



Vademecum Tecnologie di Bonifica



Indice

PREMESSA.....	4
1.0 IL CONTESTO AMBIENTALE.....	6
1.1 TERRENO INSATURO	10
1.2 FALDA	11
2.0 CARATTERISTICHE DEI CONTAMINANTI	13
2.1 COMPOSTI ORGANICI.....	14
2.2 COMPOSTI INORGANICI	22
2.3 ALTRE SOSTANZE.....	23
3.0 ELEMENTI STRATEGICI DI VALUTAZIONE	24
3.1 NATURA DELL'INQUINANTE	25
3.2 FATTORI SITO SPECIFICI	25
3.3 TECNOLOGIE APPLICABILI.....	25
4.0 CLASSIFICAZIONE DELLE TECNOLOGIE DI BONIFICA.....	26
4.1 TIPOLOGIA DI INTERVENTO PREVISTO	26
4.2 NATURA DEI PROCESSI BIOLOGICI O CHIMICO-FISICI PREVISTI.....	27
4.3 AZIONE DA ESERCITARE SUI CONTAMINANTI	28
5.0 MATRICE DI SCREENING	29
5.1 MATRICE DI SCREENING TERRENI	30
5.2 MATRICE DI SCREENING ACQUE SOTTERRANEE	31
6.0 PRINCIPALI TECNOLOGIE DI BONIFICA	32
<i>TECNOLOGIE DI BONIFICA IN SITU – PROCESSI BIOLOGICI*</i>	33
6.1 BIOREMEDIATION	34
6.2 MONITORED NATURAL ATTENUATION (MNA).....	42
6.3 PHYTOREMEDIATION	47
<i>TECNOLOGIE DI BONIFICA IN SITU – PROCESSI CHIMICO-FISICI</i>	54
6.4 AIR SPARGING (AS).....	55
6.5 BARRIERE IDRAULICHE.....	63
6.6 BARRIERE REATTIVE PERMEABILI (PRB)	69
6.7 ELETTROCINESI	76
6.8 MULTI PHASE EXTRACTION (MPE)	83
6.9 OSSIDAZIONE CHIMICA	92
6.10 SOIL FLUSHING (SF)	97
6.11 SOIL VAPOUR EXTRACTION (SVE)	105
6.12 SOLIDIFICAZIONE/STABILIZZAZIONE DEI TERRENI	112
<i>TECNOLOGIE DI BONIFICA EX SITU – PROCESSI BIOLOGICI</i>	119
6.13 LANDFARMING / BIOPILE.....	120
6.14 PROCESSI A FANGHI ATTIVI / BIOREATTORI A FASE FLUIDA.....	126
<i>TECNOLOGIE DI BONIFICA EX SITU – PROCESSI CHIMICO-FISICI*</i>	131
6.15 SCAVO E SMALTIMENTO	132
6.16 METODI CHIMICO-FISICI PER IL TRATTAMENTO DELLE ACQUE EX SITU.....	138

<i>TECNOLOGIE DI BONIFICA IN SITU/EX SITU– PROCESSI TERMICI</i>	151
6.17 TRATTAMENTO TERMICO	152
7.0 TECNOLOGIE DI BONIFICA INNOVATIVE	159
MICRO E NANOTECNOLOGIE	159
ELECTROKINETIC BIOREMEDIATION	160
SURFACTANT ENHANCED RECOVERY (SER).....	160
TRATTAMENTO COMBINATO DI ASSORBIMENTO E BIODEGRADAZIONE	161
TRATTAMENTO TERMICO AUTO-ALIMENTANTE IN-SITU.....	161
8.0 TECNOLOGIE E METODOLOGIE INNOVATIVE ENI	162
TECNOLOGIA E-HYREC®	162
METODOLOGIA E-LIMINA® (ENI-LINKING ISOTOPIC AND MICROBIAL INVESTIGATIONS TO AID NATURAL ATTENUATION)	167
CAMPIONATORI PASSIVI IN LDPE.....	173
9.0 BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO	180

Ringraziamenti

Il presente Vademecum è stato predisposto da **Eni Rewind S.p.A.** con il contributo tecnico e scientifico di **Stantec S.p.A.**

Si ringraziano per i contributi grafici:

- **BRGM** (Bureau de Recherches Géologiques et Minières). Le figure utilizzate nel presente documento sono soggette a copyright ©BRGM/RP-58609-FR. L'autorizzazione alla riproduzione è stata gentilmente concessa da BRGM (n. R20/20);
- **INERIS** (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). Le figure utilizzate nel presente documento sono di proprietà INERIS. L'autorizzazione alla riproduzione è stata gentilmente concessa da INERIS;
- **EPA** (*U.S. Environmental Protection Agency*);
- **Professor Marco Petrangeli Papini**, Professore Associato presso il Dipartimento di Chimica dell'Università di Roma "La Sapienza";
- **Stantec S.p.A.**

PREMESSA

La scelta delle migliori tecnologie di bonifica applicabili per un sito contaminato non può prescindere da due elementi fondamentali: un'approfondita valutazione/comparazione delle diverse tecnologie di intervento applicabili ed una rigorosa e completa analisi del contesto ambientale nel quale è stata riscontrata la sostanza contaminante.

La valutazione del contesto ambientale, unita alla definizione delle caratteristiche chimico-fisiche e tossicologiche dei contaminanti presenti, insieme all'analisi dei potenziali percorsi di migrazione attivi e di eventuali recettori presenti presso il sito, costituisce il **Modello Concettuale (Preliminare o Definitivo) previsto dal D.Lgs. 152/06**, noto anche come **Testo Unico Ambientale**.

Eni Rewind ha realizzato questo Vademecum con l'obiettivo di accompagnare il lettore nella comprensione delle più idonee tecnologie di bonifica sito specifiche, mettendo a disposizione la propria esperienza ormai più che ventennale nel settore delle bonifiche in Italia ed all'estero, affiancata da una rigorosa raccolta di conoscenze tecnico-scientifiche e dalla consultazione diretta di fonti istituzionali, di operatori del settore ed accademici italiani ed esteri.

Il Vademecum si sviluppa attraverso una **narrazione semplice e divulgativa delle tecnologie di bonifica** utilizzate in funzione della geologia ed idrogeologia e della tipologia dei contaminanti correlati. Il documento illustra schemi, diagrammi, grafici, infografiche e fotografie delle tipologie di trattamenti applicate principalmente presso i siti Eni.

Questa pubblicazione ha l'ambizione di rivolgersi sia ad un pubblico che si avvicina solo raramente alla complessa tematica della bonifica del sottosuolo, sia ad operatori del settore, ad Enti di Controllo ed ai vari "stakeholder" interessati, in un'ottica di sostenibilità, ad alcuni aspetti più squisitamente tecnici ed impiantistici.

Ampio spazio è stato, infine, dedicato sia alle **tecnologie di bonifica già mature e consolidate** sia a **tecniche innovative**. Sono state, quindi, considerate le tecnologie applicate in tempi più recenti che abbiano raggiunto lo stadio di sviluppo dell'applicazione in campo e per le quali sia stato espresso un interesse del mercato o delle istituzioni. Non sono state, invece, considerate le tecnologie tuttora allo stadio sperimentale, per le quali siano disponibili solo risultati di singole ricerche accademiche.

Nel Vademecum, si affronta il complesso mondo delle bonifiche ambientali in un'ottica integrata e multidisciplinare e si intende fornire, al contempo, un valore aggiunto nella selezione delle più idonee tecnologie di bonifica. Per questo, il documento è stato così suddiviso:

- un capitolo dedicato all'inquadramento del contesto ambientale tipico di un sito contaminato (**Capitolo 1**), approfondendo in particolare alcuni elementi conoscitivi relativi al sottosuolo ed alle sue principali caratteristiche;
- una sezione dedicata alle caratteristiche dei principali contaminanti, comprensivo di contaminanti emergenti quali i PFAS (**Capitolo 2**);

- tre sezioni rispettivamente dedicate: a) ad identificare preliminarmente gli elementi cruciali da tenere in considerazione nell'ambito del processo di selezione delle migliori tecnologie di bonifica applicabili – Best Available Technologies (BAT) (Capitolo 3); b) a fornire un inquadramento generale delle tecnologie di bonifica correntemente usate e dei relativi processi chimico-fisici o biologici ad esse associate (Capitolo 4); c) a fornire un pratico strumento di selezione delle principali tecniche che, partendo dalla consolidata Matrice di Screening delle tecnologie di bonifica predisposta da ISPRA, introduca ulteriori elementi di maggior approfondimento dell'applicabilità delle tecnologie, in termini di caratteristiche granulometriche del sottosuolo, di tempi medi di bonifica e costi associati (Capitolo 5);
- un capitolo contenente specifiche schede descrittive delle principali e consolidate tecnologie di bonifica (**Capitolo 6**);
- una digressione dedicata ad una selezione di tecnologie di bonifica innovative (**Capitolo 7**);
- una presentazione delle principali tecnologie e metodologie innovative sviluppate da Eni (**Capitolo 8**).

Da ultimo, si rimanda al **Capitolo 9** per la bibliografia, dalla quale sono tratti tutti i contenuti riportati in questo Vademecum.

1.0 IL CONTESTO AMBIENTALE

La bonifica di un sito contaminato è finalizzata, secondo la normativa italiana vigente in campo ambientale, ad eliminare l'inquinamento delle matrici ambientali o a ricondurre le concentrazioni delle sostanze inquinanti nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee e superficiali, entro i valori soglia di contaminazione (CSC), stabiliti per la destinazione d'uso prevista, o ai valori di concentrazione soglia di rischio (CSR) definiti in base ad una specifica Analisi di Rischio.

Semplificando, un **procedimento di bonifica**, infatti, può essere schematicamente ricondotto alle seguenti fasi:

- comunicazione agli enti di competenza a seguito del verificarsi di un evento di potenziale contaminazione e, laddove necessario, dell'adozione di idonei interventi di Messa in Sicurezza di Emergenza (MISE);
- definizione preliminare del Modello Concettuale del sito;
- predisposizione di uno specifico Piano di Caratterizzazione, anche qualora le indagini preliminari abbiano già accertato il superamento delle Concentrazioni Soglia di Contaminazione (CSC), fissate da normativa;
- definizione del Modello Concettuale Definitivo del sito, a seguito delle indagini di caratterizzazione;
- elaborazione dell'Analisi di Rischio sito-specifica, al fine di definire le Concentrazioni Soglia di Rischio (CSR) accettabili per quel determinato sito. Qualora le concentrazioni rilevate in situ risultino inferiori alle CSR, il sito viene classificato come "NON contaminato" e non necessita di interventi di bonifica;
- in caso contrario, il sito viene classificato come "contaminato" e, a seguito della redazione e approvazione di idoneo Progetto Operativo di Bonifica, è soggetto agli interventi di bonifica al fine di ricondurre le concentrazioni delle sostanze inquinanti entro i valori di CSR o CSC;
- ottenimento della certificazione di avvenuta bonifica, a seguito di esito favorevole delle attività di collaudo.

Eni Rewind, società ambientale di Eni che opera in linea con i principi dell'economia circolare per valorizzare le risorse (suoli, acque, rifiuti), vede la bonifica come un'opportunità per il Sistema Paese e per i territori in termini ambientali, economici e sociali. Dalle prime fasi del processo di risanamento, Eni Rewind pianifica, in accordo con le istituzioni e gli stakeholder locali, i progetti per le aree da bonificare al fine di renderle disponibili per nuove progettualità a valore aggiunto.

L'azienda promuove l'applicazione di tecnologie di bonifica sempre più innovative e sostenibili. In osservanza della normativa vigente in materia ambientale, una forte attenzione è rivolta all'applicazione di tecnologie in situ che Eni Rewind predilige in quanto consentono di bonificare suoli e falde nella loro sede naturale, senza ricorrere a operazioni di scavo e smaltimento, minimizzando gli impatti degli interventi di risanamento.

Per capire al meglio il processo di risanamento ambientale si è quindi ritenuto opportuno approfondire alcuni elementi conoscitivi relativi al sistema suolo – sottosuolo - falda ed alle sue principali caratteristiche. Nella Figura 1-1 è rappresentata una schematizzazione del sistema suolo-sottosuolo-falda relativamente alla presenza di un acquifero libero.

In particolare, a partire dal piano campagna (o piano di calpestio), si distinguono:

- A. una zona superficiale, detta **terreno insaturo** o più propriamente, **zona insatura**: al suo interno gli spazi interstiziali (ovvero gli spazi -o pori- tra le singole particelle di terreno), sono vuoti e possono contenere gas o acqua in proporzioni variabili, comunque in condizioni di non saturazione. Il movimento dei fluidi è prettamente verticale e dovuto alla forza di gravità. Tale fenomeno naturale, identificato con il termine "percolazione", permette ad esempio all'acqua piovana di infiltrarsi nei pori del terreno;
- B. una zona intermedia, detta zona di **frangia capillare**: essa è posta al di sopra della superficie freatica ed è caratterizzata da oscillazioni del livello di falda, con potenziale movimentazione dei contaminanti presenti in soluzione, i quali si distribuiscono nel volume di suolo interessato dall'oscillazione. L'acqua, in questa zona, è trattenuta dalle forze capillari;
- C. una zona più profonda, detta **falda** o, più propriamente, **zona satura**: al suo interno i pori sono saturi di acqua. Il movimento delle acque sotterranee è per lo più orizzontale e determinato dalla differenza di carico idraulico sotto il controllo della forza di gravità.

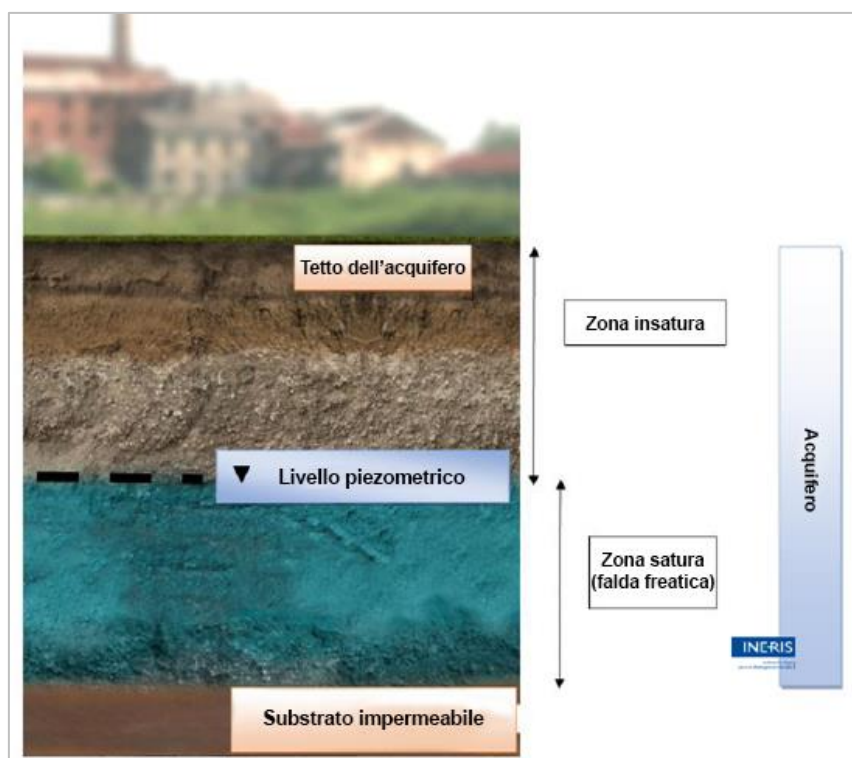
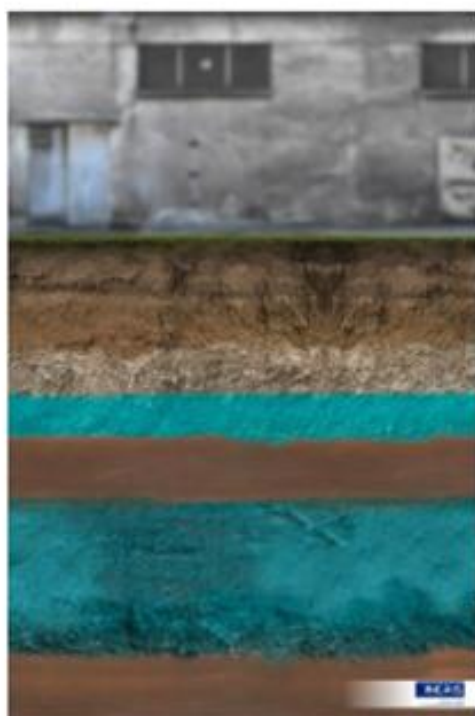
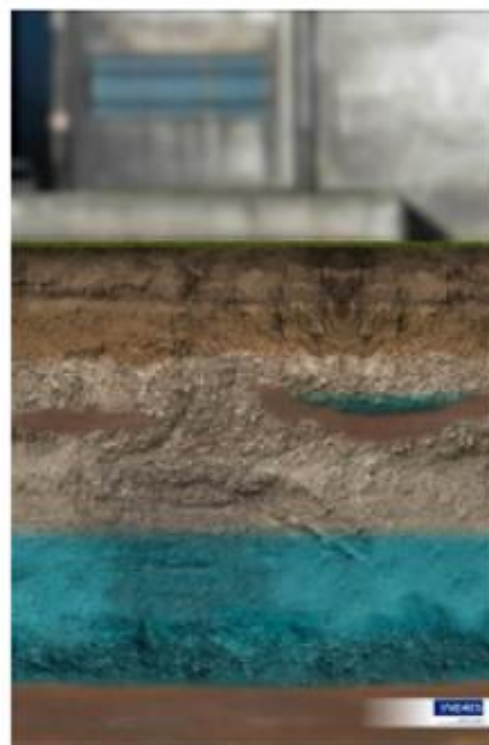


Figura 1-1 Schema di Sistema suolo-sottosuolo – falda libera (Fonte: Guide méthodologique relatif au Plan de Conception des Travaux (PCT), INERIS 2019 - modificato)



Falda confinata



Falda sospesa

Figura 1-2 Varianti falda confinata e falda sospesa (Fonte: Guide méthodologique relatif au Plan de Conception des Travaux (PCT), INERIS 2019)

Il sistema suolo-sottosuolo, schematizzato in **Figura 1-3**, è dunque un sistema complesso all'interno del quale il contaminante può essere riscontrato in quattro fasi distinte:

- I. fase adsorbita, nella quale le molecole di contaminante si legano attraverso un meccanismo di tipo chimico o fisico con le particelle di terreno;
- II. fase volatile o gassosa, nella quale le molecole di contaminante volatilizzano, subendo una transizione dallo stato liquido (evaporazione) o, teoricamente, anche dallo stato solido (sublimazione) a quello aeriforme;
- III. fase disciolta, nella quale le molecole di contaminante si trovano in soluzione, ovvero disciolte nell'acqua igroscopica;
- IV. fase liquida non solubile (NAPL), ovvero il contaminante è presente come prodotto puro.

Quindi nel sottosuolo, i contaminanti possono volatilizzare, essere trasportati in soluzione, essere adsorbiti, nonché subire trasformazioni chimiche e/o biologiche.

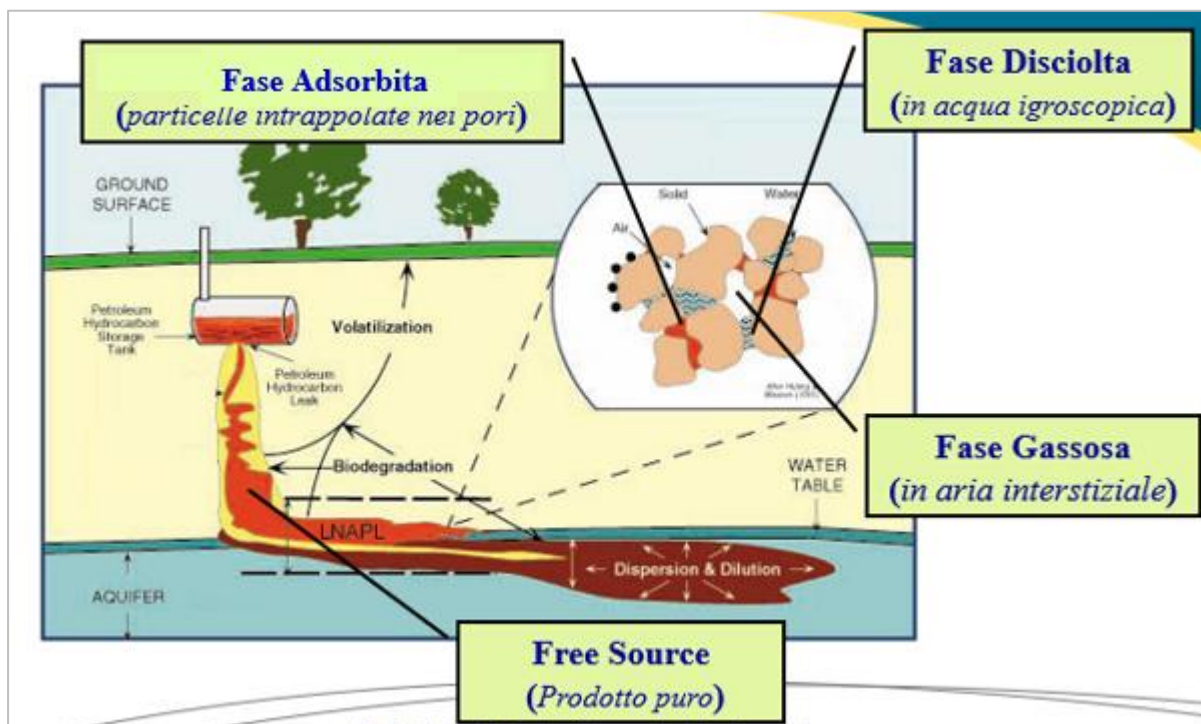


Figura 1-3 Schema delle fasi del sottosuolo (Fonte: Tecnologie per la bonifica di siti contaminati: fondamenti teorici ed applicazioni, MWH, 2014-modificata)

Il comportamento e la mobilità dei contaminanti possono essere influenzati da alcuni processi, di seguito sintetizzati i principali:

- processi idrodinamici: i quali influenzano la mobilità delle sostanze, in particolare dei contaminanti, negli acquiferi. Essi sono principalmente funzione della litologia, della permeabilità e del gradiente idraulico;
- processi biotici: sono fondamentali per la degradazione dei contaminanti organici e dei nutrienti;

- processi abiotici: determinano sia il trasporto delle sostanze mediante interazione con le fasi stazionarie sia la loro speciazione. Esempi in tal senso sono l'adsorbimento, lo scambio ionico, l'idrolisi, ecc.

In base alle loro caratteristiche, i contaminanti si possono classificare come organici (quali ad esempio gli idrocarburi) o inorganici (quali i metalli). Di particolare rilevanza dal punto di vista ambientale in termini di diffusione e di tossicità, si segnalano i **composti organici**. Si introducono invece di seguito, i principali parametri che influenzano il comportamento dei composti organici, nonché la loro mobilità, nel sottosuolo. In particolare, si evidenziano:

- la pressione di vapore (P_v) e la costante di Henry (H);
- la solubilità in acqua (S), inversamente proporzionale al peso molecolare;
- i coefficienti di diffusione in aria (D_a) e in acqua (D_w);
- il coefficiente di distribuzione (K_d);
- la densità e la viscosità del soluto, rispetto a quella del solvente;
- la costante di degradazione (λ).

Si segnalano inoltre come elementi da tenere in considerazione:

- la capacità di ritenzione del terreno;
- la tipologia della sorgente di contaminazione;
- il volume di inquinante.

Nei prossimi capitoli si approfondiranno le principali tipologie di contaminanti organici, oltre che inorganici, con un'analisi del loro comportamento e mobilità nelle matrici ambientali.

1.1 Terreno insaturo

Nel presente paragrafo è illustrato brevemente il comportamento delle fasi caratteristiche dei composti organici nella zona insatura che contraddistingue il sottosuolo.

Nella zona insatura si riconoscono due fasi prevalenti:

- Fase volatile: i composti volatili possono migrare dalla sorgente di contaminazione, espandendosi in forma gassosa (evaporazione) nella zona insatura, ritornando anche in atmosfera o creando i noti vapori "indoor". L'intensità dell'evaporazione, nonché della dispersione dei gas, è, tra gli altri fattori, direttamente proporzionale alla permeabilità del terreno. Tuttavia, una parte dei vapori viene anche adsorbita e diluita da parte dell'acqua di infiltrazione, migrando in falda allo stato solubile.
- Fase liquida: la percolazione della massa liquida è caratterizzata prevalentemente da un moto verticale; la velocità e la distribuzione nel sottosuolo sono influenzate in prevalenza dalla densità e dalla viscosità dell'inquinante.

1.2 Falda

Nel presente paragrafo è illustrato brevemente il comportamento delle fasi caratteristiche dei composti organici nella zona satura che contraddistingue il sottosuolo.

Nella zona satura si riconoscono tre stati prevalenti:

- Fase volatile: necessita di una presenza rilevante della frazione volatile del polluento in falda. La sua migrazione è rivolta sia verso la zona insatura sia nell'ambito della zona satura stessa.
- Fase miscibile: si verifica al contatto con la superficie piezometrica.
- Fase non miscibile: in funzione della densità, si possono avere due tipologie di prodotto, ovvero i LNAPL (*Light Non Aqueous Phase Liquid*, più leggeri dell'acqua) e DNAPL (*Dense Non Aqueous Phase Liquid*, più pesanti dell'acqua), come mostrato nella figura seguente.
 - I composti LNAPL tendono a galleggiare sulla superficie freatica, dando luogo a lenti più o meno estese e separate tra loro (fase surnatante). Presentano un moto sia verticale sia orizzontale, quest'ultimo nella direzione prevalente del flusso di falda.
 - I composti DNAPL, essendo più pesanti dell'acqua, sviluppano uno scorrimento lento e prevalentemente verticale, finché non incontrano un livello a basso grado di conducibilità idraulica (come ad esempio il bottom permeabile dell'acquifero).

La **Figura 1-4** riporta uno schema semplificato del comportamento dei principali contaminanti nel sottosuolo.

Al fine di valutare distribuzione e percorsi di diffusione della contaminazione determinata in fase di caratterizzazione, si ricorre sovente alla predisposizione di complessi modelli previsionali idrogeologici e di trasporto che risultano maggiormente rappresentativi dello stato reale del sottosuolo in funzione del numero e della qualità di dati ed informazioni disponibili.

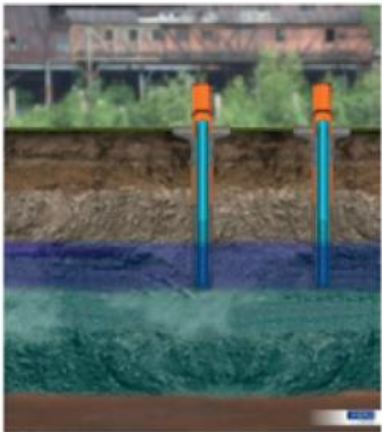
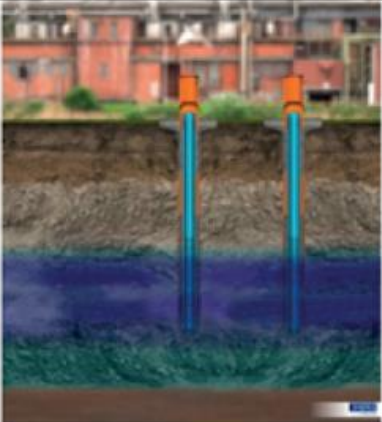
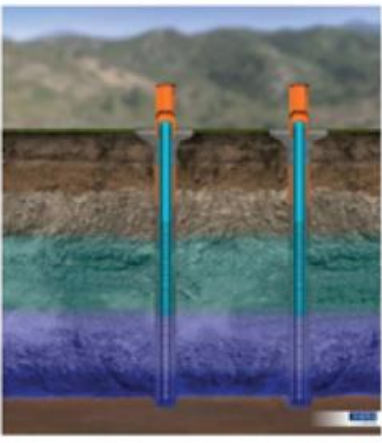
	Esempio con contaminazione legata alla presenza di una fase organica libera sumatante la falda (LNAPL)
	Esempio intermedio con una contaminazione legata a una o più sostanze solubili
	Esempio con una contaminazione legata alla presenza di una fase organica depositata sul fondo dell'acquifero (DNAPL)

Figura 1-4 Esempi distribuzione degli inquinanti in un acquifero omogeneo (Fonte: Guide méthodologique relatif au Plan de Conception des Travaux (PCT), INERIS 2019 - modificato)

2.0 CARATTERISTICHE DEI CONTAMINANTI

La conoscenza delle principali caratteristiche chimico-fisiche, tossicologiche ed ambientali dei contaminanti sito-specifici costituisce il primo fondamentale elemento per la definizione delle più idonee tecnologie di bonifica applicabili.

Nei successivi paragrafi si riporta una breve sintesi delle caratteristiche maggiormente significative, ai fini del presente Vademecum, relative alle due principali classi di contaminanti analizzate all'interno del presente documento:

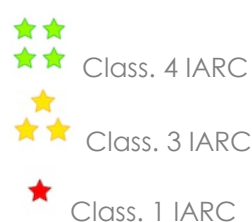
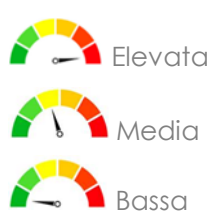
- Composti organici;
- Composti inorganici.

Per ciascuna classe di composti chimici si procederà descrivendo le caratteristiche generali afferenti all'intera categoria, a cui seguirà una tabella contenente delle informazioni qualitative concernenti i principali parametri chimico-fisico-tossicologici (con focus sui singoli inquinanti).

Si precisa che le informazioni sono state ricavate principalmente dalle seguenti fonti:

- Banca dati ISS-INAIL (Aggiornamento Marzo 2018) e relativa documentazione di supporto;
- Banca dati Bonifiche (ISS);
- Banca dati Cancerogeni (ISS).

Al fine di agevolare la lettura del presente capitolo, sono stati individuati specifici simboli grafici, intuitivi e facilmente confrontabili tra di loro, rappresentativi delle principali caratteristiche chimico-fisiche e tossicologiche dei contaminanti di interesse; si riporta di seguito la legenda utilizzata in ciascuna tabella riassuntiva:



2.1 Composti organici

Idrocarburi

I composti idrocarburici sono molecole organiche, la cui fonte principale è di natura fossile, che contengono atomi di carbonio e di idrogeno; dalla raffinazione del greggio derivano numerosi composti utilizzati nell'ambito della chimica di base e fine oltre ad essere ampiamente usati come combustibili per autotrazione o riscaldamento. In **Figura 2-1** sono visibili alcune molecole di composti organici costituenti gli idrocarburi.

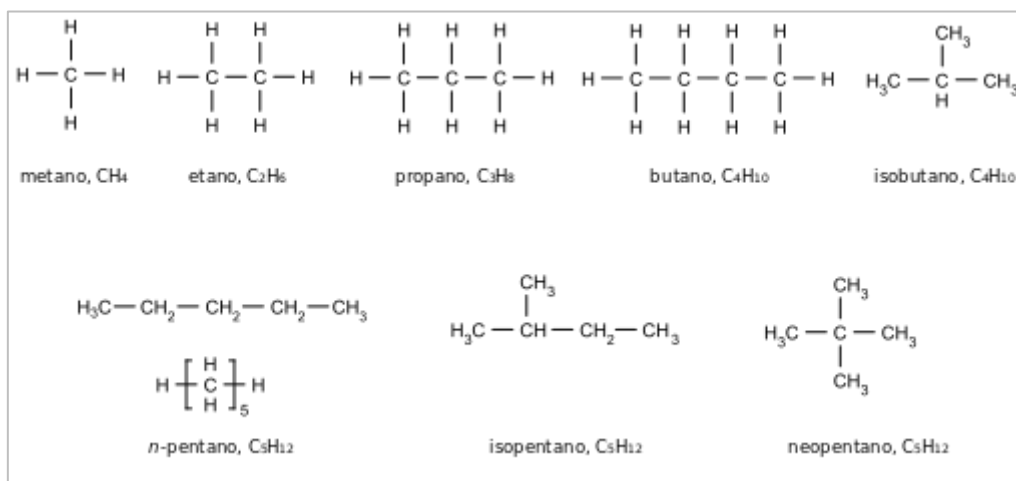


Figura 2-1 Molecole dei principali composti organici costituenti gli idrocarburi

Una prima distinzione tra i numerosi composti idrocarburi si riferisce allo stato fisico (stato di aggregazione) nelle condizioni di pressione e di temperatura ambiente, che a sua volta dipende dal peso molecolare:

- Idrocarburi solidi o semisolidi, aventi peso molecolare maggiore;
- Idrocarburi liquidi, aventi peso molecolare intermedio;
- Idrocarburi gassosi, aventi peso molecolare minore.

Dal punto di vista delle proprietà chimiche gli idrocarburi si distinguono in due classi principali:

- Idrocarburi Aromatici: dotati di "aromaticità", ovvero una proprietà chimica impartita da un anello benzenico, che li rende particolarmente stabili;
- Idrocarburi Alifatici: non dotati di aromaticità ma a catena ramificata.

Le caratteristiche vengono riassunte in Tabella 2-1.

Il destino ambientale di una miscela idrocarburica è fortemente influenzato dalla sua composizione e struttura chimica e la sua distribuzione nell'ambiente varia notevolmente con il passare del tempo.

I singoli composti della miscela si ripartiscono in misura differente nelle varie matrici ambientali e subiscono specifici processi di degradazione. Inoltre, data la loro eterogeneità e complessità, non è possibile attribuire un unico valore di tossicità all'intera miscela idrocarburica. La normativa ambientale prevede quindi specifiche analisi chimiche finalizzate a determinare i singoli contributi presenti nelle miscele idrocarburiche (ad es. le note analisi di "speciazione" MADEP).

In Tabella 2-1, si riassumono le principali caratteristiche chimico-fisiche tossicologiche di tali composti.

In particolare, dal punto di vista ambientale, si segnala che i composti idrocarburici con struttura molecolare composta esclusivamente da atomi di carbonio e di idrogeno hanno una densità inferiore a quella dell'acqua e, per tale motivo, è possibile riscontrarli in natura in forma pura (i famosi LNAPL – Light Non Aqueous Phase Liquids) e surnatanti le acque di falda.

Volatilità (Costante di Henry, pressione di vapore, punto di ebollizione)	
Stato fisico	
Solubilità (Solubilità, Costante di ripartizione suolo/acqua, Costante di ripartizione ottanolo/acqua)	
Diffusione (Coefficiente di diffusione in aria e in acqua)	
Cancerogenicità (Classificazione IARC, International Agency for Research on Cancer)	
Infiammabilità	

Tabella 2-1 Caratteristiche Idrocarburi

Composti Organici Aromatici (BTEXS)

Per composti aromatici si intende l'insieme di sostanze chimiche aventi una specifica struttura molecolare, denominata anello benzenico. Il composto più noto è il Benzene, una sostanza chimica organica, fondamentale per i processi industriali legati alla "chimica fine", che si presenta in forma liquida ed inodore, altamente infiammabile e caratterizzata da un odore dolciastro ed aromatico, che a temperatura ambiente evapora facilmente nell'aria. Il Benzene è costituito da 6 atomi di carbonio con 6 atomi di idrogeno, visibile in

Figura 2-2.

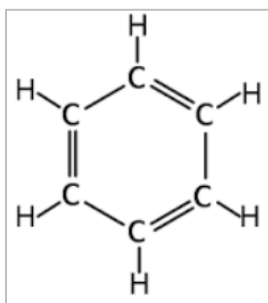


Figura 2-2 Molecola di Benzene

I principali composti derivati dal Benzene (generalmente indicato con la lettera B nella classe dei BTEXS) sono: toluene (T), etilbenzene (E), xileni (m-xilene, o-xilene, p-xilene - X) e stirene (S).

In particolare, dal punto di vista ambientale si segnala che i BTEXS sono composti volatili e solubili, i quali tendono ad avere elevate caratteristiche di diffusività, sia in aria sia in acqua.

Tra i BTEXS, secondo la classificazione di Cancerogenicità definita dallo IARC (International Agency for Research on Cancer) il composto con tossicità maggiormente elevata è sicuramente il benzene. L'inalazione di un tasso molto elevato di benzene, infatti, può portare al decesso. Il principale effetto di un'esposizione cronica al benzene è il danneggiamento dei tessuti ossei e la diminuzione delle cellule del midollo osseo. Le caratteristiche vengono riassunte in **Tabella 2-2**.

Volatilità (Costante di Henry, pressione di vapore, punto di ebollizione)	
Stato fisico	
Solubilità (Solubilità, Costante di ripartizione suolo/acqua, Costante di ripartizione ottanolo/acqua)	
Diffusione (Coefficiente di diffusione in aria e in acqua)	
Cancerogenicità (Classificazione IARC, International Agency for Research on Cancer)	★ benzene, ★★ etilbenzene e stirene, ★★★ toluene e xileni
Infiammabilità	

Tabella 2-2 Caratteristiche BTEX

Idrocarburi Policiclici Aromatici

Con il termine IPA si intendono numerosi composti organici con due o più anelli aromatici condensati tra loro. I composti IPA sono spesso presenti in atmosfera a causa della combustione incompleta di materiale organico e dall'uso di olio combustibile, gas, carbone e legno nella produzione di energia. Le fonti più importanti di origine antropica sono rappresentate da eventuali sversamenti accidentali e dalle emissioni veicolari seguiti dagli impianti termici, dalle centrali termoelettriche e dagli inceneritori.

I composti IPA sono spesso associati alle polveri sospese e in particolare alle particelle con diametro aerodinamico minore di 2 micron e quindi in grado di raggiungere facilmente la regione alveolare del polmone e da qui il sangue e quindi i tessuti. Inoltre, alcune molecole sono riconosciute per le proprietà mutagene e cancerogene (ad es. il noto Benzo(a)pirene).

Dal punto di vista ambientale i composti IPA si possono generalmente distinguere in due categorie differenti a seconda delle loro caratteristiche chimico-fisiche:

- IPA con peso molecolare inferiore: sono volatili e solubili;
- IPA con peso molecolare maggiore: non sono volatili e sono insolubili in acqua.

Le caratteristiche degli IPA sono riassunte in **Tabella 2-3**, mentre in **Figura 2-3** è possibile osservare la struttura molecolare del Benzo(a)pirene.

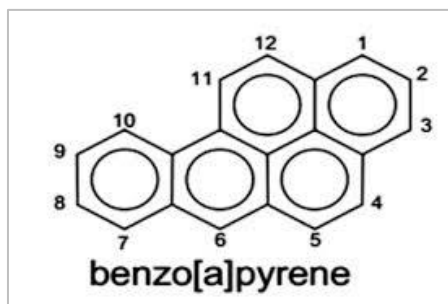


Figura 2-3 Molecola di Benzo(a)pirene

Volatilità (Costante di Henry, pressione di vapore, punto di ebollizione)	
Stato fisico	
Solubilità (Solubilità, Costante di ripartizione suolo/acqua, Costante di ripartizione ottanolo/acqua)	
Diffusione (Coefficiente di diffusione in aria e in acqua)	
Cancerogenicità (Classificazione IARC, International Agency for Research on Cancer)	★ Benzo(a)pirene ★★ Benzo(a)antracene, Benzo(b)fluorantene, Benzo(k)fluorantene, Crisene, Dibenzo(a,i)pirene, Dibenzo(a,l)pirene, Dibenzo(a,h)pirene, Indenopirene, Naftalene ★★★ Benzo(g,h,i)perilene, Dibenzo(a,e)pirene, Pirene, Acenafteene, Antracene, Fenantrene, Fluorantene, Fluorene, Perilene Non Classificata: Acenafilene
Infiammabilità	

Tabella 2-3 Caratteristiche IPA

Composti Organici Clorurati

I composti idrocarburi clorurati (o solventi clorurati), sono molecole di sintesi derivanti da idrocarburi con l'aggiunta di un alogeno, il cloro (Cl).

