico e la combustione di combustibili fossili sono le principali fonti identificate di PHA nelle aree urbane (Fabińska et al., 2016; Keyte et al., 2013).

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

### *1.1 Scopo di questa linea guida*

Le economie industrializzate e i paesi in via di sviluppo sono colpiti dalla contaminazione del suolo derivante da attività estrattive e industriali, da uno smaltimento improprio dei rifiuti e da un'agricoltura meccanizzata che potrebbe avere ripercussioni sulla produttività delle colture e sulla salute umana. Poiché la contaminazione del suolo è una questione importante e, talvolta, sottovalutata, la presente Guida mira a presentare alle autorità locali le raccomandazioni e i risultati raccolti e sviluppati ottenuti attraverso il progetto LIFE BIOREST. Il progetto è stato concepito per dimostrare l'efficienza e l'economicità di una soluzione innovativa e sostenibile per il biorisanamento di terreni contaminati da idrocarburi, basata sull'uso di ceppi batterici e fungini ad alto potenziale di degradazione, attraverso la valorizzazione dei sottoprodotti dell'industria agroalimentare.

Le informazioni contenute nel presente documento non sono state pensate per fornire orientamenti dettagliati sulla progettazione di un programma di trattamento di biorisanamento, ma mirano a fornire un modello per l'applicazione di una tecnica di biorisanamento nei comuni interessati da siti contaminati, utilizzando il caso studio del sito di Fidenza, dove si è svolto il progetto LIFE BIOREST.

Inoltre, l'orientamento mira a sostenere il partenariato pubblico-privato e a mostrare i vantaggi e gli svantaggi della tecnica impiantata che può essere presentata alle industrie, agli enti pubblici, ai governi nazionali e alla comunità.

È stato analizzato il quadro legislativo europeo in materia di contaminazione del suolo al fine di confrontare l'adeguamento legislativo dei tre paesi in cui è stato attuato LIFE BIOREST (Italia, Spagna e Francia), con le direttive europee.

Come analizzato in modo approfondito nel documento, nei tre paesi dell'UE, la contaminazione da idrocarburi è la più frequente in termini di contaminazione e di necessità di risanamento.

Questi contaminanti, rispetto agli oligoelementi, possono essere degradati da microrganismi e piante. Per questa regione, LIFE BIOREST potrebbe rappresentare un modello per l'applicazione del trattamento di biorisanamento ai siti contaminati, con il potenziale per essere diffuso in tutta Europa.

**8**

### *1.2 Quadro legislativo europeo sulla contaminazione del suolo*

I requisiti giuridici per la protezione generale del suolo non sono stati concordati a livello di Unione europea (UE) e, attualmente, solo pochi Stati membri dell'UE dispongono di una legislazione specifica sulla protezione del suolo.

Pertanto, il suolo non è soggetto a una serie completa e coerente di norme all'interno dell'UE. Le attuali politiche dell'UE in settori quali l'agricoltura, l'acqua, i rifiuti, le sostanze chimiche e la prevenzione dell'inquinamento industriale contribuiscono indirettamente alla protezione dei suoli, ma non sono sufficienti a garantire un livello adeguato di protezione per tutti i suoli presenti in Europa. Poiché il suolo è utilizzato in modo non sostenibile, nel 2006 la Commissione europea ha adottato la cosiddetta Soil Thematic Strategy<sup>3</sup> (22 settembre 2006) con l'obiettivo di proteggere tutti i suoli dell'UE. Nel 2014 la Commissione ha deciso di ritirare la proposta di direttiva quadro sul suolo ma, con l'adozione del Settimo Programma d'Azione per l'ambiente<sup>4</sup> nel gennaio 2014, il degrado del suolo è stato riconosciuto come una questione grave. La relazione indica che entro il 2020 i suoli dovrebbero essere gestiti in modo sostenibile in tutti gli Stati membri dell'UE, che il suolo dovrebbe essere adeguatamente protetto e che la bonifica dei siti contaminati dovrebbe essere ben sviluppata. Diverse direttive europee prevedono controlli indiretti sulla contaminazione del suolo e consulenza per la sua gestione, come la direttiva integrata sull'inquinamento e la prevenzione (IPPC 2008/1/ CE), la direttiva quadro sui rifiuti (2008/98/ CE) e la direttiva sulle discariche (99/31/CE). Inoltre, la Direttiva sulle Emissioni Industriali (IED 2010/75/ UE), che ha abrogato la direttiva IPPC nel 2014, fornisce un quadro normativo per prevenire le emissioni nel suolo provenienti dai grandi impianti industriali che riversano nel suolo.

La tabella che segue rappresenta una panoramica degli obiettivi nazionali esistenti. Questi includono una varietà di forme, come ad esempio la ridefinizione dei tempi di bonifica della contaminazione storica o specifiche fasi di gestione o elenchi di siti nazionali prioritari. In totale, 17 paesi segnalano obiettivi politici ufficiali per la gestione dei siti contaminati.

<sup>3</sup> Soil Thematic Strategy (COM(2012) 46) - 2006: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52012DC0046>

<sup>4</sup> 7° EAP – 2013: <https://ec.europa.eu/environment/action-programme/>

**Tabella 1.** Panoramica delle politiche nazionali e delle direttive europee riguardanti in modo specifico la contaminazione del suolo (fonte: Status of local soil contamination in Europe - JRC Technical Report, 2018).

1986	Direttiva sui fanghi di depurazione <sup>5</sup> Regolamentazione dell'uso dei fanghi di depurazione in agricoltura al fine di prevenire effetti nocivi sul suolo e stabilire valori limite per i metalli pesanti nei suoli
1987	<b>Paesi Bassi</b> - Azione sulla protezione del suolo
1988	
1989	<b>Austria</b> - Legge sulla bonifica dei suoli contaminati
1990	
1991	Direttiva Nitrati <sup>6</sup> Protezione delle acque superficiali e sotterranee dall'inquinamento da nitrati provenienti da fonti agricole
1992	Direttiva habitat <sup>7</sup> Conseguimento di uno stato di conservazione favorevole in tutta l'area naturale all'interno dell'UE e riduzione dell'inquinamento degli habitat, riducendo così la contaminazione del suolo
1993	
1994	<b>Finlandia</b> - Legge sui rifiuti
1995	<b>Estonia</b> - Gestione dei siti contaminati <b>Belgio (Fiandre)</b> - Decreto sulla bonifica del suolo e la protezione del suolo <b>Svizzera</b> - Environmental Protection Act (EPA)
1996	<b>Ungheria</b> - Decisione No. 2205/1996 (VII.24) adozione del programma nazionale di risanamento ambientale (prima di entrare a far parte dell'UE) <b>Slovenia</b> - Decreto sui valori limite, le soglie di allarme e i livelli critici di sostanze pericolose nel suolo
1997	
1998	<b>Germania</b> - Legge federale sulla protezione del suolo
1999	Direttiva sulle discariche <sup>8</sup> Prevenzione/riduzione degli effetti negativi dell'interramento dei rifiuti sull'ambiente durante l'intero ciclo di vita della discarica. <b>Danimarca</b> - Azione sulla contaminazione del suolo <b>Italia</b> - Regolamento che stabilisce criteri, procedure e metodi per la sicurezza, la bonifica e il ripristino dei siti inquinate <b>Lussemburgo</b> - Legge sugli stabilimenti classificati
2000	Direttiva Quadro sulle acque <sup>9</sup> Prevenzione e riduzione dell'inquinamento; sono elencati i principali inquinanti e sono fissate le soglie <b>Francia</b> - Codice ambientale <b>Regno Unito</b> - Regime dei terreni contaminati (parte 2A della legge sulla protezione ambientale, 1990) <b>Finlandia</b> - Legge sulla protezione ambientale

<sup>5</sup> Council Directive 86/278/EEC on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31986L0278>

<sup>6</sup> Council Directive 91/676/EEC concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1561542776070&uri=CELEX:01991L0676-20081211>

<sup>7</sup> Council Directive 92/43/EEC on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31992L0043>

<sup>8</sup> Council Directive 1999/31/EC on the landfill of waste:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>