In genere gli organo-clorurati hanno una particolare stabilità che gli conferisce una notevole persistenza nel mezzo poroso acquifero. Tale proprietà è una caratteristica indotta dal legame Carbonio-Cloro; la presenza del cloro, infatti, riduce notevolmente la reattività degli altri legami presenti nelle molecole organiche e diminuisce la biodegradabilità ed il potenziale di

attenuazione naturale. Questo fa sì che, una volta penetrati nell'ambiente, gli idrocarburi alogenati vengano degradati con estrema difficoltà con il conseguente loro accumulo nell'ambiente stesso. Ciò è aggravato dal fatto che la maggior parte di essi risultano idrofobi, cioè non solubili in acqua.

I composti clorurati sono generalmente elementi volatili, hanno elevata densità e bassa viscosità. Avendo densità superiore a quella dell'acqua e risultando poco miscibili con le acque sotterranee, possono depositarsi nelle porzioni inferiori dell'acquifero come fluidi puri (DNAPL, *Dense Non Aqueous Phase Liquids*). Queste peculiari caratteristiche rendono particolarmente difficile una loro bonifica.

Di seguito, in **Figura 2-4**, considerando la complessità in termini bonifica di tali composti, si riporta la classica catena di degradazione del noto composto Tetracloroetilene (PCE – 1,1,2,2-tetracloroetene) a Cloruro di Vinile (VC - dal punto di vista tossicologico più cancerogeno del PCE) fino al composto Etene.

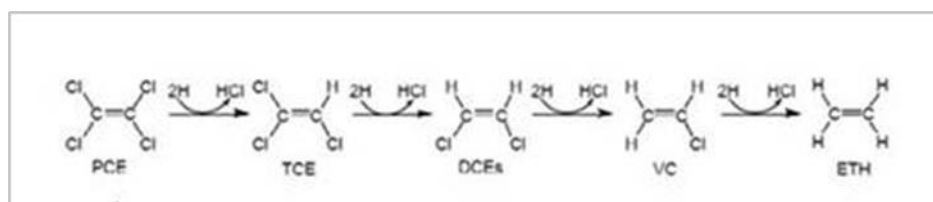


Figura 2-4 Catena di degradazione del Tetracloroetilene

A loro volta i composti clorurati si distinguono in:

- Alifatici Clorurati non cancerogeni
- Alifatici Clorurati cancerogeni
- Alifatici Alogenati cancerogeni

Le caratteristiche di tali composti sono riassunte in **Tabella 2-4**

Volatilità (Costante di Henry, pressione di vapore, punto di ebollizione)	
Stato fisico	
Solubilità (Solubilità, Costante di ripartizione suolo/acqua, Costante di ripartizione ottanolo/acqua)	
Diffusione (Coefficiente di diffusione in aria e in acqua)	

Cancerogenicità (Classificazione IARC, International Agency for Research on Cancer)	★ 1,2 – Dicloropropano, Cloruro di Vinile, Tricloroetilene ★★ 1,2,3 – Tricloropropano, 1,1,2,2 – Tetracloroetano, Diclorometano, Triclorometano, 1,2 – Dicloroetano, Tetracloroetilene (PCE), 1,2 – Dibromoetano, Bromodiclorometano ★★★ 1,1,1 – Tricloroetano, 1,1,2 – Tricloroetano, Clorometano, 1,1 – Dicloroetilene, Esaclorobutadiene, Dibromoclorometano, Tribromometano (Bromoformio) Non Classificati: 1,1 – Dicloroetano, 1,2 – Dicloroetilene
Infiammabilità	

Tabella 2-4 Caratteristiche composti organici clorurati

Eteri (MTBE e ETBE)

Il metil-t-butil etere (o MTBE) è un etere che a temperatura ambiente si presenta come un liquido incolore e dall'odore caratteristico. È un composto organico di sintesi derivante dal metanolo e dal 2-metil-2-propanolo, che viene impiegato come additivo per la benzina per aumentare il numero di ottano in sostituzione del piombo tetraetile, in quanto più economico e meno tossico. Tuttavia, è piuttosto solubile in acqua e non viene trattenuto negli strati superficiali del terreno. Per questo motivo, una volta raggiunte le acque sotterranee, si disperde facilmente e viene scarsamente degradato. All'uomo può provocare irritazione cutanea, ma non rappresenta un pericolo di tossicità acuta.

L'etil-t-butil-etere (o ETBE) è un etere, un composto organico con caratteristiche molto simili all'MTBE. Come l'MTBE può essere utilizzato per aumentare il numero di ottano e per questo viene usato come additivo per benzine. Viene prodotto dalla reazione di etanolo ed isobutene. Dal punto di vista tecnico le caratteristiche dell'ETBE sono molto simili a quelle dell'MTBE.

La struttura delle due molecole di MTBE ed ETBE è visibile in **Figura 2-5**.

Non sono normati secondo il Decreto Legislativo 152 del 2006, ma presentano limiti fissati con Provvedimento dell'ISS (ripresi successivamente dal D.M. 31/2015, specifico per i Punti Vendita Carburante). Le loro caratteristiche sono riassunte in **Tabella 2-5**.

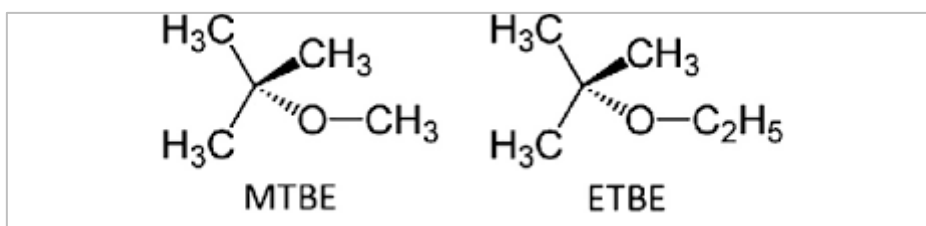


Figura 2-5 Molecole di MTBE e ETBE

Volatilità (Costante di Henry, pressione di vapore, punto di ebollizione)	
Stato fisico	
Solubilità (Solubilità, Costante di ripartizione suolo/acqua, Costante di ripartizione ottanolo/acqua)	
Diffusione (Coefficiente di diffusione in aria e in acqua)	
Cancerogenicità (Classificazione IARC, International Agency for Research on Cancer)	MTBE Non Classificato: ETBE
Infiammabilità	

Tabella 2-5 Caratteristiche MTBE e ETBE

Sostanze perfluoro-alchiliche (PFAS)

Le sostanze perfluoroalchiliche (PFAS), tra i contaminanti emergenti più significativi, sono composti organici formati da una catena alchilica di lunghezza variabile (in genere da 4 a 14 atomi di carbonio) totalmente fluorurata e da un gruppo funzionale idrofilico, generalmente un acido carbossilico o solfonico.

Le molecole più utilizzate e studiate tra le centinaia di questa famiglia sono l'acido perfluorooctanoico (PFOA) e l'acido perfluorooottansolfonico (PFOS).

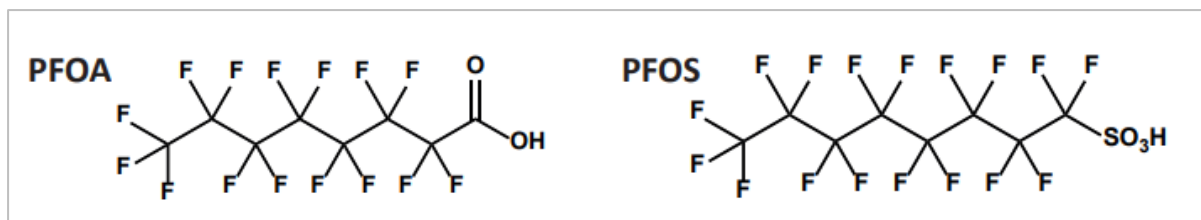


Figura 2-6: Struttura molecolare PFAS

Si presentano come repellenti all'acqua e ai grassi e stabili dal punto di vista termico; inoltre, dal momento che possiedono elevata tensioattività, sono molto utili in un ampio campo di

applicazioni industriali e prodotti di largo consumo. Le principali applicazioni, fin dagli anni '50 del secolo scorso hanno riguardato la metallurgia, la plastica, il tessile e la carta.

Proprio per le loro caratteristiche intrinseche, tali composti risultano essere degli inquinanti organici molto persistenti, nonché bioaccumulabili e tossici. Infatti, tendono a trasferirsi alle catene trofiche e, in ultimo, all'essere umano, soprattutto attraverso la via alimentare.

Essi sono in grado di rimanere nell'aria per giorni e di essere trasportati prima di cadere sul suolo e contaminare le acque. Le principali fonti di esposizione possono essere l'ingestione di acqua potabile contaminata o di cibi con alti livelli di questi composti (ad esempio, pesce e frutti di mare) o contaminati da imballaggi che li contengano. La popolazione generale può essere anche esposta attraverso l'inalazione di aria contenente polveri o contatto di superfici o suoli contaminati, principalmente nei bambini. Sulla base della letteratura scientifica, nelle industrie che hanno prodotto o utilizzato PFOA e PFOS, i lavoratori possono essere stati esposti a quantità elevate di tali composti e si possono riscontrare alti livelli di queste sostanze nel sangue. La popolazione residente in località vicine a tali impianti può essere stata esposta ai PFOA e PFOS attraverso acqua potabile e/o dieta.

Gli studi disponibili suggeriscono che un maggiore livello ematico di PFOA e PFOS possa essere associato ad un aumento di livelli di colesterolo nel sangue, di acido urico e ad un aumentato rischio di pressione alta. Il principale organo bersaglio sembra essere il fegato anche in studi effettuati sugli animali.

Sebbene alcuni studi abbiano suggerito una possibile correlazione con tumori testicolari e renali, a causa di incongruenze osservate, non è stato possibile concludere in modo definitivo circa il legame tra l'esposizione a PFOA e PFOS e il cancro nell'uomo.

Le loro caratteristiche sono riassunte in **Tabella 2-6**.

Volatilità (Costante di Henry, pressione di vapore, punto di ebollizione)	
Stato fisico	
Solubilità (Solubilità, Costante di ripartizione suolo/acqua, Costante di ripartizione ottanolo/acqua)	
Diffusione (Coefficiente di diffusione in aria e in acqua)	
Cancerogenicità (Classificazione IARC, International Agency for Research on Cancer)	In fase di studio
Infiammabilità	

Tabella 2-6 Caratteristiche PFAS

2.2 Composti inorganici

Sebbene tra le sostanze inorganiche che interessano le contaminazioni ambientali esistano anche composti quali Fluoruri, Solfati, Nitriti, Boro e Cianuri, i contaminanti prevalenti appartengono alla famiglia dei **Metalli**.

Si definiscono metalli quegli elementi chimici che formano ossidi basici e reagiscono con gli acidi dando Sali. I metalli sono caratterizzati da elevata malleabilità e duttilità, elevato potere riflettente, buona conducibilità termica e conducibilità elettrica. Presentano, inoltre, strutture cristalline a elevata simmetria e compattezza e sono gli elementi chimici più numerosi.

A temperatura ambiente e a pressione atmosferica si presentano allo stato solido, ad esclusione del Mercurio che invece risulta liquido. Questa famiglia comprende:

- Alluminio;
- Arsenico;
- Ferro;
- Manganese;
- Piombo;
- Mercurio;
- Zinco;
- Cromo totale;
- Rame.

Le caratteristiche dei metalli sono riassunte in **Tabella 2-7**.

Volatilità (Costante di Henry, pressione di vapore, punto di ebollizione)	
Stato fisico	
Solubilità (Solubilità, Costante di ripartizione suolo/acqua, Costante di ripartizione ottanolo/acqua)	
Diffusione (Coefficiente di diffusione in aria e in acqua)	
Cancerogenicità (Classificazione IARC, International Agency for Research on Cancer)	★ Arsenico, Berillio, Cadmio, Cromo VI, Nichel ★★ Piombo ★★★ Selenio, Mercurio, Cromo Totale Non Classificati: Alluminio, Antimonio, Argento, Cobalto, Ferro, Manganese, Rame, Stagno, Tallio, Vanadio, Zinco
Infiammabilità	 L'alluminio puro in polvere

Tabella 2-7 Caratteristiche Metalli

2.3 Altre sostanze

Piombo Tetraetile

Il Piombo tetraetile è un composto tossico appartenente alla classe dei metallorganici. In passato veniva utilizzato come additivo nella benzina per aumentarne il numero di ottano, ma a causa della sua tossicità è stato sostituito con altre sostanze.

Il piombo tetraetile è un liquido viscoso incolore, ottenuto dalla reazione di cloruro di etile con una lega piombo-sodio, le cui caratteristiche sono riassunte in **Tabella 2-8**. La struttura molecolare è visibile in **Figura 2-7**.

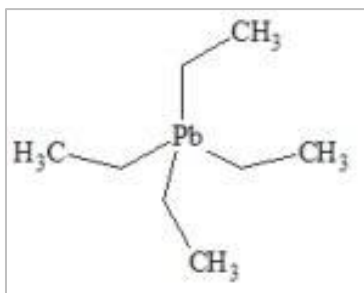


Figura 2-7 Molecola di Piombo Tetraetile

Volatilità (Costante di Henry, pressione di vapore, punto di ebollizione)	
Stato fisico	
Solubilità (Solubilità, Costante di ripartizione suolo/acqua, Costante di ripartizione ottanolo/acqua)	
Diffusione (Coefficiente di diffusione in aria e in acqua)	
Cancerogenicità (Classificazione IARC, International Agency for Research on Cancer)	
Infiammabilità	

Tabella 2-8 Caratteristiche Piombo Tetraetile

3.0 ELEMENTI STRATEGICI DI VALUTAZIONE

La corretta definizione e la successiva realizzazione degli interventi di bonifica devono essere preceduti da un'accurata attività di caratterizzazione del sito inquinato e dell'area soggetta agli effetti dell'inquinamento.

La scelta della migliore tecnica di bonifica disponibile non può prescindere da un'approfondita valutazione ed un bilanciamento dei vari interessi tecnico-strategici e dall'analisi delle numerose variabili, sia di ordine generale sia soprattutto sito-specifiche, quali in particolare:

- lo stato dei luoghi (sito dismesso o attivo);
- eventuali progetti di risviluppo già definiti per il sito;
- il livello di protezione dell'ambiente che sarebbe desiderabile conseguire;
- l'esistenza o meno di tecniche affidabili in grado di conseguire e mantenere nel tempo detti livelli di protezione;
- la sostenibilità ambientale delle tecnologie di bonifica selezionate;
- l'entità dei costi di progettazione, realizzazione, gestione monitoraggio, ecc. da sostenere nelle varie fasi dell'intervento.

La formulazione più evoluta cui deve ispirarsi tale bilanciamento di interessi è data dalla definizione di "**migliori tecniche disponibili**" (**BAT**), contenuta nella Direttiva 96/61/CE e recepita nel nostro ordinamento (D.Lgs. 152/2006 Parte Quarta, Titolo V, Allegato 3):

- "**tecniche**": ovvero sia le tecniche impiegate, sia le modalità di progettazione, costruzione, manutenzione, esercizio e chiusura dell'impianto;
- "**disponibili**": ovvero le tecniche sviluppate su una scala che ne consenta l'applicazione in condizioni economicamente e tecnicamente valide nell'ambito del pertinente comparto industriale, prendendo in considerazione i costi e i vantaggi, indipendentemente dal fatto che siano o meno applicate o prodotte nello Stato membro di interesse;
- "**migliori**": ovvero le tecniche più efficaci per ottenere un elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso.

In particolare, la scelta della tecnologia di bonifica più idonea deve tendere a:

- privilegiare le tecniche che **riducono permanentemente** e significativamente le concentrazioni, gli effetti tossici e la mobilità dei inquinanti;
- privilegiare le **tecniche in situ** o, eventualmente, ex situ on-site;
- privilegiare le tecniche che **immobilizzano le sostanze inquinanti**;
- privilegiare le tecniche che permettano il **trattamento e il riutilizzo** in situ dei materiali eterogenei o di risulta per i riempimenti;
- prevedere il **riutilizzo di suoli** e materiali eterogenei trattati off-site;
- privilegiare l'impiego di **materiali organici** di adeguata qualità;
- evitare i **rischi addizionali**, quali inquinamento dell'aria, delle acque superficiali e delle matrici terreno/acque sotterranee;
- evitare i **rischi igienico-sanitari** per la popolazione durante gli interventi.

Sulla base della consolidata esperienza sviluppata nel campo delle bonifiche ambientali, di seguito sono riassunti i principali fattori di scelta per l'applicazione della migliore tecnologia disponibile, raggruppati in **tre macro-categorie**:

- natura dell'inquinante;
- fattori sito specifici;
- tecnologie applicabili.

3.1 Natura dell'inquinante

Tra i fattori legati alla natura intrinseca dei contaminanti, è opportuno prendere in considerazione i seguenti aspetti:

- caratteristiche chimico-fisiche;
- distribuzione spaziale (profondità ed estensione) e concentrazioni;
- frazionamento delle masse inquinanti in fasi (libera, adsorbita, disciolta, gassosa);
- tossicità / infiammabilità / esplosività;
- stabilità / mobilità / persistenza;
- biodegradabilità.

3.2 Fattori Sito specifici

Tra i fattori legati alla natura del sito, è opportuno prendere in considerazione i seguenti aspetti:

- comparto interessato dall'inquinamento e valore del sito stesso;
- presenza di recettori sensibili;
- target di decontaminazione da raggiungere in funzione destinazione d'uso finale del sito e calcolo degli obiettivi;
- contesto geologico e idrogeologico;
- vicinanza e vulnerabilità acquifero, idrogeologia sito, meteorologia ed esistenza punti di prelievo acqua sotterranea;
- natura e tipo di attività praticate sul sito;
- accessibilità e disponibilità *utilities*;
- presenza di strutture interrate e fuori terra.

3.3 Tecnologie applicabili

Tra i fattori legati alle tecnologie disponibili, è opportuno prendere in considerazione i seguenti aspetti:

- **realizzabilità tecnica**, livello di sviluppo, limiti e confidenza;
- presenza di **effetti indesiderati** e di rischio incidenti;
- **costi** legati al trattamento e **tempo** disponibile per la bonifica;
- grado di **sostenibilità ambientale**.

4.0 CLASSIFICAZIONE DELLE TECNOLOGIE DI BONIFICA

Le **diverse tecnologie di bonifica** possono essere preliminarmente classificate in funzione dei seguenti criteri:

- tipologia di intervento (es. in situ-ex situ);
- natura dei processi biologici o chimico-fisici previsti;
- azione esercitata sui contaminanti.

Spesso, in presenza di più contaminanti o di fasi differenti in cui è possibile rilevare nel sottosuolo il singolo contaminante (LNAPL, disciolto, ecc.), possono essere applicate contemporaneamente o per step successivi diverse tecnologie di bonifica.

Di seguito si fornisce un breve focus introduttivo sulle tipologie di bonifica adottabili; per una descrizione dettagliata delle principali tecniche di “remediation”, si rimanda al Capitolo 7 del presente Vademecum.

4.1 Tipologia di intervento previsto

Il sistema di classificazione generalmente adottato per individuare la tipologia di intervento definisce, in funzione del luogo di trattamento della/e matrice/i contaminata/e:

- **interventi in-situ:** effettuati senza movimentazione o rimozione del suolo;
- **interventi ex situ on-site:** con movimentazione e rimozione di materiali e suolo inquinato, ma con trattamento nell'area del sito stesso e possibile riutilizzo del suolo trattato;
- **interventi ex situ off-site:** con movimentazione e rimozione di materiali e suolo inquinato fuori dal sito stesso, per avviare i materiali e il suolo negli impianti di trattamento autorizzati o in discarica.

Tra i vari interventi in situ, nell'ambito del presente Vademecum, si contempla anche il contenimento della contaminazione, generalmente come azione di MISE, che consiste nell'applicazione di operazioni volte a limitare la potenziale migrazione dell'inquinante.

In particolare, se da un lato gli interventi ex-situ sono caratterizzati da una maggiore flessibilità in termini di controllo e gestione del processo, dall'altro producono un impatto ambientale maggiore, limitando di fatto la fruibilità del sito durante le attività di bonifica.

Una prima cernita della tipologia di intervento può essere effettuata considerando le principali caratteristiche del sito in termini di estensione della contaminazione, caratteristiche del suolo, presenza di vincoli e/o recettori ed in funzione dei tempi previsti di restituzione agli usi legittimi dell'area. A titolo indicativo, in **Tabella 4-1** in calce, sono riassunti alcuni elementi di valutazione, legati alle caratteristiche del sito, in funzione delle quali adottare la tipologia di intervento più adeguata (Colombano et. al, 2010 - modificata).

CARATTERISTICHE DEL SITO					
	Estensione della contaminazione	Caratteristiche del suolo	Vincoli strutturali	Vicinanza dei recettori	Tempi esecuzione interventi
EX SITU	Estensione verticale e orizzontale limitata	Molto eterogeneo, con flussi preferenziali	Assenza di vincoli strutturali nell'area di interesse	Nessun recettore sensibile nelle immediate vicinanze	Celeri tempi di restituzione agli usi legittimi
IN SITU	Estensione verticale e orizzontale importante	Uniforme, permeabile o moderatamente permeabile	Presenza di strutture nell'ambito dell'area contaminata	Recettori sensibili nelle immediate vicinanze da tutelare	Tempi di restituzione all'uso legittimo del sito non definiti

Tabella 4-1 Valutazione preliminare tipologie di intervento in funzione delle principali caratteristiche del sito

4.2 Natura dei processi biologici o chimico-fisici previsti

I trattamenti di bonifica possono essere classificati in funzione della natura del processo o del meccanismo previsto:

- biologico;
- chimico;
- fisico.

Per **tecnologie di bonifica biologiche**, si intendono quei trattamenti finalizzati alla decomposizione delle molecole organiche grazie all'attività metabolica di microrganismi autoctoni presenti nel sottosuolo, oppure introdotti al suo interno.

L'obiettivo consiste nell'incrementare la crescita microbica, garantendo dunque la presenza di nutrienti e di adeguate condizioni ambientali (come ad es. pH, temperatura), al fine di velocizzare i processi.

All'interno della presente categoria sono inclusi anche quei processi noti come *Phytoextraction* (nell'ambito della più complessiva *Phytoremediation*), che si basano sulla capacità delle piante di estrarre dal suolo i contaminanti, concentrandoli principalmente nelle parti aeree (fusto e foglie). Una volta accumulato il contaminante, le piante devono essere avviate a smaltimento controllato. Questa tecnica risulta particolarmente adatta per il trattamento dei composti inorganici più recalcitranti (ad es. i metalli pesanti), riscontrati generalmente nel primo metro del sottosuolo.

I **metodi chimico-fisici** invece sfruttano le proprietà chimiche e fisiche del contaminante, o della matrice contaminata, per diminuire la concentrazione dei contaminanti e/o contenere la contaminazione.

I **trattamenti chimici** interessano la trasformazione dello stato chimico degli inquinanti, la quale può portare rispettivamente ad una riduzione della loro concentrazione/tossicità e/o

all'incremento/riduzione della loro mobilità. A seconda del principio di funzionamento, possiamo avere:

- riduzione: vengono utilizzati degli agenti chimici "riducenti" per modificare la struttura dei composti chimici al fine di ottenere una minore tossicità rispetto alle relative forme ossidate;
- ossidazione: grazie ad agenti ossidanti contenuti all'interno di miscele spesso iniettate all'interno della matrice ambientale coinvolta, la sostanza organica inquinante viene trasformata, alla fine del processo ossidativo, in anidride carbonica e acqua, o eventualmente, viene ridotta la sua tossicità;
- fissazione: si utilizza in prevalenza per ridurre la mobilità dei contaminanti (ad es. dei metalli pesanti) tramite l'iniezione di agenti chimici chelanti. Questi ultimi, legati ai polluenti, si accumulano in determinate porzioni di suolo e vengono quindi rimossi e trattati;
- estrazione: si utilizzano iniezioni con solventi per trasferimento degli inquinanti dalla fase solida a quella liquida, i quali vengono successivamente rimossi dal sottosuolo e trattati.

I **trattamenti fisici** hanno come obiettivo il mutamento dello stato fisico degli inquinanti, dal quale ne consegue il trasferimento tra le diverse fasi del suolo. I principali meccanismi sono:

- solidificazione/stabilizzazione: l'utilizzo di particolari agenti chimici di varia natura determina la formazione di una massa stabile a ridotta permeabilità;
- termici: viene utilizzato il calore al fine di aumentare la volatilità, bruciare, decomporre o fondere i polluenti, producendo composti inorganici (ad es. CO₂, ossidi di azoto e zolfo). All'interno di tale categoria rientra la tecnica della vetrificazione che consiste nella creazione di una matrice solida amorfa, ricca in inquinanti non volatilizzati.

4.3 Azione da esercitare sui contaminanti

In funzione della tipologia di azione prevista sui contaminanti, si possono avere le seguenti tipologie di risanamento:

- Immobilizzazione: prevede tecniche che consentono di modificare la mobilità e/o la tossicità degli inquinanti mediante due tipi di processi:
 - *Modifica dell'inquinante*: ovvero il cambiamento nel comportamento o nella tossicità attraverso reazioni chimiche;
 - *Modifica dell'ambiente ricevente*: tra cui la riduzione della permeabilità e della porosità.
- Trasformazione e/o separazione: essa può avvenire mediante processi chimici, termici, fisici e biologici, precedentemente descritti.

5.0 MATRICE DI SCREENING

Nell'ambito del presente Vademecum, sono state implementate specifiche **matrici di Screening finalizzate a selezionare le migliori tecnologie di bonifica applicabili per i terreni e per le acque sotterranee**.

Come modelli di riferimento conosciuto ed utilizzato a livello nazionale ed internazionale sono stati utilizzati, a seguito di modifiche:

- la matrice di screening realizzata da ISPRA;
- la matrice di screening sviluppata dalla *Federal Remediation Technologies Roundtable*.

Si specifica che gli strumenti di supporto decisionale, riportati di seguito, non sono da intendersi quali assoluti, dal momento che lo stato dell'arte sulle tecnologie di bonifica è in continuo aggiornamento. Questo aspetto insieme alla definizione futura del sito spesso incidono in misura preponderante nelle scelte della tecnologia più applicabile.

Le tecniche di "remediation" citate rappresentano le strategie di bonifica potenzialmente applicabili in fase di elaborazione di un progetto di bonifica **maggiormente adottate**, suddivise per matrice interessata dalla contaminazione (terreni/falda), luogo di trattamento (in situ/ex situ), meccanismo di trattamento (biologico/chimico-fisico/termico).

Le variabili analizzate tengono in considerazione la tipologia della contaminazione (contaminanti significativi ai sensi della normativa vigente), la granulometria per la matrice terreno (grossolana/fine) e il grado di permeabilità per la matrice falda (alta/bassa).

Da ultimo, viene posta l'attenzione anche su parametri di importanza rilevante nella scelta decisionale, ovvero i residui prodotti dalle attività di bonifica (streaming residui), i tempi e i costi degli interventi.

5.1 Matrice di Screening Terreni

				INQUINANTI									
				Composti inorganici		Composti organici							
PROCESSO	STREAM RESIDUI	TEMPI DI BONIFICA	COSTO	Metalli escluso mercurio		Idrocarburi leggeri / composti aromatici		Idrocarburi pesanti (C>12)		IPA		Composti alifatici clorurati volatili	
Litologia				sabbioso / ghiaioso	limoso / argilloso	sabbioso / ghiaioso	limoso / argilloso	sabbioso / ghiaioso	limoso / argilloso	sabbioso / ghiaioso	limoso / argilloso	sabbioso / ghiaioso	limoso / argilloso
Trattamenti biologici in situ													
Bioventilazione	Vapore/Liquido	B	15-50 €/ton di suolo trattato	☹	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Bioremediation assistita	-	A	25-75 €/ton di suolo trattato	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Fitodepurazione	Vapore/Solido	A	15-40 €/m² di superficie di suolo trattata*	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Trattamenti biologici ex situ													
Landfarming	Vapore/Liquido	M	20-60 €/ton di suolo trattato	☹	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Biopile	Vapore	B/M	50-80 €/ton di suolo trattato	☹	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Trattamenti chimico-fisici in situ													
Soil Vapor Extraction	Vapore	B	25-60 €/ton di suolo trattato	☹	☹	😊	😊	☹	☹	☹	☹	😊	😊
Solidificazione-stabilizzazione	Solido	M	25-70 €/ton di suolo trattato	😊	😊	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹
Soil-flushing	Liquido	A	40-120 €/ton di suolo trattato	☹	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Ossidazione chimica	Sol./Liq./Vap.	B	30-90 €/ton di suolo trattato	☹	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Trattamenti chimico-fisici ex situ													
Soil-washing	Solido/Liquido	B	100-400 €/ton di suolo trattato	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Scavo e smaltimento	-	B	50-250 €/ton di suolo scavato	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Trattamenti termici in situ													
Estrazione-strippaggio con vapore	Vapore/Liquido	B	30-100 €/ton di suolo trattato	☹	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Vetrificazione	Vapore/Solido	B	250-800 €/ton di suolo trattato	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Trattamenti termici in situ/ex situ													
Desorbimento termico	Vapore	B	100-250 €/ton (in situ); 100-400 €/ton di suolo trattato (ex-situ)	☹	☹	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊

LEGENDA: A=alto/i; M=medio/i;

B=brevi/basso

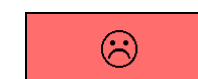
(*)=escluso l'apporto di terreno vegetale



applicabile



applicabile con basse efficienze



non applicabile

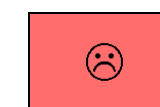
5.2 Matrice di Screening Acque Sotterranee

				INQUINANTI								
				Composti inorganici		composti organici						
PROCESSO	RESIDUI PRODOTTI	TEMPI DI BONIFICA	COSTO	Metalli	Composti aromatici		Composti alifatici alogenati cancerogeni		Idrocarburi			
Grado di permeabilità				alta permeabilità	bassa permeabilità	alta permeabilità	bassa permeabilità	alta permeabilità	bassa permeabilità	alta permeabilità	bassa permeabilità	
Attenuazione Naturale	-	A	12-65 €/m² di superficie di acqua trattata	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	
Trattamenti Biologici In Situ												
Fitodepurazione	Solido	A	15-40 €/m² di superficie acqua trattata	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	
Biosparging	-	M	10-50 €/m³ di acqua trattata	☹	☹	☺	☹	☹	☹	☹	☹	
Bioremediation	-	A	25-60 €/m³ di acqua trattata	☹	☹	☺	☺	☺	☺	☺	☺	
Bioaugmentation	-	A	25-60 €/m³ di acqua trattata	☹	☹	☺	☺	☺	☺	☺	☺	
Trattamenti Biologici Ex Situ												
Processi a fanghi attivi	Semi- solido/Liquido	A	40-200 €/m³ di acqua trattata	☹	☹	☺	☹	☺	☹	☺	☹	
Bioreattori a fase fluida	Semi- solido/Liquido	A	60-200 €/m³ di acqua trattata	☹	☹	☺	☹	☺	☹	☺	☹	
Trattamenti Chimico-Fisici In Situ												
Air-Sparging	Gassoso	M	15-55 €/m³ di acqua trattata	☹	☹	☺	☹	☺	☹	☺	☹	
Barriere Permeabili Reattive	Solido	A	200-1500€/m² di superficie di barriera	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	
Multi Phase Extraction	Liquido/gassoso	M	40-100 €/m³ di fluidi emunti/trattati	☹	☹	☹	☺	☹	☺	☹	☺	
Ossidazione Chimica	Possibili sottoprodotti	B	30-90 €/m³ di acqua trattata	☹	☹	☺	☹	☺	☹	☺	☹	
Barriere idrauliche	Liquido	B	10-100 €/m³ di acqua emunta/trattata	☺	☹	☺	☹	☺	☹	☺	☹	
Trattamenti Chimico-Fisici Ex Situ												
Precipitazione chimica	Solido/Liquido	A	*	☺	☺	☹	☹	☹	☹	☹	☹	
Ossidazione	Solido/Liquido	A		☺	☺	☹	☹	☹	☹	☹	☹	
Chiariflocculazione	Solido/Liquido	A		☺	☺	☺	☺	☹	☹	☹	☹	
Adsorbimento	Liquido	A		☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	☹	
Ossidazione UV	Gassosa	A		☹	☹	☺	☺	☹	☹	☹	☹	
Strippaggio	Liquido	A		☹	☹	☹	☹	☹	☹	☺	☺	
Osmosi inversa	Solido/Liquido	A		☺	☺	☹	☹	☹	☹	☹	☹	

LEGENDA: A=alto/i; M=medio/i; B=brevi/basso
(*)= prezzi compresi nei singoli trattamenti di
bonifica citati nelle matrici



applicabile

applicabile con basse
efficienzenon
applicabile

6.0 PRINCIPALI TECNOLOGIE DI BONIFICA

Nel presente Capitolo vengono descritte nel dettaglio le principali tecnologie di bonifica presentate nelle matrici di Screening e suddivise in funzione dei seguenti criteri:

- tipologia di intervento (in situ – ex situ);
- natura dei processi utilizzati (biologici – chimico/fisici – termici).

Le schede redatte, suddivise per singola tecnologia, risultano così strutturate:

- una descrizione generale di inquadramento e dei principali criteri di funzionamento della tecnologia di bonifica;
- una seconda parte in cui sono forniti maggiori elementi di approfondimento relativi a:
 - condizioni e limiti di applicabilità della tecnologia;
 - componente impiantistica di base e principali parametri di sviluppo. In alternativa, mezzi necessari e fasi operative, laddove la tecnologia non necessiti di particolari configurazioni impiantistiche;
 - vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnologia;
 - eventuali tecnologie correlate.

Ciascuna scheda, da ultimo, è corredata di immagini e tabelle o grafici, per una migliore comprensione delle tecnologie di bonifica e delle loro applicazioni pratiche.

Tecnologie di Bonifica In Situ – Processi Biologici*

(*) La tecnologia di **Bioventing** è sinteticamente descritta come tecnologia correlata nella scheda relativa al Soil Vapour Extraction (processo chimico-fisico), così come la tecnologia di **Biosparging** è stata inserita nella scheda relativa all'Air Sparging (processo chimico-fisico).

6.1 Bioremediation

Definizione e criteri generali

La **Bioremediation (o Biorisanamento)** è una tecnica di bonifica applicabile al terreno insaturo, alla zona di frangia capillare e alla falda, per la bonifica di composti organici (idrocarburi (aromatici, alifatici), nitrobenzeni, clorobenzeni, fenoli, ammine aromatiche, alcuni pesticidi e fitofarmaci), alcuni metalli e altri composti inorganici.

La tecnica sfrutta la naturale capacità di degradare i contaminanti organici da parte dei microorganismi, presenti nel sottosuolo o appositamente introdotti, purché sussistano le condizioni ottimali per la crescita delle colonie microbiche (pH, temperatura, potenziale redox, quantità di ossigeno, nutrienti, ecc.). Essi infatti utilizzano i composti organici inquinanti come nutrimento e fonte di energia, trasformandoli in anidride carbonica, acqua e/o biomassa.

I contaminanti inorganici e i metalli non possono invece essere biodegradati, ma tecniche sperimentali dimostrano che l'azione dei microorganismi può essere usata per cambiarne lo stato di valenza e provocarne l'assorbimento, l'immobilizzazione nel suolo, la precipitazione, l'accumulo e la concentrazione all'interno della biomassa con conseguente diminuzione delle concentrazioni nella matrice ambientale impattata.

I **microorganismi** possono essere distinti in:

- aerobi: necessitano di ossigeno per i processi metabolici;
- anaerobi: non necessitano di ossigeno per i processi metabolici.

A seconda della tipologia di microorganismi e in funzione della tipologia di contaminante presente, i processi di biodegradazione possono avvenire secondo quattro **classi principali di reazione metabolica**:

- ossidazione aerobica: per opera dei microorganismi i contaminanti cedono elettroni, che vengono acquisiti dall'ossigeno, ossidandosi e venendo quindi convertiti in anidride carbonica, acqua e biomassa;
- ossidazione anaerobica: per azione dei microorganismi i contaminanti cedono elettroni che vengono acquisiti in sequenza, al diminuire del potenziale di ossido-riduzione, dai seguenti accettori finali di elettroni: nitrati, manganese (IV), ferro (III), solfati e anidride carbonica. I contaminanti vengono quindi metabolizzati in metano, quantità limitate di anidride carbonica e tracce di idrogeno gassoso;
- declorurazione riduttiva anaerobica: comporta la sostituzione di un atomo di cloro con un atomo di idrogeno ed avviene in modo efficace per alcuni composti clorurati (ad esempio PCE, TCE, DCE);
- cometabolismo: è un effetto secondario dell'azione biodegradativa. I composti non vengono infatti degradati direttamente dall'azione dei microorganismi, ma da enzimi (mono ossigenasi) che si generano a seguito della degradazione di altri composti presenti.

La strategia di biorisanamento attivo più applicata risulta essere la cosiddetta **Enhanced Bioremediation (Biostimolazione)**, ovvero la tecnica che implementa la stimolazione dei processi di biodegradazione mediante aggiunta al sistema esistente di nutrienti (azoto, fosforo, ecc.) e/o altri reagenti (ossigeno, lattato, ecc.) per fornire l'energia necessaria ai microrganismi per crescere e sopravvivere e favorire quindi i processi di degradazione. Può essere eseguita nelle seguenti condizioni:

- condizioni aerobiche: l'ossigeno viene fornito in forma gassosa mediante pompaggio di aria, o aggiungendo ossigeno puro, o prodotti a lento rilascio di ossigeno. L'utilizzo di ossigeno puro consente di creare condizioni ottimali, costanti e maggiormente stabili per i processi di degradazione.

I composti efficacemente trattati sono gli idrocarburi aromatici, i nitrobenzeni, i fenoli non clorurati, gli IPA, le ammine aromatiche e alcuni solventi clorurati. Con maggiore lentezza la degradazione aerobica può essere efficace anche per PCB debolmente clorurati, fenoli clorurati, cresoli e alcuni pesticidi e fitofarmaci.

La **Figura 6-1** illustra il principio di funzionamento della biodegradazione.

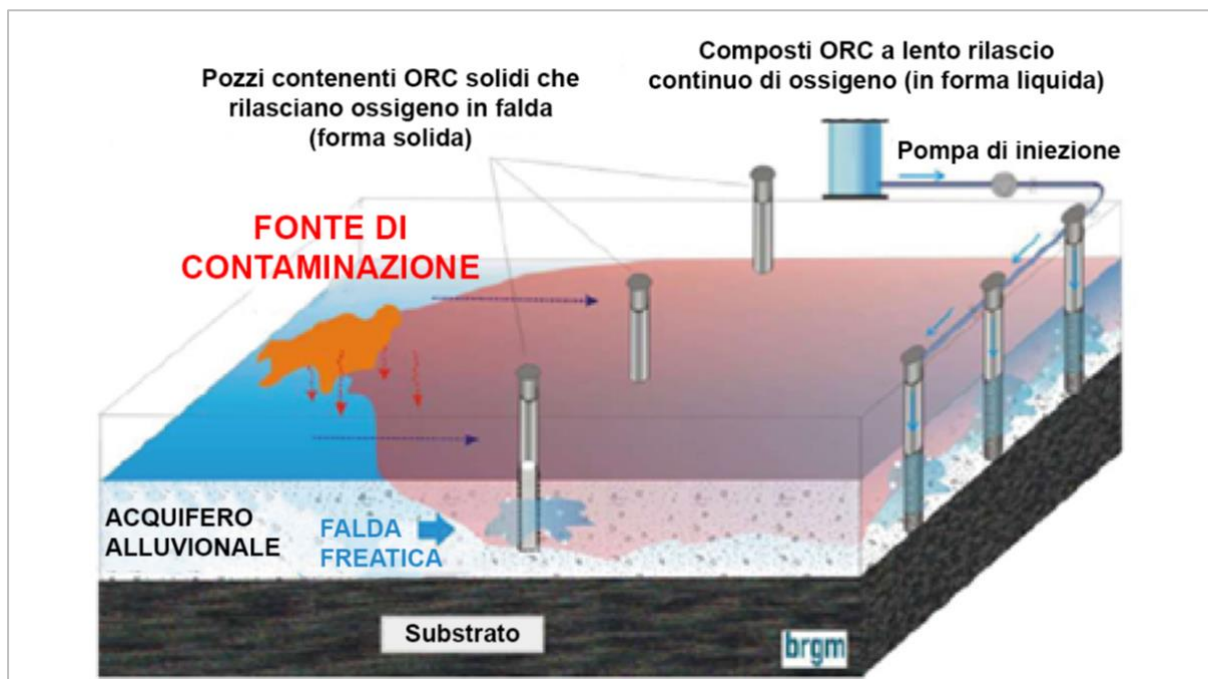


Figura 6-1 Schema del principio di biodegradazione in situ (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-benefices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificato)

- condizioni anaerobiche: il sistema necessita dell'aggiunta di nutrienti (nitrati, ferro (II), solfati, anidride carbonica, metanolo, etanolo, melassa, zucchero, acidi grassi, olio, chitina, idrogeno) e donatori di elettroni. L'iniezione di questi composti avviene in forma essenzialmente liquida o gassosa.

Gli inquinanti trattati più efficacemente con processi anaerobici sono i composti alifatici clorurati, (PCE, TCE, dicloroetilene), il toluene, gli IPA, i nitrobenzeni, i clorobenzeni, i fenoli non clorurati, le ammine aromatiche, i PCB e altri inquinanti organoclorurati (pesticidi, ecc.). Più difficilmente la degradazione anaerobica può avvenire anche per o-xilene e m-xilene, fenoli clorurati, fitofarmaci, alcuni metalli e composti inorganici.

Condizioni e limiti di applicabilità

La tecnica di **Bioremediation** è **particolarmente adatta**, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- presenza di composti organici;
- qualsiasi estensione del plume di contaminazione dei terreni e/o delle acque sotterranee.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- presenza di terreni omogenei con granulometria da limoso-sabbiosa a ghiaiosa, caratterizzati da una conducibilità idraulica medio-alta ($K > 10^{-5}$ cm/s);
- pH preferibilmente nel range 6 – 8;
- temperatura del suolo / acque sotterranee $> 10^{\circ}\text{C}$;
- umidità del terreno $> 10\%$ in volume.

Di contro, **la tecnica di Bioremediation risulta non idonea, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Elevate concentrazioni dei contaminanti organici trattabili;
- Non adatta a contaminanti inorganici, ad eccezione dell'azoto ammoniacale;
- Alte concentrazioni di metalli pesanti, di composti clorurati, di idrocarburi a catena lunga o di sali inorganici;
- presenza di prodotto in fase separata.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- presenza di terreni a granulometria fine con bassa conducibilità idraulica ($k < 10^{-5}$ cm/s);
- presenza di terreni eccessivamente eterogenei e/o stratificati;
- pH eccessivamente acidi o basici;
- bassa umidità del terreno.

La **Tabella 6-1** mostra il grado di efficacia della Bioremediation in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Processo Aerobico: Idrocarburi aromatici, i nitrobenzeni, i fenoli non clorurati, gli IPA, le ammine aromatiche e alcuni solventi clorurati Processo Anaerobico: composti alifatici clorurati, (PCE, TCE, dicloroetilene), il toluene, gli IPA, i nitrobenzeni, i clorobenzeni, i fenoli non clorurati, le ammine aromatiche, i PCB e altri inquinanti organoclorurati (pesticidi, ecc.)	Processo Aerobico: PCB debolmente clorurati, fenoli clorurati, cresoli e alcuni pesticidi e fitofarmaci Processo Anaerobico: o-xilene e m-xilene, fenoli clorurati, fitofarmaci, alcuni metalli e composti inorganici	Elevate concentrazioni di contaminanti organici Contaminanti inorganici, metalli pesanti, composti clorurati
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante disciolto	Contaminante adsorbito	Prodotto in fase separata
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Qualsiasi estensione	-	-
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In prossimità di superfici freatiche	In acquiferi posti a limitata profondità	In acquifero confinato profondi
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei con granulometria da limoso-sabbiosa a ghiaiosa	Terreni debolmente stratificati, limi sabbiosi e ghiaiosi	Limi e argille, terreni a granulometria eccessivamente fine
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	$>10^{-4} \text{ m/s}$	$10^{-5} \div 10^{-4} \text{ m/s}$	$<10^{-5} \text{ cm/s}$
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-1 Grado di efficacia della Bioremediation

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento Bioremediation è costituita da:

- molteplici postazioni di iniezione verticali (piezometri valvolati, direct push, ecc.) o orizzontali (dreni di iniezione, trincee, sistema di irrigazione);
- un sistema di stoccaggio e distribuzione dei reagenti/nutrienti in configurazione differente a seconda che siano in forma gassosa, liquida o solida (pompa booster, serbatoio di accumulo, sistema di miscelazione dell'acqua, pompa, contatori, ecc.);
- un sistema di recupero e trattamento degli effluenti gassosi se necessario: punti di estrazione gassosi verticali (chiamati aghi di estrazione) o orizzontali (chiamati scarichi di estrazione), rete di estrazione che consente il collegamento dei punti di estrazione e dell'estrattore, unità di estrazione (volumetrico, intermedio, estrattore centrifugo), un separatore di condensa o un demister e un sistema di trattamento del gas;
- un sistema di trattamento e recupero degli effluenti acquosi se necessario: punti di estrazione verticali (pozzi verticali, pozzi orizzontali, pompe, tubazioni, trincee), sistema di trattamento delle acque (e se necessario sistema di reinfiltrazione);
- sistema di stoccaggio di rifiuti solidi e liquidi derivanti dal trattamento;
- rete di monitoraggio piezometrico che consente il monitoraggio dei flussi e della qualità delle acque sotterranee.

I principali parametri da valutare nello sviluppo e nel dimensionamento di un sistema di Bioremediation derivano da un'accurata caratterizzazione del sito e dei processi chimico fisici presenti nello stesso nonché da un'approfondita conoscenza della sorgente di contaminazione (geometria, concentrazioni nel plume, tasso di degradabilità dei contaminanti).

In particolare, per il dimensionamento del sistema sono da acquisire i seguenti parametri:

- caratteristiche delle matrici ambientali: permeabilità, porosità, contenuto di materia organica, contenuto di carbonio organico, umidità, temperatura, pH, potenziale di ossido riduzione, contenuto di nutrienti (azoto ammoniacale, azoto totale, nitrati, nitriti, fosforo totale), ossigeno disciolto, solfati, ferro ferrico e ferroso, metano, manganese disciolto;
- caratteristiche dei contaminanti presenti: solubilità, pressione di vapore, costante di Henry, punto di ebollizione, coefficiente di ripartizione aria/acqua/suolo, concentrazione, emivita e tasso di degradazione);

permettono di definire:

- il raggio di azione dei pozzetti di iniezione, dipende dal tipo di booster utilizzato;
- il numero, la spaziatura e le caratteristiche dei punti di iniezione (profondità, diametro, trincee, pozzi ...);
- la frequenza e la modalità di iniezione (continua o intermittente);
- il raggio di influenza dei punti di iniezione per sostanze nutritive e altri additivi (accettori e donatori di elettroni) in base alle portate.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e collaudata. Tecnica che può essere utilizzata a supporto delle tecniche di estrazione fisica classica (SVE, MPE, AS, ecc.) quando queste hanno raggiunto i limiti applicativi;
		Difficilmente si raggiungono abbattimenti delle concentrazioni di contaminante superiori al 90%. Il processo richiede competenze di alto profilo e le prestazioni sono estremamente variabili a seconda delle condizioni specifiche del sito. Probabile effetto "rebound": quando il trattamento viene interrotto, le concentrazioni sono basse ma possono aumentare significativamente qualche mese dopo.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile ad una vasta gamma di contaminanti organici, purché non in concentrazione elevata.
		Non adatta ad alte concentrazioni di metalli pesanti, di composti clorurati, di idrocarburi a catena lunga o di sali inorganici, nonché in presenza di prodotto in fase separata.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni con granulometria da limoso-sabbiosa a ghiaiosa, caratterizzati da una conducibilità idraulica medio-alta.
		Non idonea in presenza di terreni a granulometria fine con bassa conducibilità idraulica, presenza di terreni eccessivamente eterogenei e/o stratificati.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Applicabile sotto edifici (perforazione orizzontale) e nel caso di inquinamento a grandi profondità (diverse decine di metri).

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		L'uso di ossigeno può comportare rischi per la salute, la sicurezza e l'ambiente (incendio, soffocamento in spazi confinati ed esplosione).
TEMPISTICA DI BONIFICA		La durata dei trattamenti di biorisanamento è spesso importante. Necessario inoltre monitoraggio <i>post operam</i> a garanzia della riuscita dell'intervento.
COSTI DI INTERVENTO		Costi contenuti connessi all'intervento. Sia le acque sotterranee che il suolo possono essere trattati contemporaneamente, offrendo ulteriori vantaggi in termini di costi.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Compatibilità con altri metodi di risanamento.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Generazione di disturbi limitati nel sottosuolo. Tuttavia, in caso di utilizzo in terreni insaturi, la circolazione di soluzioni a base d'acqua nel suolo può aumentare la mobilità dei contaminanti che possono di conseguenza impattare le acque sotterranee sottostanti. In presenza di elevate concentrazioni di ferro e manganese, la crescita dei microrganismi potrebbe indurre l'intasamento dei filtri dei pozzi / piezometri presenti, specie se sono presenti batteri che riducono il ferro. In condizioni anaerobiche si possono sviluppare metaboliti anche più pericolosi del contaminante originale.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-2 Vantaggi e svantaggi della Bioremediation

Tecnologie correlate

Le **principali tecnologie** correlate alla Bioremediation di tipo attivo in situ sfruttano la naturale capacità di degradare i contaminanti da parte dei microorganismi, sono:

- **bio-venting:** tecnologia di bonifica in situ che prevede l'iniezione di aria nei terreni insaturi per incrementare il quantitativo di ossigeno e stimolare l'azione di biodegradazione dei batteri autoctoni. Tale tecnologia è dettagliata al Paragrafo 7.11;
- **bio-sparging:** tecnologia di bonifica in situ che utilizza i microrganismi autoctoni per biodegradare i componenti organici nella zona satura, attraverso iniezioni di aria. Tale tecnologia è dettagliata al Paragrafo 7.4;
- **bio-slurping:** tecnologia che combina elementi di bio-venting e pompaggio sotto vuoto del prodotto libero, al fine di recuperare il prodotto libero dalle acque sotterranee e contemporaneamente stimolare i processi degradativi ad opera dei microorganismi autoctoni nell'insaturo. Tale tecnologia è dettagliata al Paragrafo 7.8;
- **Bioaugmentation (Bioincremento):** consiste nell'integrare il sistema esistente con l'introduzione di microorganismi, selezionati in base alle popolazioni presenti in situ (batteri autoctoni) o isolati in laboratorio da batteri noti per la capacità di degradare specifici contaminanti presenti (batteri alloctoni), al fine di accelerare i processi di biodegradazione. L'approccio è efficace per la degradazione di idrocarburi petroliferi, idrocarburi alifatici clorurati, clorobenzeni, idrocarburi aromatici, IPA e fenoli. Con maggiore incertezza e limitazione la tecnica può essere applicata anche ad alcuni PCB e alcuni pesticidi.

6.2 Monitored Natural Attenuation (MNA)

Definizione e criteri generali

L'attenuazione naturale della contaminazione rappresenta la capacità di **autodepurazione dell'ambiente**, mediante riduzione delle concentrazioni di carico contaminante grazie ad una serie di fenomeni fisici, chimici e biologici che si sviluppano naturalmente nel suolo saturo e insaturo, quali a titolo esplicativo e non esaustivo: biodegradazione, dispersione, diluizione, adsorbimento, volatilizzazione, processi di trasformazione e/o distruzione chimici e biologici.

Per questo motivo la MNA si può configurare come una tecnica di bonifica "passiva", benché fortemente **pollutant-specific**, ovvero caratteristica del tipo di contaminante presente.

Essendo più lenta dei processi attivi e quindi insostenibile oltre un certo periodo di tempo, si ritiene applicabile per siti anche di grandi dimensioni ma con una bassa concentrazione di inquinanti e in assenza di prodotto libero.

Secondo la definizione dell'*Environmental Protection Agency* (EPA), si tratta di un approccio di gestione della contaminazione che implica un suo monitoraggio a lungo termine.

Di fatto, necessita lo sviluppo di un progetto ben strutturato che preveda:

- **caratterizzazione completa** ed esaustiva del sito al fine di sviluppare un modello concettuale del sito e prelevare dati di campo idonei a valutare l'effettiva esistenza dell'attenuazione naturale, nonché per stabilire se i processi in atto siano sufficienti a garantire il risanamento del fenomeno di inquinamento (ad esempio attraverso bilancio di massa e l'uso di indicatori specifici);
- pieno **controllo della sorgente** di contaminazione;
- elaborazione di **un'Analisi di Rischio**, per valutare se l'attenuazione risulterà sufficiente a proteggere i recettori dal pericolo associato alla contaminazione e per stabilire gli obiettivi di bonifica;
- valutazione dei **tempi di bonifica** in relazione agli obiettivi definiti;
- **piano di monitoraggio** a lungo termine;
- piano delle **eventuali azioni correttive** o di emergenza.

Condizioni e limiti di applicabilità

La MNA è **particolarmente adatta** ed applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di composti organici volatili o semivolatili (Idrocarburi leggeri, BTEX, solventi alogenati e clorurati) e alcuni composti inorganici;
- Presenza del contaminante in concentrazioni ridotte;

- Estensione da limitata ad estesa della contaminazione, meglio se di distribuzione omogenea.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni omogenei;
- Maggiormente applicata alla zona satura, ma efficace anche nella zona insatura;
- Profondità della zona da trattare anche piuttosto elevata.

Condizione necessaria per l'applicabilità della tecnologia è la caratterizzazione completa ed esaustiva del sito, nonché una dimostrazione del raggiungimento degli obiettivi di risanamento in tempi ragionevoli.

Di contro, **la MNA risulta non idonea, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di inquinanti con basso grado di volatilità e/o ridotta biodegradabilità;
- Presenza di prodotto libero;
- Presenza di una distribuzione eterogenea dell'inquinante;
- Presenza di alte concentrazioni di inquinante.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni eterogenei;
- Condizioni per cui sia possibile il verificarsi di migrazione degli inquinanti prima della degradazione;
- Condizioni per cui sia possibile il verificarsi di variazioni temporali delle condizioni idrogeologiche e geochimiche, le quali possono ad esempio mobilitare inquinanti precedentemente stabilizzati.

La **Tabella 6-3** seguente mostra il grado di efficacia dell'attenuazione naturale in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Composti organici volatili e semivolatili, Idrocarburi leggeri, BTEX, solventi alogenati, solventi clorurati	Alcuni pesticidi, esplosivi (trinitrotoluene), fenoli e alcuni composti inorganici	Elevate concentrazioni di contaminanti possono ostacolare il processo Alte concentrazioni di metalli sono incompatibili con questa tecnica

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminanti disciolti in acqua, adsorbiti su particelle di terreno o in forma di vapore		Non applicabile in presenza di NAPL
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Da limitato ad esteso	L'eterogeneità della distribuzione dell'inquinante interferisce con l'efficacia del trattamento	Plume eccessivamente esteso.
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	Maggiormente applicabile in zona satura, anche a grandi profondità	-	-
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei	Terreni debolmente eterogenei	Terreni eterogenei
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	Permeabilità da media a elevata		Permeabilità molto bassa
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-3 Grado di efficacia della MNA

Elementi necessari

I mezzi necessari sono essenzialmente composti dai soli piezometri di monitoraggio, la cui posizione dipende strettamente dall'idrogeologia e dal comportamento degli inquinanti. È necessario dunque prevedere:

- piezometri a monte per monitorare le condizioni naturali del sito;
- piezometri in corrispondenza della sorgente di contaminazione, nonché a valle lungo la direzione del plume, al fine di valutare il comportamento della fonte e il suo impatto;
- piezometri laterali per verificare l'estensione laterale del plume;
- piezometri sentinella remoti per controllare il contenimento della fonte e il suo impatto.

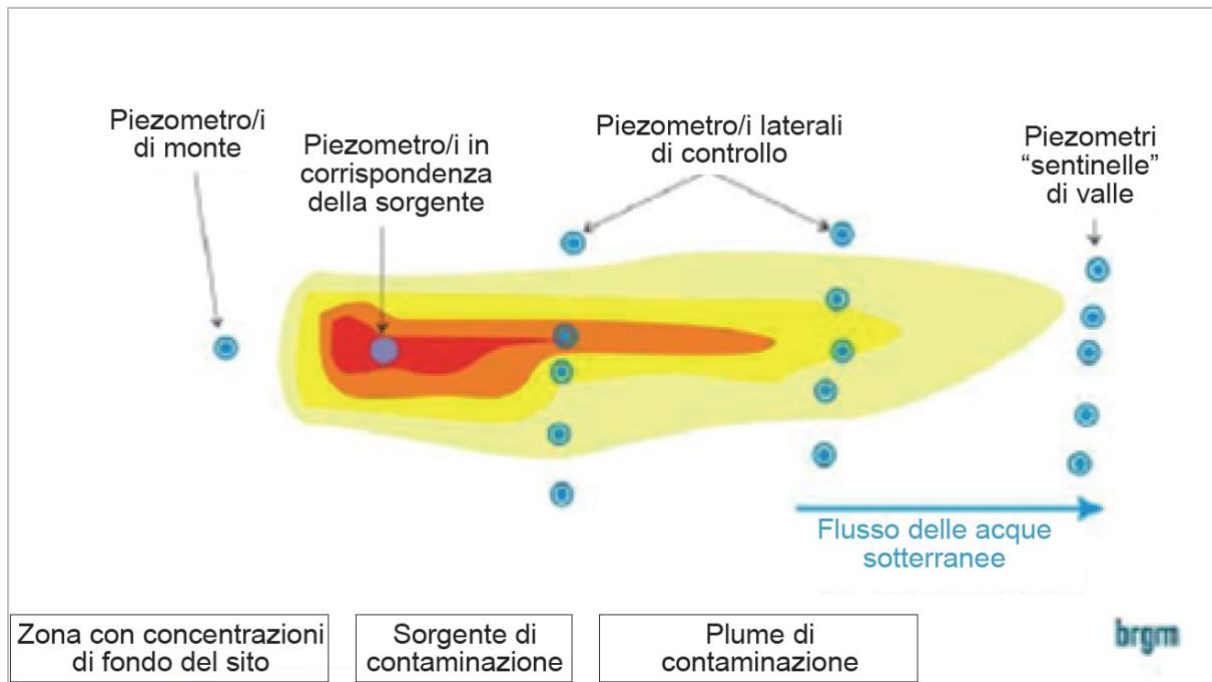


Figura 6-2 Ubicazione dei piezometri di monitoraggio intervento MNA (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificata)

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE	😊	Tecnica caratterizzata da semplicità di installazione e disturbo logistico praticamente assente.
	😐	I rendimenti di bonifica sono molto variabili; tuttavia, non è raro evidenziare rese superiori al 70% in condizioni ottimali. Strategia con protocolli codificati solo per poche tipologie di contaminazione.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE	😊	Processi molto efficaci nella degradazione di numerosi composti organici, nella trasformazione in prodotti meno nocivi e nell'immobilizzazione sia di composti organici sia di metalli pesanti.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		In alcuni casi può verificarsi la formazione di composti intermedi più tossici e/o mobili (ad es. la degradazione di TCE e cloruro di vinile). Non applicabile in presenza di prodotto libero.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni omogenei a granulometria e permeabilità variabile.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Applicabile nella maggior parte dei contesti logistici.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Essendo una tipologia di bonifica "passiva" richiede tempi abbastanza lunghi affinché si possano instaurare i meccanismi naturali.
COSTI DI INTERVENTO		Non necessita di costi di installazione, se non dei piezometri di monitoraggio. Tuttavia, i costi relativi al monitoraggio, se molto prolungati nel tempo, possono diventare rilevanti.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Compatibile con i metodi di risanamento attivi.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Assenza di disturbi al sistema. Mancanza di produzione di rifiuti da smaltire/trattare e emissioni.

 Buona
  Media
  Bassa

Tabella 6-4 Vantaggi e svantaggi della MNA

Tecnologie correlate

Non si segnalano tecnologie correlate per la MNA.

6.3 Phytoremediation

Definizione e criteri generali

Le tecnologie di fitorisanamento sono strumenti di ripristino ambientale, le quali sfruttano le piante erbacee e/o le specie arboree per trattare la contaminazione di metalli pesanti, composti organici ed elementi radioattivi sia nella matrice insatura sia nella matrice satura, in particolare nei terreni a granulometria medio-grossolana.

La phytoremediation si basa su processi naturali attinenti alle capacità dei vegetali di assorbire non solo nutrienti, ma anche ulteriori molecole che possono essere accumulate o eventualmente metabolizzate dalle piante stesse. Si configura perciò come una tecnica di disinquinamento potenzialmente in grado di fornire una alternativa più sostenibile rispetto ad altre tecnologie di bonifica.

L'impiego di piante, nel contesto di una bonifica, è indicato al fine di:

- estrarre dal sottosuolo e accumulare nei tessuti vegetali le sostanze inquinanti;
- estrarre dal sottosuolo e decomporre le sostanze inquinanti;
- modificare le caratteristiche del sottosuolo e/o delle sostanze inquinanti;
- creare nel terreno un ambiente più favorevole alla degradazione delle sostanze inquinanti.

La **Phytoremediation** avviene grazie a seguenti processi di funzionamento:

- Rizodegradazione: consiste nella decomposizione del contaminante per mezzo dell'attività biologica degli organismi (batteri e funghi) che occupano la rizosfera, ovvero il volume di suolo influenzato dalle radici (che si estende, secondo Shimp et al. 1993, 1-3 mm intorno alla superficie radicale). I contaminanti trattati sono prettamente i composti organici (TPH, solventi clorurati e PCB). Le tipologie di piante adottate possono appartenere sia alle specie erbacee sia alle specie arboree, con particolare efficacia da parte delle piante tipiche di ambienti umidi;
- Fitostabilizzazione: consiste nell'assorbimento/accumulo nelle radici, nella precipitazione e/o immobilizzazione sempre nella zona radicale. I contaminanti trattati sono i metalli pesanti. Le tipologie di piante adottate possono appartenere sia alle specie erbacee sia alle specie arboree, con particolare efficacia da parte delle piante acquatiche e delle piante tipiche di ambienti umidi;
- Fitodegradazione: consiste nell'assorbimento e successiva trasformazione del contaminante per mezzo dei processi vegetali. I contaminanti trattati sono alcuni composti organici (TPH, solventi clorurati, BTEX, fenoli). Le tipologie di piante adottate possono appartenere sia alle specie erbacee sia alle specie arboree, con particolare efficacia da parte delle piante acquatiche e delle piante tipiche di ambienti umidi;
- Fitostimolazione (o Rizorimedio): a livello radicale, l'associazione simbiotica di piante e microrganismi porta alla degradazione del contaminante in forma non tossica, o comunque a tossicità ridotta. Da un lato, le radici forniscono i nutrienti e il substrato; dall'altro, i microrganismi degradano il polluento. È possibile incrementare tale processo usando additivi che stimolano la crescita e l'azione di degradazione, oppure introducendo nella rizosfera specifici ceppi fungini e/o batterici (Bioaugmentation, Kuiper et al, 2004);

- Fitoestrazione: consiste nell'estrazione del contaminante e successivamente nell'accumulo nei tessuti vegetali. I contaminanti trattati sono principalmente i metalli pesanti e i radionuclidi. Le tipologie di piante adottate possono appartenere sia alle specie erbacee sia alle specie arboree, con particolare efficacia da parte delle piante acquatiche e delle piante tipiche di ambienti umidi;
- Fitovolatilizzazione: consiste nell'assorbimento e nel successivo rilascio in atmosfera mediante traspirazione dei contaminanti (che possono eventualmente subire modifiche chimiche prima del rilascio). I contaminanti trattati sono sia i composti organici (quali solventi clorurati e MtBE) sia i composti inorganici (come ad esempio mercurio, arsenico, selenio e argento). Le tipologie di piante adottate possono appartenere sia alle specie erbacee sia alle specie arboree, con particolare efficacia da parte delle piante acquatiche e delle piante tipiche di ambienti umidi;
- Evapotraspirazione: il normale processo di evapotraspirazione consente, in parte, il controllo idraulico del sito contaminato. I contaminanti trattati sono quelli solubili in acqua. Le tipologie di piante adottate possono appartenere sia alle specie erbacee sia alle specie arboree, con particolare efficacia da parte delle piante tipiche di ambienti umidi.

Le varie tipologie sono rappresentate in **Figura 6-3**.

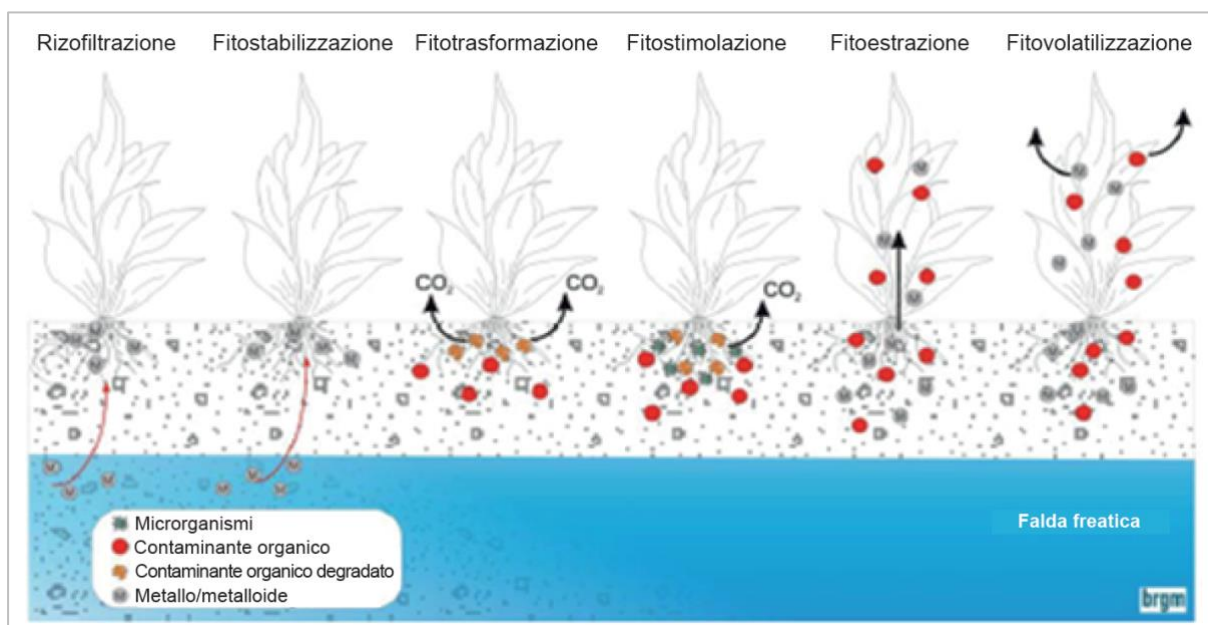


Figura 6-3 Tipologie di Fitorimediazione (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificata)

Al termine del trattamento la biomassa vegetale viene raccolta e la parte aerea, ricca di metalli, viene separata dalle radici, subendo un processo di smaltimento (conferimento in discarica o incenerimento).

Condizioni e limiti di applicabilità

Il Fitorimedia è particolarmente adatto, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di composti inorganici (metalli pesanti ed elementi radioattivi) e organici, sia in zona insatura sia in zona satura;
- In presenza di basse concentrazioni di contaminante su aree estese e su siti contaminati da più inquinanti;
- Contaminazione ubicata a profondità < 1 m e distribuita omogeneamente; in alcuni casi è possibile raggiungere profondità maggiori utilizzando specie arboree con apparato radicale molto sviluppato (es. pioppi).

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni a permeabilità medio-alta (da limoso-sabbiosi a sabbiosi);
- Valori di pH compresi tra 4 e 9.

Di contro, **il Fitorimedia risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di elementi fito-tossici e di metalli non fitodisponibili;
- Contaminazione ubicata a profondità > 1 m e distribuita in maniera disomogenea.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni a permeabilità bassa;
- Valori di pH inferiori a 4 e superiori a 9.

La Tabella 6-5 seguente mostra il grado di efficacia dei sistemi di Fitorimedia in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Contaminanti inorganici (metalli pesanti ed elementi radioattivi) solubili e biodisponibili Composti organici (clorobenzeni, pesticidi)	Contaminanti organici (IPA, idrocarburi alifatici clorurati e alogenati, BTEX, fenoli non clorurati e clorurati, ammine aromatiche)	Contaminanti inorganici (metalli non biodisponibili) Composti organici (nitrobenzeni, diossine e furani, PCB)

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante in fase adsorbita Concentrazioni basse	Contaminante in fase adsorbita ma in forma non biodisponibile Contaminante in fase disciolta Concentrazioni medio-basse	Contaminante in fase gassosa Concentrazioni elevate e in presenza di elementi fitotossici (es. Cu)
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Esteso ma con distribuzione omogenea della contaminazione		Esteso ma con distribuzione non omogenea della contaminazione
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In zona insatura/frangia capillare/zona satura a profondità di max. 80 cm	In zona insatura/frangia capillare/zona satura a profondità tra 0,8-1 m	In zona insatura/frangia capillare/zona satura a profondità >1 m
	In alcuni casi è possibile raggiungere profondità maggiori (2-3 m) utilizzando specie arboree con apparato radicale molto sviluppato (es. pioppi).		
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni o a granulometria medio-grossolana (da sabbioso-limosi a sabbiosi), con pH maggiore di 4 ma inferiore a 9	Terreni a granulometria medio-fine	Terreni a tessitura fine con pH vicino a 4 e 9
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	>10E-5 m/s	10E-6÷10E-5 m/s	<10E-6 m/s
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-5 Efficacia della Phytoremediation

Elementi necessari e parametri di progettazione

I **mezzi materiali** necessari per applicare il Fitorimedio sono essenzialmente quelli inerenti alla coltivazione delle **specie vegetali** piante (attrezzature agricole), oltre alle specie stesse.

I principali parametri utili alla progettazione dell'intervento sono:

- Scelta e selezione della specie vegetale (la quale è funzione della tipologia di contaminazione presente, nonché del contesto climatico);
- Velocità di prelievo dei inquinanti;
- Produttività vegetale (la quale, tra gli altri, è legata al contesto climatico e alle caratteristiche del terreno);
- Tasso di traspirazione;
- Disposizione e densità della specie vegetale;
- Sistema di irrigazione;
- Sistema agronomico;
- Sistema di monitoraggio.

Di seguito si riportano alcuni esempi di specie vegetali che possono agire sui contaminanti in determinati contesti ambientali:

SUOLI CONTAMINATI:

- ❖ *Acer-pseudoplatanus* (Acero di monte) → Zinco, Cadmio, Piombo;
- ❖ *Eucalyptus globulus* (Eucalipto) → Cadmio, Zinco, Rame, Piombo, contaminanti organici;
- ❖ *Populus nigra* (Pioppo nero) → Cadmio, Piombo, contaminanti organici;
- ❖ *Robinia pseudoacacia* (Robinia) → Metalli pesanti, contaminanti organici;
- ❖ *Zea mays* (Mais o granturco) → Metalli pesanti, contaminanti organici;
- ❖ *Agrostis stolonifera* (Cappellini comuni, erba perenne) → Metalli pesanti, arsenico, Idrocarburi.

ACQUE CONTAMINATE:

- ❖ *Robinia pseudoacacia* (Robinia) → Metalli pesanti, contaminanti organici;
- ❖ *Populus nigra* (Pioppo nero) → Cadmio, Piombo, contaminanti organici;
- ❖ *Cannabis sativa* (Canapa utile) → Cadmio, Cromo, Nichel, Piombo, Zinco, contaminanti organici e radionuclidi;
- ❖ *Pteris vittata* (felce) → Arsenico;
- ❖ *Phalaris arundinacea* (Saggina spagnola) → metalli pesanti, contaminanti organici, nutrienti.

Di seguito si riportano alcune **applicazioni delle fitotecnologie**:

- Fitobarriera: vengono utilizzate al fine di bloccare la contaminazione sia nell'aria (grazie al filtro operato dall'apparato aereo) sia nelle acque sotterranee superficiali (grazie all'azione delle radici);
- Fitodisidratazione: mediante i processi traspirativi delle piante, si ottiene una graduale disidratazione del substrato. Tale processo può influire anche sulla contaminazione presente, andando a ridurre la pericolosità;
- Phytocapping: è un sistema di copertura superficiale mediante l'utilizzo di terreno e vegetazione che controlla la percolazione. Si utilizza nelle discariche in alternativa ai sistemi tradizionali.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		La tecnologia non è particolarmente diffusa sul mercato, tuttavia ha mostrato risultati estremamente significativi quando applicata in condizioni ottimali. L'efficienza delle piante, in particolare quelle decidue, è legata alla stagionalità (quindi si riduce durante il periodo non vegetativo) e possono essere suscettibili a parassiti. Alcuni inquinanti possono migrare durante le fasi di trattamento.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Efficace sia per trattare contaminanti inorganici (metalli pesanti ed elementi radioattivi) e organici (idrocarburi, solventi clorurati, IPA, MtBE, pesticidi, percolato di discarica). Le concentrazioni devono tuttavia essere basse ed i metalli pesanti solubili e biodisponibili.
		Applicabile solo a limitata profondità (<1 m) in funzione delle caratteristiche dell'apparato radicale della specie prescelta.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Risulta efficace in terreni o a granulometria medio-grossolana (da sabbioso-limosi a sabbiosi) e permeabilità medio-alte.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Non applicabile con pH inferiore a 4 e maggiore di 9.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Tempi lunghi di intervento (3-5 anni).
COSTI DI INTERVENTO		Costi generalmente limitati, soprattutto in relazione all'area da bonifica, che può essere molto ampia.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Il fitorimediazione si applica in contesti ove le altre tecnologie di bonifica non sarebbero ugualmente efficienti. Può essere utilizzata come tecnologia di supporto dopo un primo trattamento iniziale che necessita di un intervento di finitura.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Non comporta alcuna necessità di realizzare impianti complessi (e non crea disturbo al sottosuolo), ma devono essere eliminate le frazioni vegetali derivanti dai diversi cicli di trattamento. Aumento del valore estetico dell'area e riduzione di rumori e cattivi odori. Limitazione dell'effetto serra per assorbimento della CO ₂ . Produzione di energia rinnovabile grazie al potenziale recupero di energia dalle biomasse.
		Potenziale contaminazione della catena trofica.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-6 Vantaggi e svantaggi della Phytoremediation

Tecnologie correlate

Non si segnalano tecnologie correlate per il Fitorimediazione.

Tecnologie di Bonifica In Situ – Processi Chimico-Fisici

6.4 Air Sparging (AS)

Definizione e criteri generali

L'**AS** è una tecnica di bonifica adatta per il trattamento dei composti organici volatili e semi-volatili (alogenati e non alogenati) nei terreni omogenei e a tessitura medio-grossolana con permeabilità medio-alta, in corrispondenza della zona satura e della frangia capillare.

Tale tecnologia consiste nell'iniettare aria in pressione in falda attraverso pozzi opportunamente fenestrati nella zona satura (generalmente del diametro di 2'', con tratto filtrante lungo tra 0,15-3 m e ubicato tra 1,5-6 m al di sotto della tavola d'acqua).

Il principio di funzionamento fisico comprende:

- il trasferimento degli inquinanti volatili dalla fase acquosa a quella di vapore (**stripping**, effetto primario), a cui fa seguito la loro migrazione nell'ambito del mezzo insaturo sovrastante e infine la loro rimozione;
- l'incremento del tenore di ossigeno disciolto in falda, il quale porta ad un incremento della degradazione microbica dei contaminanti in falda (effetto secondario).

In presenza di composti volatili l'**AS** necessita la presenza di un sistema integrato con *Soil Vapour Extraction (SVE)*, in quanto i vapori prodotti (ricchi in concentrazione di inquinanti), una volta abbandonata la superficie libera della falda, migrano nel mezzo insaturo sovrastante. Con un sistema SVE vengono pertanto richiamati i vapori prodotti da appositi dispositivi di aspirazione, convogliati attraverso filtri a carboni attivi ed infine liberati in atmosfera dopo il trattamento, nel rispetto dei limiti previsti dalla normativa vigente.

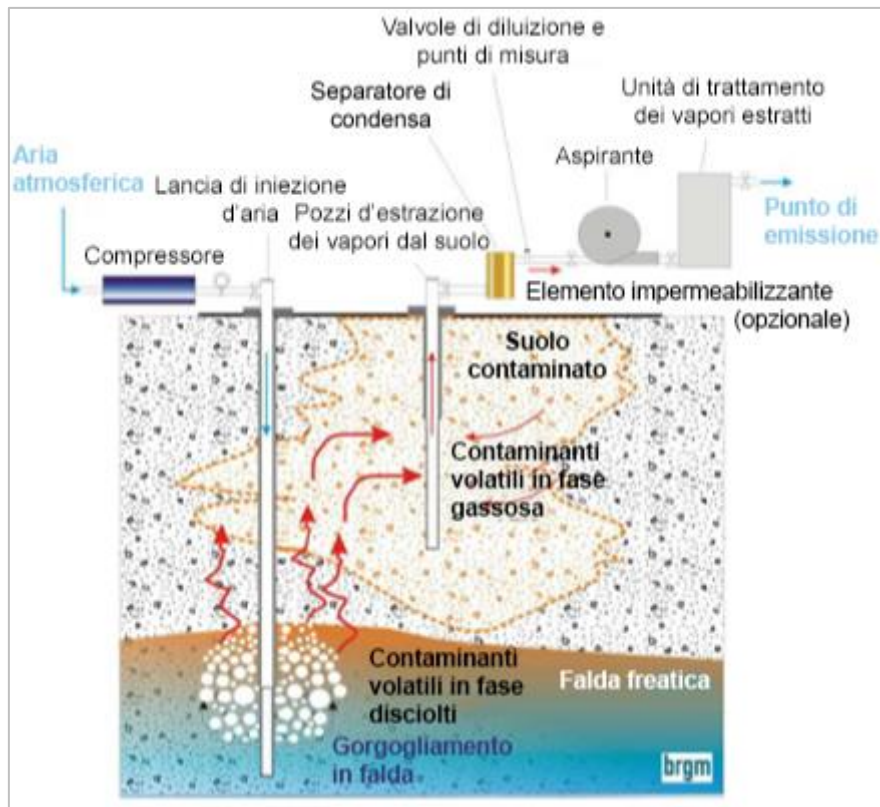


Figura 6-4 Schema di funzionamento AS- SVE (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificata)

Condizioni e limiti di applicabilità

L'AS è particolarmente adatto e quindi applicabile nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di composti organici volatili e semivolatili;
- Estensione limitata della contaminazione (plume di ridotte dimensioni) e contaminazione localizzata in prossimità della superficie freatica.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni omogenei con granulometria da limoso-sabbiosa a ghiaiosa, caratterizzati da una conducibilità idraulica medio-alta;
- Profondità della zona satura da trattare comprese tra 2 m e 15-20m.

Di contro, **l'AS risulta non idoneo/non applicabile** quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di inquinanti con basso grado di volatilità e/o ridotta biodegradabilità e contaminanti molto solubili;
- Presenza di prodotto libero;

- Estensione elevata della contaminazione (plume di grandi dimensioni) e contaminazione localizzata vicino alla base di un acquifero libero.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di acquiferi confinati e/o esigui spessori di acquifero (<3 m);
- Terreni eterogenei a bassa permeabilità;
- Presenza di fondazioni o spazi confinati dove si possono creare accumulo di vapori inquinanti;
- Presenza di elevate concentrazioni di ferro disciolto Fe^{2+} nel sottosuolo.

La **Tabella** 6-7 seguente mostra il grado di efficacia dei sistemi di AS in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra (fonte: USACE, 2008 - modificata).