<sup>9</sup> Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>

2001	Direttiva sulla valutazione ambientale strategica <sup>10</sup> Riduzione dell'impatto ambientale di piani e programmi nell'ambiente, compresi i suoli <b>Lettonia</b> - Legge sull'inquinamento
2002 2003	<b>Cipro</b> - Legge sul controllo dell'inquinamento idrico e del suolo
2004	Direttiva sulla responsabilità ambientale (ELD) <sup>11</sup> Istituzione di un quadro basato sul principio chi inquina paga (PPP) per prevenire e porre rimedio ai danni ambientali al suolo, agli ecosistemi e alle risorse idriche, qualora la salute umana ne risenta <b>Belgio (Bruxelles-Capitale)</b> - Ordinanza sulla gestione e la pulizia dei terreni <b>Belgio (Vallonia)</b> - Decreto sulla gestione dei suoli <b>Slovacchia</b> - Legge sulla protezione del suolo <b>Svezia</b> - Regolamento sul risarcimento dei danni da contaminazione e aiuti di Stato per il risanamento (attuazione codice ambientale svedese del 1999)
2005	<b>Ungheria</b> - Decreto relativo alle norme in materia di indagini di screening dei siti di bonifica <b>Spagna</b> - Decreto sulla definizione delle attività e dei criteri inquinanti del suolo
2006	Strategia tematica per la protezione del suolo (STS) <sup>12</sup> Protezione dei suoli prevenendo la degradazione del suolo e ripristinando i suoli degradati, compresi quelli contaminati. Direttiva sulle industrie estrattive per la gestione dei rifiuti <sup>13</sup> Introduzione di misure per prevenire o ridurre al minimo gli effetti negativi sull'ambiente e sulla salute derivanti dalla gestione dei rifiuti delle industrie estrattive <b>Irlanda</b> - Azione sull'energia. Siti minerari storici - inventario e classificazione dei rischi <b>Italia</b> - Codice ambientale <b>Lituania</b> - Regolamenti sulle procedure di trattamento dei siti contaminati
2007	<b>Bulgaria</b> - Azione sul suolo <b>Finlandia</b> - Decreto governativo sulla valutazione della contaminazione del suolo e delle esigenze di bonifica <b>Romania</b> - Decreto sul risanamento <b>Slovacchia</b> - Azione per la prevenzione e la riparazione del danno ambientale
2008	Direttiva Quadro sui rifiuti <sup>14</sup> Fornire le basi per la bonifica dei siti di smaltimento dei rifiuti contaminati storici <b>Repubblica Ceca</b> - Legge sulla prevenzione del danno ambientale e sua rettifica
2009	Direttiva quadro sui pesticidi <sup>15</sup> Prevenzione della contaminazione dell'ambiente da parte dei pesticidi. <b>Belgio (Bruxelles-Capitale)</b> - Decreto sulla bonifica e la gestione del suolo del 5 marzo 2009 modificato il 23 giugno 2017
2010	Direttiva sulle emissioni industriali <sup>16</sup> Prevenzione, riduzione ed eliminazione (ove possibile) dell'inquinamento derivante dalle attività industriali. Gli Stati membri si impegnano a istituire inventari delle emissioni di biossido di zolfo (SO <sub>2</sub> ), ossidi di azoto (NO <sub>x</sub> ) e polveri e redigere una relazione di riferimento per stabilire lo stato di contaminazione del suolo e delle acque sotterranee. <b>Serbia</b> - Regolamento relativo al programma di monitoraggio sistematico della qualità del suolo, indicatori per la valutazione della degradazione del suolo e metodologia per la preparazione del programma di bonifica

<sup>10</sup> Directive 2001/42/EC on the assessment of the effects of certain plans and programmes on the environment:

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

<sup>11</sup> Directive 2004/35/CE on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128120>

<sup>12</sup> Thematic Strategy for Soil Protection [SEC(2006)620] [SEC(2006)1165]:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52006DC0231>

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

<sup>14</sup> Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098>

<sup>15</sup> Directive 2009/128/EC establishing a framework for Community action to achieve the sustainable use of pesticides:

[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/627113/EPRS\\_STU\(2018\)627113\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/627113/EPRS_STU(2018)627113_EN.pdf)

<sup>16</sup> Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control):

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075>

2011	<p>Direttiva di valutazione di impatto ambientale<sup>17</sup> Valutazione dell'impatto ambientale dei progetti pubblici e privati che possono avere effetti significativi sull'ambiente.</p> <p>Strategia sulla biodiversità<sup>18</sup> Ridurre la perdita di biodiversità e di servizi ecosistemici nell'UE e contribuire a fermare il declino globale della biodiversità entro il 2020, promuovendo terreni sani.</p> <p><b>Spagna</b> - Legge sui rifiuti e i terreni contaminati</p>
2012	<b>Malta</b> - Politica nazionale sull'ambiente
2013	
2014	<b>Croazia</b> - Ordinanza sulla protezione dei terreni agricoli dall'inquinamento
2015	<b>Serbia</b> - Legge sulla protezione del suolo
2016	<p>Regolamentazione sul mercurio<sup>19</sup> Identificazione e valutazione dei siti contaminati dal mercurio, compreso un inventario dei siti contaminati e l'inclusione di un elenco dei principali composti del mercurio.</p>
2017	<p><b>Grecia</b> - Legge per la protezione e l'uso sostenibile del suolo (in preparazione)</p> <p><b>Polonia</b> - Valutazione della contaminazione della superficie del terreno (in fase di preparazione)</p> <p><b>Portogallo</b> - Prevenzione della contaminazione e regime giuridico di risanamento del suolo (in preparazione)</p> <p><b>Slovenia</b> - Decreto e norme sullo stato del suolo (in preparazione)</p>

### 1.3 Normativa ambientale per la contaminazione del suolo in Italia

In Italia, la contaminazione del suolo rappresenta un problema diffuso a causa della presenza di aree industriali, discariche, aree commerciali ed estrattive. Nonostante la gravità dell'incidenza e dei danni alla salute evidenziati dalla letteratura scientifica (Brevik, 2013; Burgess, 2013; Jordão et al., 2006), la questione della contaminazione del suolo non sembra essere percepita dall'opinione pubblica allo stesso modo dell'inquinamento dell'aria e dell'acqua, anche se indirettamente collegato a questi. La ridotta percezione di un'emergenza ambientale nell'opinione pubblica è confermata dal rapporto della FAO (Rodríguez-Eugenio et al. 2018), che definisce l'inquinamento del suolo come una "realtà nascosta", essendo più difficile da identificare, misurare e studiare nel corso degli anni.

L'evoluzione delle disposizioni giuridiche, in materia di riduzione e trattamento della contaminazione, risente di questa diversa percezione. Il primo passo contro la contaminazione ambientale è incluso nella legge n. 615/1966<sup>20</sup>, concernente "Misure contro l'inquinamento atmosferico", finalizzata a regolare e ridurre le emissioni di fumi, gas, polveri e odori provenienti dalle industrie e dai mezzi di trasporto, riconoscere i danni indiretti alla salute umana.

Con l'introduzione della Legge n. 319/1976<sup>21</sup> (allora abrogata dal Decreto Legislativo n. 152/2006<sup>22</sup>), sono state definite le leggi per la protezione delle acque dall'inquinamento, rappresentando un punto di partenza per una maggiore consapevolezza delle questioni ambientali che ha portato alla creazione di uno specifico Ministero della politica ambientale. Il ministero dell'Ambiente, della tutela del territorio e del mare, istituito nel 1986 con la misura n. 349<sup>23</sup>, è incaricato di garantire che la promozione, la conservazione e il recupero delle condizioni ambientali siano conformi agli interessi fondamentali della collettività e della qualità della vita, nonché la conservazione e la valorizzazione del patrimonio naturale nazionale e la difesa delle risorse naturali dall'inquinamento (art.1).

L'istituzione di tale organo di governo coincide con la definizione di un quadro politico per il monitoraggio territoriale costante in materia di inquinamento ambientale.

<sup>17</sup> Directive 2004/35/CE on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32004L0035>

<sup>18</sup> Communication from the Commission {COM/2011/244 final} Our life insurance, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020

<https://ec.europa.eu/environment/nature/info/pubs/docs/brochures/2020%20Biod%20brochure%20final%20lowres.pdf>

<sup>19</sup> Regulation (EU) 2017/852 on mercury, and repealing Regulation (EC) No 1102/2008:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32017R0852>

<sup>20</sup> [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1966-08-13&atto.codiceRedazionale=066U0615&elenco30giorni=false](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=1966-08-13&atto.codiceRedazionale=066U0615&elenco30giorni=false)

<sup>21</sup> [http://www.reteambiente.it/repository/normativa/761\\_legge\\_merli.pdf](http://www.reteambiente.it/repository/normativa/761_legge_merli.pdf)

<sup>22</sup> [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171)

<sup>23</sup> [https://www.minambiente.it/sites/default/files/legge\\_08\\_07\\_1986\\_349.pdf](https://www.minambiente.it/sites/default/files/legge_08_07_1986_349.pdf)

Con la Legge n. 22/1997<sup>24</sup> (abrogata anche dal Decreto Legislativo 152/2006), le Direttive UE sui rifiuti sono state accomunate, introducendo il concetto di rifiuto come risorsa.

La prima legge riguardante la bonifica ambientale del suolo è il decreto ministeriale n. 471/1999<sup>25</sup>, che definisce i criteri e le procedure per l'identificazione, la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati.

Il decreto legislativo n. 152/2006<sup>26</sup>, in materia di Legislazione Ambientale, ha sostituito il precedente decreto n. 471/1999. I nuovi regolamenti ridefiniscono le procedure amministrative che hanno l'obiettivo primario di promuovere un elevato livello di qualità della vita, da realizzare mediante la protezione e il miglioramento delle condizioni ambientali e l'uso razionale delle risorse naturali (art. 2).

Nel D.Lgs 152/2006, per sito contaminato si intende un sito in cui vengono superati i valori delle concentrazioni di soglia di rischio, determinati mediante l'applicazione di una procedura di analisi del rischio.

Questa definizione si riferisce a tutte le aree in cui, a causa di attività umane in corso o concluse, è stato stabilito un livello alterato di caratteristiche del suolo, del sottosuolo e delle acque sotterranee, rappresentando così un rischio per la salute umana. Il Decreto Legislativo 152/2006 specifica la tipologia dei terreni contaminati presenti sul territorio e le procedure amministrative relative alla loro identificazione e gestione.