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Volatili e semivolatili(*): BTEX, MOGAS e AVGAS, solventi alogenati, solventi clorurati	Carburanti diesel e avio, acetone	Carburanti alterati, oli lubrificanti, fluidi idraulici e dielettrici, PCB. Contaminazione "datata"
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante disciolto	Contaminante adsorbito	Prodotto libero
(*)La volatilità dell'inquinante è determinata dalla pressione di vapore, dalla costante di Henry, dalla sua composizione e dal punto di ebollizione.			
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Di piccole dimensioni	Di modeste dimensioni	Esteso
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In prossimità di superfici freatiche	In acquiferi posti a limitata profondità	In acquifero confinato oppure vicino alla base di un acquifero libero ed esigui spessori di acquifero (<3 m)
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei a granulometria elevata (sabbie e ghiaie), limi omogenei	Terreni debolmente stratificati, limi sabbiosi e ghiaiosi, argille molto fratturate	Limi e argille, terreni altamente organici, substrato fratturato, terreni stratificati e orizzonti di confinamento

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	>10E-4 m/s	10E-5÷10E-4 m/s	<10E-5 m/s
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-7 Efficacia dell'AS

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di AS, affiancato da un sistema di SVE per il recupero dei vapori strippati, è costituita da (Johnson et al., 1993; Suthersan S., 1997):

- uno o più pozzi di aerazione, verticali o orizzontali;
- un compressore;
- uno o più pozzi di estrazione dell'aria, verticali o orizzontali;
- una soffiante o pompa a vuoto;
- le relative reti di *interconnecting*;
- un separatore di condensa;
- un'unità di trattamento dei gas effluenti;
- piping e strumentazioni correlate;
- piezometri di monitoraggio;
- quadro elettrico di controllo.

I principali parametri da considerare nello sviluppo di un sistema di AS sono riportati nella seguente **Tabella 6-8** (fonte: Marley e Bruell, 1995 – modificata).

PARAMETRO	INTERVALLO DI VALORI*
Diametro del pozzo (")	1-4
Lunghezza del tratto fenestrato (m)	0,15-3
Profondità del top dei filtri al di sotto della tavola d'acqua (m)	1,5-6
Portata di iniezione dell'aria (m3/h)	2,2-68
Pressione di iniezione (kPa)	380-2700

PARAMETRO	INTERVALLO DI VALORI*
Sovrappressione (kPa, rispetto alla pressione idrostatica)	38-1970
Zona di influenza dello sparging (m)	1,5-7,5
Rapporto tra la zona di influenza dello SVE e quello dell'AS	0,16-7,4
(*) = fonte: Marley e Bruell, 1995 – modificata	

Tabella 6-8 Principali parametri di un sistema di AS

Le **principali configurazioni adottabili** sono le seguenti:

- pozzi a grappolo distribuiti lungo l'intera lunghezza del *plume* o dell'area sorgente (*nested wells*, caso tipico di accoppiamento con la tecnologia di SVE);
- orientazione lineare dei pozzi perpendicolare alla direzione di flusso idrico sotterraneo (*barriera di pozzi* o *sparging curtain*) ubicati all'interno del *plume* o subito a valle dello stesso;
- pozzi orizzontali (soprattutto nei casi di *plume* subsuperficiali, sottili e lunghi, nonché in corrispondenza di settori con accesso limitato);
- cinturazione della zona contaminata mediante pozzi di *sparging*;

È raccomandabile mantenere una distanza tra i pozzi di iniezione inferiore a 2 volte il RoI (raggio di influenza).

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e collaudata. Semplicità di installazione e disturbo logistico minimo.
		Difficilmente si raggiungono abbattimenti delle concentrazioni di contaminante superiori al 90%. Probabile effetto "rebound": quando il trattamento viene interrotto, le concentrazioni sono basse ma possono aumentare significativamente qualche mese dopo.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile a molti inquinanti volatili e semivolatili.
		Difficilmente applicabile a composti molto solubili e incapacità di trattare inquinanti semivolatili con ridotta biodegradabilità aerobica. Insufficiente potere di estrazione del prodotto libero più denso dell'acqua (DNAPL).
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni omogenei a granulometria grossolana e permeabilità medio alta.
		Non idonea in terreni eterogenei a tessitura fine, con elevato tasso di materia organica e permeabilità bassa.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Applicabile sotto-fondazione, ma presenta pericolo di accumulo in spazi confinati eventualmente presenti. Il limitato raggio di influenza dei singoli punti di iniezione può richiedere la realizzazione di un significativo numero di pozzi di iniezione per operare un intervento adeguato.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Relativamente veloce in condizioni ottimali.
COSTI DI INTERVENTO		Costi contenuti connessi all'intervento. Tuttavia, le emissioni in atmosfera derivanti dall'utilizzo della tecnologia di SVE -spesso abbinata- richiedono il trattamento dell'aria (costo aggiuntivo).
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Compatibilità con altri metodi di risanamento (es. SVE/BV).
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Generazione di disturbi limitati nel sottosuolo. Non si producono "scarti".



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-9 Vantaggi e svantaggi dell'AS

Tecnologie correlate

L'introduzione di aria direttamente nella zona satura rappresenta solo una delle possibili varianti della flessibile tecnologia di *sparging*.

Le **principali varianti** sono infatti costituite da:

- **bio-sparging**: si tratta di un processo analogo all'AS, dove tuttavia la finalità di insufflazione di aria non risiede nei processi di strippaggio/volatilizzazione, bensì nell'ossigenazione della falda e della zona satura;
- **gas-sparging**: in presenza di tricloroetilene può essere valutata l'applicabilità di iniezione di metano (1% o 4% in aria, rispettivamente per immissione continua o intermittente, Alvarez-Cohen et al. 1992; Hazen et al., 1994), propano (Wackett et al., 1989), o anche gas naturale (miscela di metano, etano, propano e tracce di alcani superiori, Wilson e Wilson, 1985) sfruttati come substrati di carbonio per la biodegradazione del composto. L'uso invece di ammoniaca (Dinee et al., 1990), ossido di azoto (al 0,07% in aria) o trietilfosfato (al 0,007%) aumenta l'attività di biodegradazione da parte dei microrganismi autoctoni (Hazen et al., 1994), in quanto fungono da sorgenti di azoto e fosforo;
- **pneumatic/hydraulic fracturing**: la fratturazione indotta nei terreni e nelle rocce, nel contesto di una bonifica, è stata implementata per aumentare la permeabilità all'aria e, più specificatamente, di incrementarne il flusso in formazioni compatte e cementate (ad es. calcari) o a basso grado di conducibilità termica (limi e argille);
- **in-well aeration**: veicolando l'aria nella parte inferiore della tubazione di un pozzo per acqua, le bolle d'aria risalgono all'interno della colonna, sviluppando quindi un trasferimento di massa vapore-liquido e liquido-vapore (Hinchee, 1994);
- **steam stripping**: l'utilizzo di vapore permette lo sviluppo di gradienti termici che accelerano la volatilizzazione dei VOC in zona satura (Evans, 1991).

Di seguito, dato il suo diffuso utilizzo, si riportano alcune considerazioni di dettaglio relativamente alla tecnologia di Biosparging (BS).

Il meccanismo, di fatto analogo a quello descritto per l'AS, prevede l'iniezione di aria nella zona satura. La differenza è dovuta principalmente ai valori di portata utilizzati, i quali risultano circa 1/3÷1/5 rispetto a quelli di AS, evitando di fatto lo strippaggio delle acque con il conseguente rilascio di vapori.

Il BS è estremamente efficace nel trattamento di sostanze petrolifere di medio peso (ad es. gasolio, benzine, avio), composti volatili e semivolatili non alogenati. Così come per la tecnologia di AS, risulta NON applicabile in terreni a bassa permeabilità e con alto contenuto di argilla.

Tale tecnologia NON è applicabile qualora:

- sia presente prodotto libero, in quanto quest'ultimo può migrare a seguito dell'innalzamento piezometrico indotto;
- l'acquifero sia confinato, in quanto l'aria immessa rimarrebbe costretta in falda;
- vi siano spazi chiusi all'interno del sito, all'interno dei quali potrebbero accumularsi gli inquinanti.

Proprio per le sue caratteristiche, la sua efficacia è intrinsecamente legata a due fattori (Provincia di Milano, 2004):

- biodegradabilità dei contaminanti;
- quantitativo di batteri presenti;
- permeabilità del terreno.

Da ultimo, la seguente tabella riporta i vantaggi più significativi derivanti dall'adozione di un sistema di BS rispetto a quello di AS:

PARAMETRO	VANTAGGIO RISPETTO ALL'AS	
COSTI DI INTERVENTO		Il BS permette di avere costi più competitivi in quanto può non necessitare dell'accoppiamento con un sistema di SVE (e quindi del trattamento dei vapori estratti).
CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE		Il BS impiega tassi d'iniezione di aria notevolmente più ridotti e configurazioni più flessibili.

Tabella 6-10 Vantaggi di un sistema di BS

6.5 Barriere idrauliche

Definizione e criteri generali

Il barrieramento idraulico è ad oggi uno dei più utilizzati sistemi di riduzione della contaminazione della falda, seppure nato inizialmente come tecnica di contenimento.

Questa tecnologia consiste in una serie di pozzi di emungimento (detti "pozzi barriera"), posti prevalentemente trasversalmente al deflusso idrico, la cui azione crea dei coni di depressione piezometrica, richiamando il plume di contaminazione e impedendone la migrazione nell'ambiente circostante.

Spesso al barrieramento idraulico viene accoppiato un sistema di trattamento delle acque emunte; da qui il termine frequentemente utilizzato di tecnologia **Pump&Treat** (P&T), visibile in Figura 6-5.

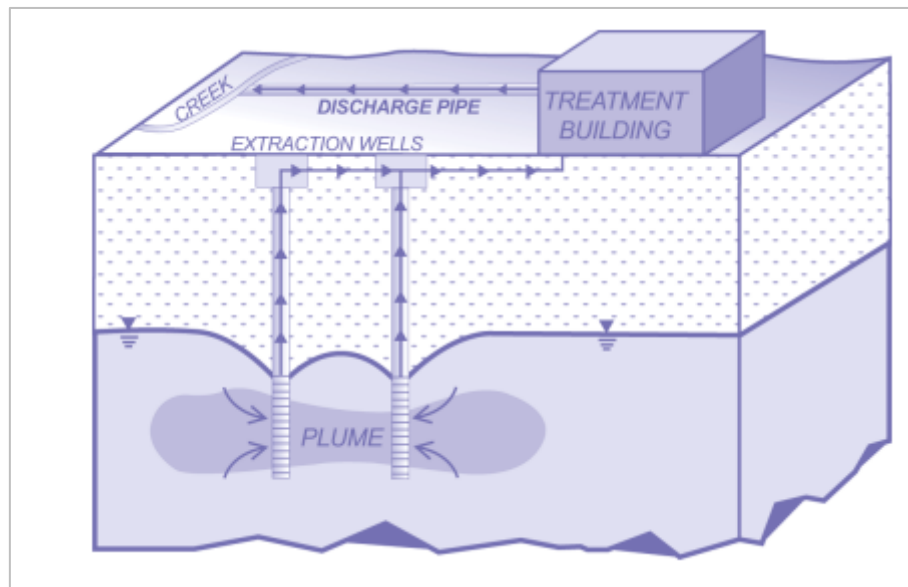


Figura 6-5 Schema di trattamento mediante P&T (fonte: U.S. EPA)

Nel caso si opti per il trattamento in sito, l'acqua può essere poi sia immessa nella rete fognaria o in corpo idrico superficiale sia reintrodotta nell'acquifero tramite pozzi di reiniezione.

Purtroppo, il trattamento spesso ha successo durante le fasi iniziali dell'implementazione ma le prestazioni diminuiscono drasticamente in tempi successivi, comportando la permanenza di quantità, anche significative, di contaminazione residua.

A causa di queste limitazioni, il metodo di P&T viene ora utilizzato principalmente per il recupero del prodotto e il controllo della migrazione del plume di contaminanti.

Condizioni e limiti di applicabilità

Il **barrieramento idraulico** è **particolarmente adatto**, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Contaminazione presente in fase disciolta nelle acque (o anche in forma di prodotto libero);

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni a permeabilità media e medio-alta, anche mediamente eterogenei;
- Presenza di falda anche superficiale.

Di contro, il **barrieramento idraulico risulta non idoneo**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Contaminazione nel suolo insaturo.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Terreni molto eterogenei a bassa permeabilità (permeabilità $< 10^{-5}$ m/s);
- Acquiferi con permeabilità per fratturazione;
- Acquiferi molto produttivi (a causa degli elevati costi).

La **Tabella 6-11** seguente mostra il grado di efficacia dei sistemi di P&T in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Tutti i tipi di contaminazione		-
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Disciolta o LNAPL		DNAPL
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Di piccole-medie dimensioni		Molto esteso
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	Suolo Saturo e falda		Suolo insaturo

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei o mediamente eterogenei a granulometria media e medio-grossolana		Terreni eterogenei, a granulometria fine o acquiferi fratturati
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	>10E-6 m/s		<10E-6 m/s
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Moderato o isotropo		Elevato

Tabella 6-11 Efficacia dei sistemi P&T

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

Propedeuticamente alla progettazione del sistema di P&T è necessario:

- ricostruire la geometria e le caratteristiche dell'acquifero (permeabilità, eterogeneità, coefficiente di immagazzinamento, livello di falda, ecc.);
- elaborare la carta piezometrica;
- definire la concentrazione dei contaminanti nella falda;
- definire l'estensione del plume di contaminazione.

Queste informazioni consentiranno di definire:

- il raggio di azione dei punti di estrazione;
- il numero, la spaziatura e le caratteristiche dei punti di pompaggio (profondità, diametro, pozzo, ecc.);
- il tipo e la potenza delle pompe;
- le dimensioni dell'unità di trattamento acque;
- in caso di reiniezione nella falda acquifera: il numero, la spaziatura e le caratteristiche dei punti di iniezione (profondità, diametro, pozzi, ecc.);
- gli effetti su eventuali acque superficiali vicine;
- variazioni dei livelli delle acque sotterranee in funzione delle portate e delle diverse condizioni previste (regime di transizione, falda alta, falda bassa, ecc.);
- l'evoluzione della concentrazione e il pennacchio di inquinamento.

La realizzazione della barriera idraulica prevede una progettazione accurata affinché i coni di depressione creati dai vari pozzi si compenetrino tra loro e intercettino completamente il plume di contaminazione.

Allo scopo di tenere sotto controllo il funzionamento dell'impianto di contenimento è necessario inoltre predisporre una serie di pozzi di monitoraggio a valle dell'impianto stesso: un incremento delle concentrazioni di inquinanti nei pozzi di controllo è infatti il primo indice di criticità nel buon funzionamento dei pozzi di emungimento.

- La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di P&T è costituita da:
- una rete di estrazione costituita da pozzi verticali opportunamente fessurati nella zona satura oppure da trincee drenanti;
- una rete di piezometri di monitoraggio;
- pompe elettrosommerse o pneumatiche;
- separatore acqua/olio (qualora presente prodotto surnatante);
- un'unità di trattamento delle acque di falda estratte (se trattamento onsite);
- stoccaggio dei rifiuti (qualora presente surnatante e/o l'acqua non fosse inviata in fognatura/reimmessa in falda);
- piping e strumentazioni correlate (contaltri, pressostati, ecc.);
- quadro elettrico di controllo.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e collaudata. Relativamente semplice e veloce da configurare e con disturbo minimo per il sottosuolo. Permette di operare il confinamento idraulico.
		Necessita il controllo completo della direzione di deflusso della falda per evitare il rischio di diffusione dell'inquinamento.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Efficace con tutti i tipi di contaminante.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Applicabile in più contesti ambientali (frangia capillare e zona satura). Adatta a terreni omogenei o poco eterogenei a granulometria medio-fine e permeabilità medio-bassa (comunque non inferiore a 10^{-7} m/s).

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		Non idonea in terreni a tessitura fine e poco permeabili.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		È possibile intervenire sotto edifici esistenti. Il raggio di influenza dei singoli pozzi di pompaggio può richiedere la realizzazione di un significativo numero di pozzi per operare un intervento adeguato. È necessario installare anche dei pozzi di controllo a valle del barriera idraulica.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Possibili lunghi tempi di bonifica e incapacità di ridurre il valore dell'inquinante oltre un certo valore di equilibrio spesso superiore alle concentrazioni limite.
COSTI DI INTERVENTO		Può essere un trattamento abbastanza economico ma, a seconda dell'estensione del plume possono essere necessari numerosi punti di estrazione e la quantità d'acqua pompata e trattata può essere consistente, aumentando di conseguenza i costi.
		I costi possono essere molto sostenuti nel caso di emungimento e stoccaggio delle acque.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Spesso viene utilizzata come attività di messa in sicurezza e accoppiata con altre tecnologie raggiungere gli obiettivi di bonifica.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Spesso viene pompata molta più acqua di quella effettivamente contaminata. È necessario il trattamento dell'acqua pompata.
		In caso di stoccaggio, la necessità di smaltimento delle acque comporta una riduzione ulteriore della sostenibilità ambientale.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-12 Vantaggi e svantaggi

Tecnologie correlate

A causa:

- dell'incapacità di ridurre il valore dell'inquinante oltre un certo valore di equilibrio spesso superiore alle concentrazioni limite
- dell'azione solamente sulla fase disciolta

spesso il sistema P&T viene utilizzato come attività di messa in sicurezza ed associato ad altri interventi di bonifica sia del suolo insaturo che della falda (AS, SVE, dig&dump, ecc.).

6.6 Barriere Reattive Permeabili (PRB)

Definizione e criteri generali

La definizione di **PRB (Permeable Reactive Barrier)** proviene da U.S. EPA (1998); tale tecnologia, di tipo passivo, è applicabile per il risanamento dei contaminanti presenti in fase disciolta nelle acque sotterranee. Tra i contaminanti trattabili vi sono molti idrocarburi clorurati, i metalli in tracce e gli inquinanti anionici (solfati, nitrati, fosfati, arsenico).

Essa consiste nella realizzazione di una trincea nel sottosuolo a valle idrogeologico del terreno da bonificare, riempita con un materiale reattivo (capace cioè di degradare gli inquinanti a sostanze non tossiche, o meno tossiche). Il trattamento di tipo passivo sfrutta il gradiente naturale della falda che attraversa il mezzo reattivo posto all'interno della barriera stessa. Il plume che attraversa la barriera viene in contatto con il materiale che la costituisce e reagisce con esso. I processi chimico-fisici che avvengono consentono di degradare, immobilizzare o adsorbire il contaminante nella fase di attraversamento. Il funzionamento è schematizzato in **Figura 6-6**.

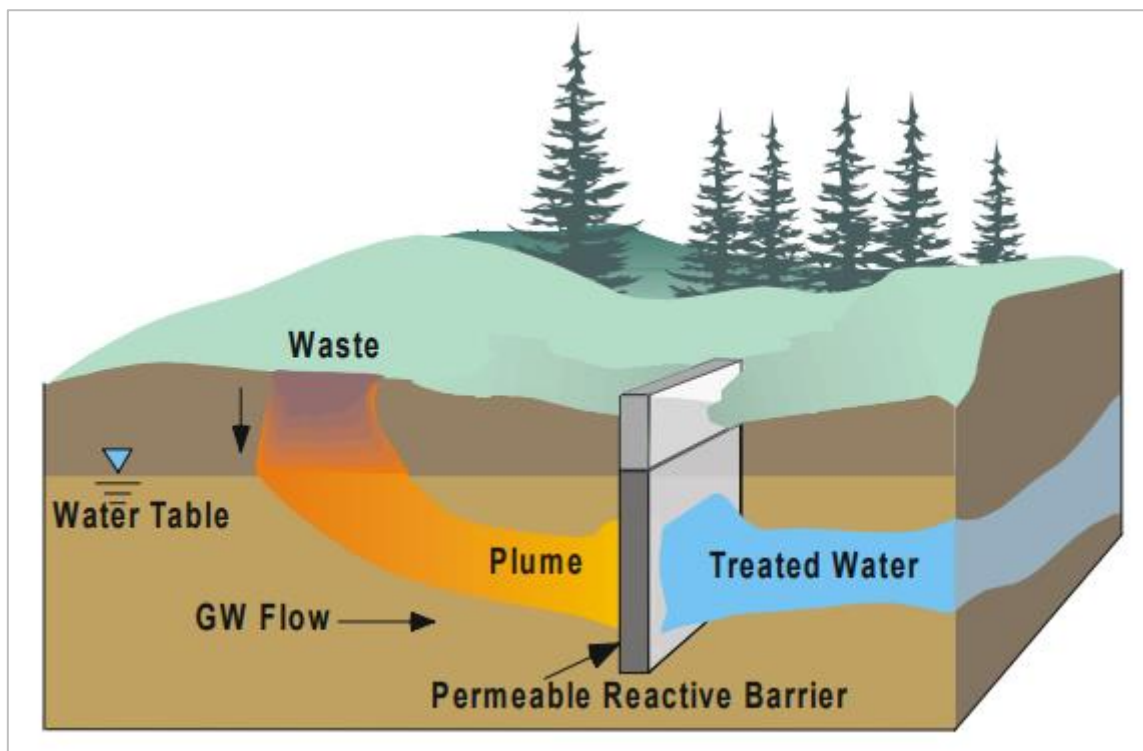


Figura 6-6 Schema delle Barriere Reattive Permeabili (fonte: EPA, 1998)

Perché l'intervento sia efficace, l'intero plume deve essere convogliato attraverso l'elemento reattivo della barriera caratterizzato da una permeabilità superiore a quella dell'acquifero, onde evitare fenomeni di aggiramento della barriera stessa, in qualsiasi direzione.

Le reazioni tra i contaminanti contenuti nell'acqua ed il substrato reattivo possono essere di due tipologie:

- assorbimento alla superficie del solido: i contaminanti vengono sottratti alla fase liquida in movimento restando assorbiti al substrato solido, il quale è costituito generalmente da carboni attivi, efficaci soprattutto sui composti organici apolari, o da zeoliti, naturali o artificiali.
- degradazione: a seconda del tipo di materiale reattivo utilizzato, si sviluppano reazioni di degradazione chimica o microbiologica dei contaminanti in fase liquida. La degradazione può essere sia totale sia parziale, con formazione di prodotti intermedi a tossicità diversa rispetto ai composti iniziali.

Condizioni e limiti di applicabilità

La PRB può essere considerata adatta, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di contaminazione disciolta in falda di ampio spettro;
- Particolarmente adatta per contaminazioni entro i 15 m da p.c.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Acquifero omogeneo, assenza di percorsi preferenziali di permeabilità
- Presenza di uno strato impermeabile a profondità superiori a 25-30 m
- Buone condizioni di scavabilità del terreno e assenza di criticità per la realizzazione delle opere fisiche

Di contro, **la PRB risulta non idonea, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di contaminazione poco solubile;
- Presenza di prodotto surnatante;
- Contaminazioni ubicate a profondità >15 m da p.c.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Aree dove sono presenti percorsi preferenziali per il flusso della falda o basso gradiente idraulico;
- Presenza di litologie caratterizzate da frazioni fini superiori al 20%
- Terreno poroso, eterogeneo, a bassa permeabilità, ad alto contenuto di sostanza organica;
- Significativa capacità di scambio cationico.

La **Tabella 6-13** seguente mostra il grado di efficacia dei sistemi PRB in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Composti organici (clorurati) e inorganici (metalli in tracce e inquinanti anionici)	Idrocarburi aromatici IPA, Fenoli non clorurati	PCB, Mercurio, alcuni pesticidi
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante disciolto	Contaminante debolmente disciolto	Prodotto libero
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Plume poco o mediamente estesi		Plume troppo estesi
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	< 15 m da p.c.		>15 m da p.c.
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni mediamente omogenei, a granulometria sabbiosa	Terreni mediamente eterogenei, a granulometria sabbiosa	Terreni ad elevato tenore di matrice organica organici Terreni eterogenei a granulometria medio-fine (sabbioso-limosi, limosi, limoso-argillosi)
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	Elevata	Media	Bassa
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-13 Efficacia delle Barriere Reattive Permeabili

Test di laboratorio e configurazioni/ tipologie costruttive

Le tipologie di materiali reattivi fino ad ora applicate o in fase di studio a scala di laboratorio sono molteplici.

I **test** da eseguire sono costituiti sia da prove statiche (batch test) che da prove dinamiche (prove in colonna) e dovrebbero preferibilmente sfruttare campioni di acqua prelevati in sito,

vista l'importanza che hanno le caratteristiche geochimiche dell'acqua nel determinare l'efficienza del trattamento.

- I batch tests sono usualmente utilizzati per lo screening iniziale del materiale reattivo (test rapidi, poco costosi e facilmente gestibili) e consentono, inoltre, di ottenere più agevolmente informazioni circa i percorsi di reazione e meglio verificare i bilanci di massa.
- I test in colonna invece sono condotti con il materiale selezionato nei test batch con lo scopo di stimare i tempi di dimezzamento dei contaminanti e dei composti intermedi. Tali test consentono di ottenere informazioni sul comportamento del sistema in condizioni molto simili a quelle che si realizzano su campo, permettendo di ottenere informazioni sulla cinetica del processo in condizioni più rappresentative di quanto non si ottenga dai test in batch. Dalla cinetica di degradazione è possibile quindi calcolare il tempo di residenza necessario per raggiungere la concentrazione richiesta e quindi, dalla velocità della falda, lo spessore di mezzo reattivo.

La messa in opera delle barriere reattive si fa generalmente ricorrendo a due diverse **configurazioni planimetriche**, in funzione delle dimensioni dell'area da trattare dalle caratteristiche dell'acquifero e dal tipo di materiale reattivo necessario:

- barriera continua: è costituita da una cella che si estende senza interruzioni, in modo da intercettare il pennacchio in tutta la sua estensione, senza alterare le condizioni di flusso del sito. Il plume, come mostrato in **Figura 6-7**, attraversa la barriera sotto il gradiente naturale, senza che ci siano variazioni di velocità.

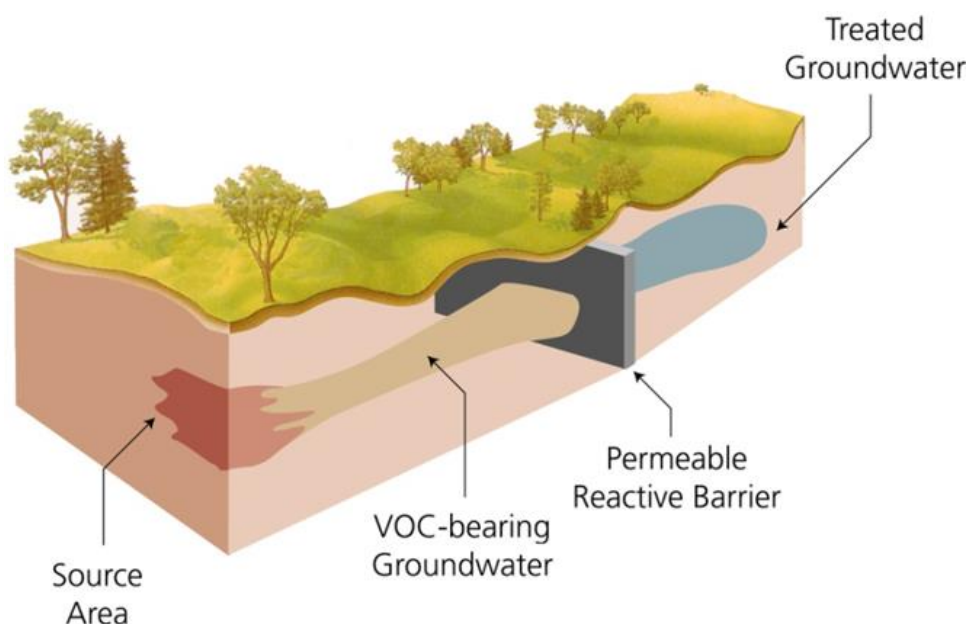


Figura 6-7 Funzionamento della barriera continua (fonte: Professor Petrangeli Papini)

- "funnel and gate", che a sua volta può essere a "single gate" oppure a "multiple gate". Il primo caso, più semplice e mostrato in **Figura 6-8**, comprende:

- due sezioni a bassa permeabilità (funnel) esterne, costituite da uno o più diaframmi plastici (ad es. in cemento-bentonite) o da palificazioni, che servono a convogliare il plume verso la zona centrale;
- una sezione permeabile (gate) interna, costituita da una trincea e contenente il materiale reattivo.

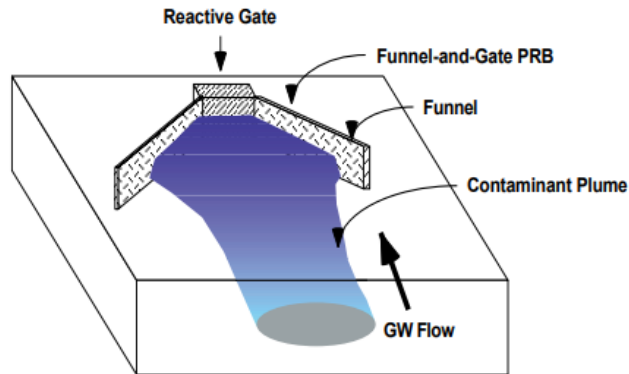


Figura 6-8 Funzionamento del Funnel and Gate (fonte: EPA, 1998)

Indipendentemente dalla configurazione planimetrica selezionata, l'elemento reattivo può essere sospeso oppure intestato nel substrato impermeabile. La seconda soluzione rappresenta sempre quella preferibile, allo scopo di evitare fenomeni di aggiramento verticale o laterale della barriera da parte delle acque contaminate.

Per la realizzazione della zona reattiva sono diffuse tecniche diverse, tra cui:

- realizzazione di una trincea mediante escavatori a braccio rovescio, benne mordenti o escavatori a movimento continuo;
- messa in posto del materiale reattivo mediante cassoni, rimossi dopo che il materiale reattivo ha sostituito il terreno;
- messa in posto del materiale reattivo mediante mandrino.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
SGRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Sebbene si tratti di un processo meccanicamente affidabile, è una tecnologia poco diffusa. La formazione di precipitati, legata alle reazioni tra contaminante e mezzo reattivo, potrebbe compromettere l'efficacia a lungo termine del sistema.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		I processi fisico-chimici, se correttamente dimensionati, possono avere rese >95%; i processi biologici hanno resa in generale inferiore.
		La continuità e quindi l'efficienza della barriera devono essere costantemente monitorate attraverso il controllo della conducibilità idraulica e dei movimenti del terreno circostante che potrebbero mettere in crisi la stabilità dell'opera e la qualità delle acque sotterranee a valle dell'opera stessa.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile ad un ampio spettro di contaminanti organici e inorganici.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Non idoneo per aree dove sono presenti percorsi preferenziali per il flusso della falda o acquiferi caratterizzati da un basso gradiente idraulico. Difficoltà di applicazione nel caso di inquinamento profondi (oltre i 15 m da piano campagna).
		Trattamento ottimo per sorgenti distribuite e/o difficilmente localizzabili.
		Applicabile in aree produttive attive, in generale è possibile l'utilizzo dell'area durante le operazioni di ripristino ambientale.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Mancanza di field tests di lunga durata in grado di fornire garanzie sulla longevità delle proprietà reattive della barriera o sulla sua riduzione di permeabilità a causa di fenomeni di precipitazione. È necessario prevedere manutenzione/monitoraggio a lungo termine.
COSTI DI INTERVENTO		Bassi costi operativi e di mantenimento, tuttavia il materiale reattivo può avere costi sostenuti.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		È compatibile con altre tecnologie di risanamento.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		È applicabile in situ e non richiede perciò estrazione o movimentazione delle acque contaminate (se non durante la fase di scavo, per l'installazione).

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		È un sistema di tipo passivo, in cui le acque si muovono spinte da un gradiente idraulico naturale e raggiungono la zona di trattamento senza che debba essere fornita energia.
		Terreno di risulta prodotto dalle operazioni di scavo da inviare a smaltimento. Per le barriere in carbone attivo granulare occorre provvedere allo smaltimento del materiale reattivo esausto



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-14 Vantaggi e svantaggi delle Barriere Reattive Permeabili

Tecnologie correlate

Si segnala l'esistenza di barriere che sfruttano trattamenti misti chimico-biologici: nel caso di degradazione chimica, il materiale solido può essere ferro granulare, anche combinato con altri materiali solidi come la sabbia silicea, e può fungere da supporto per la crescita delle popolazioni batteriche autoctone. In tal caso, aggiungendo nutrienti ed ossigeno in quantità e tempi opportuni si stimola la crescita batterica, sostenendo la degradazione biologica.

Sulla base di tali principi si possono individuare tre diverse categorie di barriere reattive permeabili:

- **Barriere chimiche:** sono basate sulle trasformazioni dei contaminanti a composti meno nocivi, e non richiedono la rigenerazione del materiale reattivo.
- **Barriere assorbenti:** i due materiali assorbenti più rappresentativi, tra quelli utilizzabili per le barriere di questo tipo, sono il carbone attivo e le zeoliti naturali.
- **Barriere Biologiche:** la "bioremediation" è essenzialmente basata sul sostegno nutrizionale/energetico da fornire ai microrganismi già presenti nel sito da decontaminare, o appositamente introdotti.

6.7 Elettrocinesi

Definizione e criteri generali

L'Elettrocinesi è una tecnologia di bonifica in situ, applicata sia in zona insatura sia in zona satura, che permette di separare ed estrarre:

- metalli pesanti;
- radionuclidi;
- molecole inorganiche (nitrati, solfati e cianuri);
- esplosivi;
- composti organici, come prodotti petroliferi (carburanti e oli lubrificanti), DNAPL, solventi alogenati (TCE), BTEX ed idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

Tale tecnologia si basa sull'applicazione di corrente continua, costante e a bassa intensità (600mA) tra due elettrodi infissi nel terreno; la differenza di potenziale tra gli elettrodi provoca una corrente elettrica che porta a una migrazione dei contaminanti disciolti nell'acqua in forma ionica verso i rispettivi elettrodi (anodo e catodo), dove vengono recuperati.

La presenza di un campo elettrico nel terreno genera inoltre lo sviluppo di un gradiente di pH, reazioni redox, generazione di calore, nonché processi di elettrolisi.

Esistono diversi processi di trattamento elettrocinetico:

- elettro-osmosi: consiste in un movimento di acqua dall'anodo al catodo,
- elettromigrazione: consiste nel trasporto di ioni e complessi ionici all'elettrodo di carica opposto (catodo e anodo),
- elettroforesi: consiste nel trasporto di particelle cariche o colloidali sotto l'influenza di un campo elettrico; i contaminanti sono quindi trasportati in forma adsorbita.

Lo schema di funzionamento dell'elettrolisi è visibile in **Figura 6-9**.

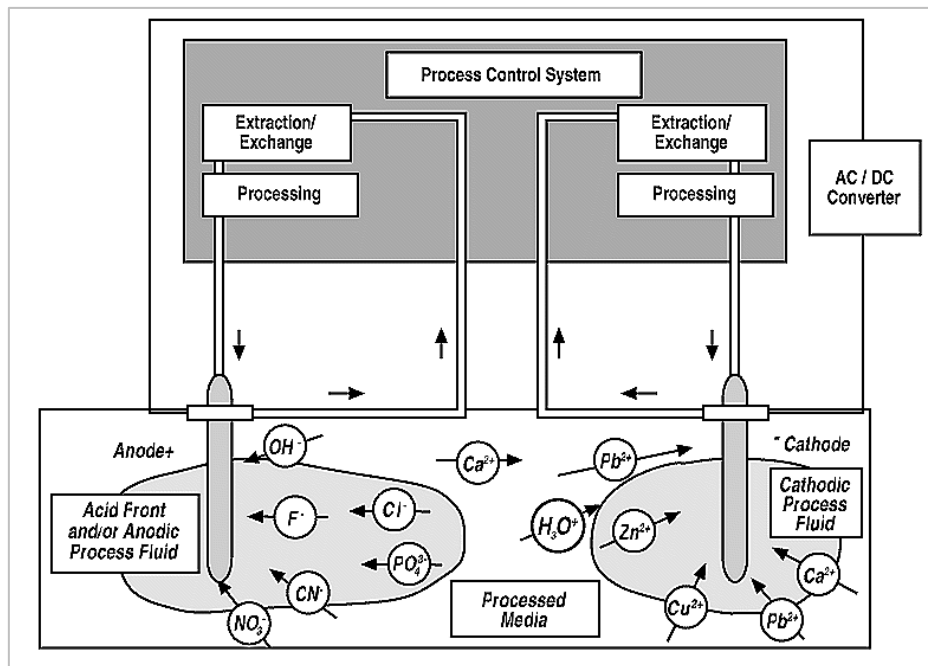


Figura 6-9 Schema dell'Elettrocinesi (Fonte: FRTR, EPA)

Condizioni e limiti di applicabilità

L'Elettrocinesi è particolarmente adatta, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Composti polari e solubili, grazie alla loro elevata mobilità. I composti più adatti per questo trattamento sono i metalli pesanti;
- Il processo si applica anche a un ampio range di concentrazioni (da pochi ppm a decine di migliaia);
- Presenza di DNAPL;
- Profondità della contaminazione < 20m.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni omogenei con granulometria fine (limi e argille compatte), meno efficace ma possibile anche in caso di sabbie quarzose;
- Conducibilità idraulica medio-bassa;
- Capacità di scambio cationico e salinità basse;
- Depositi con bassi livelli di conduttività elettrica.

Di contro, **l'Elettrocinesi risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Basse concentrazioni di ioni da rimuovere si traducono in una bassa efficienza;
- Precipitazione prematura di specie chimiche vicino al catodo;
- Profondità della contaminazione superiore a 20 m.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Terreni a granulometria grossolana e conducibilità idraulica medio-alta;
- Terreni eterogenei e anomalie nel sottosuolo;
- pH elevato che provoca la precipitazione di alcuni metalli e un progressivo intasamento dei pori;
- Condizioni di acidità e di decadimento elettrolitico dell'ambiente;
- Capacità di scambio cationico e salinità alte;
- Depositi con alti livelli di conduttività elettrica.

La **Tabella 6-15** seguente mostra il grado di efficacia della tecnologia di Elettrocinesi in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Composti inorganici: metalli pesanti, radionuclidi, molecole inorganiche tossiche (cianuri, solfati, nitrati), esplosivi	Composti organici polari: prodotti petroliferi (carburanti e oli lubrificanti), DNAPL, solventi alogenati, BTEX, PAH	Composti apolari e metalli allo stato zero-valente
	Concentrazioni da pochi ppm a diverse migliaia		
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Composti disciolti e adsorbiti (nel caso dell'elettroforesi)		-
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Limitata-Moderata		Elevata
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In zona insatura e satura entro i 20 m da p.c.		Oltre i 20 m da p.c.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei, a granulometria fine (limi e argille) Tasso di umidità del sottosuolo tra il 14 e il 18%. Capacità di scambio cationico e salinità basse.	Terreni mediamente omogenei e a granulometria medio-fine (sabbie quarzose)	Terreni eterogenei e a granulometria grossolana (sabbie e ghiaie). Tasso di umidità >10 %. Capacità di scambio cationico e salinità alte.
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	Bassa	Media	Alta
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-15 Efficacia dell'Elettrocinesi

Componenti impiantistici di base e possibili configurazioni

La **componente impiantistica di base** per attuare un trattamento elettrocinetico è costituita da:

- elettrodi (anodi, catodi) fissati a un sistema di tenuta e alimentato da corrente elettrica, costituiti da materiali conduttivi e resistenti alla corrosione (titanio, platino, leghe speciali, grafite);
- sistema di estrazione/scambio cationico,
- sistema di iniezione del fluido per trattamento catodico,
- sistema di estrazione/scambio anioni,
- sistema di iniezione del fluido per trattamento anodico,
- trattamento/ricircolo dei prodotti estratti,
- se necessario: una copertura ermetica per l'intera area da trattare e un sistema di trattamento del gas,
- un sistema di monitoraggio dell'acqua,
- stoccaggio di rifiuti solidi e liquidi derivanti dal trattamento.

Le possibili configurazioni possono essere di tipo mono o bi-dimensionale (esagonale, quadrata, triangolare), a seconda di:

- numero e costo degli elettrodi per area da trattare;
- posizione e dimensione delle eventuali zone di campo inattivo;
- tempo richiesto per il processo.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		I risultati dei test in laboratorio su terreni a bassa conducibilità idraulica hanno evidenziato un recupero dei metalli del 75-95%. Processi e mezzi tecnici ancora in fase emergente, inoltre richiede un controllo molto accurato delle acque sotterranee per evitare il diffondersi del plume.
		Sistema relativamente semplice.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Idoneo per composti polari e solubili. I composti più adatti per questo trattamento sono i metalli pesanti. Applicabile anche ad altri composti inorganici (radionuclidi, molecole inorganiche tossiche, esplosivi) e a composti organici (prodotti petroliferi, DNAPL, solventi alogenati, BTEX, PAH).
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni omogenei a granulometria fine e permeabilità medio-bassa.
		Non idonea in terreni eterogenei a tessitura grossolana e permeabilità alta.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Rifiuti o strutture interrati con elevata conduttività elettrica possono rendere inefficace la tecnica.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Il tempo richiesto per il trattamento è funzione della velocità di trasporto del contaminante. Adsorbimento, precipitazione, complessazione interferiscono con il trasporto attraverso un fattore di ritardo, a sua volta dipendente dalla tipologia di terreno, dalle condizioni di pH e dalla presenza di sostanze organiche.
COSTI DI INTERVENTO		I costi dipendono fortemente dal terreno da trattare, dalla conduttività del terreno, dal tipo di inquinanti, spaziatura degli elettrodi e processo., Anche il costo dell'energia elettrica e dei monitoraggi a lungo termine incidono sul costo finale.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Tensioattivi o agenti complessanti possono essere utilizzati per aumentare la solubilità degli inquinanti e quindi aumentare la loro mobilità. Alcuni reagenti possono anche essere utilizzati per aumentare i tassi di recupero.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		L'applicazione di un campo elettrico può causare surriscaldamento e quindi essiccazione del suolo. Gli elettrodi metallici possono dissolversi durante le reazioni di elettrolisi e generare ulteriore inquinamento da metalli nel suolo. Non è necessaria alcuna operazione di recupero on/off site dei contaminanti.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-16 Vantaggi e svantaggi dell'Elettrocinesi

Tecnologie correlate

Le principali varianti della tecnica elettrocinetica classica, sviluppati e brevettati di recente sono:

- *Eletrochemical Geooxidation (ECGO)*: sistema utilizzato per mineralizzare i composti organici e immobilizzare quelli inorganici tramite correnti elettriche. È applicabile sia in zona insatura sia in zona satura;
- *Processo Lasagna™*: tecnologia con struttura a strati che combina elettrosmosi e zone di trattamento, utilizzata sia con i composti inorganici sia organici, nonché di rifiuti misti;
- *Tecnica Elettroacustica*: utilizza una sorgente acustica, oltre a quella elettrica, collocata in posizione mediana rispetto agli elettrodi di potenziale. È utilizzata in particolare nei terreni argillosi contaminati da metalli pesanti e in presenza di NAPL;
- *Permeable Electrochemical Oxidation Reactor (PEOR)*: si utilizza un reattore permeabile di ossidazione elettrochimica (Van Cauwenberghe, 1997).

6.8 Multi Phase Extraction (MPE)

Definizione e criteri generali

I sistemi di MPE sono adatti a trattare la contaminazione da composti organici volatili, presente contemporaneamente in zona insatura/frangia capillare/zona satura in terreni con permeabilità medio-basse e contengono al loro interno molteplici configurazioni impiantistiche (**TPE, DPE, Bioslurping**).

L'estrazione multifase simultanea, attraverso pozzi verticali e orizzontali, consiste nell'esercitare una depressione significativa nell'area insatura, a livello della frangia capillare e a livello della parte superiore della zona satura, che ha lo scopo di estrarre vapori dal suolo, l'eventuale prodotto surnatante e la fase disciolta.

La tecnologia è applicabile anche in acquiferi a bassa trasmissività e in questi casi può essere utilizzato anche quale sistema di contenimento idraulico.

Di seguito si riporta una breve descrizione delle possibili configurazioni impiantistiche.

Dual Phase Extraction (DPE)

La tecnica DPE, visibile in **Figura 6-10**, prevede l'estrazione dal pozzo di gas e liquidi (NAPL e acque di falda) mediante due condotti separati mediante l'utilizzo di due pompe o soffianti.

- i liquidi sono estratti impiegando una pompa elettrosommersa o pneumatica posta all'interno del casing. Essi vengono poi trattati nell'impianto fuori terra;
- i vapori vengono asportati mediante la creazione di basso o alto grado di vuoto generato da una pompa del vuoto installata alla testa del pozzo. In superficie subiscono dapprima un passaggio all'interno di un separatore di condensa e, successivamente, il trattamento della fase aeriforme.

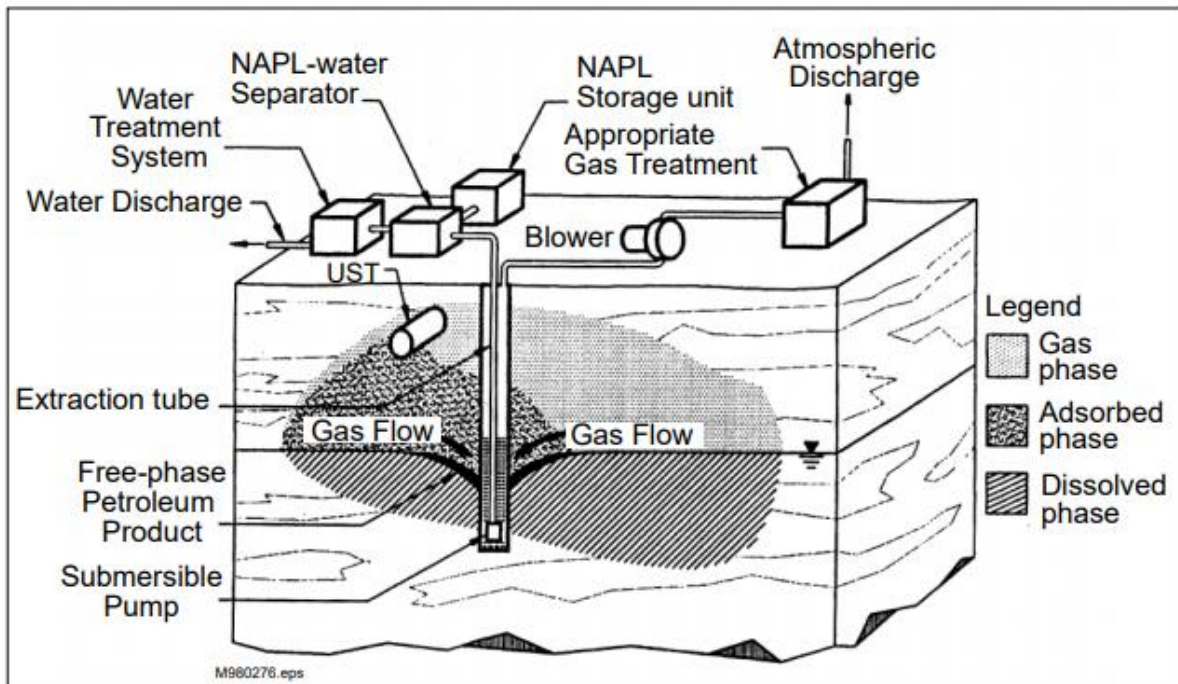


Figura 6-10 Schema della tecnologia DPE (Fonte: After USEPA 1995)

Un'alternativa a tale configurazione è rappresentata dal cosiddetto Dual Pump, ovvero l'utilizzo di due pompe all'interno di uno stesso pozzo (ovviamente di grande diametro) a quote differenti, qualora la finalità sia costituita dal recupero unicamente degli idrocarburi.

Two Phase Extraction (TPE)

La tecnica TPE, visibile in **Figura 6-11**, prevede l'estrazione dal pozzo di gas e liquidi (NAPL e acque di falda) mediante un unico condotto (*drop tube*), richiamati grazie all'azione di una pompa aspirante o soffiante che genera un alto grado di vuoto.

La miscela estratta, una volta in superficie, subisce un primo passaggio nel separatore gas/liquidi (ed eventualmente un ulteriore separatore olio/acqua) e, infine, il trattamento delle singole fasi distinte.

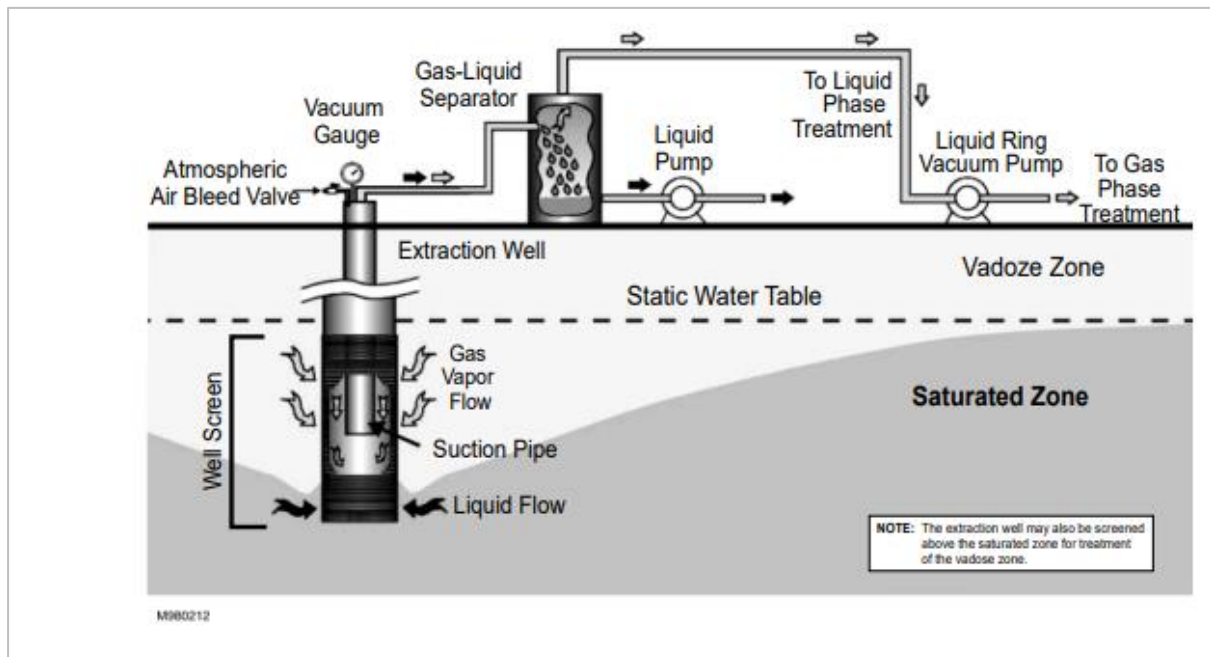


Figura 6-11 Schema del TPE (Fonte: After EPA 1997)

Bioslurping

Tale tecnica, visibile in **Figura 6-12**, è di fatto una variante del TPE concepita con lo scopo di migliorare il recupero del prodotto di LNAPL, nonché incentivare la biodegradazione nell'insaturo causata dall'ossigenazione del suolo per bioventing.

Prevede l'utilizzo di un tubo di suzione, ubicato all'interfaccia LNAPL-acqua con lo scopo di creare un gradiente di pressione, il quale provoca l'ingresso nel pozzo delle 3 fasi (gas, liquido, LNAPL) senza però generare effetti di *smearing* (ovvero la ritenzione di prodotto in zona satura e lo stazionamento dello stesso in zona insatura a seguito delle oscillazioni della tavola d'acqua).

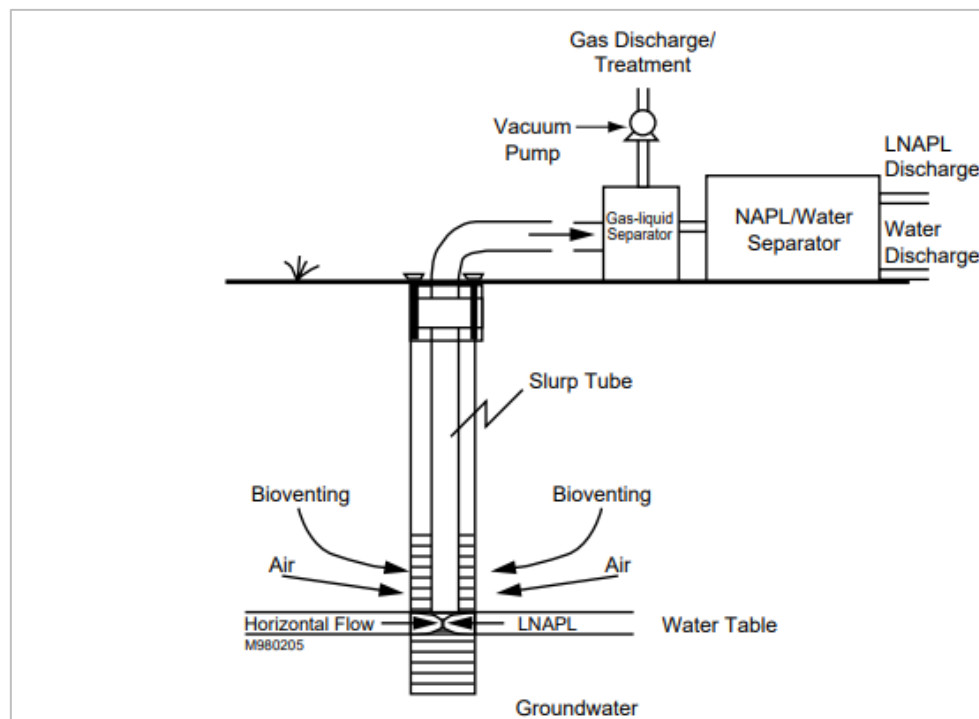


Figura 6-12 Schema del Bioslurping (Fonte: After AFCEE 1994b)

Condizioni e limiti di applicabilità

Il sistema MPE è particolarmente adatto e applicabile nelle seguenti

condizioni: CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di composti organici volatili e idrocarburi di tipo petrolifero;
- Contaminazione presente in due o tre fasi, compresa la presenza di prodotto surnatante;
- Contaminazione di origine recente, o comunque non eccessivamente datata.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni sabbioso-limosi, limi o argille limose a permeabilità media e medio-bassa, anche mediamente eterogenei;
- Presenza di falda anche superficiale;
- Terreni con tenori non elevati di materia organica.

Di contro, **l'MPE risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di inquinanti molto solubili e molto volatili;
- Prodotto surnatante con spessori < 1 cm e densità molto vicina a 1;

- Forte variabilità spazio-temporale degli spessori del prodotto surnatante;
- Contaminazione datata.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Terreni molto eterogenei ad alta permeabilità (sabbie grossolane e ghiaia) o con permeabilità $< 10^{-7}$ m/s;
- Livello di falda $> 7-10$ m;
- Presenza di tenori elevati di materia organica ed elevato grado di umidità.

La **Tabella** 6-17 seguente mostra il grado di efficacia dei sistemi di MPE in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Composti volatili* e in particolari idrocarburi petroliferi. Contaminazione recente.	Composti semivolatili	Composti non volatili. Contaminazione "datata"
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante disciolto e in fase gassosa. LNAPL	Contaminante adsorbito	DNAPL NAPL con spessori < 1 cm e densità molto vicina a 1
(*)La volatilità dell'inquinante è determinata dalla pressione di vapore, dalla costante di Henry, dalla sua composizione e dal punto di ebollizione.			
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Di piccole-medie dimensioni	Di medie dimensioni	Esteso
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In terreni insaturi, zona di frangia capillare e nelle porzioni superficiali della zona satura	In acquiferi posti a limitata profondità	In falde ubicate a profondità $> 7-10$ m
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei a granulometria medio-fine (sabbioso-limosi, limosi, limoso-argillosi)	Terreni mediamente eterogenei, a granulometria sabbiosa	Terreni a tessitura grossolana, altamente organici e con elevato tasso di umidità,

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
			substrato fratturato, terreni stratificati.
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	<10E-5 m/s	10E-5÷10E-4 m/s	>10E-4 m/s <10E-7 m/s
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-17 Efficacia della tecnologia MPE

Da ultimo, si precisa che la tecnologia di MPE risulta applicabile con maggiore efficacia rispetto ai sistemi tradizionali (SVE, emungimento e trattamento delle acque) in condizioni di permeabilità medio-basse. Ciò è dovuto al fatto che:

- si sviluppa un'azione di richiamo più sviluppata mediante l'azione del vuoto applicato;
- si verifica la cosiddetta "sovrapposizione degli effetti" dovuta alla somma tra l'azione del vuoto e la depressione piezometrica, provocando quindi maggiori valori di portata di aria/acqua.

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di MPE è costituita da:

- una rete di estrazione costituita da pozzi verticali opportunamente fessurati nella zona insatura e satura;
- una rete di piezometri di monitoraggio;
- lance di aspirazione del flusso multifase (slurp tube, per configurazione TPE) collegate alla testa pozzo in modo ermetico e generalmente regolabili in altezza;
- pompe elettrosommerse o pneumatiche (per configurazione DPE);
- una soffiante o pompa del vuoto;
- separatore acqua/gas del flusso multifase;
- separatore acqua/olio (qualora presente prodotto surnatante);
- un'unità di trattamento dei vapori estratti;
- un'unità di trattamento delle acque di falda estratte;
- reti di *interconnetting*;
- piping e strumentazioni correlate;
- quadro elettrico di controllo.

I principali parametri da considerare nello sviluppo di un sistema di MPE sono riportati nella seguente **Tabella 6-18**. Relativamente alle caratteristiche dei pozzi di estrazione, gli standard di riferimento sono stati principalmente redatti da ASTM, AWWA e U.S. EPA.

PARAMETRO	INTERVALLO DI VALORI MAGGIORMENTE UTILIZZATO
Diametro del pozzo di estrazione verticale (")	4-8
Diametro del piezometro di monitoraggio (")	4-6
Lunghezza della fenestratura e suo posizionamento (m)	Funzione della profondità della contaminazione e del suo spessore
Zona di influenza (m)	2-8
Portata di estrazione (m ³ /h)	10-100
Vuoto generato (mmHg)	Basso (circa 100-300) Alto (circa 300-650)

Tabella 6-18 Parametri del sistema MPE

Le **principali configurazioni adottabili** sono le seguenti:

- pozzi verticali a grappolo distribuiti all'interno dell'area sorgente;
- come pozzi barriera al fine di operare un contenimento idraulico (nel caso di acquiferi a bassa trasmissività).

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e collaudata. Relativamente semplice e veloce da configurare e con disturbo minimo per il sottosuolo. Permette di operare il confinamento idraulico. Si possono raggiungere abbattimenti delle concentrazioni di contaminante superiori al 95%.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		L'effetto "rebound" è limitato grazie all'eliminazione delle fasi LNAPL/aria/acqua (ovvero le potenziali fonti di rilascio della contaminazione)
		Necessita il controllo completo della direzione di deflusso della falda per evitare il rischio di diffusione dell'inquinamento.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile agli inquinanti volatili e in particolare agli idrocarburi petroliferi. Adatta al recupero di LNAPL.
		Incapacità di trattare inquinanti non volatili e DNAPL. Inadatta per spessori di prodotto surnatante < 1 cm.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Applicabile in più contesti ambientali (zona insatura, frangia capillare e zona satura). Adatta a terreni omogenei o poco eterogenei a granulometria medio-fine e permeabilità medio-bassa (comunque non inferiore a 10^{-7} m/s).
		Non idonea in terreni eterogenei a tessitura grossolana, permeabilità alta e con elevato tasso di materia organica ed elevato grado di umidità. Inadatto a trattare la falda ubicata a >7-10 m da p.c. L'efficacia è fortemente ostacolata da oscillazioni frequenti della tavola d'acqua.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Il raggio di influenza non elevato dei singoli punti di iniezione può richiedere la realizzazione di un significativo numero di pozzi di iniezione per operare un intervento adeguato. Permette di trattare anche il sottosuolo al di sotto di edifici esistenti.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
TEMPISTICA DI BONIFICA		Relativamente veloce in condizioni ottimali.
COSTI DI INTERVENTO		I costi relativi al trattamento dei vapori/acque estratti possono diventare considerevoli. Possono essere necessari numerosi punti di estrazione, aumentando di conseguenza i costi.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE	-	Tale tecnologia permette di sostituire l'utilizzo associato delle tecniche convenzionali di emungimento/trattamento/recupero prodotto/venting in condizioni di permeabilità medio-basse e terreni con grado minore di omogeneità.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Necessità di disporre di impianti di trattamento di vapori/acqua estratti.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-19 Vantaggi e svantaggi MPE

Tecnologie correlate

La tecnologia di bonifica MPE (in configurazione DPE, TPE e Bioslurping) rappresenta solo una delle possibili varianti della flessibile tecnologia di estrazione multifase.

Le **principali varianti** sono infatti costituite da:

- **Pump-skimming:** in presenza di prodotto surnatante, le acque sotterranee vengono emunte, generando un cono per trascinamento. I prodotti in fase separata si accumulano per gravità al centro di questo cono facilitando così il loro recupero in superficie;
- **Contenimento idraulico:** è costituito da batterie di pozzi di prelievo ubicate generalmente perpendicolari alla direzione di flusso della falda, intercettando il plume e impedendo la sua circolazione *ex-situ*;
- **Trincee drenanti:** vengono posizionate perpendicolarmente alla direzione del flusso delle acque sotterranee e per l'intera lunghezza della sorgente di contaminazione; vengono utilizzate in condizioni di soggiacenza limitata. Sono generalmente costituite da un fossato o un insieme di tubi di drenaggio e da pompe di estrazione o skimmer (nel caso sia presente prodotto surnatante).

6.9 Ossidazione chimica

Definizione e criteri generali

I trattamenti di **ossidazione chimica in situ** consistono nell'iniezione nella matrice contaminata di una miscela costituita da un opportuno agente ossidante, che consente la completa trasformazione della sostanza organica inquinante in anidride carbonica e acqua o la sua trasformazione parziale in sostanze a struttura molecolare più semplice e più facilmente degradabile.

L'applicazione più comune è la bonifica delle acque di falda con immissione diretta dei reagenti nell'acquifero; i reagenti, però, possono anche essere introdotti nella zona insatura.

I composti ossidanti più utilizzati sono il perossido di idrogeno, l'ozono, il permanganato di potassio e sodio, a cui si aggiungono altri ossidanti (persolfato di sodio, acido peracetico, ipocloriti).

Frequentemente questo tipo di tecnologia viene utilizzata quando i trattamenti biologici non funzionano correttamente a causa della concentrazione elevata oppure delle mutevoli proprietà dei contaminanti nella zona sorgente.

Di seguito, in **Figura 6-13**, è visibile lo schema della tecnologia appena illustrata.

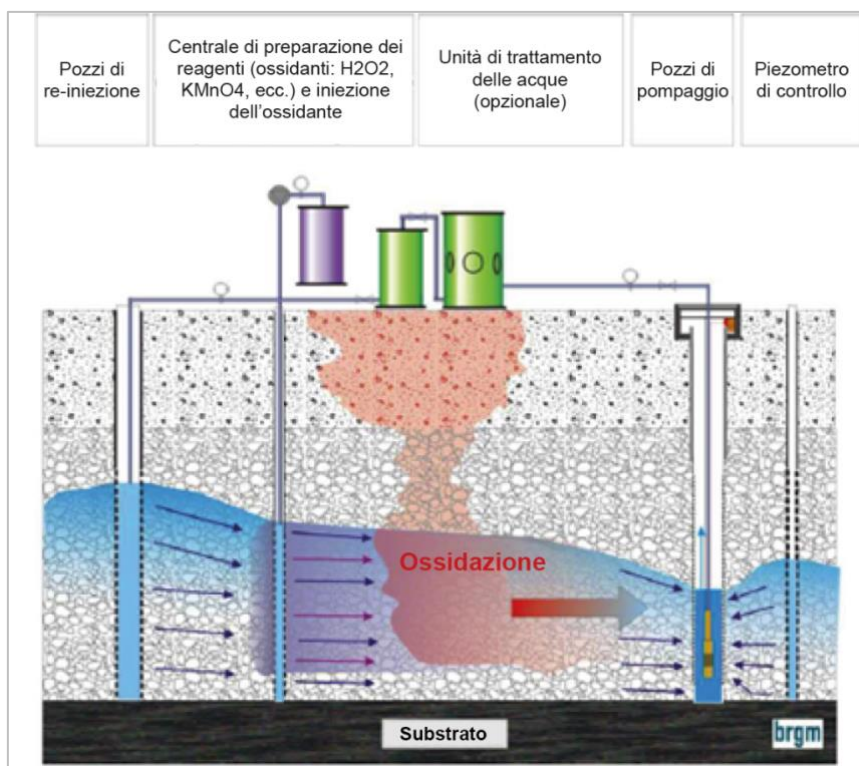


Figura 6-13 Schema Ossidazione chimica (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-benefices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR – modificata)

Condizioni e limiti di applicabilità

L'ossidazione chimica è particolarmente adatta, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Contaminazione anche in elevate concentrazioni o con presenza di fase separata (LNAPL)
- Contaminanti ossidabili
- Contaminazione nella zona satura (anche diffusa)

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Litologia omogenea
- Terreni discretamente permeabili
- Concentrazione di massa organica limitata

Di contro, **l'ossidazione chimica risulta non idonea, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di contaminanti non ossidabili;
- Contaminazione diffusa nella zona insatura

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Litologia molto variabile
- Terreno a granulometria fine
- Permeabilità inferiore a $10E-7$ m/s
- Presenza di materiale organico superiore al 20%

La **Tabella** 6-20 seguente mostra il grado di efficacia dell'ossidazione chimica in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	VOC, SVOC, HC, BTEX, IPA, PCB, composti clorurati		composti inorganici
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
MATRICE CONTAMINATA	Frangia capillare, suolo saturo, falda		Suolo insaturo
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei a granulometria elevata (sabbie e ghiaie), limi omogenei		Limi e argille, terreni altamente organici
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	>10E-6 m/s		<10E-7 m/s
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo		Elevato

Tabella 6-20 Efficacia dell'Ossidazione chimica

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

I metodi di applicazione dei reagenti possono perciò essere i seguenti:

- Iniezione nei alcuni dei pozzi di monitoraggio già presenti in sito;
- Iniezione diretta nel suolo usando un sistema Geoprobe e la tecnologia direct-push;
- Iniezione tramite la realizzazione di pozzi di iniezione dedicati, caratterizzati di solito da un diametro minore dei pozzi di monitoraggio. Tali pozzi non vengono mai usati per il campionamento delle acque.

Come riportato nelle sezioni precedenti gli ossidanti sono principalmente usati per contaminazioni in falda.

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di ossidazione chimica nella zona satura è costituita da:

- uno o più pozzi di iniezione (già presenti o di nuova installazione);
- uno o più pozzi di controllo;
- una pompa ad alta pressione;
- le relative reti di *interconnetting*;

In caso i composti utilizzati producano dei prodotti intermedi sotto forma di gas (come ad es. per l'iniezione di perossido di idrogeno) potrebbe essere necessario prevedere dei pozzi dotati di aspirazione dei gas che confluiscono ad un impianto di trattamento aria.

Nel caso si utilizzi l'ozono è inoltre possibile sfruttare i pozzi di air sparging se già presenti.

È inoltre possibile, come visibile nell'immagine sottostante, prevedere una reimmissione a monte idraulico dell'acqua trattata in modo da poter eseguire più "cicli" di trattamento.

Il successo di un intervento di ossidazione chimica dipende principalmente dall'effettiva interazione tra il reagente introdotto e il contaminante e dall'efficace introduzione dei prodotti ossidanti in tutta la zona da trattare. Entrambi questi fattori sono molto influenzati dalle condizioni sito-specifiche della zona di intervento.

Per un corretto dimensionamento risulta perciò di fondamentale importanza eseguire dei test pilota in campo per poter stimare, tra gli altri parametri:

- il Raggio di influenza dei pozzi di immissione;
- la stabilità dell'ossidante;
- i possibili sottoprodotti da includere nel monitoraggio;
- il quantitativo minimo di reagenti da introdurre.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Semplicità di installazione e disturbo logistico minimo.
		Abbattimenti rapidi ma la riuscita dell'intervento dipende molto da un'approfondita progettazione.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile a molte categorie di inquinanti, anche ad elevate concentrazioni.
		Incapacità di trattare inquinanti non ossidabili.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni omogenei a granulometria medio-grossolana e permeabilità medio alta.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		È principalmente applicabile alla zona satura. Non idonea in terreni eterogenei a tessitura fine, con elevato tasso di materia organica e permeabilità bassa.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Trattabili vaste aree senza interrompere le normali attività svolte sul sito. Permette di trattare anche il terreno al di sotto di edifici esistenti, laddove l'acquifero si trovi ad una profondità maggiore dei sottoservizi.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Piuttosto veloce in condizioni ottimali.
COSTI DI INTERVENTO		Il costo in caso di concentrazioni elevate può diventare considerevole. Per alcuni reagenti necessità di accoppiare l'intervento con sistemi di estrazione vapori.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Non cumulabile con interventi di Bioremediation (di solito eseguiti a posteriori).
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Elimina i rischi e i costi relativi al trasporto di notevoli quantità di suolo contaminato. Alterazione del chimismo della falda con rischio di generazione di sottoprodotti. Distruzione, parziale o totale, dei microorganismi naturalmente presenti.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-21 Vantaggi e svantaggi dell'Ossidazione chimica

Tecnologie correlate

Il trattamento con ossidanti spesso è seguito da una **Bioremediation** in quanto difficilmente è in grado di riportare le concentrazioni al di sotto delle CSC di riferimento. Tipicamente, l'ossidazione chimica trova applicazione nella riduzione delle concentrazioni in fase disciolta dopo la rimozione di una fase libera e prima di un trattamento di biorisanamento.

6.10 Soil Flushing (SF)

Definizione e criteri generali

La tecnologia di **SF** consiste nel trattamento in situ dei composti organici e inorganici presenti sia nella zona insatura sia nella zona satura in terreni omogenei e con permeabilità medio-alta (da sabbioso-limoso a ghiaiosi), mediante la rimozione degli stessi grazie ad un flussaggio implementato chimicamente.

Il principio di funzionamento, illustrato in **Figura 6-14**, è basato sul lavaggio del terreno mediante iniezione o infiltrazione di acqua (spesso additivata con sostanze deputate a favorire la rimozione dei contaminanti, come ad esempio surfattanti, chelanti, solventi) in una serie di pozzi/trincee ubicati a monte dell'area contaminata. Tale lavaggio produce due diversi meccanismi:

- passaggio in soluzione o sospensione dei contaminanti;
- trascinalimento della frazione fine (<2 mm) dove spesso è adesa la contaminazione.

Oltre a favorire la solubilizzazione, il sistema incide anche sulla velocità delle reazioni chimico-fisiche, quali desorbimento-adsorbimento, biodegradazione, complessazione e precipitazione.

A seguito dell'azione di lisciviazione, il fluido acquoso viene rimosso, a valle dell'area trattata, in corrispondenza di pozzi di presa, trincee o dreni, e quindi sottoposto a trattamento prima dell'eventuale re-immissione in situ o dello scarico in fognatura/corsi idrici superficiali. Talvolta, oltre che con sistemi quali il *Pump&Treat*, può essere utilizzato in associazione a sistemi di barrieramento fisico (diaframmi plastici, jet grouting, ecc.).

I **principali additivi** utilizzati sono:

- tensioattivi, come i detergenti, gli emulsionanti e le schiume: utilizzati in particolare per la rimozione dei contaminanti idrofobi (prodotti petroliferi, solventi aromatici, clorurati, PCBs, pesticidi clorurati e composti organici semi-volatili);
- soluzioni acide: utilizzati per la rimozione di molecole metalliche e alcuni composti organici (es. eteri);
- soluzioni basiche: utilizzate per la rimozione di inquinanti organici (ad es. NAPL e fenoli) e di alcuni metalli pesanti (es. stagno, zinco, piombo)
- agenti complessanti: utilizzati per la rimozione di metalli pesanti;
- cosolventi: per la rimozione di composti organici poco solubili.

Una volta rimossi i contaminanti che contengono, gli agenti impiegati per asportarli possono venire riciclati (Sims R.C et al., 1984).

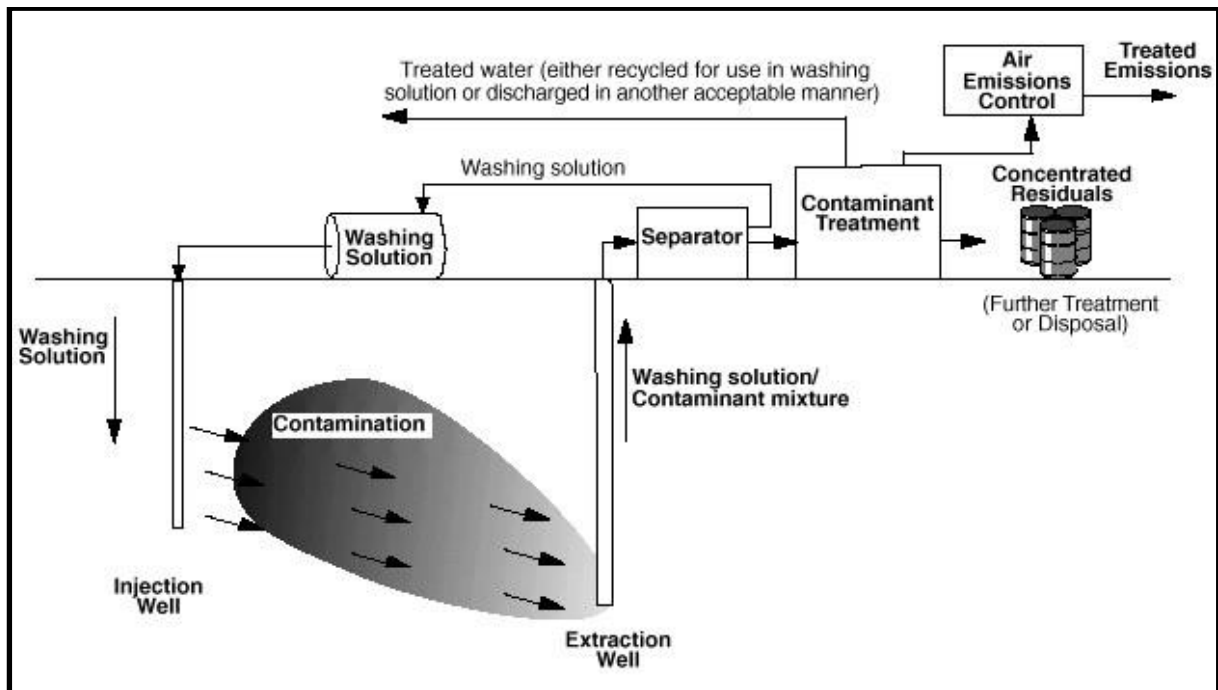


Figura 6-14 Schema del Soil Flushing (fonte: EPA,1996)

Condizioni e limiti di applicabilità

Il SF è **particolarmente adatto**, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di composti inorganici (metalli, cianuri, corrosivi, isotopi radioattivi) e organici (volatili e semi-volatili, PCBS, pesticidi non alogenati, diossine e furani, cianuri, corrosivi);
- Eventuale presenza di NAPL;
- Contaminazione localizzata, limitata arealmente e a profondità ridotta da p.c.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni omogenei a permeabilità medio-alta (da sabbioso-limosi a ghiaiosi);
- Terreni con tenori non elevati di materia organica;
- Capacità di scambio cationico e frazione argillosa limitati.

Di contro, **il SF risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di contaminanti poco solubili in acqua e molto adsorbibili;
- Contaminazione estesa e diffusa, nonché ubicata a grande profondità.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni eterogenei a permeabilità medio-bassa;
- Terreni con tenori elevati di materia organica e carbonati;
- Capacità di scambio cationico e frazione argillosa rilevanti;
- Presenza di ostruzioni antropiche interrate.

La **Tabella 6-22**, mostra il grado di efficacia dei sistemi di SF in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra (fonte: Roote, 1997 – modificata).

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Contaminanti inorganici e organici molto solubili in acqua, poco adsorbibili, con modesti valori di pressione di vapore, densità elevata ma viscosità ridotta	Contaminanti inorganici e organici mediamente solubili in acqua, mediamente adsorbibili, con valori moderati di pressione di vapore/densità/viscosità	Contaminanti inorganici e organici poco solubili in acqua, molto adsorbibili, con elevati valori di pressione di vapore, densità bassa
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante in fase disciolta	NAPL	Contaminante in fase gassosa
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Di piccole dimensioni e localizzato	Di medie dimensioni	Esteso e diffuso
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In zona insatura/frangia capillare/zona satura a profondità limitate	In zona insatura/frangia capillare/zona satura a profondità intermedie	In zona insatura/frangia capillare/zona satura a elevate profondità Presenza di strutture antropiche interrate
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei a granulometria medio-grossolana (da sabbioso-limosi a ghiaiosi), con basso contenuto di materia organica	Terreni debolmente eterogenei, a granulometria media, con contenuto moderato di materia organica	Terreni eterogenei a tessitura fine con contenuto di materia organica e carbonati elevato. Capacità di scambio cationico e frazione argillosa rilevanti

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	>10E-5 m/s	10E-7÷10E-5 m/s	<10E-7 m/s
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-22 Efficacia del Soil Flushing

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di SF è costituita da:

- serbatoio di stoccaggio degli additivi e sistema di miscelazione dell'acqua;
- un sistema di iniezione della soluzione, costituito da pozzi verticali o trincee orizzontali, gallerie di infiltrazione e bacini disperdenti;
- un sistema di recupero del fluido di lavaggio contaminata, costituito da pozzi, trincee e dreni;
- un sistema di trattamento delle acque contaminate prima della reimmissione in falda o dello scarico in fognatura/corpo idrico superficiale o riuso nel ciclo di lavaggio;
- un eventuale sistema di recupero degli additivi;
- una rete di piezometri di monitoraggio;
- reti di *interconnecting*;
- piping e strumentazioni correlate;
- quadro elettrico di controllo.

Le **principali configurazioni adottabili**, per mezzo delle quali può essere eseguito il lavaggio del terreno, sono le seguenti:

- se la zona da trattare è unicamente l'insaturo, si può prevedere l'aspersione del solvente direttamente nel terreno (*spray irrigation*) o mediante trincee;
- se la zona da trattare prevede anche il mezzo saturo, si possono adottare pozzi di iniezione e pozzi di estrazione per il recupero delle soluzioni contaminate.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		In condizioni ottimali l'efficacia dell'intervento è generalmente non superiore all'80%. Tecnica ancora in fase sperimentale.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Tecnica applicabile ad una grande numero di composti, sia organici sia inorganici, compresi i metalli pesanti, i PCB e i contaminanti radioattivi, sia in zona insatura che satura. Applicabile anche in presenza di NAPL
		Non adatta per contaminanti poco solubili in acqua e molto adsorbibili
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Tecnica efficace in terreni omogenei a tessitura medio-grossolana e permeabilità medio-alta
		Non adatta in terreni eterogenei a tessitura medio fine e permeabilità medio-basse, con contenuto elevato di materia organica e carbonati elevato, nonché capacità di scambio cationico e frazione argillosa rilevanti. Non attuabile con profondità elevata della contaminazione e con inquinamento diffuso arealmente.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		L'area deve essere adeguatamente confinata. La presenza di strutture antropiche interrato può interferire con l'azione di lavaggio.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Tempi lunghi di intervento a causa della ripetizione di più cicli di lavaggio e di monitoraggio continuo.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
COSTI DI INTERVENTO		Costi generalmente elevati.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Si rendono necessarie ulteriori tecnologie al fine di recuperare, rimuovere e trattare la soluzione emunta (es. fissazione geochimica, P&T).
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		L'utilizzo di solventi, come ad esempio i tensioattivi, può alterare le caratteristiche chimico-fisiche del terreno. Possibilità di riduzione della porosità efficace del terreno a causa della biocrescita. Produzione di scarti e necessità di impianti per il trattamento/riciclo delle soluzioni emunte, anche di notevoli volumi.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-23 Vantaggi e svantaggi del Soil Flushing

Tecnologie correlate

Esistono sul mercato analoghe tecnologie di bonifica che risultano attualmente più efficaci, affidabili e consentono di operare un controllo maggiore del processo.