### *1.4 Normativa ambientale per la contaminazione del suolo in Spagna*

In Spagna, i principali regolamenti che disciplinano la contaminazione del suolo sono inclusi nella legge n. 22/2011<sup>27</sup> sui rifiuti e terreni contaminati, e il Decreto spagnolo del suolo n. 9/2005<sup>28</sup> sulla creazione di un elenco di attività potenzialmente inquinanti per il suolo e dei criteri per la dichiarazione dei suoli contaminate.

Il decreto spagnolo sul suolo presenta un quadro normativo per la definizione di attività industriali potenzialmente contaminanti e indica la metodologia per la determinazione di parametri generici di riferimento dei contaminanti, derivati principalmente dall'applicazione dell'analisi del rischio. Il decreto contiene un elenco di parametri di riferimento per 60 sostanze prioritarie. Essa considera le diversità ecologiche e geologiche dei suoli nelle diverse regioni spagnole, sfidando un approccio flessibile che consente di raggiungere livelli più profondi.

12

Nel Decreto si prendono in considerazione 3 diverse tipologie di utilizzo del suolo: industriale, residenziale e naturale, considerando gli obiettivi umani e, per la terza tipologia, anche quelli ecosistemici.

La legge 22/2011 sui rifiuti e i suoli contaminati prevede l'obbligo di istituire un registro dei siti sottoposti a prescrizione. Ne sono responsabili le autorità regionali. Altre norme riguardano l'inquinamento del suolo da diverse prospettive, come il regio decreto legislativo n. 1/2016<sup>29</sup>, sulla prevenzione e la riduzione integrate del l'inquinamento e la legge n. 26/2007<sup>30</sup> sulla responsabilità ambientale.

La dichiarazione dei terreni come inquinati, basata sulla nozione di rischio (per la salute umana o per l'ambiente) e sugli usi del suolo, è effettuata dalle autorità regionali sulla base dei criteri stabiliti nel decreto n. 9/2005, che distingue tra terreni industriali, usi urbani o di altro tipo del terreno.

Le persone obbligate a ripulire il sito sono gli inquinatori, il proprietario del sito inquinato ed eventualmente il possessore.

La dichiarazione di contaminazione del suolo deve essere iscritta nel registro delle proprietà e può essere rimossa solo se le autorità regionali confermano che il risanamento è stato effettuato correttamente e che il rischio per la salute umana o per l'ambiente è assente.

<sup>24</sup> [http://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1997\\_0022.htm](http://www.bosettiegatti.eu/info/norme/statali/1997_0022.htm)

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

<sup>26</sup> [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazione=006G0171](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazione=006G0171)

<sup>27</sup> Waste and Contaminated Soils

<https://www.global-regulation.com/translation/spain/1436517/law-22-2011%252c-28-july%252c-waste-and-contaminated-soils.html>

<sup>28</sup> <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>

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

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

### 1.5 Normativa ambientale per la contaminazione del suolo in Francia

L'unica legge per la gestione e la bonifica della contaminazione del suolo in Francia è la legge n. 19/1976<sup>31</sup>, relativa agli impianti classificati per la protezione dell'ambiente (legge ICPE), che è stata assimilata alla legge sull'ambiente del 21 settembre 2000<sup>32</sup> e dalla direttiva 2004/35/CE<sup>33</sup> sulla responsabilità ambientale in materia di prevenzione e riparazione del danno ambientale (direttiva sulla responsabilità ambientale). Quest'ultima è stata recepita in Francia dalla legge sulla responsabilità ambientale e dall'adeguamento di varie disposizioni della legge ambientale dell'UE del 2008<sup>34</sup>, relativa ai danni ambientali causati al suolo che presentano un rischio per la salute umana.

In materia di legislazione ICPE, è stata introdotta una strategia nazionale che comprende l'inventario dei siti contaminati e linee guida per la loro caratterizzazione. Questa legge definisce le attività produttive, come industrie, laboratori, cantieri, che potrebbero avere svantaggi per la salute pubblica, l'agricoltura, l'ambiente e la protezione del paesaggio.

La politica nazionale e le misure da applicare sono definite da due documenti chiave rappresentati dalle circolari del ministero dell'Ambiente del dicembre 1993 e del dicembre 1999<sup>35</sup>, che definiscono le caratteristiche principali di una politica nazionale per i siti contaminati. In particolare, la circolare del 1999 indica i principi per l'individuazione degli obiettivi di bonifica, sulla base di un'analisi dettagliata del rischio e di una valutazione tecnico-economica delle alternative di intervento.

Il Ministero dell'Ecologia, dello Sviluppo Sostenibile e dell'Energia (MEDDE) è responsabile della definizione della politica pubblica in materia di terreni contaminati, sia che la contaminazione sia naturale o generata dall'uomo e che si tratti o meno di una politica ICPE.

<sup>31</sup> [https://aida.ineris.fr/consultation\\_document/2193](https://aida.ineris.fr/consultation_document/2193)

<sup>32</sup> [http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy\\_and\\_regulatory&T=France#targetText=France%20has%20no%20specific%20legislation,%2C%201977%20\(see%20below\)](http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy_and_regulatory&T=France#targetText=France%20has%20no%20specific%20legislation,%2C%201977%20(see%20below)).

<sup>33</sup> Directive 2004/35/CE on environmental liability with regard to the prevention and remedying of environmental damage:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM%3A128120>

<sup>34</sup> [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%2F99%2FEC%20on,adopted%20on%2028%20October%202008](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%2F99%2FEC%20on,adopted%20on%2028%20October%202008).

<sup>35</sup> [http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy\\_and\\_regulatory&T=France](http://www.eugris.info/FurtherDescription.asp?e=183&Ca=1&Cy=3&DocID=B&DocTitle=Policy_and_regulatory&T=France)

## 2. Mappatura dei siti inquinati nelle aree test EU del progetto LIFE BIOREST

I risultati del progetto LIFE BIOREST rappresentano un'istantanea dell'estensione dei siti inquinati in Italia, Spagna e Francia dove il progetto è stato attuato. È stata evidenziata una situazione frammentaria, in particolare per quanto riguarda l'armonizzazione dei criteri e delle informazioni disponibili nei registri nazionali e regionali.

I siti inquinati più rilevanti in Italia sono i Siti di Interesse Nazionale (Siti di Interesse Nazionale, SIN), classificati in base al grado di contaminazione ambientale, rischio sanitario e allarme sociale (DM 471/1999<sup>36</sup>). Queste aree sono definite dal Decreto Legislativo 152/2006<sup>37</sup>, che indica le caratteristiche del sito, la concentrazione e i pericoli degli inquinanti presenti e l'impatto ambientale sia a livello sanitario che ambientale. Il programma nazionale di bonifica, istituito dal Ministero dell'Ambiente, fornisce periodicamente un quadro aggiornato sullo stato di contaminazione dei SINs. Attualmente sono stati classificati 41 SINs (aggiornati al 2018), compreso il sito di Fidenza dove si svolgono le attività di test del progetto LIFE BIOREST.

I SINs comprendono siti industriali dismessi, in cui sono in corso attività di conversione, soggetti a incidenti che comportano la fuoriuscita di inquinanti chimici e aree soggette allo smaltimento incontrollato anche di rifiuti pericolosi. Quasi tutte le 20 regioni italiane ospitano almeno un SIN, ad eccezione del Molise. Il suolo contaminato occupa un'area complessiva di 51.403,5 ettari, equivalente a circa tre volte l'area della Città Metropolitana di Milano. I piani di caratterizzazione hanno finora interessato il 57,3% delle aree perimetrali totali (29.453,9 ettari), e nel 94,7% dei casi sono stati attuati. Ci sono 1.574,5 ettari colpiti da misure di prevenzione, circa il 3% del perimetro totale, dove vengono applicate soluzioni per ridurre l'impatto delle sostanze tossiche sull'ambiente e sulla salute umana.

In sintesi, le attività di bonifica hanno finora interessato solo il 12,6% del totale delle aree SIN (6.513,1 ettari, secondo l'ultima analisi nazionale di giugno 2018).

**Tabella 2.** Stato dell'arte delle aree per la matrice del suolo per quanto riguarda 41 SINs, i numeri sono riferiti alle aree in ettari (ha), % di bonifica sono calcolati sulle superfici totali (dati elaborati dal rapporto SIN del Ministero dell'Ambiente, 2018<sup>38</sup>).

14

SIN	% biorisanamento 2018	Misure preventive	Progetti di bonifica presentati	Progetti di bonifica approvati	Aree biorisanate	Aree totali
1 - Venezia	15%	0	1.146	1.055	241	1.618
2 - Napoli Orientale	6%	89	174	127	50	834
3 - Gela	0%	0	120	101	4	795
4 - Priolo	8%	11	1.000	733	449	5.814
5 - Manfredonia	18%	8	67	42	38	216
6 - Brindisi	6%	0	723	692	378	5.851
7 - Taranto	8%	12	341	335	347	4.383
8 - Cengio e Saliceto	0%	0	77	77	0	77
9 - Piombino	45%	0	239	121	422	931
10 - Massa e Carrara	5%	0	46	29	5	116
11 - Casal Monferrato	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
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
17 - Tito	4%	25	25	25	13	315
18 - Crotone-Cassano-Cerchiara	13%	7	150	135	69	544

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

<sup>37</sup> [https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie\\_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171](https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2006-04-14&atto.codiceRedazionale=006G0171)

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



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 Iglesiente Guspinese	8%	117	1.029	922	904	19.751
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 - Trento Nord	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 - Laghi di Mantova	3%	0	188	63	19	614
35 - Orbetello	0%	0	0	0	0	204
36 - Porto Torres	12%	0	944	157	226	1.874
37 - Val Basento	88%	96	30	23	2.925	3.330
38 - Milazzo	20%	59	110	110	111	549
39 - Bussi sul Tirino	1%	50	12	0	2	232
40 - Bacino sul fiume Sacco	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
41 - Bologna Officina Grandi Riparazioni ETR	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>TOTALE</b>	<b>13%</b>	<b>1.574,5</b>	<b>7.791,8</b>	<b>5.478,8</b>	<b>6.513,1</b>	<b>51.403,5</b>

Le principali cause di contaminazione nel 66% dei SINs sono legate alle attività industriali (46%) ed ex aree industriali vietate (20%). Il 12% dei SINs è costituito da ex aree estrattive di amianto: Casal Monferrato, Broni, Emarese e la Baliano Amiantifera in Piemonte, la più grande miniera di amianto in Europa ad alto rischio di insorgenza di malattie oncologiche polmonari. Il 10% di SINs è rappresentato da aree portuali (Taranto e Venezia, Falconara Marittima e Trieste) fortemente inquinate da metalli pesanti e idrocarburi. Sono comprese anche le discariche (5%) e le aree di complessa attività industriale e mineraria (7%) che presentano una varietà di contaminanti (Val Basento, Crotone-Cassano-Cerchiara).

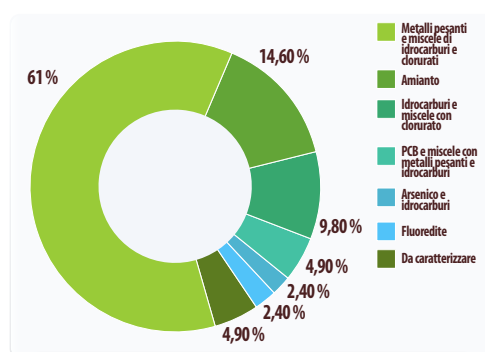


Figura 2. Contaminazione dei SINs per tipologia di inquinanti prevalenti.

L'analisi chimica dei SINs ha mostrato una predominanza di metalli esogeni, composti clorurati, idrocarburi, pesticidi ed erbicidi che rappresentano insieme il 61% dei contaminanti totali (Fig. 2). Gli inquinanti più diffusi sono l'amianto (nel 14,6% dei SIN), gli idrocarburi (9,8%), i policlorobifenili (4,9%), l'arsenico (2,4%) e la fluoredite (2,4%). Gli idrocarburi sono presenti nel 53,7% dei Sins. I siti di Gela, Fidenza, Laghi di Mantova, Val Basento e Sulcis Iglesiente Guspinese presentano una notevole contaminazione da idrocarburi. Si tratta di dati trattati a partire dalla valutazione delle fonti di inquinamento rilevate nelle relazioni tecniche di caratterizzazione effettuate presso i SIN e dalle informazioni messe a disposizione dagli uffici anagrafici regionali.

Per quanto riguarda la mappatura dei suoli contaminati in Spagna, la tabella di seguito mostra il numero totale dei siti contaminati nella Regione dell'Andalusia, divisi per provincie: Cordova è il più grande (5.676 siti), seguita da Siviglia (4.986) e Granada (4.238).

Tabella 3. Numero totale di siti contaminati censiti nelle 8 province dell'Andalusia.  
(Dati da <http://descargasrediam.cica.es/>)

	Almería	Cadice	Cordova	Granada	Huelva	Jaén	Malaga	Siviglia	TOTALE
Numero siti censiti	2.841	2.404	5.676	4.238	1.580	2.540	4.712	4.986	29.277

Mancano informazioni dettagliate sulla tipologia dell'inquinamento. Tuttavia, una mappa a livello nazionale del Ministero dell'Energia (Fig. 3) mostra un'ampia distribuzione di aree con concessioni per gli idrocarburi. La mappa mostra infatti diversi punti caldi per le attività legate agli idrocarburi in Spagna, con una concentrazione molto elevata di aree in Andalusia. Questo risultato è particolarmente importante per le attività del progetto LIFE BIOREST, data l'ubicazione delle unità CSIC in questa regione, che può consentire una migliore diffusione dei protocolli da sviluppare nelle fasi successive del Progetto.

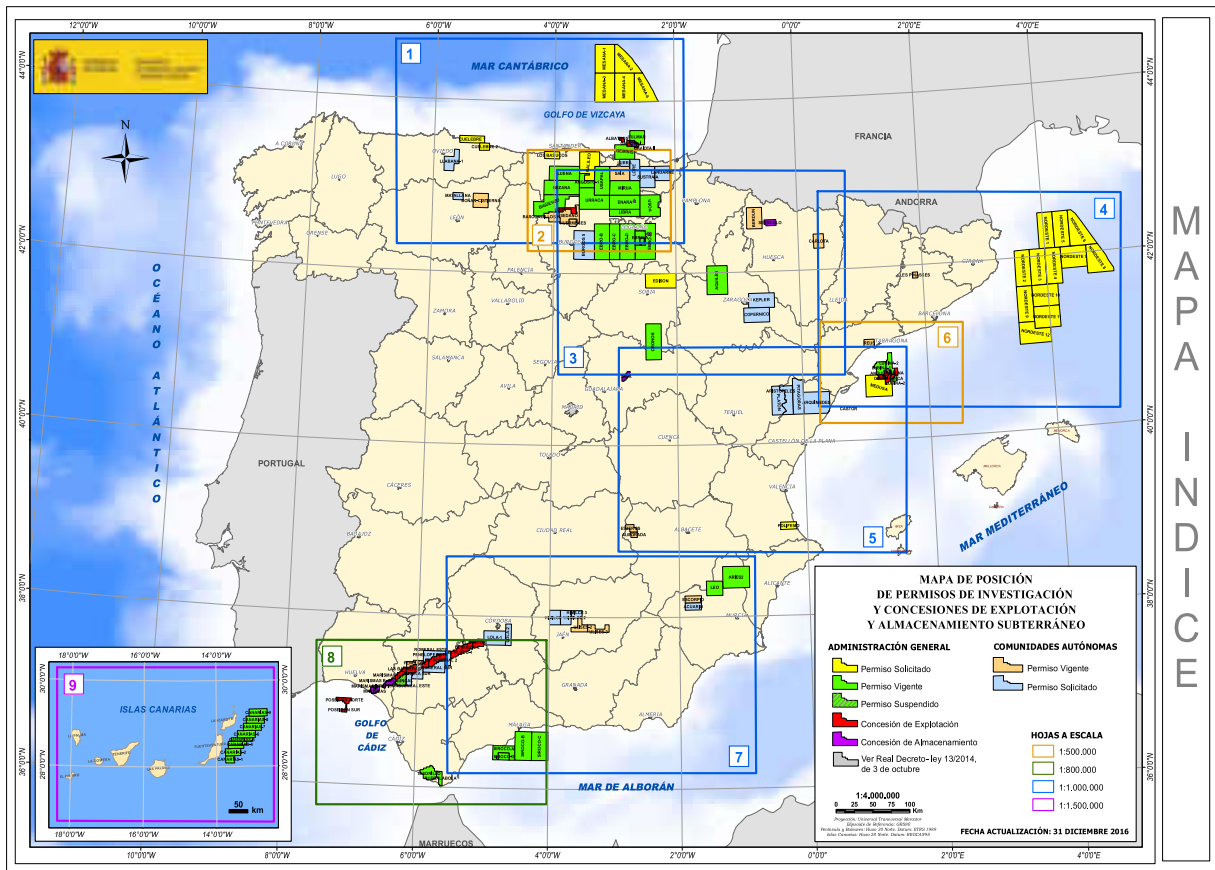


Figura 3. Mappa della Spagna che mostra la concessione totale e le licenze per gli idrocarburi.

Un inventario della contaminazione del suolo in Francia registra 4.142 siti (aggiornati nel 2012) distribuiti sul territorio nazionale. Gli idrocarburi sono la principale causa di inquinamento, che colpisce il 33% sia dei terreni contaminati che delle acque. Tuttavia, questa percentuale si riferisce solo agli idrocarburi lineari: includendo idrocarburi aromatici, idrocarburi clorurati e BTEX, i numeri salgono al 67% sia per i terreni che per le acque più.

Les sites et sols pollués début 2012  
 (sites sur lesquels l'état a entrepris des actions de rémediation 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. Mappa della Francia indicante l'ubicazione dei siti inquinati.