È il caso del **Soil Washing (SW)**, tecnologia di risanamento ex-situ (on-site e off-site).

Esso consiste nella rimozione del contaminante dal terreno - precedentemente estratto dall'area contaminata e sottoposto preventivamente a vagliatura al fine di suddividere le frazioni grossolane da quelle fini, le quali verranno sottoposte al trattamento - mediante lavaggio con solventi. Tale tecnologia è illustrata in **Figura 6-15**.

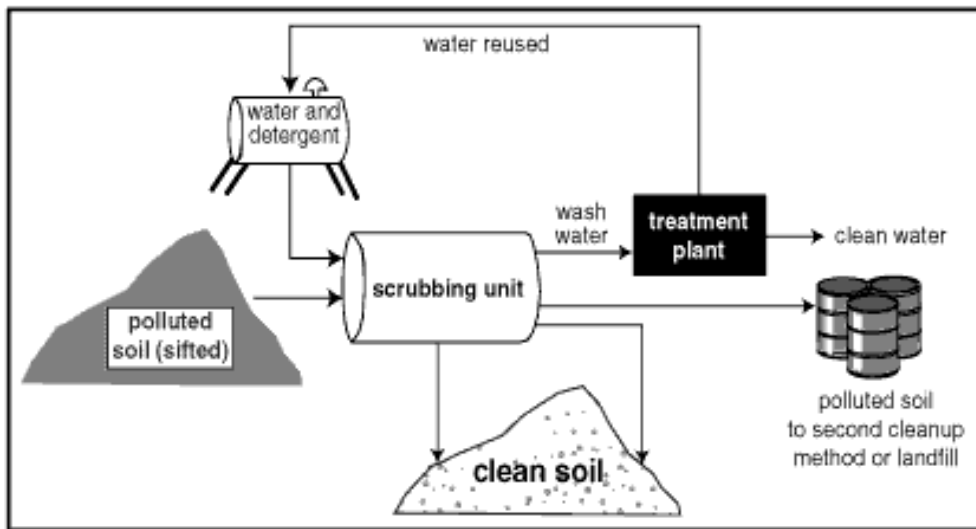


Figura 6-15 Schema del Soil Washing (fonte: EPA)

Il SW viene applicato principalmente su terreni eterogenei al fine di concentrare le frazioni più fini, generalmente le più inquinate. Agisce con efficacia sugli idrocarburi petroliferi, VOCS, SVOCS, alogenati, ma anche su composti recalcitranti quali IPA, PCB, diossine e furani, pesticidi e metalli / metalloidi.

Di seguito in **Tabella** 6-24, si riportano una sintesi dei vantaggi/svantaggi del sistema di SW rispetto al sistema di SF:

PARAMETRO	VANTAGGIO/SVANTAGGIO DEL SW RISPETTO AL SF	
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE	😊	In condizioni ottimali l'efficacia dell'intervento è generalmente intorno al 95%. Tecnica ampiamente collaudata.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SITO (SOTTOSUOLO E LOGISTICA)	😊	L'applicabilità del SW è indipendente dalle caratteristiche del sito anche se risulta poco efficiente in presenza di materiali a granulometria fine. Risulta efficace in terreni sia omogenei sia eterogenei, di qualsiasi tessitura (anche se con risultati migliori con tessiture grossolane). Può inoltre essere utilizzato qualsiasi tipo di prodotto in soluzione in quanto non si rischia di peggiorare le caratteristiche naturali del terreno sottostante.
TEMPISTICA DI BONIFICA	😊	L'intervento può essere più rapido rispetto al SF (anche pochi mesi).
COSTI DI INTERVENTO	😊	Risulta economicamente più vantaggioso rispetto al SF; inoltre le frazioni grossolane non contaminate possono

PARAMETRO	VANTAGGIO/SVANTAGGIO DEL SW RISPETTO AL SF	
		essere riutilizzate in sito, permettendo di ridurre i costi per il materiale di riempimento.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Si tratta pur sempre di una tecnologia ex-situ che genera notevoli quantità di residui da trattare e smaltire, nonché l'utilizzo di rilevanti quantità d'acqua. Le emissioni atmosferiche e l'inquinamento acustico possono risultare importanti.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-24 Vantaggi e svantaggi del Soil Washing

6.11 Soil Vapour Extraction (SVE)

Definizione e criteri generali

Lo **SVE** è una tecnica di bonifica adatta per il trattamento dei composti organici volatili e semi-volatili nei terreni omogenei e a tessitura medio-grossolana con permeabilità medio-alta, in corrispondenza della zona insatura (difficilmente applicabile qualora la falda si riscontrasse a profondità inferiori di 2 m dal piano campagna).

Il principio di funzionamento, illustrato in **Figura 6-16**, è basato sulla generazione di un flusso di aria nel sottosuolo, grazie all'applicazione di un gradiente di pressione attraverso trincee orizzontali o pozzi verticali e orizzontali, a cui fa seguito l'estrazione dell'insaturo.

I composti volatili rilasciati dal terreno evaporano fino alla saturazione dei pori; la ventilazione induce la circolazione dell'aria e provoca un rinnovo dell'aria inquinata nei pori. Questo fenomeno ha l'effetto di modificare gli equilibri chimici tra le diverse fasi presenti (aria, acqua, suolo); quindi, durante il suo passaggio attraverso l'area contaminata, l'aria viene "caricata" di contaminanti, i vapori vengono recuperati mediante i punti di estrazione e, infine, trattati in superficie.

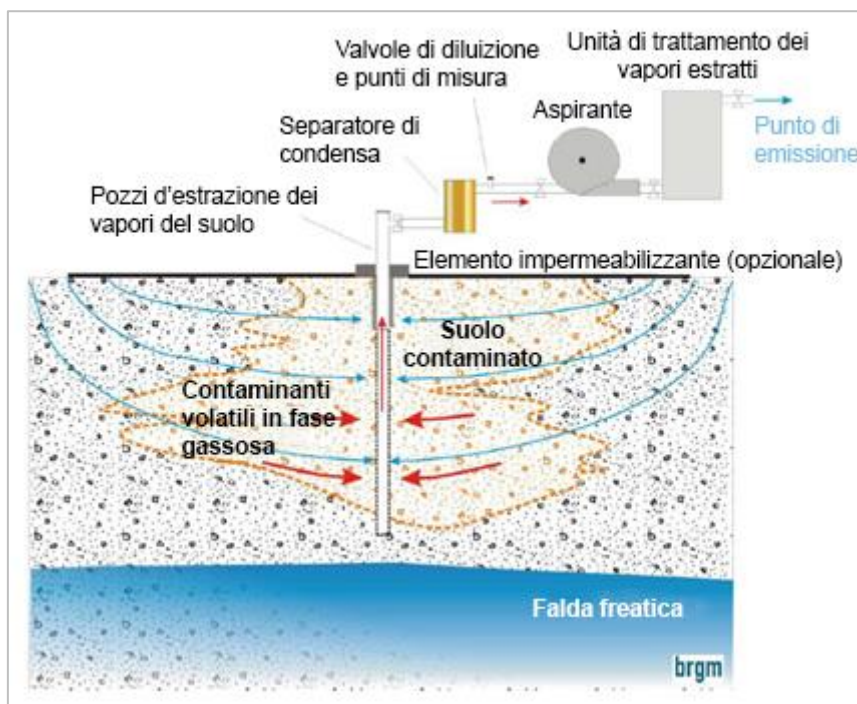


Figura 6-16 Schema di SVE (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificata)

La tecnologia SVE si basa dunque sull'estrazione ed il recupero dell'aria interstiziale del sottosuolo attraverso l'applicazione di una depressione nella zona insatura del terreno.

La depressione indotta favorisce, oltre che la rimozione della frazione più volatile degli idrocarburi, anche il richiamo di aria dall'esterno con conseguente ossigenazione dello strato di terreno insaturo. Il processo di decontaminazione della matrice solida del terreno sfrutta quindi due proprietà tipiche dei composti idrocarburici: la volatilità e la biodegradabilità.

La tecnologia di SVE è spesso utilizzata in combinazione con altre tecnologie di bonifica, tra cui l'Air Sparging, finalizzato al trattamento dei composti organici volatili e semi-volatili in zona satura. I vapori prodotti (ricchi in concentrazione di inquinanti), una volta abbandonata la superficie libera della falda, migrano infatti nel mezzo insaturo sovrastante, dove vengono richiamati da appositi dispositivi di aspirazione, convogliati attraverso filtri a carboni attivi ed infine liberati in atmosfera dopo il trattamento, nel rispetto dei limiti previsti dalla normativa vigente.

Condizioni e limiti di applicabilità

Lo SVE è particolarmente adatto, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di composti organici prettamente volatili e, in misura minore, semivolatili;
- Contaminazione di origine recente, o comunque non eccessivamente datata.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni omogenei con granulometria da sabbioso-limosa a ghiaiosa, caratterizzati da una permeabilità medio-alta;
- Profondità della zona satura sottostante > 2-3 m;
- Terreni con tenori non elevati di materia organica e con basso tasso di umidità.

Di contro, **lo SVE risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di inquinanti con basso grado di volatilità, con basso grado di permeabilità all'aria e/o ridotta biodegradabilità;
- Presenza di NAPL in lenti caratterizzate da bassa permeabilità;
- Contaminazione datata.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Terreni eterogenei a bassa permeabilità (limi e argille);
- Livello di falda < 2-3 m;
- Presenza di tenori elevati di materia organica e di umidità del suolo.

La **Tabella 6-25** seguente mostra il grado di efficacia dei sistemi di SVE in rapporto al tipo di sostanza organica inquinante (fonte: USACE, 2002 - modificata).

CONTAMINANTE	EFFICACIA DIMOSTRATA	EFFICACIA POTENZIALE	EFFICACIA NON ATTESA
ORGANICI	VOC alogenati VOC non alogenati SVOC non alogenati	SVOC alogenati	Cianuri organici Corrosivi organici Diossine Esplosivi PCB Diossine
INORGANICI	-	-	Metalli volatili Metalli non volatili Asbesto Cianuri inorganici Materiali radioattivi Corrosivi inorganici
REATTIVI	-	Ossidanti Riducenti	-
VOCs = composti organici volatili SVOCs = composti organici semi-volatili			

Tabella 6-25 Efficacia della tecnologia SVE

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di SVE è costituita da:

- uno o più pozzi di estrazione dell'aria, verticali o orizzontali, o trincee;
- una soffiante o pompa a vuoto;
- le relative reti di *interconnetting*;
- un separatore di condensa
- un'unità di trattamento dei vapori estratti;
- un'unità di trattamento o stoccaggio dell'acqua derivante dal separatore di condensa;
- piping e strumentazioni correlate.

L'efficienza del trattamento aumenta inserendo nello schema operativo di base anche dei pozzi di insufflazione di aria, che facilitano l'induzione di un flusso di aria.

I principali parametri da considerare nello sviluppo di un sistema di SVE sono riportati nella seguente **Tabella 6-26**. Relativamente alle caratteristiche dei pozzi di estrazione/trincee, gli standard di riferimento sono stati principalmente redatti da ASTM, AWWA e U.S. EPA.

PARAMETRO	INTERVALLO DI VALORI MAGGIORMENTE UTILIZZATO
Diametro del pozzo di estrazione verticale (")	4-6
Diametro del piezometro di monitoraggio (")	$\frac{3}{4}$ -2
Diametro dei tubi nel caso di trincee orizzontali (mm)	101-203
Larghezza totale della trincea (mm)	Diametro del tubo+600 mm
Lunghezza della fenestrazione (m)	Funzione della profondità della contaminazione. Da ubicare comunque a debita distanza dalla superficie freatica
Zona di influenza della ventilazione (m)	5-20/30
Portata di estrazione (m ³ /h)	17-170
Depressione testa pozzo (atm)	0,4-0,9

Tabella 6-26 Parametri della tecnologia SVE

Le **principali configurazioni adottabili** sono le seguenti:

- pozzi a grappolo distribuiti all'interno dell'area sorgente (*nested wells*, caso tipico di accoppiamento con la tecnologia di AS);
- trincee orizzontali (soprattutto nei casi di contaminazione e falda molto superficiali).

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e collaudata. Semplicità di installazione e disturbo logistico minimo.
		Difficilmente si raggiungono abbattimenti delle concentrazioni di contaminante superiori al 90%.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA		Applicabile a molti inquinanti volatili e semivolatili.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Incapacità di trattare inquinanti semivolatili con ridotta biodegradabilità aerobica e contaminanti non volatili.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni omogenei a granulometria medio-grossolana e permeabilità medio alta. È applicabile per trattare la contaminazione ubicata a grande profondità (decine di metri).
		È applicabile unicamente nella zona insatura. Non idonea in terreni eterogenei a tessitura fine, con elevato tasso di materia organica ed umidità e permeabilità bassa. Inadatto con presenza di falda ad una profondità < 2-3 m da p.c.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Trattabili vaste aree senza interrompere le normali attività svolte sul sito. Permette di trattare anche il terreno al di sotto di edifici esistenti.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Piuttosto veloce in condizioni ottimali (da 6 mesi a 2 anni).
COSTI DI INTERVENTO		Basso rapporto costi-benefici, tuttavia i costi relativi al trattamento dei vapori estratti può diventare considerevole
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Compatibilità con altri metodi di risanamento (es. BV, AS/BS).
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Elimina i rischi e i costi relativi al trasporto di notevoli quantità di suolo contaminato. Necessità di disporre di un impianto di trattamento dei vapori estratti.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-27 Vantaggi e svantaggi della tecnologia SVE

Tecnologie correlate

L'estrazione di aria dalla zona insatura mediante sistema di SVE rappresenta solo una delle possibili varianti della flessibile tecnologia di *venting*.

Le **principali varianti** sono infatti costituite da:

- **Bioventing:** l'iniezione di aria (o altri gas) durante la ventilazione, associato all'aggiunta di nutrienti, innesca una biodegradazione di inquinanti, che aumenta le prestazioni di depurazione della zona insatura riducendo al contempo le quantità di inquinanti gassosi da trattare;
- **Ventilazione passiva:** il trasferimento dei vapori viene effettuato mediante differenze di pressione (specialmente durante l'innalzamento della superficie di falda) (Card G., 1996), senza l'utilizzo di iniezione d'aria o sviluppo di depressioni;
- **Dual Phase Extraction, Slurping o Multi Phase Extraction:** consiste nell'applicare una depressione significativa nella zona insatura appena sopra alla superficie di falda, finalizzata all'estrazione dei vapori dal sottosuolo, il surnatante (nel caso di prodotto in galleggiamento) e la fase disciolta. Per i dettagli si rimanda al Paragrafo 6.8;
- **Fratturazione pneumatica + SVE:** qualora il terreno da trattare presentasse una permeabilità all'aria non sufficiente per l'estrazione, può essere preventivamente utilizzata la fratturazione pneumatica per aumentare il flusso d'aria e quindi accelerare l'estrazione dei vapori;
- **In situ Soil Heating + SVE:** il vapore o l'aria calda sono iniettati attraverso i pozzetti di iniezione, aumentando così la volatilizzazione e estrazione di contaminanti, inclusi quelli semi-volatili.

Di seguito, dato il suo diffuso utilizzo, si riportano alcune considerazioni di dettaglio relativamente alla tecnologia di **Bioventing (BV)**.

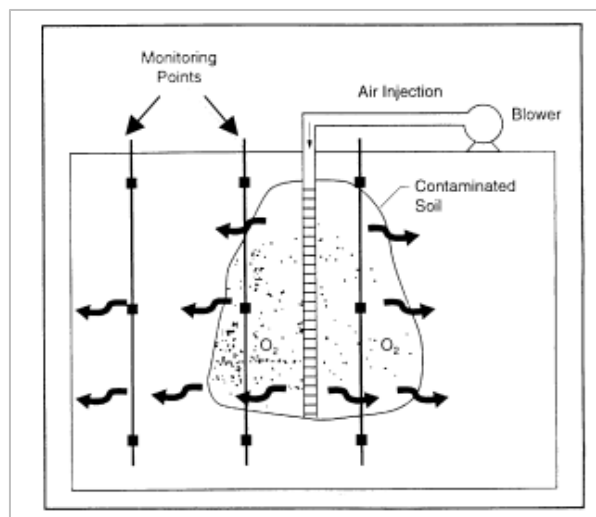


Figura 6-17 Schema di funzionamento del BV
(fonte: AFCEE, 1994 / USACE 2002)

Come osservabile dalla **Figura 6-17**, il meccanismo prevede l'iniezione di gas (principalmente ossigeno) nella zona insatura e a basse portate ($2\div 14$ m³/h), al fine di nutrire i microrganismi

autoctoni, ma anche per abbassare il livello idrostatico della falda. Insieme all'ossigeno possono eventualmente essere immessi nutrienti e/o inoculati co-substrati.

Così come per la tecnologia di SVE, risulta NON applicabile in terreni a bassa permeabilità e con alto contenuto di argilla.

Proprio per le sue caratteristiche, la sua efficacia è intrinsecamente legata a due fattori (Provincia di Milano, 2004):

- biodegradabilità dei contaminanti;
- permeabilità all'aria dei terreni da trattare.

La **Tabella 6-28** seguente mostra, invece, il grado di efficacia del sistema di BV in rapporto al tipo di sostanza organica inquinante.

MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE/POCO EFFICACE
Composti petroliferi e idrocarburi (benzina, oli combustibili, oli lubrificanti, gasolio, BTEX) Composti organici alogenati (cloruro di vinile, tricloroetilene)	Composti aromatici a doppio anello (es. naftalene)

Tabella 6-28 Efficacia del BV

Nonostante i benefici prodotti dall'utilizzo congiunto di SVE e BV siano notevolmente superiori rispetto al loro utilizzo singolo (in quanto solitamente viene dapprima applicata la tecnologia di SVE per eliminare la frazione volatile e, in un secondo momento, quella di BV al fine di degradare i composti meno volatili), esistono alcuni vantaggi del BV rispetto allo SVE visibili nella seguente **Tabella 6-29**:

PARAMETRO	VANTAGGIO RISPETTO ALLO SVE	
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Il BV è applicabile sulle sostanze poco volatili (ad es. i costituenti dei carburanti, sia benzine sia diesel).
COSTI DI INTERVENTO		Il BV permette di avere costi più competitivi in quanto può non necessitare del trattamento dei vapori estratti.
CARATTERISTICHE IMPIANTISTICHE		Il BV impiega flussi d'aria significativamente più ridotti.

Tabella 6-29 Vantaggi del BV

6.12 Solidificazione / Stabilizzazione dei terreni

Definizione e criteri generali

La solidificazione/stabilizzazione dei terreni nasce dall'interazione di tecnologie deputate al consolidamento geotecnico dei terreni e all'inertizzazione dei terreni normalmente impiegata nel campo ambientale per terreni contaminati e rifiuti. È normalmente conosciuta anche come “**deep soil mixing**”. Gli obiettivi del trattamento sono i seguenti:

- ridurre la superficie del materiale esposta al contatto con acque meteoriche o di percolazione;
- ridurre la permeabilità del materiale così da limitare le infiltrazioni;
- ridurre la solubilità dei contaminanti a seguito della formazione di precipitati;
- promuovere la formazione di legami chimici tra i contaminanti presenti nel materiale da trattare ed i reagenti impiegati nel trattamento.

Generalmente il processo avviene in **due fasi**:

1. **stabilizzazione**: trasformazione dei composti tossici, mediante reazioni chimiche, in composti molto poco solubili e quindi più stabili dal punto di vista chimico. La stabilizzazione non necessariamente conferisce un miglioramento delle proprietà fisiche e meccaniche del materiale trattato, il quale generalmente mantiene la sua forma fisica iniziale; tuttavia, la tossicità o la mobilità dei contaminanti risultano ridotte grazie ai fenomeni di immobilizzazione di tipo chimico.
2. **solidificazione**: intrappolamento dei composti tossici in un ammasso solido: ha quindi l'obiettivo di conferire al materiale contaminato caratteristiche di stabilità dal punto di vista fisico e dimensionale. Questo processo non necessariamente prevede reazioni chimiche tra il materiale e l'agente stabilizzante.

Il trattamento viene eseguito intrappolando fisicamente all'interno di una matrice solida o intrappolando chimicamente i contaminanti riducendone la solubilità, la mobilità e la tossicità. I meccanismi attraverso i quali avviene il processo di “immobilizzazione” possono essere diversi: adsorbimento o complessazione, precipitazione, scambio ionico, formazione di soluzione solida e incorporazione nel reticolo cristallino. È applicabile principalmente per i contaminanti inorganici e per i rifiuti anche in presenza di materiali medio-fini.

Il metodo viene applicato sul materiale in posto con specifiche macchine operatrici abitualmente impiegate per il consolidamento geotecnico dei terreni. Vengono eseguite perforazioni con utensili ad elica fino a raggiungere la profondità del materiale da trattare. Successivamente, durante la risalita degli utensili di perforazione, viene effettuata l'iniezione della miscela inertizzante (cemento, silicati, termoplastiche o polimeri), rimescolando la miscela con il terreno da trattare. Anziché con un attrezzo ad elica, può essere impiegato un

utensile per l'iniezione forzata (ad alta pressione, del tipo "jet grouting") della miscela inertizzante, che permette una miscelazione più penetrante con il terreno contaminato grazie all'effetto di disaggregazione favorito dalle alte pressioni. Al fine di avere certezza di trattare effettivamente tutto il volume di terreno contaminato, le perforazioni vengono eseguite con sovrapposizione dell'una con l'altra, con distanze variabili in funzione della potenzialità della macchina operatrice e del raggio di influenza sito specifico.

Per il fatto che tale tecnologia non rimuove o degrada i contaminanti, ma sostanzialmente li immobilizza, viene spesso considerata una tecnologia di messa in sicurezza permanente anziché di bonifica. Come già indicato, può essere applicata anche ai rifiuti e non ai soli terreni contaminati.

Di seguito viene illustrato lo schema di funzionamento in **Figura 6-18**.

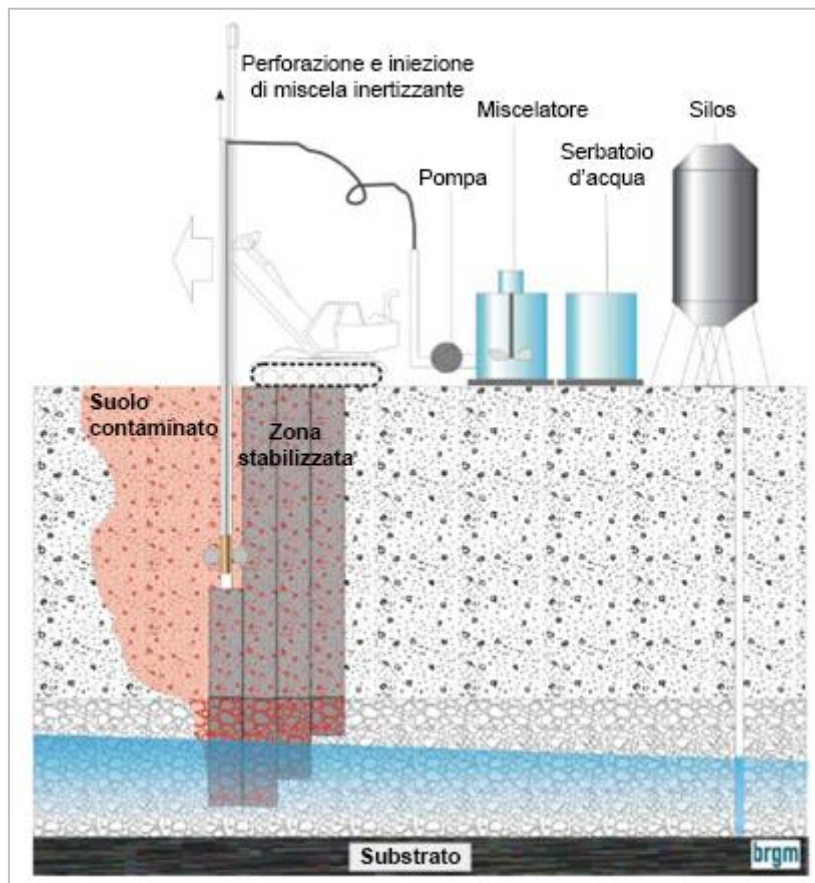


Figura 6-18 Schema di solidificazione e stabilizzazione (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificata)

Condizioni e limiti di applicabilità

La **stabilizzazione/solidificazione è adatta**, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di composti inorganici;
- non è da escludere, anche se con efficacia limitata, l'applicazione anche a contaminanti organici.
- La tecnologia può essere applicata anche a rifiuti (es. fanghi) e non solo a terreni contaminati.
- Contaminazione con profondità indicativamente non superiori ai 40-45 m da p.c.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni sciolti sia granulari sia limosi-argillosi;
- È preferibile che i terreni contaminati siano collocati in ambiente insaturo;

Di contro, la **stabilizzazione/solidificazione risulta non idonea, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di soli inquinanti organici;
- Contaminazione molto profonda.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Terreni saturi; la presenza di acqua di falda può portare alla lisciviazione delle miscele iniettate e dei relativi contaminanti con potenziali rischi di contaminazione delle acque di falda.
- Contaminazione in sottosuolo con elevata presenza di trovanti o orizzonti molto coerenti (es. roccia).

La **Tabella 6-30** seguente mostra il grado di efficacia dei sistemi di solidificazione/stabilizzazione in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Composti inorganici, terreni e rifiuti	Applicabile anche ad alcuni composti organici, ma meno indicata	Composti organici volatili

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Prodotto libero, contaminante disciolto o adsorbito		Fase gassosa
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DEL PLUME	Di piccole dimensioni nella zona insatura	Di modeste dimensioni nella zona insatura	Esteso nella zona insatura e nella zona satura
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In prossimità del piano campagna da 0 a 20m di profondità	Terreni mediamente profondi fino ai 40-45m	Terreni profondi oltre i 40-45m di profondità
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni sciolti a granulometria elevata (sabbie e ghiaie) o fine (limosi-argillosi)	-	-
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	10E-4 m/s ÷ 10E-5 m/s	-	-
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato, presenza di terreni molto compatti e rocce

Tabella 6-30 Efficacia di solidificazione/stabilizzazione

Componenti impiantistiche di base e principali parametri di sviluppo

L'**attrezzatura di base** per eseguire un intervento di solidificazione/stabilizzazione è costituita da:

- Una macchina per perforazione e iniezione di miscele di leganti idraulici del tipo di quelle impiegate per consolidamento terreni in geotecnica (jet grouting);
- Silos per accumulo di acqua, additivi e leganti idraulici;
- Impianto di miscelazione dei leganti e preparazione della miscela da iniettare;
- Compressore per fornitura di aria compressa;
- Pompa ad alta pressione;
- le relative reti di *interconnetting*;

I principali parametri da considerare nell'applicazione della tecnologia di solidificazione/stabilizzazione sono riportati nella seguente **Tabella 6-31**.

PARAMETRO	INTERVALLO DI VALORI MAGGIORMENTE APPLICATO
Profondità raggiungibile nel trattamento (m da p.c.)	30-45
Diametro delle colonne del materiale trattato (m)	0,4-1,0
Percentuale di legante idraulico secco rispetto al suolo secco da trattare (%)	15-30
Pressioni di iniezione con tecnica jet grouting (MPa)	30-50
(fonte: P. Berbenni, C. Di Toro, 2003.)	

Tabella 6-31 Parametri di solidificazione/stabilizzazione

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnologia

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Sebbene la tecnologia sia applicata da tempo in campo geotecnico in modo affidabile e collaudato, l'applicazione in campo ambientale è piuttosto limitata.
		La tecnologia è diffusa prevalentemente all'estero (USA)
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Risulta difficile il controllo della corretta applicazione della tecnologia (certezza di aver trattato tutto il terreno contaminato) nonché la durabilità a lungo termine dell'efficacia del trattamento nel caso di cicli di gelo/disgelo, precipitazioni acide e altri fenomeni erosivi per il sottosuolo
		Applicabile a contaminanti inorganici.
		Non adatta a contaminanti volatili.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni sciolti sia di tipo granulare sia limosi/argillosi. È applicabile fino a profondità di 30-45 m da p.c.
		È applicabile unicamente nella zona insatura, al fine di evitare la lisciviazione sia della miscela sia dei contaminanti con aggravamento della qualità delle acque di falda.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Non applicabile in spazi limitati per ingombro della macchina perforatrice e attrezzature a supporto. Non permette di trattare il terreno al di sotto di edifici o strutture esistenti.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Legata all'estensione della contaminazione (sia in termini di superficie sia di profondità). La tempistica è sostanzialmente legata ai tempi di perforazione/iniezione. Devono essere considerate ulteriori tempistiche al termine delle iniezioni per il monitoraggio post-operam
COSTI DI INTERVENTO		Sui costi di intervento complessivi incidono in modo significativo quelli legati alla perforazione, soprattutto se viene impiegata la tecnologia del jet grouting e se devono essere raggiunte profondità significative da p.c.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Non è compatibile con altre tecnologie, in quanto, una volta applicata, porta al consolidamento e alla solidificazione del terreno costituente il sottosuolo
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Non richiede scavi e movimentazione del terreno contaminato. Elimina i costi relativi al trasporto di notevoli quantità di suolo contaminato. L'applicazione della tecnologia non richiede impianti e attrezzature impattanti



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-32 Vantaggi e svantaggi di solidificazione/stabilizzazione

Tecnologie correlate

La tecnologia di stabilizzazione/solidificazione non presenta tecnologie correlate. Si segnala la possibilità di iniettare miscele di reagenti organici, anziché inorganici (leganti idraulici). I reagenti organici di cui si conosce applicazione sono di origine termoplastica (es. bitumi, polietilene) oppure polimerica (es. urea, formaldeide) o, infine, composti microincapsulanti. In ogni caso, le applicazioni più comuni sono legate all'uso dei leganti idraulici mentre quelle dei reagenti organici hanno avuto uno sviluppo limitato.

Tecnologie di Bonifica Ex Situ – Processi Biologici

6.13 Landfarming / Biopile

Definizione e criteri generali

Il **Landfarming** e le **Biopile** sono due tecniche di risanamento biologico "ex-situ" per il trattamento dei suoli insaturi contaminati da sostanze organiche, realizzabili sia "off-site" che "on site".

Il **principio di trattamento**, comune per entrambe le due tecnologie, consiste nella stimolazione dei processi biodegradativi esercitati dai microorganismi autoctoni in grado di alimentarsi delle catene idrocarburiche e degradare i contaminati organici presenti nei terreni oggetto di bonifica.

L'efficacia di un trattamento biologico del terreno dipende da numerosi fattori, quali:

- le caratteristiche del terreno: densità della popolazione microbica, pH, contenuto idrico, temperatura, concentrazione dei nutrienti, tessitura;
- le caratteristiche dei contaminanti: volatilità, struttura chimica, concentrazione e tossicità;
- le condizioni climatiche: temperatura, piovosità, vento.

Le due tecnologie differiscono dal punto di vista dimensionale e operativo:

- nel **Landfarming** il terreno viene steso su una superficie ampia e l'aerazione avviene direttamente dall'atmosfera. La biobonifica può essere accelerata mediante la movimentazione meccanica del terreno a regolari intervalli di tempo per la sua ossigenazione;
- nella **biopile** l'aria viene fatta circolare nel terreno attraverso tubature con tecniche di estrazione / iniezione.

Si riportano di seguito maggiori approfondimenti.

Landfarming

Nel corso dell'intervento di LandFarming il terreno, steso in strati sottili (spessori 0,5 fino ad un massimo di 1-2 metri), viene frequentemente rivoltato mediante macchine discatrici per favorire l'intimo contatto tra l'inquinante, la biomassa, l'ossigeno, i nutrienti e l'umidità, ottimizzando così le condizioni che favoriscono l'attività degradativa dei batteri. La bonifica richiede, inoltre, irrigazione del terreno periodica in maniera da mantenere un'umidità circa costante.

Tipicamente, l'intervento consiste nella realizzazione di un bacino di trattamento confinato da opportuni argini ed impiantato sopra il p.c. o parzialmente interrato; in entrambi i casi la superficie di fondo viene configurata con una pendenza dell'1-2%.

Le acque di ruscellamento superficiale vengono raccolte ed allontanate tramite una canaletta di drenaggio posta al piede del letto in sabbia e posizionata lungo il perimetro del bacino.

Di seguito in **Figura 6-19** viene illustrato il funzionamento della sopra citata tecnologia.

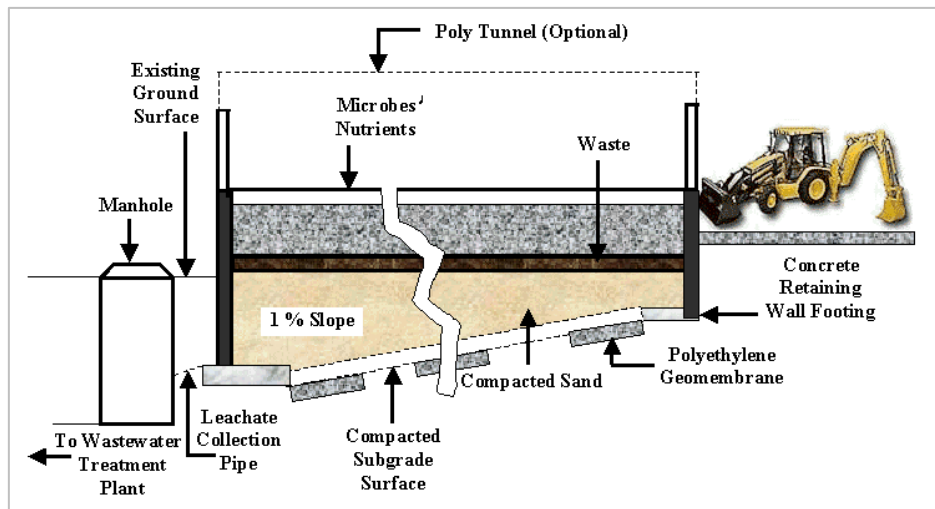


Figura 6-19 Schema di funzionamento del Landfarming (fonte: FRTR, EPA)

Biopile

La tecnologia "Biopile", derivata dal Landfarming e illustrata in **Figura 6-20**, prevede la formazione di reattori biologici costruiti mediante una sovrapposizione di strati di terreno contaminato (per altezze fino a 4-5 metri) intervallati con la posa in opera, tra uno strato ed il successivo, di tubi forati per distribuire nel materiale contaminato aria e soluzioni di acqua e nutrienti (soprattutto azoto e fosforo) e tubi di estrazione dell'aria.

All'interno di tali reattori vengono artificialmente mantenute le condizioni ottimali di disponibilità di nutrienti, umidità e temperatura, mentre un sistema di aerazione provvede a fornire l'ossigeno necessario allo svolgimento dei processi biodegradativi.

Per contenere l'emissione di sostanze volatili la biopila viene coperta con teli di plastica e i vapori sono trattati con carboni attivi.

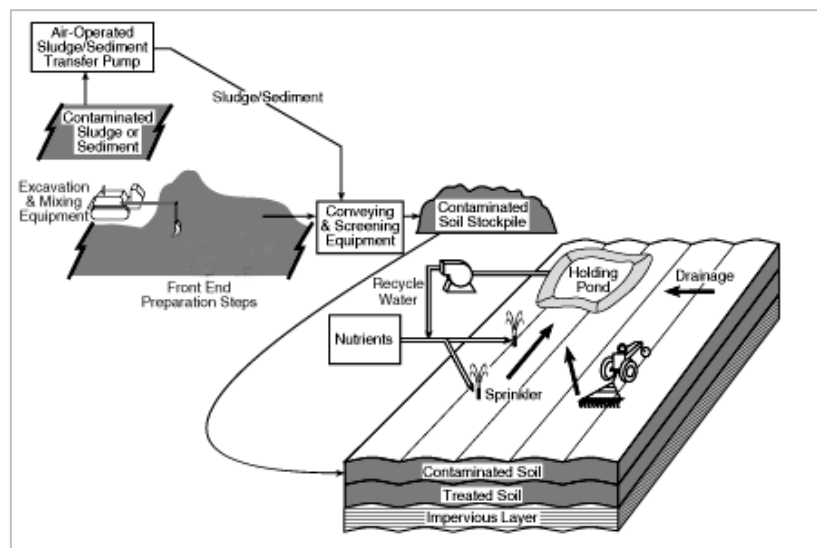


Figura 6-20 Schema Biopile (fonte: FRTR, EPA)

Condizioni e limiti di applicabilità

Gli interventi di Landfarming e Biopila sono particolarmente adatti, e quindi applicabili, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Contaminazione costituita da composti organici con un numero di atomi di carbonio inferiore a 20;
- Contaminazione con basso tenore di metalli pesanti.

CARATTERISTICHE DEL TERRENO DA TRATTARE

- Terreni a permeabilità medio-elevata (sabbie e ghiaia);
- Terreni con una densità della popolazione microbica compresa tra 10^4 e 10^7 CFU (Unità Formanti Colonia);
- Contenuto idrico in peso dell'ordine del 12-30%;
- Temperatura variabile da 10°C a 45°C;
- Concentrazione di nutrienti C:A:F=100:10:1.

Di contro, **le tecnologie di Land Farming e Biopile risultano non idonee, e quindi non applicabili**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Contaminazione del terreno costituita da composti inorganici, Nitrobenzeni e, in genere, contaminanti non biodegradabili;
- Terreni caratterizzati dalla presenza di un elevato tenore di metalli pesanti (quantità superiori a 2500 mg/kg);
- Elevate concentrazioni di idrocarburi ≥ 50.000 mg/kg

CARATTERISTICHE DEL TERRENO DA TRATTARE

- Terreni con granulometrie superiori a 60 mm;
- Presenza di terreni sabbioso-limosi, limi o argille limose a permeabilità media e medio-bassa, anche mediamente eterogenei.