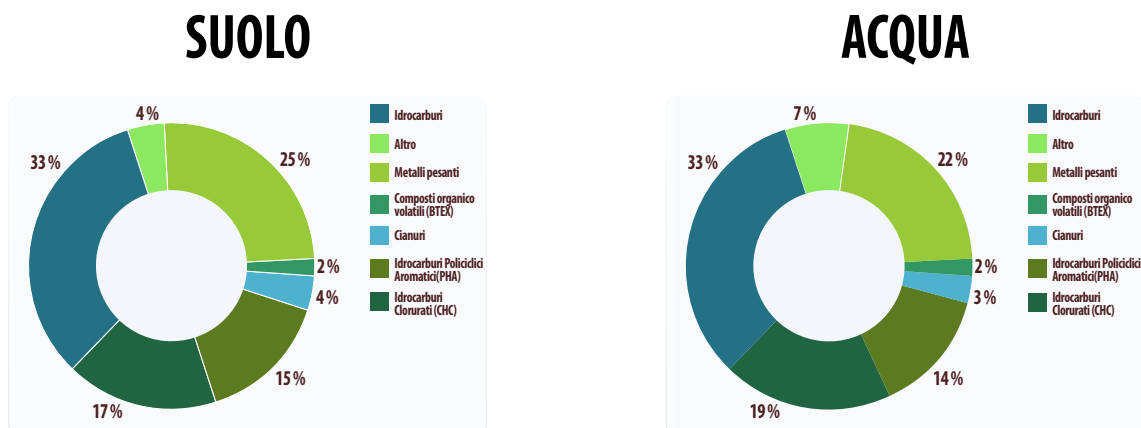


Figura 5. Classificazione dei siti inquinati secondo le classi chimiche: i terreni sono riportati a sinistra, l'acqua a destra.

## 3. Tecniche di biorisanamento

La versatilità nutrizionale dei microrganismi può essere sfruttata per il processo di biodegradazione delle sostanze inquinanti, o, come è noto, biorisanamento. Questo processo si basa sulla capacità di alcuni microrganismi di convertire, modificare e utilizzare i solventi tossici per il loro sviluppo e la loro crescita (Tang et al., 2007). Il biorisanamento è un'attività microbiologica applicata ben organizzata e serve per scomporre o trasformare i contaminanti in composti meno tossici o non tossici (Abatenh et al., 2017). Quando si decide di utilizzare la tecnica di biorisanamento, si dovrebbe considerare quanto segue: la natura degli inquinanti (ad es. prodotti agrochimici, composti clorurati, idrocarburi, metalli pesanti), la profondità di inquinamento, le concentrazioni di contaminanti, le proprietà fisico-chimiche del suolo da trattare, il costo del trattamento e le politiche ambientali.

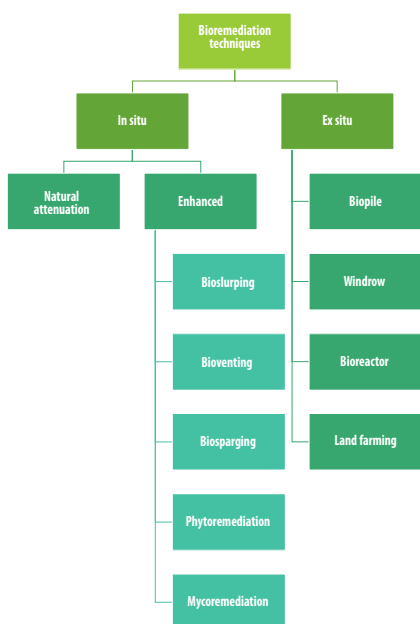


Figura 6. Tecniche di bonifica del suolo In situ ed Ex situ.

I microrganismi sono un'alternativa eco-compatibile ai processi tradizionali di risanamento e rappresentano materiale genetico con un valore promettente per risolvere le minacce ambientali.

Il biorisanamento può essere effettuata mediante tecniche in situ o ex situ, partendo da diversi fattori quali il costo, le caratteristiche del sito e il tipo e la concentrazione degli inquinanti.

Le tecniche di biorisanamento **In situ** comprendono il trattamento di sostanze inquinate nel sito di inquinamento, senza scavo. Rappresentano un'alternativa meno costosa alle tecniche ex situ, poiché il costo per il processo di scavo non è richiesto e la dispersione dei contaminanti è trascurabile. Le tecniche di biorisanamento in situ sono state applicate con successo nel trattamento del suolo per solventi clorurati, coloranti, metalli pesanti e idrocarburi (Azubuike et al., 2016; Frascari et al., 2015; Kim et al., 2014).

Le tecniche di biorisanamento **Ex situ** comportano lo scavo di inquinanti provenienti da siti inquinati e il successivo trasporto verso un altro sito da sottoporre al trattamento. Il raggiungimento degli obiettivi di risanamento in termini di costi e tempi competitivi dipende da un'ampia serie di parametri di ottimizzazione, il cui monitoraggio richiede una grande esperienza applicativa (Sofo, 2010).

18

### 3.1 In situ

Tra le tecniche di biorisanamento in situ, si possono distinguere due categorie principali:

**Attenuazione naturale:** i contaminanti vengono lasciati sul posto permettendo ai processi naturali di ripulire il sito. Il successo dell'attenuazione naturale dipende dalla geologia del sottosuolo, dall'idrologia e dalla microbiologia ed è soggetto a cambiamenti idrologici, che richiedono un considerevole periodo di tempo per rimuovere i contaminanti del suolo. È utilizzato principalmente per BTEX e idrocarburi clorurati (Mulligan, 2004).

**Biorisanamento potenziato:** funghi, batteri e nutrienti vegetali (ossigeno, nitrati) vengono aggiunti per accelerare il processo naturale di biodegradazione. Queste tecniche sono state applicate con successo per bonificare terreni e falde contaminate da combustibili, composti organici volatili e semivolatili (COV e SVOCs), perclorato e pesticidi<sup>39</sup>. Le tecniche di biorisanamento potenziate comprendono diverse alternative, che sono elencati di seguito.

**Bioventing:** chiamato anche Bio-enhanced Soil Venting, è una tecnica in situ basata sulla naturale stimolazione della normale attività biologica presente nel terreno con l'iniezione di ossigeno attraverso un flusso d'aria. L'aria viene iniettata direttamente a basse velocità attraverso uno o più pozzi collegati a pompe a vuoto, che garantiscono la circolazione forzata dell'aria nel suolo insaturo contaminato. Quando il suolo è altamente inquinato, può verificarsi ostruzione dei pori del suolo, con conseguente riduzione dei livelli di ossigeno. Per superare questo tipo di problema, sono state sviluppate diverse strategie, come l'aumento dei livelli di ossigeno attraverso iniezioni di aria pulsata<sup>40</sup>. I vantaggi sono i bassi costi di realizzazione e gestione dell'impianto, a scapito del tempo richiesto, che varia da alcuni mesi ad anni. Tuttavia, può aumentare la normale capacità di biodegradazione del suolo fino a 40 volte<sup>41</sup>.

<sup>39</sup> 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.>

<sup>40</sup> [https://www.crccare.com/files/dmfile/CTechguide\\_Bioremediation\\_Rev0.pdf](https://www.crccare.com/files/dmfile/CTechguide_Bioremediation_Rev0.pdf)

<sup>41</sup> [http://www.arpa.umbria.it/Resources/docs/micron%2025/micron\\_25\\_45.pdf](http://www.arpa.umbria.it/Resources/docs/micron%2025/micron_25_45.pdf)

**Bioslurping:** è una metodica che usa tecniche di disidratazione sottovuoto per la bonifica di siti inquinati da idrocarburi, attraverso la combinazione di estrazione di vapore dal suolo e bioventilazione per apporto indiretto di ossigeno e successiva stimolazione della biodegradazione del contaminante presente (Gidakaros et al., 2007). Questo sistema utilizza una "slurp" che si allunga nello strato, che estrae liquidi (prodotti liberi e gas di suolo) e altre sostanze. Questo meccanismo permette il recupero di composti liberi, composti organici volatili o semi-volatili e liquidi leggeri di fase non acquosi (LNAPL) (Kim et al., 2014). Sebbene il bioslurping non sia quasi mai utilizzato per terreni a bassa permeabilità, esso contribuisce a risparmiare costi a causa della minore quantità di acqua sotterranea derivante dal funzionamento, riducendo al minimo i costi di stoccaggio, trattamento e smaltimento (Philip et al, 2005).

**Biosparging:** è una tecnica analoga al bioventing, in cui vi è una iniezione d'aria nel sottosuolo del suolo. Questa azione è in grado di stimolare attività microbiche al fine di consentire la rimozione delle sostanze inquinanti dai siti contaminati. In biosparging, aria (o ossigeno) e nutrienti vengono iniettati nella zona satura per aumentare l'attività biologica dei microrganismi, favorendo così l'aumento di composti organici volatili verso l'area insaturi per aumentare la biodegradazione.

Ci sono due fattori principali che regolano l'efficienza: la biodegradabilità dell'inquinante e la permeabilità del suolo che regola la biodisponibilità dei contaminanti ai microrganismi. Viene spesso applicato per trattare le falde acquifere contaminate con prodotti petroliferi ma anche con benzene, toluene, etilbenzene, xilene (BTEX) (Kao et al., 2008).

**Fitodepurazione:** tecnica che si basa sull'uso di impianti in zone inquinate per ridurre la concentrazione di contaminanti. I composti organici vengono eliminati per degradazione, rizoremediazione, stabilizzazione e volatilizzazione, mentre i metalli pesanti vengono rimossi per trasformazione, estrazione e sequestro (Azubuike et al., 2016).

Nel processo di fitodepurazione vengono usati i seguenti meccanismi:

- Biodegradazione aumentata della rizosfera: il rilascio di sostanze naturali dalle radici delle piante per fornire nutrienti ai microrganismi con elevate attività biologiche;
- fitoaccumulo: l'assorbimento di contaminanti da parte delle radici delle piante e il trasferimento ai germogli e foglie della pianta;
- potodegradazione: metabolismo dei contaminanti nei tessuti vegetali;
- fitodepurazione: la produzione di sostanze chimiche da parte della pianta che immobilizza i contaminanti all'interfaccia tra le radici e il suolo (Azubuike et al., 2016).

**Depurazione microbica:** batteri e/o funghi sono utilizzati per trasformare i contaminanti nel suolo e nelle acque sotterranee. I microrganismi sono anche in grado di rilasciare enzimi ossidativi aspecifici che possono abbattere i composti organici. Il tipo di microrganismi utilizzati è strettamente correlato alla temperatura, al pH del terreno e alla disponibilità di ossigeno. I microrganismi sono in grado di degradare idrocarburi di petrolio e composti clorurati, ma possono anche accumulare metalli pesanti all'interno della parete cellulare.

### 3.2 Ex situ

**Biopila:** è un'applicazione ex situ di una tecnica di bonifica che utilizza i microrganismi del suolo per rimuovere la contaminazione dal suolo.

Di solito, questa tecnica viene applicata ai terreni impattati da idrocarburi, contaminati da idrocarburi di petrolio, dove si effettua lo scavo e successivamente il terreno viene mescolato con modifiche del suolo, per formare cumuli di compost e consentire al microrganismo di migliorare il processo di degradazione. I prodotti petroliferi più leggeri tendono ad evaporare dalla pila a causa dell'aerazione, ma gli idrocarburi petroliferi medi e pesanti sono degradati aerobicamente. Per rendere i processi più efficaci e produttivi, alcuni parametri e caratteristiche possono essere controllati come temperatura, ossigeno, pH, aerazione e nutrienti.

La biopila è una delle tecniche di biorisanamento ex situ più utilizzate principalmente per il rapporto costo-efficacia, anche se molti parametri devono essere controllati per stabilire una biodegradazione efficace (Whelan et al., 2015).

**Windrow:** è una tecnica di bonifica ex situ specifica basata sulla rotazione periodica del suolo contaminato per aumentare il biorisanamento aumentando l'attività di degradazione dei microrganismi. La periodica rotazione del terreno contaminato, unitamente all'aggiunta di acqua, è in grado di aumentare l'aerazione e di uniformare la distribuzione di inquinanti, nutrienti e attività microbiche degradanti. Il biorisanamento può risultare accelerato (Barr, 2002). Tuttavia, non può essere l'opzione migliore da utilizzare in presenza di composti volatili. L'uso del trattamento Windrow è effettivamente coinvolto nel rilascio di CH<sub>4</sub> (gas serra) a causa dello sviluppo di una zona anaerobica all'interno del suolo contaminato accatastato, che di solito si verifica dopo una ridotta aerazione (Hobson et al., 2005).

**Bioreattori:** Quando il materiale viene rimosso dall'ambiente, può essere immesso all'interno di bioreattori, che rappresentano grandi contenitori in cui il materiale contaminato può essere monitorato e le condizioni per il biorisanamento possono essere impostate. Esistono diverse modalità di funzionamento dei bioreattori, tra cui batch, fed-batch, sequencing batch, continuo e multistadio. In un bioreattore, è possibile controllare la velocità di miscelazione, la temperatura, il pH e i livelli di nutrienti, sostenendo il processo naturale dei microrganismi imitando e mantenendo il loro ambiente naturale per fornire le condizioni di crescita ottimali (Azubuike et al., 2016).

**Land Farming:** un sistema di biorisanamento ingegnerizzato utile per il trattamento di siti remoti grazie alle attrezzature minime richieste, che utilizza generalmente l'aerazione passiva mediante lavorazione del terreno contaminato per ridurre i livelli di contaminanti (EPA 2014). Il land farming è considerata una delle tecniche più semplici, facile da pianificare e implementare, rendendo possibile il trattamento di un'ampia area di suolo contaminato con un basso impatto ambientale ed energetico (Azubuike et al., 2016).

## 4. Il biorisanamento del suolo in tre fasi: il metodo LIFE BIOREST

Il progetto LIFE BIOREST coinvolge tre paesi europei - Italia, Francia e Spagna - ed è stato sviluppato per dimostrare l'efficienza e l'economicità dell'approccio di biorisanamento per terreni contaminati da idrocarburi policiclici aromatici (IPA) benzene, toluene, etilbenzene, xilene (BTEX) e alcani a catena lunga, contribuendo così alle conoscenze scientifiche necessarie per lo sviluppo della politica europea in materia di ambiente e di protezione del suolo. Il progetto è stato supervisionato la collaborazione tra Consorzio Italtotec, in qualità di coordinatore del progetto, Actygea Srl, Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia - ARPAE, Università di Torino, Università Cattolica del Sacro Cuore, Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Spagna) e SATT- SAYENS (Francia).

L'approccio biotecnologico sviluppato si basa su microrganismi, sottoprodotti agricoli e piante, con l'obiettivo di ripopolare, ripristinare il suolo contaminato e restituirlo all'uso pubblico. Le attività sperimentali del progetto LIFE BIOREST mirano a convalidare un modello di biorisanamento sostenibile in grado di trattare IPA, BTEX e alcani che sono, insieme ai metalli pesanti, il 45% dei contaminanti totali in Europa. Questo vale anche per il sito di Fidenza (in Emilia-Romagna), dove avviene il biorisanamento.

20

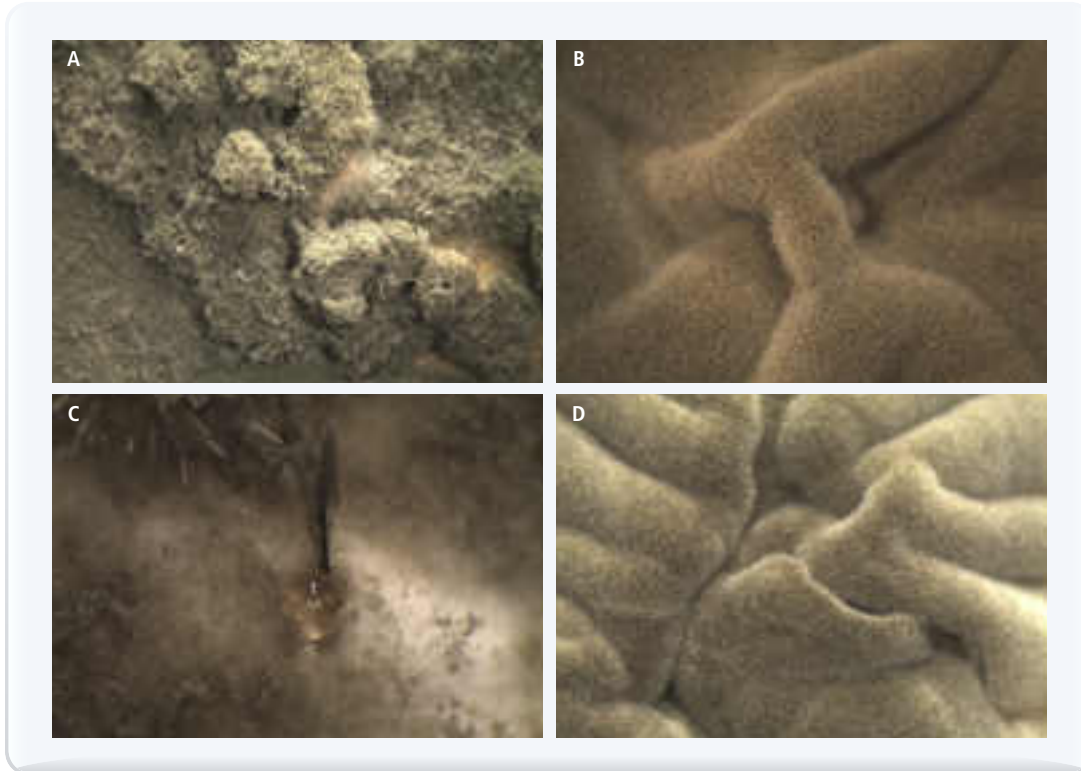
Attività sperimentali avviate nel luglio 2016, nell'area di "ex-Carbochimica", Sito di Interesse Nazionale (SIN) di Fidenza, grazie al sostegno del Comune che ha fornito infrastrutture e spazi già interessati da altre attività di bonifica.