Infine, le celle di trattamento devono essere ubicate in zone:

- caratterizzate da una soggiacenza minima della falda di 2 m (considerando anche le escursioni stagionali) rispetto al piano di posa del telo impermeabile alla base del cumulo;
- di dimensioni sufficienti alla sistemazione del terreno da trattare e con buone qualità tecniche per sopportare il peso dei cumuli e del passaggio mezzi superiori alle 40 ton;
- facilmente accessibili, pianeggianti, ubicate al di fuori di aree esondabili (in osservanza ai requisiti indicati dalle norme nazionali e regionali), in un'area recintabile possibilmente prossima alla zona di scavo per minimizzare i costi di gestione e trasporto;
- lontane da zone residenziali.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Composti organici con un numero di atomi di carbonio < 20 (BTEX, fenoli, IPA leggeri, idrocarburi petroliferi, alcuni pesticidi). Contaminazione con basso tenore di metalli pesanti.	Composti moderatamente biodegradabili	Composti inorganici, metalli pesanti, Nitrobenzeni e contaminanti non biodegradabili Elevate concentrazioni di idrocarburi (≥ 50.000 mg/kg)
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante adsorbito e disciolto		Prodotto in fase separata
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DELLA CONTAMINAZIONE	Di piccole dimensioni	Di modeste dimensioni	Esteso
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	Terreno insaturo in prossimità del piano campagna	Terreni insaturi posti a limitata profondità	Terreni insaturi profondi
CARATTERISTICHE DEL TERRENO DA TRATTARE			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni a granulometria medio-grossolana, limi omogenei. Terreni con una densità della popolazione microbica compresa tra 10 ⁴ e 10 ⁷ CFU (Unità formanti colonie) Contenuto idrico in peso dell'ordine del 12-30% Temperatura variabile da 10°C a 45°C Concentrazione di nutrienti C:A:F=100:10:1	Terreni mediamente fini, limi sabbiosi e ghiaiosi, argille molto fratturate	Limi e argille, terreni altamente organici, substrato fratturato, terreni stratificati e orizzonti di confinamento. Terreni con granulometrie superiori a 60 mm. Non applicabile con soggiacenza minima della falda di 2 m rispetto al piano di posa del telo impermeabile alla base del cumulo.
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	>10E-4 m/s	10E-5÷10E-4 m/s	<10E-5 m/s

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato		Medio-Elevato

Tabella 6-33 Efficacia di Land farming e Biopile

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Entrambe le tecnologie sono di semplice progettazione ed implementazione. Sistemi adatti alla gestione di grandi volumi di materiale. Tecniche affidabili e diffuse.
		Richiedono la necessità di eseguire test in laboratorio ed in campo di trattabilità per determinare la biodegradabilità dei contaminanti e le opportune percentuali di ossigenazione e carico di nutrienti.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Efficace per il trattamento di contaminanti organici con bassa velocità di biodegradazione
		Il trattamento di LF non risulta adatto al trattamento di suoli contaminati da VOCs
		Non è efficace sui suoli ad alti livelli di contaminazione o sui suoli con presenza di contaminanti inorganici. La presenza nel suolo contaminato di alte concentrazioni di metalli pesanti può inibire la crescita microbica.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL TERRENO DA TRATTARE		Terreni a granulometria medio-grossolana, limi omogenei, con permeabilità medio-elevata.
		Terreni a granulometria fine altamente organici, substrato fratturato, terreni stratificati e orizzonti di confinamento.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		Terreni con granulometrie superiori a 60 mm. Non applicabile con soggiacenza minima della falda di 2 m rispetto al piano di posa del telo impermeabile alla base del cumulo.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Le tecnologie di trattamento richiedono ampi spazi per la sistemazione dei cumuli oggetto di trattamento e per i sistemi di drenaggio e raccolta delle acque meteoriche. Necessita di interventi di stabilizzazione degli scavi in caso di profondità superiori ai 3 metri del terreno da inviare a trattamento.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Tempi di trattamento relativamente brevi per le Biopile (da 6 mesi a 2 anni) e di medio-lungo termine per il Landfarming. I tempi di trattamento, soprattutto per il land farming, sono fortemente dipendenti dalle condizioni climatiche quindi è difficile stabilirne i tempi di realizzazione con precisione.
COSTI DI INTERVENTO		Costi di realizzazione e di gestione degli impianti competitivi.
		Necessitano di un sistema raccolta del percolato e suo successivo trattamento. Alto costo di mantenimento.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE	-	-
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Le tecnologie di LF e Biopile, in quanto trattamenti "ex-situ", richiedono lo scavo, la movimentazione ed il trasporto dei terreni contaminati per cui è possibile un impatto sull'ambiente e sulla salute dei lavoratori. I composti volatili tendono a migrare in atmosfera



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-34 Vantaggi e svantaggi di Land Farming e Biopile

Tecnologie correlate

Non si segnalano tecnologie correlate per Landfarming/Biopile.

6.14 Processi a fanghi attivi / Bioreattori a fase fluida

Definizione e criteri generali

Il **trattamento biologico ex situ delle acque di falda** è una tecnica di bonifica applicata alle acque contaminate sia da composti organici, sia inorganici.

I trattamenti biologici sfruttano tecnologie basate su fenomeni naturali sviluppati in ambiente controllati, così che tali processi possano essere ottimizzati. Si basano su un processo che ha come principali protagonisti comunità di organismi viventi (aerobici o anaerobici) che degradano le sostanze inquinanti presenti nelle acque, formando un materiale semisolido (fango) che in seguito può essere separato dalle acque per sedimentazione.

I trattamenti biologici ex situ delle acque più comunemente utilizzati si presentano secondo due **configurazioni principali**:

- Processi di coltura liberi o processi a fanghi attivi;
- processi di coltura fissi o bioreattori.

Fanghi attivi

Il processo a fanghi attivi è un trattamento biologico aerobico che si sviluppa all'interno di vasche dove, conseguentemente ad un'aerazione spinta, si innescano una serie di processi chimici fisici e biologici.

Dopo una prima fase di ossidazione chimica, i microrganismi presenti nelle vasche sotto forma di colonie sospese formano dei fiocchi che, tramite processi fisici, inglobano gli eventuali solidi sospesi ed adsorbono eventuali solidi colloidali. Tali sostanze, una volta inglobate nel fiocco, vengono metabolizzate dai microrganismi mediante processi biologici.

Bioreattori

Il principio di funzionamento dei bioreattori vede la proliferazione dei batteri responsabili dei processi biologici, su supporti fisici.

I bioreattori vengono utilizzati principalmente per il trattamento di composti organici volatili e semivolatili e sono particolarmente efficaci nella rimozione dei composti a basso peso molecolare, altamente solubili (ad esempio composti aromatici), con una concentrazione totale di carbonio organico (TOC) inferiore a 5.000 mg/l.

Il trattamento consiste nel favorire il contatto tra microrganismi e corrente da trattare facendo scorrere l'acqua su una massa di materiale di grande superficie specifica che funge da supporto per microrganismi, i quali formano un film di diverso spessore. Il tipo di materiale il riempimento può essere costituito da pozzolane, coke metallurgico, ciottoli silicei materiali compatti o plastici.

Condizioni e limiti di applicabilità

I trattamenti biologici delle acque sono particolarmente adatti, e quindi applicabili, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Presenza di composti organici (preferibilmente trattabili in ambiente aerobico);

CARATTERISTICHE DELLA CORRENTE IDRICA

- Corrente idrica di caratteristiche poco mutevoli nel tempo.

Di contro, **risultano non idonei, e quindi non applicabili**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Presenza di inquinanti inorganici e che formano precipitati;
- Fitofarmaci, diossine e furani.

CARATTERISTICHE DELLA CORRENTE IDRICA

- Corrente idrica con concentrazioni di contaminanti variabile nel tempo.
- Basse temperature.

Componenti impiantistici di base e principali fasi operative

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di trattamento biologico è costituita da:

FANGHI ATTIVI

- Unità di contatto;
- insufflatori di aria;
- compressore per insufflaggio aria,
- Unità di sedimentazione;
- sistema di ricircolo fanghi;

BIOREATTORI

- Reattore dotato di supporto in materiale inerte ed insufflatori d'aria;
- compressore per insufflaggio aria,

Il processo a fanghi attivi, visibile in **Figura 6-21**, si sviluppa per fasi successive: una prima fase detta di contatto, dove mediante l'insufflazione di aria nella vasca, viene favorito il contatto, in ambiente aerobico, tra i microrganismi e inquinanti presenti nell'acqua, e una seconda fase che prevede la sedimentazione del fango formatosi. Nel sedimentatore viene inoltre prevista una fase detta di stabilizzazione, ovvero una fase che vede il completamento dei processi di degradazione della sostanza organica, prima del ricircolo del fango prodotto.

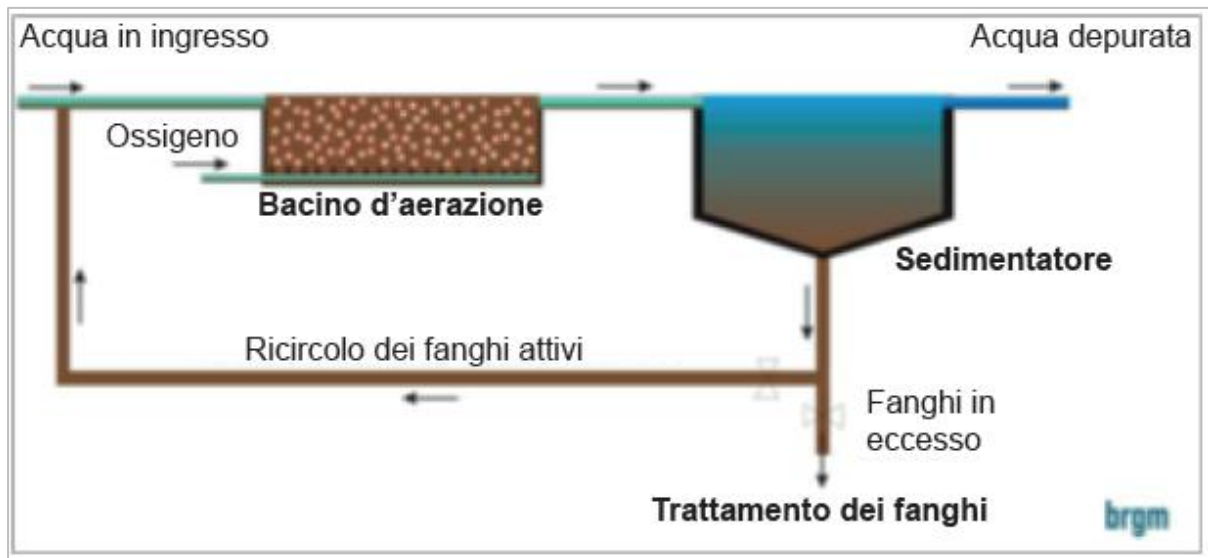


Figura 6-21 Schema della tecnologia a fanghi attivi (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificata)

Per quanto concerne i bioreattori, visibili in **Figura 6-22** l'aerazione può essere ottenuta mediante tiraggio naturale o per ventilazione forzata. L'insufflazione di aria dal basso favorisce il continuo mescolamento delle tre fasi presenti nel reattore: fase solida (ovvero le particelle inerti con batteri immobilizzati), una parte gassosa (costituita dalle bolle d'aria) e una fase liquida formata dalla soluzione da trattare. A differenza del processo a fanghi attivi, in questo caso non si prevede un ricircolo dei fanghi.

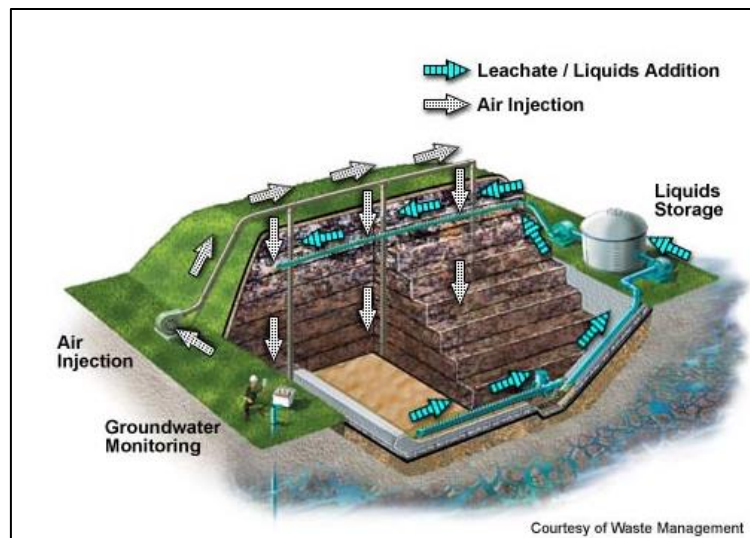


Figura 6-22 Schema di bioreattore (EPA-Waste Management)

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e collaudata,
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Possibilità di configurare l'impianto in funzione del tipo e della concentrazione di contaminante presente, della portata da trattare e della tipologia di recettore dell'effluente trattato
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Non influenzata
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Le soluzioni impiantistiche possono richiedere aree anche molto estese in funzione della complessità della configurazione impiantistica individuata nonché delle portate da trattare.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Generalmente lunghi
COSTI DI INTERVENTO		Costi generalmente meno elevati dei processi chimico-fisici e contenuti in rapporto ad un elevato volume di acqua trattata. I costi prevedono anche attività di manutenzione e monitoraggio, nonché la gestione (trattamento e smaltimento) dei fanghi prodotti.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Compatibilità con tutti i metodi di risanamento che prevedono l'emungimento di acque di falda (la configurazione dell'impianto può essere più o meno complessa e articolata in funzione dei volumi di acqua emunti, il tipo e la concentrazione di contaminante presente, il destino finale dell'effluente trattato).
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		La tecnologia può portare al depauperamento della risorsa idrica sotterranea a meno che non si preveda la

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		reimmissione in falda. Il trattamento finale prevede la produzione di fanghi.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-35 Vantaggi e svantaggi

Tecnologie correlate

Una particolare tipologia di bioreattore è quello a letto fluido (anche detti **AFB Aerobic Ruized Bed**) che prevede l'utilizzo di un reattore il cui letto granulare con biofilm è distribuito all'interno del reattore.

Tecnologie di Bonifica Ex Situ – Processi Chimico-Fisici*

(*) La tecnologia di Soil Washing è sinteticamente descritta come tecnologia correlata nella scheda relativa al Soil Flushing (processo chimico-fisico in situ).

6.15 Scavo e smaltimento

Definizione e criteri generali

Tale tecnologia si basa sulla rimozione meccanica del terreno contaminato e, successivamente, sul suo smaltimento/trattamento off-site in idoneo impianto autorizzato. Il conferimento off-site prevede normalmente la realizzazione di un deposito temporaneo in sito/caratterizzazione in banco al fine di classificare adeguatamente il terreno escavato mediante attribuzione del necessario codice CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti).

La bonifica dei terreni mediante scavo e smaltimento rappresenta una buona tecnologia sotto il profilo dell'efficacia d'intervento, dei tempi e dei costi di realizzazione per siti dove la contaminazione sia localizzata a profondità limitata o dove siano previsti scavi di sbancamento nell'ambito degli interventi di risviluppo delle aree.

Risulta, inoltre, una tecnica affidabile e collaudata, la cui efficacia è facilmente verificabile tramite analisi del fondo e delle pareti dello scavo, applicabile a qualsiasi tipo di terreno, (poiché adatta a qualunque granulometria) e indipendente dalla tipologia di inquinante. Essendo una tecnica veloce e semplice, può essere considerata una fase preliminare di trattamento ed è quindi compatibile con successive azioni di intervento.

Sotto il profilo della sostenibilità ambientale, tuttavia, risulta fortemente impattante e poco sostenibile.

Di seguito in **Figura 6-23** viene illustrato lo schema rappresentativo di uno scavo.

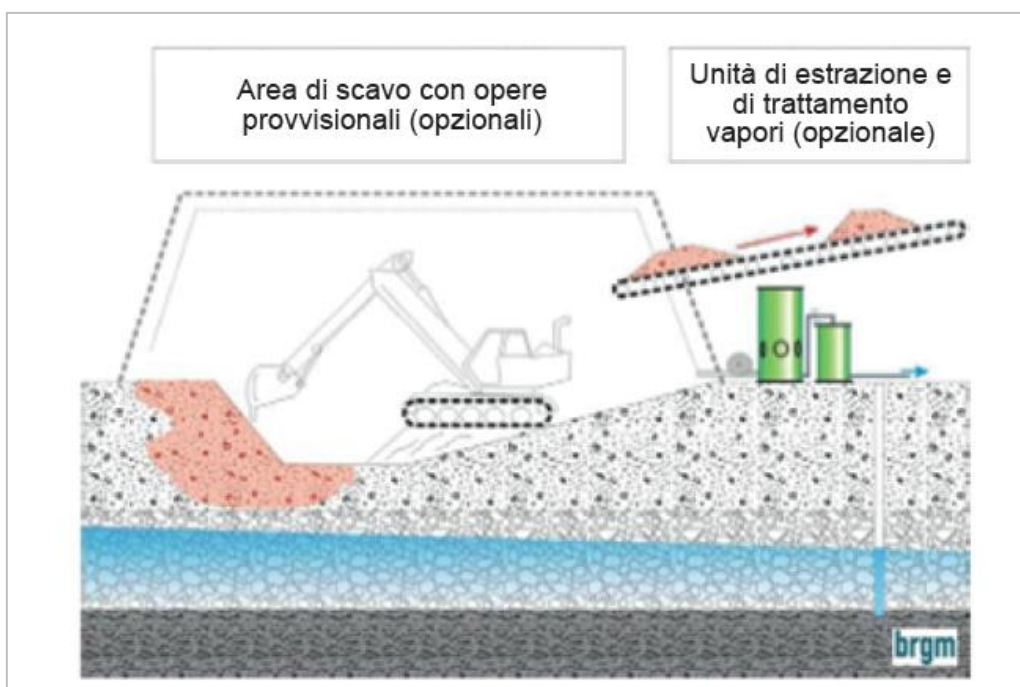


Figura 6-23 Schema di scavo e smaltimento (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-benefices Rapport Final, BRGM, 2010©BRGM/RP-58609-FR - modificato)



Figura 6-24 Caso applicativo di scavo e smaltimento (Fonte: Professor Petrangeli Papini)

Condizioni e limiti di applicabilità

Lo scavo e smaltimento è una tecnica particolarmente adatta, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Contaminazione costituita da composti sia inorganici sia organici, anche recalcitranti all'utilizzo di altre tecnologie di bonifica e/o in elevata quantità;
- Presenza di hot-spot di contaminazione e/o in aree logisticamente difficili da trattare con ulteriori tecnologie di bonifica;
- Presenza di contaminazione in zona insatura, con eventuali approfondimenti nella zona satura. In quest'ultimo caso bisogna provvedere a misure adeguate al contenimento e il monitoraggio delle acque sotterranee;
- Profondità della zona insatura da trattare comprese tra 0 m e 3-5 m (eventualmente maggiori, grazie all'utilizzo di particolari accorgimenti di sostegno dei fronti di scavo).

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni caratterizzati da tessitura da fine a grossolana.

Di contro, **lo scavo e smaltimento risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Contaminazione diffusa su vaste aree;
- Contaminazione presente a profondità >3-5 m da p.c., se non previa installazione di opere provvisorie adeguate.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Terreni prevalentemente saturi;
- Presenza di strutture interrato che possono essere danneggiate durante lo scavo e/o vicinanza di edifici nel caso non potessero essere adottate opere di sostegno adeguate.

Risulta inoltre non adatto quando le attività svolte in sito non possano subire arresti o limitazioni a causa delle attività di scavo, oppure quando sia assolutamente da evitare il disturbo alle aree circostanti in termini di rumore, polveri, traffico dei veicoli trasportatori (al netto delle azioni di mitigazioni eventualmente adottate).

La **Tabella 6-36** seguente mostra il grado di applicabilità della tecnologia di scavo-smaltimento in un'ottica di costi-benefici.

PARAMETRO	APPLICABILE	APPLICABILITÀ LIMITATA	NON APPLICABILE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Qualsiasi tipologia di contaminante inorganico e organico	-	-
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Qualsiasi fase di contaminante	-	-
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DELLA CONTAMINAZIONE	Hot-spot	Mediamente estesa	Estesa
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In prossimità del piano campagna fino a 3-5 m di profondità	Tra i 3-5 m e gli 8-9 m di profondità con idonee opere provvisorie	Oltre i 9 m di profondità con idonee opere provvisorie
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni da fini a grossolani	-	-
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	Terreni da impermeabili a permeabili	-	-
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Terreni da omogenei a eterogenei	-	-

Tabella 6-36 Efficacia di scavo e smaltimento

Principali fasi operative e mezzi utilizzati

L'asportazione dei terreni contaminati avviene generalmente secondo le seguenti fasi operative:

- posa in opera di eventuali opere provvisorie a sostegno dei fronti di scavo (es. palancole);
- scavo mediante escavatore meccanico, operando una selezione preliminare in modo da consentire una separazione qualitativa delle frazioni con evidenze di contaminazione da quelle che non presentano tali evidenze;
- stoccaggio in cumuli nelle aree di deposito temporaneo preventivamente individuate in situ;

- caratterizzazione dei cumuli mediante campionamento e analisi di laboratorio, attribuzione del codice CER;
- carico dei terreni contaminati su autocarri, trasporto e smaltimento presso idonea struttura autorizzata off-site;
- a seguito del collaudo delle pareti e del fondo scavo, ripristino dello scavo con materiale di riempimento certificato e/o proveniente dai cumuli non contaminati.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e collaudata. Semplicità di applicazione (entro limitate profondità di intervento).
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile a qualsiasi tipo di inquinante. Adatta alle contaminazioni ad hot-spot nel terreno insaturo entro i 5-6 m da p.c.
		L'applicabilità, in relazione al rapporto costi-benefici, diminuisce con l'aumentare della profondità alla quale è presente la contaminazione, a causa della necessità di installazione di opere di sostegno dei fronti di scavo. Non idonea per contaminazioni diffuse arealmente.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni di qualsiasi tipo, granulometria e permeabilità, prevalentemente nella matrice insatura, ma con possibili approfondimenti nel saturo.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Tale tecnica risulta spesso influenzata dalle condizioni logistiche del sito e può risultare non compatibile con le attività operative dello stesso. Da valutare accuratamente l'esistenza di strutture interrato e/o fuori terra adiacenti alle aree di scavo.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Nettamente più veloce rispetto alle altre tecnologie di bonifica.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
COSTI DI INTERVENTO		I costi sono proporzionali ai volumi di terreno da rimuovere (aumentano inoltre in presenza di opere provvisorie e/o di mitigazione del rischio). È necessario tenere in considerazione anche la realizzazione di prove geotecniche al fine di dimensionare eventuali opere provvisorie.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Compatibilità con altri metodi di risanamento. Spesso costituisce la fase preliminare di trattamento.
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Risulta fortemente impattante (movimentazione terreni, rumore, polveri) e poco sostenibile, in quanto il terreno viene asportato e conferito off-site dove subisce trattamento o smaltimento. Tale tecnologia prevede inoltre generalmente il reperimento di ulteriore materiale certificato per il riempimento delle aree scavate.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-37 Vantaggi e svantaggi di scavo e smaltimento

Tecnologie correlate

Una possibile tecnica da utilizzare in sostituzione dello scavo e smaltimento classico è rappresentata dal **Continuous Flight Auger (CFA)**. Si tratta di una soluzione che consente di effettuare scavi per la rimozione di hot-spot di contaminazione ubicati a grande profondità, basata sull'impiego di un'elica continua saldata su di un'asta cava che, in fase di perforazione, una volta disgregato il terreno con apposito utensile, accoglie il materiale scavato sulle falde dell'elica e lo trasporta in superficie compattandolo contemporaneamente verso le pareti dello scavo. Caratteristica principale dei pali eseguiti con C.F.A. è l'assenza di fanghi stabilizzanti o di tubi forma di rivestimento, nonché la drastica riduzione della quantità di terreno estratto che risale lungo l'elica fino all'esterno. La realizzazione dello scavo non richiede consolidamenti e garantisce una maggiore sicurezza per i lavoratori.

6.16 Metodi chimico-fisici per il trattamento delle acque ex situ

Definizione e criteri generali

Il trattamento chimico fisico ex situ delle acque di falda è una tecnica di bonifica applicata sia alle acque contaminate da composti inorganici sia organici.

In presenza di acque contaminate da composti inorganici il processo vede la combinazione delle seguenti fasi di trattamento:

- precipitazione – coagulazione - flocculazione (anche denominata chiariflocculazione);
- ossidazione;
- scambio ionico;
- processi a membrana (es. osmosi inversa);
- adsorbimento.

In presenza di acque contaminate da composti organici il processo vede l'applicazione anche di tecnologie quali:

- ossidazione spinta (es. ossidazione mediante UV);
- Strippaggio.

Chiariflocculazione

La **chiariflocculazione** è un processo di trattamento che vede la combinazione di tre fasi di trattamento finalizzate alla rimozione dei solidi sospesi non sedimentabili.

La precipitazione è un processo chimico-fisico in cui, tramite l'aggiunta di un agente precipitante, i metalli e i composti inorganici solubili vengono convertiti in metalli e composti inorganici insolubili.

Gli agenti precipitanti solitamente utilizzati sono:

- idrossidi, quali soda caustica, calce idrata, idrossido di magnesio;
- solfuri, quali solfuro di sodio, solfuro acido di sodio, solfuro di ferro o solfuro di calcio;
- carbonati, quali carbonato di calcio e carbonato di sodio;
- xantati (composti organici sulfonati).

I precipitati vengono poi sottoposti ad un processo di coagulazione e flocculazione il cui scopo è favorire lo sviluppo di fiocchi di particelle colloidali che verranno poi rimosse dalla corrente idrica nelle successive fasi.

Il processo in questione si sviluppa mediante i seguenti passaggi:

- additivazione del flocculante (Sali trivalenti di ferro e/o alluminio o polimeri);
- agitazione veloce;
- additivazione di coadiuvanti della coagulazione (ovvero derivati dell'alluminio e del ferro o calce o polielettroliti);
- agitazione lenta;

- sedimentazione;
- filtrazione.

Ossidazione

L'ossidazione viene utilizzata per la rimozione di ioni metallici e costituenti inorganici. Il processo viene regolato mediante l'utilizzo di prodotti chimici in grado di garantire una adeguata ossidazione. I prodotti chimici maggiormente utilizzati, in particolare per la rimozione di ferro e manganese, sono:

- Cloro;
- Biossido di Cloro;
- Ossigeno;
- Ozono;
- Permanganato di Potassio.

Le reazioni di ossido-riduzione intervengono nella rimozione dell'Arsenico e dei cianuri, nonché nella riduzione di metalli quali Cromo, Cromo VI e Piombo. In questo caso i reagenti più comunemente adottati sono:

- solfato ferroso;
- bisolfito di sodio.

Adsorbimento

L'adsorbimento è un processo che consente la rimozione di composti organici presenti nelle acque, con particolare efficacia verso i composti caratterizzati da scarsa solubilità, nonché tutti quelli rinvenibili in concentrazioni elevate. L'adsorbimento è un processo di natura chimico-fisica che sfrutta la capacità di alcune sostanze (dette adsorbenti) di trattenere sulla propria superficie i suddetti composti.

In generale i meccanismi di adsorbimento possono essere classificati in diverse categorie: adsorbimento fisico, chimico o elettrostatico.

I supporti adsorbenti maggiormente diffusi sono i carboni attivi (granulari GAC o in polvere PAC), ma è possibile prevedere anche l'utilizzo, quale supporto adsorbente, dell'allumina attivata, di argille, zeoliti e resine sintetiche.

Strippaggio

Lo strippaggio è un processo di deassorbimento che vede il trasferimento di massa tra la fase liquida e quella gassosa. Tale processo può avvenire secondo due modalità differenti:

- aerazione diffusa: il processo prevede l'insufflazione di aria compressa, mediante un supporto forato o poroso (tubo o piastra), nell'acqua accumulata in una vasca o serbatoio.
- Torre di strippaggio: il flusso idrico entra nella torre dalla sommità della stessa e, mentre attraversa la torre dall'alto verso il basso, viene intercettata da un flusso d'aria in uscita dai diffusori posti alla base della torre. Per ottimizzare lo scambio, le torri di strippaggio sono solitamente attrezzate con materiale di riempimento inerte (vetro ceramica o plastica).

Osmosi inversa

L'osmosi inversa è un processo che consente la separazione di elementi quali sali, sostanze organiche, virus e batteri mediante il passaggio, ad una pressione maggiore della pressione osmotica, di una soluzione salina concentrata attraverso una membrana.

Ossidazione UV

Il processo di ossidazione mediante l'uso di raggi UV è un processo di ossidazione avanzata contraddistinto dalla formazione in acqua di radicali ossidrilici, di natura fortemente ossidante. Questo trattamento vede l'azione combinata di un ossidante (ozono o perossido di idrogeno) e raggi UV.

Il processo comprende una o più camere di reazione (fotoreattore) fornite di lampade UV e di un sistema di iniezione dell'ossidante. Il sistema prevede inoltre una unità atta a distruggere l'eventuale ozono che può accumularsi nella camera di reazione.

Condizioni e limiti di applicabilità

CHIARIFLOCCULAZIONE

Il processo schematicamente descritto è **particolarmente adatto, e quindi applicabile**, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- presenza di solidi sospesi, metalli pesanti e taluni batteri patogeni;

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- elevati volumi di acqua da trattare e di afflusso continuo.

Di contro, **la chiariflocculazione risulta non idonea, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- presenza di contaminanti organici;

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- presenza di flussi piccoli o intermittenti.

OSSIDAZIONE

Il processo di ossidazione chimica è **particolarmente adatto, e quindi applicabile**, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- presenza di ioni metallici, con particolare riferimento a Ferro e Manganese;

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Non rilevanti.

Di contro, **l'ossidazione chimica risulta non idonea, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Cromo, Cromo VI e Piombo, per cui è invece previsto l'uso di composti riducenti;

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Non rilevanti.

ADSORBIMENTO

Il processo di adsorbimento è **particolarmente adatto, e quindi applicabile**, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Presenza di composti organici caratterizzati da scarsa solubilità ed elevato peso molecolare, pH neutro o lievemente basico;
- In generale risultano particolarmente efficaci per la rimozione di solventi organici (benzene, toluene e nitrobenzene), composti aromatici clorurati (PCBS, clorobenzene, cloronaftalene), fenoli e clorofenoli. Composti policiclici aromatici (acetonaftalene, benzopirene), idrocarburi ad alto peso molecolare (gasolio, ammine, sostanze umiche), composti alifatici clorurati volatili e non volatili, pesticidi ed erbicidi, triometani e loro precursori;
- Generalmente efficace anche per la rimozione di metalli quali Arsenico, Cromo e Mercurio.

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Flusso in continuo.

Di contro, **l'adsorbimento risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Presenza di composti organici caratterizzati da elevata solubilità e basso peso molecolare, pH fortemente acido o basso, temperature elevate;
- In generale risultano poco efficaci per la rimozione di chetoni, acidi ed aldeidi, idrocarburi alifatici a basso peso molecolare, amidi e zuccheri, contaminanti ad altissimo peso molecolare e colloidali organici, composti con attrazione specifica ridotta;
- In genere poco efficace per la rimozione di metalli/metalloidi ad eccezione di Arsenico, Cromo e Mercurio.

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Flusso discontinuo (in caso di fermo prolungato si rischia la proliferazione di batteri e la formazione di nitriti) o con concentrazioni di inquinanti molto variabili nel tempo o ricchi di solidi sospesi o precipitati.

STRIPPAGGIO

Il processo **di strippaggio è particolarmente adatto, e quindi applicabile**, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Presenza di composti volatili (es. BTEX, solventi clorurati).

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Nessuna indicazione.

Di contro, **lo strippaggio risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Presenza di composti poco volatili.

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Flussi ricchi di solidi sospesi o caratterizzati da elevate concentrazioni di calcio o magnesio che tendono a formare precipitato.

OSMOSI INVERSA

Il processo **di osmosi inversa è particolarmente adatto, e quindi applicabile**, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Presenza di idrocarburi volatili in forma disciolta e concentrazioni non elevate;

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Il trattamento si configura come trattamento terziario, ovvero necessita di pretrattamenti.

Di contro, **l'osmosi inversa risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Acque molto dure possono portare alla formazione di incrostazioni e ridurre l'efficacia del sistema.

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Flussi idrici non sufficientemente pretrattati, ovvero con presenza di materiale biologico, olii o grassi;
- Concentrazioni dei contaminanti fortemente variabili.

OSSIDAZIONE UV

Il processo **di ossidazione con raggi UV è particolarmente adatto, e quindi applicabile**, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Presenza di composti organici.

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Il trattamento si configura come trattamento terziario, ovvero necessita di pretrattamenti.

Di contro, **l'ossidazione con raggi UV risulta non idoneo, e quindi non applicabile**, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE

- Concentrazioni non trascurabili di metalli pesanti.

CARATTERISTICHE DEL FLUSSO DA TRATTARE

- Flussi idrici non sufficientemente pretrattati, ovvero con presenza di olii o grassi.

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppoChiariflocculazione

Le **componenti impiantistiche di base** costituenti il trattamento di chiariflocculazione sono:

- vasca di equalizzazione;
- pompa di rilancio;
- sistema di monitoraggio del pH (parametro vincolante il processo di precipitazione)
- sistema di alimentazione degli agenti precipitanti;
- sistema di alimentazione degli agenti flocculanti e coadiuvanti;
- chiarificatore (all'interno del quale avviene il processo di sedimentazione);

L'efficacia di rimozione dei metalli in soluzione è fortemente influenzata da un idoneo controllo del pH, pertanto è richiesto l'utilizzo di reagenti secondo quantità stechiometriche precise.

Lo schema di funzionamento della Chiariflocculazione è illustrato in **Figura 6-25**.

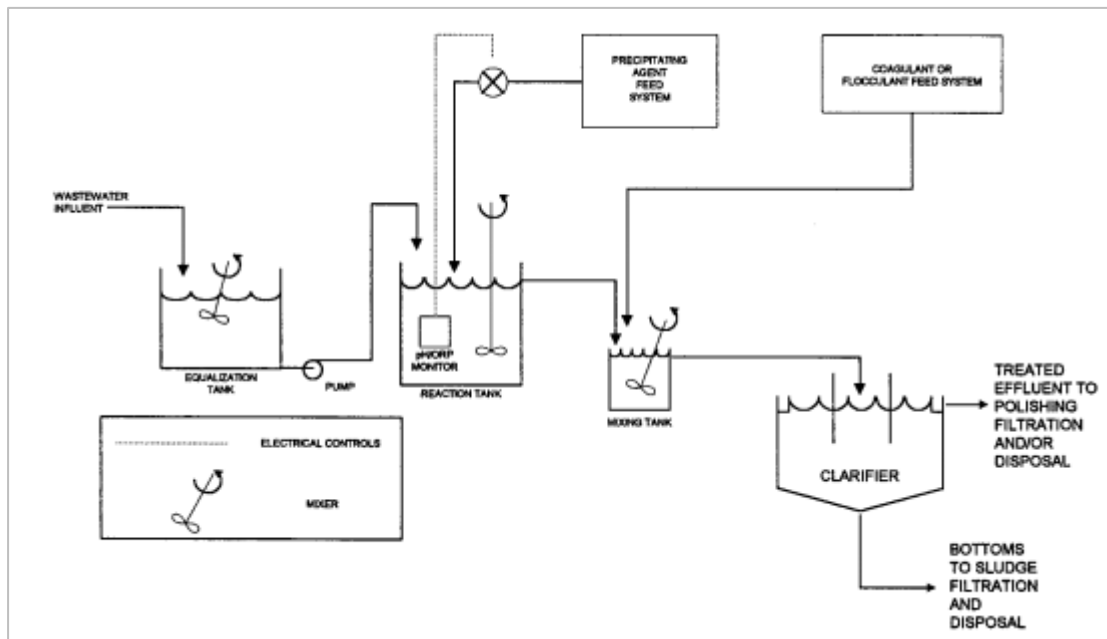


Figura 6-25 Schema della Chiariflocculazione (Fonte: FRTR, EPA)

Ossidazione

Le **componenti impiantistiche di base**, illustrati in **Figura 6-26**, costituenti il trattamento di ossidazione sono:

- Sistema di preparazione dell'agente ossidante (o riducente);
- sistema di miscelazione con acqua (batch, flash mixer);
- apparecchiature per il monitoraggio delle condizioni di reazione (RedOx, pH)
- serbatoio di reazione (durata della reazione dell'ordine 5-10 minuti)
- struttura di separazione del precipitato

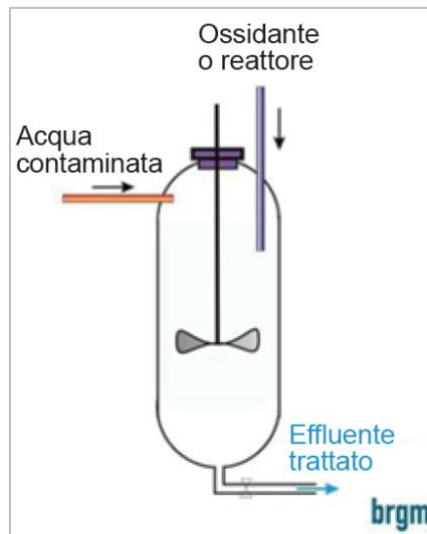


Figura 6-26 Schema dell'Ossidazione (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-benefices Rapport Final, BRGM, ©BRGM/RP-58609-FR 2010 – modificato)

Adsorbimento

Il trattamento mediante adsorbimento vede la necessità di installare dispositivi a colonne all'interno del quale viene posto il materiale adsorbente. Qualora sia necessario prevedere l'installazione di più colonne filtranti, la scelta più razionale è prevedere l'installazione in serie così da avere maggiore flessibilità nella fase di cambio carboni.

Le **componenti impiantistiche di base**, illustrati in **Figura 6-27** costituenti il trattamento mediante adsorbimento sono:

- filtro dissabbiatore (pretrattamento);
- linee di immissione in testa al filtro e di uscita alla base del filtro;
- linee di controlavaggio con relative valvole;
- flussimetro;
- colonna filtrante.

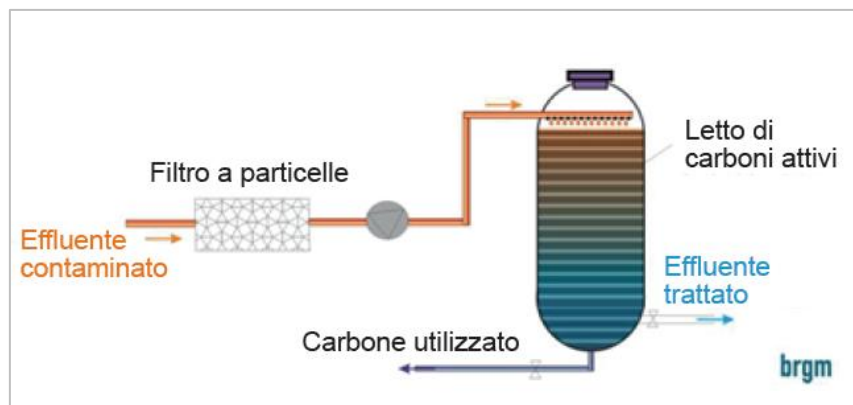


Figura 6-27 Schema Adsorbimento (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse couts-benefices Rapport Final, BRGM, 2010©BRGM/RP-58609-FR - modificato)

Strippaggio

Le **componenti impiantistiche di base**, visibili in **Figura 6-28**, costituenti il trattamento mediante torre di strippaggio sono:

- pompa di rilancio per il sollevamento delle acque alla testa della colonna di strippaggio;
- colonna di strippaggio;
- compressore per insufflazione di aria compressa;
- pompa di rilancio dell'effluente trattato;
- unità di trattamento dell'effluente gassoso in uscita dalla torre.

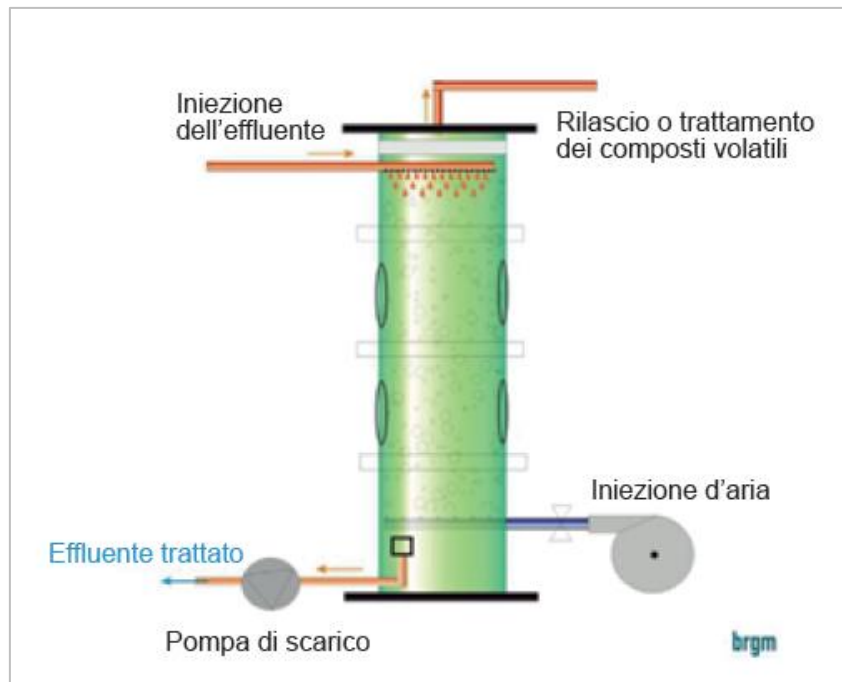


Figura 6-28 Schema Strippaggio (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificato)

Osmosi inversa

Le membrane osmotiche sono formate da composti poliammidici o in politetrafluoroetilene e possono essere configurate o con un assemblamento a spirale oppure assumendo la forma di un tubo cilindrico.