### 4.1 Ottimizzazione del biorisanamento del suolo

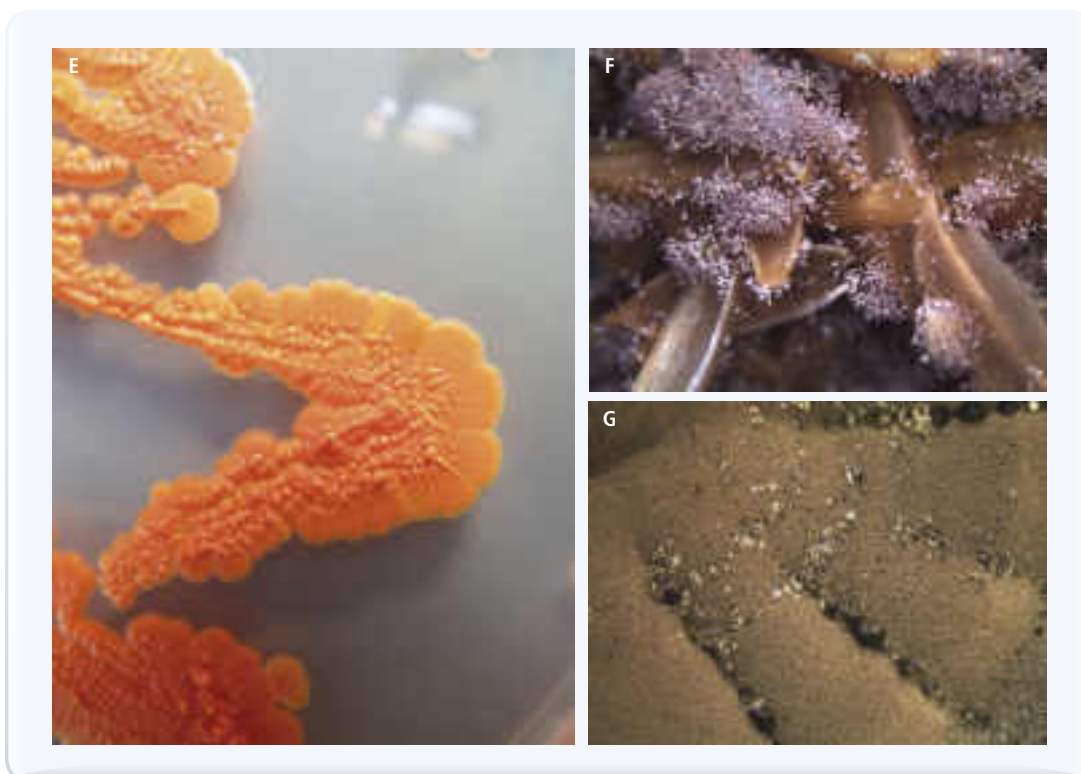
Il primo passo del progetto LIFE BIOREST è stato quello di concentrare i suoi sforzi nella selezione di ceppi microbici che sono stati ulteriormente sfruttati per il trattamento dei contaminanti. L'approccio di biorisanamento ha previsto l'uso di microrganismi autoctoni, che popolano naturalmente il sito contaminato; ceppi alloctoni non sono stati selezionati in quanto i loro effetti potrebbero essere imprevedibili quando introdotti nell'ecosistema. Anche se il suolo contaminato è compromesso rispetto al suolo pulito, il suo bioma vivente può includere microrganismi fortemente adattati a condizioni estreme.

Attraverso studi preliminari è stata valutata la vitalità del terreno raccolto nel sito di Fidenza. Le comunità batteriche e fungine sono meno abbondanti di quelle di un suolo non antropizzato, ma si è scoperto che popolano questa nicchia ecologica: sono stati rilevati rispettivamente  $10^7$  e  $10^4$  cfu/100g di batteri e funghi. I contaminanti sono stati in grado di creare un ambiente estremo, ma la natura ha imparato ad adattarsi a queste condizioni difficili. Per questo motivo, l'interesse del progetto è stato focalizzato sulla selezione di quei ceppi che sono in grado di sopravvivere in condizioni estreme e anche in grado di colonizzare il suolo contaminato. L'applicazione di una pressione selettiva durante la procedura di isolamento ha permesso l'isolamento di 309 funghi e 256 batteri appartenenti ad un'ampia biodiversità (ad es. 78 taxa fungini e 46 taxa batterici). Questa ricchezza microbica eterogenea è stata ristretta, identificando quei pochi ceppi che potrebbero essere utilizzati per trattare il terreno. La valutazione di questo enorme numero di ceppi e variabili necessarie per far avanzare i metodi analitici tradizionali che sono troppo lunghi e troppo costosi. In origine è stata sviluppata e ottimizzata un'innovativa tecnica di miniaturizzazione per testare il tasso di crescita dei microrganismi nella presenza di inquinanti bersaglio (pirene, fenantrene, naftalene, benzene, olio di paraffina, eptadecane). Diversi ceppi hanno dimostrato la capacità di utilizzare in modo efficiente almeno uno degli inquinanti come un'unica fonte di carbonio, evidenziando la loro capacità di sfruttare fonti di nutrimento complesse e semplici e biodisponibili (ad es. glucosio). Inoltre, molti ceppi erano anche in grado di produrre tensioattivi, che possono migliorare la biodisponibilità degli inquinanti organici nel suolo. Questo progetto ha contribuito a rivelare una ricchezza microbica nascosta che potrebbe essere applicata a molti diversi campi biotecnologici. Questi risultati hanno confermato le capacità di adattamento innescate dall'ambiente estremamente tossico del suolo di Fidenza che ha spinto i microrganismi a sviluppare una via metabolica unica. Sono stati selezionati

più di 30 batteri e funghi. I microrganismi sono stati considerati non solo per la loro capacità di degradare inquinanti ad alto impatto, ma anche per la loro capacità di produrre biosurfattanti, bioemulsifiers ed enzimi. In effetti, questi composti potrebbero essere rilevanti per alcuni aspetti della biodegradazione degli inquinanti e anche per la stimolazione di altri microrganismi rilevanti. I migliori 5 consorzi microbici sono stati applicati ad un volume di terreno più grande: bio-aumento ha portato ad una migliore degradazione rispetto ai controlli. È stato scelto il consorzio più capace di massimizzare la degradazione degli idrocarburi a catena lunga e degli IPA, riducendo la tossicità del suolo la tossicità interna del suolo.



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



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

### 4.2 Produzione di biomassa su scala industriale

L'obiettivo principale del progetto LIFE BIOREST è stato quello di scalare la dimostrazione di concetto ottenuto attraverso esperimenti in microcosmo e mesocosmo, su un vera e propria biopila del sito contaminato di Fidenza. I ceppi microbici sono stati utilizzati per il biopotenziamento di una porzione di un biopila di circa 530 tonnellate, in collaborazione con il Comune di Fidenza. Una notevole quantità di microrganismi erano necessari per raggiungere questo obiettivo. Per questo motivo, la seconda fase del progetto LIFE BIOREST ha previsto il raggiungimento di condizioni economiche e pratiche per la crescita dei microrganismi più adatti, consentendo l'applicazione della tecnica sul campo. La realizzazione di una produzione economicamente vantaggiosa, la produzione di microrganismi in impianti di fermentazione polivalenti e l'adattamento delle attrezzature e della logistica disponibili alla produzione di funghi sono stati gli obiettivi principali della seconda fase. Grazie alla disponibilità di un sistema di selezione dei mezzi di fermentazione per la produzione industriale (il database proprietario ActyMedDat) il costo dei prodotti di fermentazione è stato ridotto a meno di € 10 per la produzione di microrganismi necessari al trattamento di 1 tonnellata di terreno. Durante la fermentazione sono stati utilizzati materiali di scarto vegetali (come cellulosa, lolla di riso, olio vegetale esausto). I risultati hanno permesso di individuare i migliori microrganismi non solo per il loro potenziale di biodegradazione, ma anche per la possibilità di produrli su larga scala e a basso costo. La produzione sovradimensionata di microrganismi è stata raggiunta e ha permesso l'applicazione sul campo del processo di biorisanamento. Un protocollo generale di scalabilità è stato sviluppato ed è pronto per essere testato in altri siti che devono essere bonificati.

22



Figura 7. La scalabilità del processo

### 4.3 Biorisanamento In situ e rivegetazione

Nella terza fase, il progetto LIFE BIOREST si è focalizzato sulla preparazione della biopila con il miglior consorzio microbico precedentemente selezionato. La biopila è stata preparata con 530 tonnellate di terreno contaminato e i batteri e funghi appartenenti al consorzio più performante sono stati applicati al suolo. Il terreno è stato poi modellato in una biopila standard di 3 metri di altezza. La biopila è stata continuamente aerata e l'umidità del terreno è stata controllata per tutto il periodo di incubazione. La frazione bioaugmentata ha mostrato una più rapida eliminazione delle sostanze inquinanti. Ad esempio, dopo 60 giorni, la concentrazione totale di idrocarburi era inalterata nel controllo, ma una rimozione fino al 40% era già stata ottenuta dal trattamento microbico. I cambiamenti nella



composizione chimica del suolo sono anche correlati con l'intera tossicità del suolo. Ancora una volta, il bioaumentamento ha portato ad una diminuzione più veloce della tossicità. Ad esempio, per quanto riguarda il sorgo e i batteri luminescenti *Vibrio fischeri*, la tossicità è stata fino a 2 volte inferiore in presenza del terreno trattato microbicamente. Al fine di accoppiare la biobonifica con la fitodepurazione, sono stati effettuati esperimenti in vaso per selezionare le tre specie vegetali più adatte alla rigenerazione dopo il trattamento della biopila. Tre specie sono state le più indicate per la fitodepurazione nel suolo contaminato da IPA e BTEX: *Sorghum bicolor*, *Trifolium pratense* e *Festuca arundinacea*.



Figure 8 Application of the produced microorganisms to the mesocosms and to the biopile



Figure 9 Biopile preparation



Figure 10 Greenhouse pot experiments

Figure 11 LIFE BIOREST revegetation area

## 5. Raccomandazioni sul biorisanamento

Il suolo è considerato una risorsa, il cui mantenimento della salute è essenziale per promuovere le funzioni fondamentali di fornire nutrienti essenziali, acqua, ossigeno e supporto per le piante. I suoli rappresentano una parte critica del ciclo idrologico e contengono grandi quantità di carbonio che, se rilasciati nell'atmosfera, possono accelerare il tasso di riscaldamento globale e, di conseguenza, del cambiamento climatico.

Nonostante l'importanza vitale del suolo nella vita quotidiana, il suo uso improprio e la sua gestione, come l'agricoltura industriale insostenibile, l'inconsapevolezza e altri fattori socio-economici hanno portato principalmente alla distruzione di terreni.

Per questo motivo, un crescente impulso al raggiungimento della sostenibilità in tutte le sue varianti ha messo la questione della contaminazione del suolo e della protezione sotto i riflettori nel quadro europeo. In effetti, il 7° AEP ha continuato a promuovere l'uso sostenibile del suolo: i terreni devono essere gestiti in modo sostenibile nell'Unione, il suolo deve essere adeguatamente protetto e la bonifica dei siti contaminati sarà ben avviata<sup>42</sup>.

Negli ultimi anni sono stati compiuti notevoli progressi nella maggior parte dei paesi europei per quanto riguarda la coesistenza di siti storici e la fissazione di obiettivi per la gestione o la completa bonifica di tali siti. Secondo i dati del Joint Research Centre, 650.000 siti contaminati sono stati registrati negli inventari dei 28 Stati membri in cui sono stati effettuati o sono in corso trattamenti di bonifica. Più di 76.000 nuovi siti sono stati registrati dalla precedente analisi del 2014. Attualmente, 65.500 siti sono stati sottoposti a misure correttive (Peréz et al., 2018).

Nei Paesi industrializzati, la bonifica dei siti contaminati è diventata un vero e proprio problema, grazie allo sviluppo di una "coscienza ecologica" che ha sensibilizzato sulla gravità della situazione attuale.

La gestione della contaminazione del suolo presenta aspetti particolari legati all'elevata variabilità dei casi e alla disponibilità di risorse economiche, che consentono l'adozione di tecnologie più innovative e sostenibili.

La bonifica dei suoli è una complessa combinazione di diverse tecnologie e approcci che si sono evoluti nel corso degli anni. Le tecniche di bonifica tradizionali si basano sul trasferimento del suolo contaminato nelle discariche, che semplicemente trasferisce l'inquinamento, rendendolo tecnicamente limitato, inefficiente e scarsamente sostenibile dal punto di vista ambientale, soprattutto se si considerano i tempi di gestione e gli impatti ambientali. Le tecniche tradizionali di bonifica sono ancora prevalenti nel trattamento dei suoli contaminati, in particolare lo scavo e lo smaltimento dei suoli, che rappresentano il 30% di tali attività. Le misure in situ e ex situ sono applicate con le stesse frequenze. I costi di scavo e trasporto di grandi quantità di materiali contaminati per il trattamento ex situ rendono i metodi fisici attualmente disponibili più costosi.

Tuttavia, l'aumento dei controlli regolamentari sulle operazioni di discarica e l'aumento dei costi associato, combinato allo sviluppo di tecniche innovative di bonifica ex situ e in situ, sta modificando il modello delle pratiche di bonifica.

L'alto costo ha portato ad un crescente interesse per le tecnologie alternative per l'applicazione in situ, in particolare quelle basate sulla capacità di degradazione biologica delle piante e dei microrganismi (Chaudhry et al., 2005).

Il biorisanamento offre un'interessante alternativa agli approcci tradizionali, con i suoi limiti e benefici. Funghi, batteri e piante possono sviluppare capacità di adattamento che li aiutano a popolare la nicchia ecologica contaminata. Tra i vantaggi di preferire le tecniche di biorisanamento ci sono i requisiti minimi di attrezzature e il basso costo del trattamento per unità di volume di terreno rispetto ad altre tecnologie di bonifica. Inoltre, l'importanza del suolo come risorsa non rinnovabile che deve essere protetta e preservata, rende il biorisanamento un'opzione più sostenibile con benefici a lungo termine, anche se richiede più tempo rispetto ad altre alternative come la messa in discarica e l'incinerazione. Il vantaggio più significativo di utilizzare un processo di biorisanamento è il suo contributo all'ambiente in quanto utilizza la natura per risanare la natura. Il biorisanamento ha anche limitazioni nella sua applicazione, dal momento che il controllo di composti organici volatili (VOC) può essere difficile quando si utilizza un processo ex situ, e le condizioni - pH, temperatura, ossigeno - devono essere controllati e monitorati per mantenere la vitalità e l'attività dei microrganismi.

Oltre alle attuali conoscenze e applicazioni, il biorisanamento ha sempre coperto una parte consistente della qualità del suolo. Infatti, i microrganismi (il motore del biorisanamento) evolvono, agiscono e rimediano in modo invisibile fin

<sup>42</sup> The 7th Environment Action Programme (EAP) - 2013:  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013D1386>

dall'inizio del processo di inquinamento. Solo negli ultimi anni abbiamo acquisito una crescente consapevolezza del lavoro di queste macchine invisibili. D'altra parte, abbiamo anche acquistato la consapevolezza su come alimentare le nostre macchine microbiche per farli funzionare più velocemente e per consentire loro di raggiungere nicchie che sono incompatibili con il loro lavoro.

L'obiettivo del progetto LIFE BIOREST era fornire combustibile ai microrganismi indigeni nella loro azione contro gli inquinanti nel sito di Fidenza. Il progetto ha riprodotto ad un ritmo accelerato la naturale evoluzione di un ambiente perturbato che lotta per un ritorno alla natura. L'applicazione dei microrganismi indigeni ha permesso una degradazione più rapida degli inquinanti bersaglio.

Una volta che il processo di biorisanamento eseguito nella biopila è sufficientemente finito, la colonizzazione forzata del terreno con le piante ha ulteriormente spinto il ripristino di un ambiente sano. Infatti, l'azione meccanica delle radici delle piante ha generato "autostrade del suolo" lungo le quali i microrganismi hanno continuato la loro degradazione degli inquinanti.

Va sottolineato che l'approccio utilizzato nel progetto LIFE BIOREST è pienamente compatibile con il biopile (testato nell'ambito di questo progetto) o con le tecnologie agricole terrestri (non testate nell'ambito di questo progetto). Pertanto, l'impatto economico sul processo di biorisanamento tende ad essere marginale, con solo i costi di produzione di microrganismi da aggiungere (calcolati nell'intervallo di € 10-50 per tonnellata di terreno da trattare).

Anche se l'approccio LIFE BIOREST è facilmente traducibile in altri siti inquinati, uno dei problemi più significativi nello sviluppo di informazioni sui costi è che i costi segnalati in una serie di condizioni in un sito sono molto difficili da estrapolare da altri siti. Come le prestazioni tecnologiche, i costi tecnologici sono sensibili alle condizioni geologiche, geochimiche e contaminanti specifiche del sito, specialmente per le tecnologie in situ. La bonifica di terreni contaminati con un approccio di biopila standard (come quello utilizzato inizialmente nel sito di Fidenza) ha un costo profondamente influenzato dal tipo di inquinanti presenti e dai requisiti di contenimento da applicare (il costo potrebbe variare da circa € 200-1.000 per tonnellata di terreno).

Tuttavia, escludendo gli inquinanti clorurati, l'applicazione di microrganismi attraverso l'approccio LIFE BIOREST è universale e indipendente dal tipo di contaminante presente nel suolo. In conclusione, essendo consapevoli del fatto che la bonifica dei suoli è un approccio integrato, il potenziale dei microrganismi indigeni e della flora locale è di fondamentale importanza per il ripristino della qualità del suolo e ha un impatto marginale o addirittura positivo sui costi della bonifica.

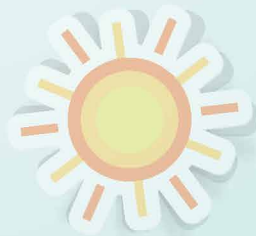
Il modello per la bonifica del suolo proposto dal progetto LIFE BIOREST ha incluso una comprensione della profonda importanza del suolo per la vita umana, con l'obiettivo di educare il pubblico sul ruolo cruciale del suolo. Per questo motivo, molte attività sono state organizzate per gli studenti, coinvolgendo più di 1.000 di loro in attività di ricerca e comunicazione in materia di prevenzione e trattamento del suolo, e incoraggiandoli a diventare attivi nella sensibilizzazione del pubblico.

## Riferimenti

- 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. In 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., Loredano 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) CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O 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