Le **componenti impiantistiche di base**, visibili in **Figura 6-29**, costituenti il trattamento osmosi inversa sono:

- sistema di pompaggio (pressione maggiore della pressione osmotica);
- sistema a membrana

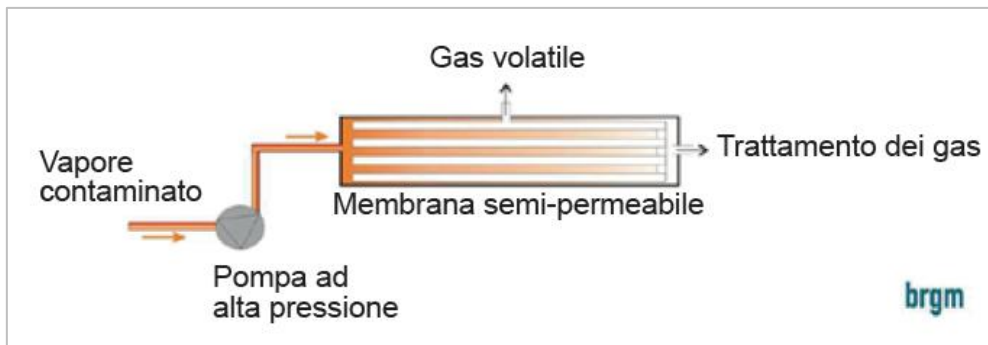


Figura 6-29 Schema Osmosi Inversa (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse couts-benefices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificato)

Ossidazione UV

Le **componenti impiantistiche di base**, visibili in **Figura 6-30**, costituenti il trattamento mediante ossidazione con raggi UV sono:

- Generatore di ozono
- Reattore UV;
- Distruttore di ozono
- Dispositivo di monitoraggio dell'ozono disciolto.

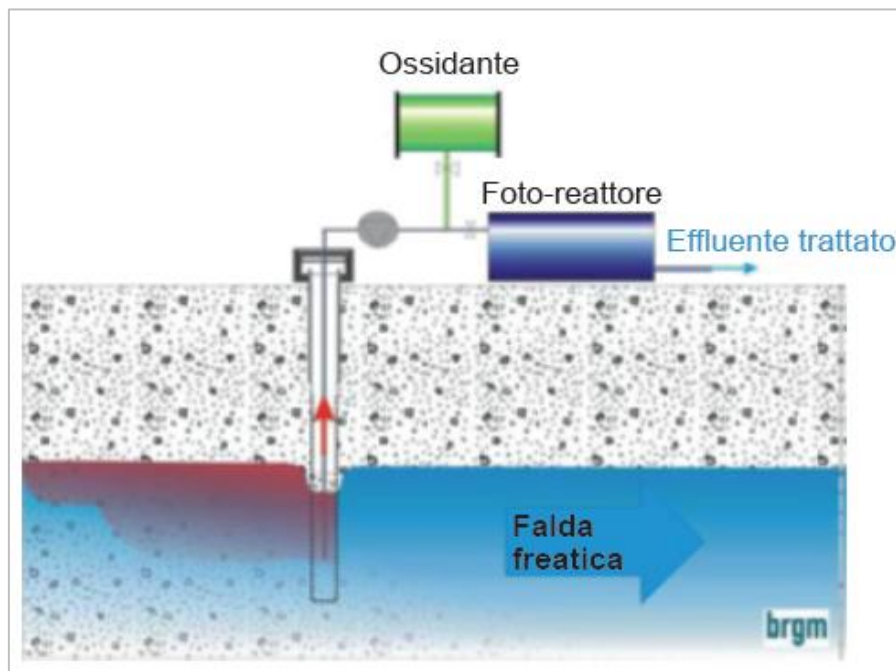


Figura 6-30 Schema Ossidazione UV (Fonte: Quelles techniques pour quels traitements - Analyse couts-benefices Rapport Final, BRGM, 2010 ©BRGM/RP-58609-FR - modificato)

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecniche affidabili e collaudate, si presta al controllo in automatico.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Possibilità di configurare l'impianto in funzione del tipo e della concentrazione di contaminante presente, della portata da trattare e della tipologia di recettore dell'effluente trattato.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Non influenzata.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		Le soluzioni impiantistiche possono richiedere aree anche molto estese in funzione della complessità della configurazione impiantistica individuata nonché delle portate da trattare.
TEMPISTICA DI BONIFICA		Generalmente lunghi
		La tecnologia basata sull'adsorbimento è generalmente veloce
COSTI DI INTERVENTO		Costi generalmente contenuti in rapporto ad un elevato volume di acqua trattata, ma fortemente influenzati dalla configurazione impiantistica individuata. I costi prevedono anche attività di manutenzione e monitoraggio, nonché la gestione (trattamento e smaltimento) dei fanghi prodotti.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		Compatibilità con tutti i metodi di risanamento che prevedono l'emungimento di acque di falda (la configurazione dell'impianto può essere più o meno complessa e articolata in funzione dei volumi di acqua emunti, il tipo e la concentrazione

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		di contaminate presente, il destino finale dell'effluente trattato).
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Le tecnologie possono portare al depauperamento della risorsa idrica sotterranea a meno che non si preveda la reimmissione in falda. Il trattamento finale prevede la produzione di fanghi.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-38 Vantaggi e svantaggi

Tecnologie correlate

Non si segnalano tecnologie correlate.

Tecnologie di Bonifica In Situ/Ex Situ– Processi Termici

6.17 Trattamento termico

Definizione e criteri generali

Il **Trattamento Termico** (o Desorbimento Termico) è una tecnologia di bonifica in situ dei terreni insaturi basata sul favorire la volatilizzazione dei contaminanti volatili e semivolatili (Idrocarburi aromatici, IPA, idrocarburi alifatici clorurati e alogenati, PCB, clorobenzeni, fenoli, ammine aromatiche, fitofarmaci, diossine e furani) mediante l'incremento di temperatura del suolo, per successiva estrazione e distruzione.

Presenta un buon rendimento nei terreni omogenei e a tessitura medio-grossolana con permeabilità medio-alta.

Il desorbimento termico, schema in Figura 6-31, è applicabile anche ex situ. I terreni inquinati, a differenza dell'incenerimento, non vengono distrutti nello stato di cenere, ma conservano buona parte delle loro proprietà fisiche e possono essere incorporati ad altri materiali o sepoliti.

Il **riscaldamento** del suolo può avvenire utilizzando:

- Iniezione di vapore a temperature variabili tra 150 e 230°C;
- Irradiazione nel suolo di microonde (temperature fino a 560 °C);
- Energizzazione con onde elettromagnetiche nel campo di frequenze delle onde radio (temperature da 100 a 300 °C);
- Riscaldamento con resistenze elettriche e bruciatori (temperature fino a 560 °C).

A partire dal punto di immissione il fronte di calore si propaga in tutta la zona da trattare generando progressivamente la vaporizzazione dell'acqua e la volatilizzazione dei contaminanti contenuti nel terreno, che vengono poi recuperati mediante i punti di estrazione e, infine, trattati in superficie. Tale processo è visibile in Figura 6-31.

L'area d'intervento deve essere ben isolata in superficie mediante realizzazione di apposite coperture (per esempio capping con teli HDPE) al fine di:

- minimizzare le perdite di calore;
- ottimizzare l'estrazione dei contaminanti mediante i sistemi di recupero;
- evitare l'infiltrazione delle acque meteoriche che influirebbero sulla propagazione del fronte di calore.

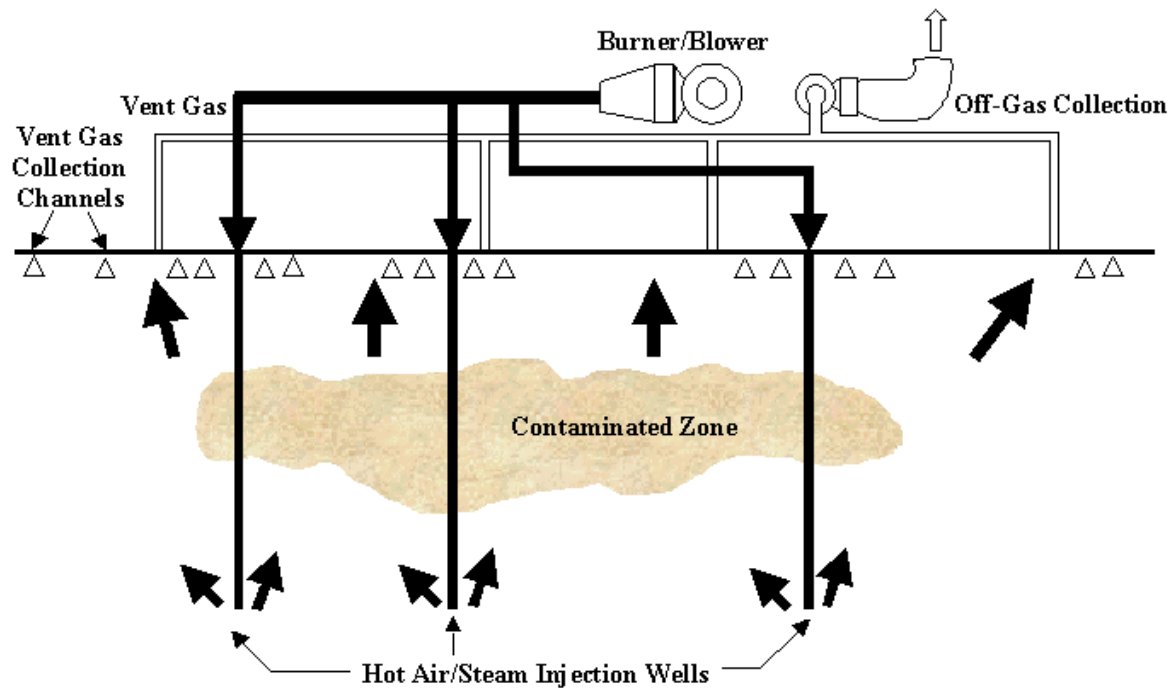


Figura 6-31 Schema di Trattamento termico in situ (Fonte: FRTR, EPA)

Condizioni e limiti di applicabilità

Il **trattamento termico** è **particolarmente adatto**, e quindi applicabile, nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di rifiuti tra cui in particolare sostanze solide a matrice carboniosa (plastiche, gomme, carta, sostanza organica, ecc.);
- Presenza di contaminanti organici volatili e semivolatili e metalli pesanti volatili;
- Ridotte concentrazioni di composti organici del fosforo (pochi mg/kg);
- Moderate concentrazioni di metalli alcalini (centinaia di mg/kg);
- Profondità della zona insatura da trattare comprese tra il piano campagna e 8-9m.

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza di terreni omogenei e a tessitura grossolana (sabbie), ma anche argillosi e mediamente eterogenei;
- Terreni con basso tasso di umidità.

Di contro, il **trattamento termico in situ** **risulta non idoneo**, e quindi non applicabile, quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di soli contaminanti inorganici e/o metalli;

- Elevate concentrazioni di composti organici del fosforo;
- Elevate concentrazioni di metalli alcalini;

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Presenza terreni fortemente eterogenei e alto livello di materia organica nel suolo;
- Presenza di tenori elevati di umidità del suolo.

Effetti indesiderati e potenziali

L'applicazione della tecnica di Trattamento Termico può provocare i seguenti effetti avversi nell'area trattata e nelle immediate vicinanze, che possono essere più o meno rilevanti in funzione delle caratteristiche sito – specifiche:

- Influsso negativo sulle comunità biologiche presenti nel sottosuolo e significativa riduzione delle specie microbiche mesofile e termofile;
- Effetto “ritiro” del suolo per disseccamento e “dewatering”;
- Alterazione delle caratteristiche geochimiche delle acque sotterranee per cambiamento della loro temperatura;
- Possibili danni a sottoservizi e infrastrutture sepolte e/o presenti nell'area di trattamento o nelle aree limitrofe.

Di seguito in **Tabella 6-39** viene illustrata l'efficacia delle tecnologie termiche.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Presenza di rifiuti tra cui in particolare sostanze solide a matrice carboniosa (plastiche, gomme, carta, sostanza organica) Volatili e semivolatili: solventi alogenati e non alogenati, idrocarburi e oli minerali, IPA, pentaclorofenolo, PCB, pesticidi ed erbicidi, BTEX, fenoli clorurati, benzina, gasolio, cherosene, oli da riscaldamento e lubrificanti, metalli pesanti volatili		Elevate concentrazioni di metalli alcalini Elevate concentrazioni di composti organici del fosforo
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante disciolto e adsorbito e gassoso		Prodotto libero
DISTRIBUZIONE DELLA CONTAMINAZIONE			
ESTENSIONE DELLA CONTAMINAZIONE	Di piccole dimensioni	Di modeste dimensioni	Esteso

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
UBICAZIONE DELL'INQUINAMENTO	In prossimità del piano campagna	Terreni mediamente profondi	Terreni profondi (>8/9 m)
CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO			
LITOSTRATIGRAFIA	Terreni omogenei a granulometria elevata (sabbie), limi omogenei	Limi sabbiosi e ghiaiosi, argille molto fratturate	Terreni ricchi di sostanza organica e con elevato tasso di umidità
CONDUCIBILITÀ IDRAULICA (K)	>10E-5 m/s		<10E-5 m/s
LIVELLO COMPLESSIVO DI ETEROGENEITÀ	Limitato o isotropo	Moderato	Elevato

Tabella 6-39 Efficacia delle tecnologie termiche

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di Trattamento Termico in situ è costituita da:

- Elettrodi o uno o più pozzi di riscaldamento e relativo sistema per l'approvvigionamento dell'energia necessaria (generatore di vapore, generatore microonde, generatore radiofrequenze, generatore elettrico);
- uno o più pozzi di estrazione aria/vapore verticali o orizzontali, o trincee;
- una soffiante o pompa a vuoto;
- le relative reti di *interconnecting*;
- un condensatore e un'unità di separatore di condensa;
- un'unità di trattamento dei vapori estratti;
- un'unità di trattamento o stoccaggio dell'acqua derivante dal separatore di condensa;
- un'unità di stoccaggio di eventuali composti oleosi derivanti dal separatore di condensa.

La **componente impiantistica di base** per attuare un intervento di Desorbimento Termico ex situ è costituita da:

- unità di pretrattamento;
- unità di frantumazione o segregazione,
- unità di asciugatura,
- unità di sbriciolatura,

- unità di miscelazione (con additivi come calce, gesso, ecc.),
- unità di omogeneizzazione,
- un forno: forno rotativo o unità a vite o unità cinghia,
- materiale relativo alla creazione di flussi e alla regolazione dei parametri termici,
- unità di trattamento gas:
- scambiatore di calore,
- filtri collettori di polveri, collettori di polveri umide o collettori di polveri elettrostatiche,
- camera di post-combustione, bruciatore, ossidazione catalitica,
- condensatore, adsorbimento su carbone attivo,
- stoccaggio di rifiuti solidi e liquidi derivanti dal trattamento.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e collaudata. Nella versione "in situ" consente di ridurre inoltre i tempi di applicazione della tecnologia SVE. Possibilità di raggiungere tassi di abbattimento anche del 99%.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile a composti organici volatili, semi-volatile o anche leggermente volatile (idrocarburi di petrolio, frazioni più pesanti di idrocarburi, solventi clorurati, oli, PCB, pesticidi, diossine / furani, IPA).
		Incapacità di trattare inquinanti inorganici non volatili e metalli non volatili.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Adatta a terreni, anche eterogenei e/o con bassa permeabilità. È applicabile anche per trattare la contaminazione ubicata entro 8-9 m da p.c.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		Non adatta in terreni con presenza di tenori elevati di sostanza organica e umidità del suolo.
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA LOGISTICA DEL SITO		In situ, permette di trattare anche il terreno al di sotto di edifici esistenti, a condizione di mantenere monitorata la produzione di vapori.
		Possibili danni a sottoservizi e infrastrutture sepolte e/o all'interno o limitrofe alla zona di trattamento.
		Ex situ, il processo richiede necessariamente lo scavo del suolo (si può attuare anche on site ma richiede una area vasta).
TEMPISTICA DI BONIFICA		Piuttosto veloce in condizioni ottimali. In situ da 3 a 6 mesi.
COSTI DI INTERVENTO		Da medi ad elevati in funzione delle caratteristiche geologiche del sito, dal tipo e concentrazione del contaminante. I costi relativi al trattamento dei vapori estratti possono inoltre diventare considerevoli. Il costo può aumentare in caso di trasporto del terreno off site.
COMPATIBILITÀ CON ULTERIORI TECNOLOGIE		In situ, compatibilità con altri metodi di risanamento (es. SVE, MPE).
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE (IN SITU)		Elimina i rischi e i costi relativi al trasporto di notevoli quantità di suolo contaminato. Necessità di disporre di un impianto di trattamento dei vapori estratti Influsso negativo sulle comunità biologiche presenti nel suolo e sottosuolo, distruzione della vegetazione nella zona di trattamento e significativa riduzione delle specie microbiche mesofile e termofile Effetto "ritiro" del suolo per disseccamento e "dewatering"

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		Alterazione delle caratteristiche geochimiche delle acque sotterranee per cambiamento della loro temperatura
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE (EX SITU)		Presenta rischi relativi al trasporto di notevoli quantità di suolo contaminato. Necessità di disporre di un impianto di trattamento dei vapori estratti Le emissioni di CO₂ legate al processo possono essere significative.



Buona



Media



Bassa

Tabella 6-40 Vantaggi e svantaggi delle tecnologie termiche

Tecnologie correlate

La **principale variante** alle tecniche di trattamento termico *in situ* è costituita dalla **Vetrificazione** in situ.

Tale tecnica consiste nel riscaldamento del terreno ad un livello tale da fonderlo (1200°C – 2000°C) e al successivo rapido raffreddamento al fine di innescare il processo di vetrificazione degli elementi che lo compongono. Il processo distrugge i contaminanti organici e immobilizza i contaminanti inorganici. Tale tecnica può essere utilizzata anche per amianto e radionuclidi.

7.0 TECNOLOGIE DI BONIFICA INNOVATIVE

Nell'ambito del presente Vademecum sono qui presentate alcune tecnologie di bonifica innovative.

Si precisa che sono state prese in considerazione le tecnologie applicate in tempi più recenti che abbiano raggiunto lo stadio di sviluppo dell'applicazione in campo e per le quali sia stato espresso un interesse del mercato o delle istituzioni. Non sono state invece considerate le tecnologie tuttora allo stadio sperimentale, per le quali siano disponibili solo risultati di singole ricerche accademiche.

Micro e Nanotecnologie

Nell'ambito della bonifica di acquiferi contaminati, la **Nanoremediation** si sta affermando come un approccio efficace e competitivo per la generazione di zone reattive. Questa tecnica consiste nell'iniezione nel sottosuolo di sospensioni acquose di micro- e nanoparticelle reattive al fine di indurre la degradazione, la trasformazione e/o l'immobilizzazione in situ degli inquinanti.

Ad oggi i nanomateriali di maggior interesse sono quelli a base di ferro: le particelle di ferro zerovalente microscopico (MZVI) o nanoscopico (NZVI) sono note per la loro efficacia nella dealogenazione riduttiva di numerosi inquinanti organici (principalmente composti organo alogenati, ma anche pesticidi) e nell'immobilizzazione dei metalli pesanti; gli ossidi di ferro sono invece impiegati per la rimozione di metalli pesanti o quali accettori elettronici durante processi di biodegradazione di composti organici (ad esempio i BTEX).



Figura 7-1 : Immagine SEM di particelle di ferro zerovalente nanometriche.

I due aspetti fondamentali per il successo dell'intervento sono dati dalla stabilità colloidale dei nano e micro reagenti e dalla loro mobilità nel sottosuolo. A tale scopo, sono stati sviluppati approcci innovativi per la stabilizzazione delle sospensioni di ferro mediante l'utilizzo di polimeri biodegradabili ecocompatibili.

La distribuzione dei reagenti in acquifero può essere ottenuta tramite:

- tecniche di iniezione per permeazione all'interno di pozzi, piezometri o postazioni di iniezione multipla;
- per fratturazione con sistemi direct push o postazioni di iniezione multipla.

Tra i micro-reagenti si segnala anche la presenza in commercio di prodotti che promuovono la distruzione di contaminanti organici e sono più comunemente utilizzati per il trattamento di solventi clorurati.

Infine, si segnala la presenza sul mercato di tecnologie brevettate che prevedono la possibilità di configurare più processi di bonifica tramite micro e nano tecnologie differenti in funzione della tipologia di contaminanti da trattare e del contesto ambientale in cui intervenire.

Ad oggi a livello mondiale si contano centinaia di interventi di *micro* e *nanoremediation* basati sull'impiego di particelle micrometriche o nanometriche a base di ferro o di altri prodotti specifici.

Electrokinetic Bioremediation

Tale tecnologia consiste nella possibilità di generare in continuo, all'interno dell'acquifero, composti ossidanti che servono per il trattamento della contaminazione presente, rendendola applicabile con efficacia anche in litologie complesse e in configurazione PRB (barriere permeabili reattive), ovvero in situazioni non affrontabili con le tecnologie ISCO tradizionali basate sull'iniezione di reagenti ossidanti.

In commercio sono presenti sistemi elettrocinetici sotterranei, collaudati sul campo, che integrano efficacemente i meccanismi ISCO, microbiologici e geofisici nelle falde acquifere contaminate.

I contaminanti quali ad esempio solventi clorurati (PCE, TCE, DCE, VC), BTEX e MTBE, vengono eliminati attraverso reazioni multiple di ossidazione e biodegradazione accelerata utilizzando ossigeno e ferro come accettori di elettroni preferiti.

Surfactant Enhanced Recovery (SER)

Negli anni più recenti è stata applicata con successo la tecnologia di bonifica tramite composti surfattanti non ionici biodegradabili al fine di desorbire in maniera selettiva dalla matrice solida i contaminanti e rendere miscibili in fase liquida i NAPL.

Con questa tecnologia è possibile trattare un'ampia gamma di contaminanti LNAPL (idrocarburi di origine petrolifera) così come DNAPL (i.e. solventi clorurati), soprattutto quando i sistemi tradizionali (skimmer e pompe) non risultano più produttivi per effetto del ridotto spessore di prodotto in fase libera presente, oppure quando occorre trattare elevate contaminazioni in frangia capillare, prima di eventuali altri trattamenti (quali ISCO, bioremediation, MPE, ecc).

La modalità di azione dei surfattanti comporta minori costi e un ridotto impatto ambientale rispetto ai tensioattivi tradizionali. Inoltre, è utilizzabile anche in litologie poco permeabili.

In Italia esistono diversi prodotti commerciali utilizzati per questa tecnologia di bonifica.

Trattamento combinato di assorbimento e biodegradazione

Alcune tecnologie innovative per la bonifica in zone sorgente e aree altamente contaminate prevedono il trattamento congiunto a mezzo di due meccanismi combinati di funzionamento: assorbimento e biodegradazione.

Ad esempio, esistono sul mercato prodotti che consentono una bio-distruzione accelerata della massa adsorbita fino al raggiungimento di concentrazioni estremamente basse. Altri prodotti, invece, sono in grado di rimuovere rapidamente gli idrocarburi dalla fase disciolta, adsorbendoli e stimolando la biodegradazione anaerobica in situ. I contaminanti trattati sono principalmente BTEX, idrocarburi petroliferi, MTBE, IPA, solventi clorurati, pesticidi e fenoli.

L'applicazione di tali prodotti avviene o attraverso l'iniezione (direct push, pozzi) a bassa pressione oppure mediante applicazione in scavo.

Trattamento termico auto-alimentante in-situ

Tra le tecnologie innovative presenti sul mercato italiano, rientra anche una tecnologia di bonifica a marchio registrato altamente sostenibile basata sulla combustione senza fiamma, in cui i contaminanti da bonificare sono il carburante stesso del processo termico. I principali contaminanti trattati risultano essere idrocarburi pesanti e leggeri soprattutto sottoforma pura (LNAPL).

Il processo è sostenuto da un flusso di aria immesso attraverso un pozzo di iniezione nella zona di trattamento target e viene avviato attraverso un "evento di accensione" di breve durata e bassa energia. Una volta avviato il processo, l'energia dei contaminanti reagenti viene utilizzata per preriscaldare e avviare la combustione di contaminanti nelle aree adiacenti, propagando un fronte di combustione attraverso la zona contaminata in modo autosufficiente (cioè, senza energia esterna o aggiunta di combustibile in seguito all'accensione) a condizione che sia fornito un flusso d'aria sufficiente. Il controllo attivo del fronte di combustione viene mantenuto dall'alimentazione dell'aria. Questo efficiente riciclo di energia è reso possibile dalle caratteristiche di porosità del sottosuolo contaminato che viene così bonificato.

Le apparecchiature utilizzate per implementare la tecnologia sono simili a quelle utilizzate nei sistemi Air Sparging (AS) / Soil Vapor Extraction (SVE) e includono compressori per l'insufflazione di aria nel sottosuolo, soffianti per l'aspirazione dei vapori interstiziali associati ad un sistema di trattamento dei gas estratti, oltre ovviamente alle specifiche apparecchiature utilizzate per attivare la combustione senza fiamma.

8.0 TECNOLOGIE E METODOLOGIE INNOVATIVE ENI

Tecnologia e-hyrec®

Definizione e criteri generali

La tecnologia e-hyrec® è applicabile nel caso di contaminazioni di falde da composti organici non solubili in acqua, generalmente idrocarburi, a bassa densità, presenti come prodotto surnatante (Light Non Aqueous Phase Liquids, LNAPLs).

Il dispositivo e-hyrec® lavora sul principio di permeazione selettiva, grazie all'uso di un filtro idrofobico e oleofilico capace di recuperare la sola fase organica. Per le caratteristiche chimico-fisiche del materiale, quando è immerso all'interfaccia tra lo strato idrocarburico surnatante e l'acqua di falda, il LNAPL permea attraverso i pori del filtro e l'acqua è respinta dalla superficie. È possibile arrivare a uno strato di iridescenza in seguito al processo di rimozione del contaminante.

Il filtro è accoppiato a una pompa di rilancio per la raccolta e l'invio del surnatante in serbatoio o in linea. Un sistema automatico di posizionamento all'interfaccia acqua/olio ottimizza le prestazioni e consente di seguire le oscillazioni della falda senza perdita di selettività, a differenza degli apparecchi tradizionali.

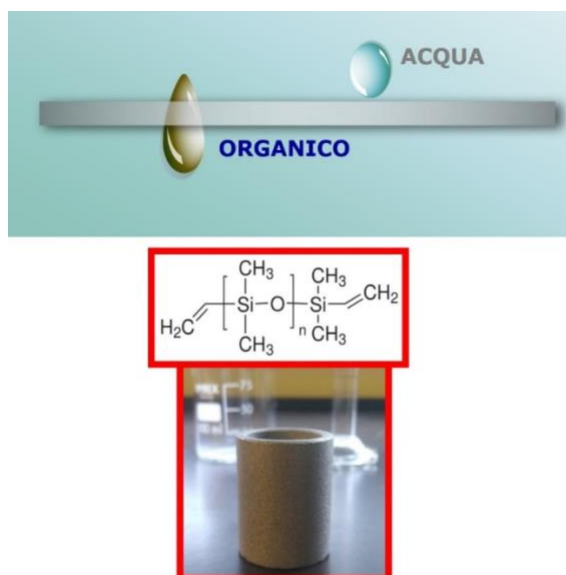


Figura 8-1: PDMS (fig. in centro) conferisce idrofobicità all'acciaio sinterizzato (fig. in basso).

Componenti impiantistici di base

Il dispositivo è costituito da due parti interconnesse tra loro mediante connessioni elettriche e pneumatiche: una parte che viene calata all'interno del pozzo piezometrico e una parte di gestione e controllo posta in superficie.

I componenti principali dell'unità di pozzo sono:

- filtro idrofobico: filtro di acciaio sinterizzato modificato con un coating superficiale di polidimetilsilossano (PDMS), che conferisce caratteristiche di idrofobicità e oleofilicità;
- pompa pneumatica tipo Total Fluid, collegata al filtro;
- sensore di fase per il posizionamento automatico, che discrimina tra le tre fasi acqua, olio e aria.

I componenti principali dell'unità di superficie sono:

- tamburo per lo svolgimento/avvolgimento del cavo portante dell'unità di pozzo;
- motore per il posizionamento automatico;
- encoder per la misura della profondità a cui è posizionato il filtro in falda;
- flussostato collegato alla pompa pneumatica che misura il numero di cicli della pompa e quindi il volume di liquido recuperato;
- quadro elettrico che contiene l'unità di controllo a PLC e l'interfaccia operatore HMI;
- skid e coperture in acciaio;
- opzione pannello fotovoltaico: alimentazione di motore e componenti sensoristica/elettronica.

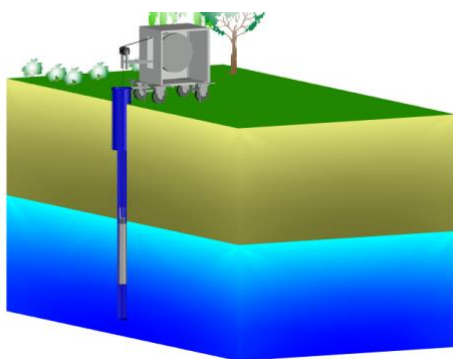


Figura 8-2: Il dispositivo e-hyrec® posizionato in falda. È costituito dalla parte calata in pozzo e dal sistema di movimentazione, gestione e controllo posto a bocca pozzo.

Condizioni e limiti di applicabilità

Caratteristiche della contaminazione

- Presenza di composti organici insolubili in acqua, in forma di fase surnatante (LNAPL).
- Prestazioni ottimali con viscosità del surnatante ≤ 5 cSt (40°C) e ricariche della falda ≤ 20 litri/giorno.
- Rimozione di LNAPL presente in falda con spessori di metri fino a spessori molto bassi, anche 5 mm.
- Non applicabile a composti organici sciolti in acqua.

Caratteristiche della falda

- Profondità dell'acquifero da 0.5 m a 30 m.
- Distanza minima di 2 m tra il livello della falda e il fondo pozzo.

Caratteristiche dell'area

- Disponibilità di aria o azoto compresso (rete o bombole).
- Area pozzo libera da ingombri (dimensione area 2 x 1 m).
- Direttiva ATEX: area esterna zona 2, area pozzo zona 0. Nel caso di area esterna classificata 0 o 1, va utilizzato un apposito rimando.
- Non applicabile in pozzi con diametro $< 4''$.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

La tecnologia e-hyrec®, che figura tra le tecnologie innovative, è in fase di primo utilizzo in campo su larga scala. Alcune voci sono quindi associate a processi di possibile implementazione.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
SELETTIVITÀ		Il prodotto recuperato non contiene fase acquosa

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
EFFICIENZA DI RIMOZIONE LNAPL		Spessori finali di surnatante in falda di pochi cm, fino al velo, in funzione della ricarica della falda Rimozione di LNAPL presente in falda con spessori di metri fino a spessori molto bassi, anche 5 mm
AUTOMAZIONE		Questa caratteristica permette un'ottimizzazione delle prestazioni
		Questa caratteristica dovrebbe permettere una riduzione degli interventi del personale tecnico. Da valutare ottimizzazioni a seguito dell'applicazione in campo
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Prestazioni ottimali con viscosità del surnatante ≤ 5 cSt (40°C) e ricariche della falda ≤ 20 litri/giorno
		Possibili riduzioni di prestazioni con viscosità e ricariche elevate (spessori finali maggiori)
COSTI DI INTERVENTO		Abbattimento dei costi di smaltimento della frazione acquosa Riduzione dei costi di intervento del personale tecnico (in via di ottimizzazione)
FLESSIBILITÀ DI IMPIEGO		Dispositivo mobile, possibilità di utilizzo in rotazione su pozzi diversi Ampio range di applicazione in termini di profondità dell'acquifero

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
		Non applicabile su pozzi carrabili (necessario modello compatto) Non applicabile in pozzi con diametro < 4"
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Il modello con alimentazione da fotovoltaico risulta vantaggioso rispetto a skimmer (smaltimento di acqua evitato, minore intervento degli operatori)

 Buona
  Media
  Bassa

Tabella 8-1 Vantaggi e svantaggi e-hyrec

Metodologia E-limina® (Eni-Linking Isotopic and Microbial Investigations to aid Natural Attenuation)

Definizione e criteri generali

La tecnologia e-limina® (acronimo per Eni-Linking Isotopic and Microbial Investigations to aid Natural Attenuation) consiste nell'associazione di diversi metodi di monitoraggio applicati alle bonifiche di tipo biologico o BIOREMEDIATION (per queste tecnologie di bonifica si faccia riferimento alla scheda dedicata).



I metodi di monitoraggio applicati alla bonifica in modo coordinato e sinergico sono di tipo:

- Microbiologico (allestimento di colture a microcosmo);
- Molecolare (quantificazione di geni – chiave che costituiscono i marcatori specie-specifici e/o funzionali);
- Isotopico (valutazione del rapporto isotopico tramite CSIA, Compound Specific Isotopic Analysis).

Questa tecnologia è applicabile ai siti inquinati sia in fase di caratterizzazione preliminare, che in fase di monitoraggio durante la bonifica stessa.

Caratterizzazione: e-limina® permette di valutare la biodegradazione in atto nel sito e di suggerire metodi di bonifica basati sulla microbiologia locale per accelerare i fenomeni di natural attenuation già presenti;

Monitoraggio: e-limina® permette di valutare in tempo reale lo stato di biodegradazione dei contaminanti durante l'intervento di bioremediation (vedi Figura 1).

La metodologia e-limina® è applicabile a qualsiasi tipo di matrice (acquiferi o suoli), per i quali si vogliano ottenere informazioni sullo stato di biodegradazione dei contaminanti e per i quali si voglia valutare l'opportunità di un trattamento biologico.

Gli strumenti di selezione e monitoraggio applicati sono altamente selettivi e ad alta precisione, quindi consentono di ridurre i margini di rischio che accomunano molte tecniche di bonifica.



Figura 8-3: Allestimento del campo per una bonifica per via biologica

Condizioni e limiti di applicabilità

Presupposto fondamentale per l'applicazione della metodologia e-limina® è la presenza di attività microbiologica nei confronti delle molecole oggetto della bonifica, ovvero gli inquinanti, nel sito di interesse. In linea teorica, tutte le molecole inquinanti sono aggredibili da parte dei microorganismi, così come descritto nella scheda Bioremediation, purché le concentrazioni non siano troppo elevate e le condizioni del sito siano permissive in termini di temperatura, umidità, pH.

La valutazione iniziale viene fatta allestendo colture in microcosmo, delle acque di falda e/o dei suoli inquinati, in condizioni aerobiche ed anaerobiche. La degradazione delle molecole inquinanti viene monitorata attraverso analisi gascromatografiche secondo i metodi standard (es. EPA), se disponibili.

Una volta verificata la presenza di attività microbica nei confronti degli inquinanti (Natural Attenuation), con la stessa modalità sperimentale è possibile saggiare le condizioni che possano favorire l'accelerazione dei fenomeni biodegradativi (Enhanced Biodegradation).

Le colture in microcosmo sono anche indispensabili per la messa a punto del metodo di analisi isotopica: vengono effettuati esperimenti di cinetica, nei quali le colture, in triplicato, sono sottoposte a prelievi ravvicinati in modo da costruire un'accurata curva di degradazione. Sul contaminante residuo viene determinato il rapporto isotopico, come descritto nel paragrafo successivo.

Contemporaneamente, è necessario individuare, all'interno della via metabolica degradativa, nota o ricostruita in base agli eventuali prodotti di degradazione e/o intermedi, gli enzimi-chiave della catena metabolica e, se note, le specie batteriche responsabili della biodegradazione. Sulla base delle sequenze nucleotidiche identificate, vengono disegnate sonde geniche (primers) specie-specifiche e funzionali che rappresentano i marcatori per quella via metabolica (vedi paragrafo successivo per i dettagli tecnici). Quanto più gli studi preliminari sono accurati, tanto più le sonde saranno efficienti nel monitorare l'attività dei batteri degradativi.

Strumentazione di laboratorio necessaria e messa a punto dei metodi

Per l'applicazione delle tecnologie che costituiscono e-limina®, oltre ad una dotazione base di laboratorio chimico – biologico, sono necessari strumenti dedicati per la quantificazione dei marcatori molecolari (Thermal Cycler per PCR quantitativa o qPCR) e una gas cromatografia-spettrometria di massa isotopica (GC-IRMS). Nella Figura 8-4 è rappresentata schematicamente l'applicazione della metodologia alle acque di falda.

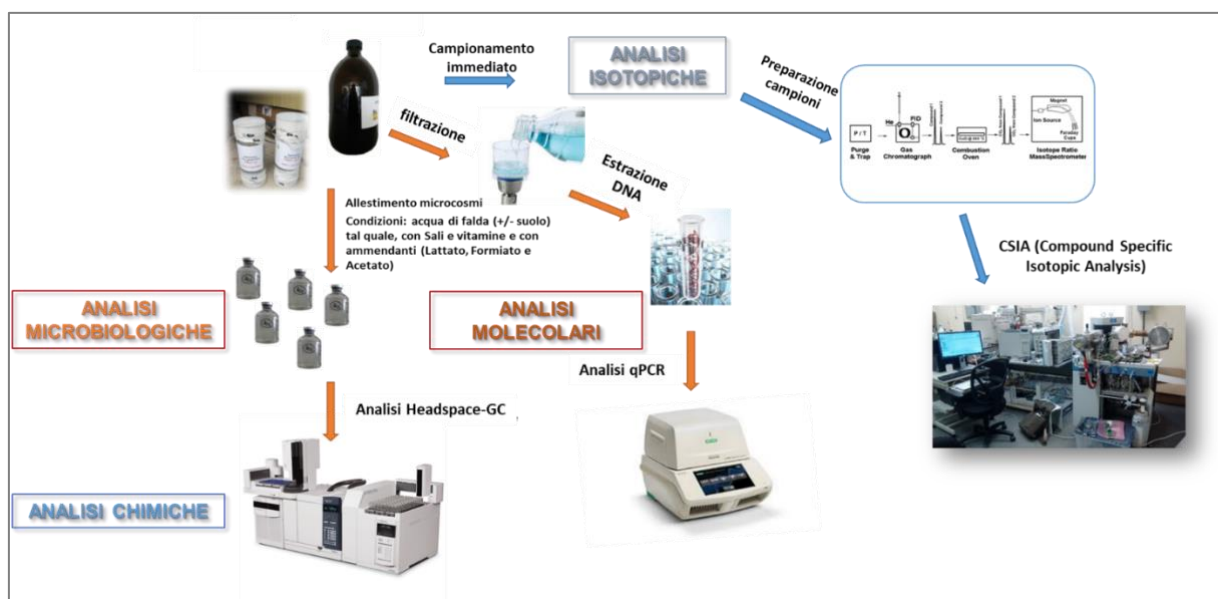


Figura 8-4: Schema dell'applicazione delle tecnologie che costituiscono il metodo e-limina®

ANALISI MICROBIOLOGICHE

A partire dalle matrici contaminate (acque o suoli) vengono allestite colture in microcosmo in condizioni:

a) **AEROBICHE**: terreno minimo salino per agevolare il metabolismo batterico e fornire oligoelementi necessari per la crescita e l'attività, aerazione facilitata (per le colture in liquido, è sufficiente l'agitazione tramite shaker orbitale, per i microcosmi di suoli è necessario rimescolare periodicamente in modo da favorire l'esposizione all'aria); non sono generalmente necessarie altre fonti di carbonio in quanto l'inquinante stesso deve essere l'unica sorgente di energia.

b) **ANAEROBICHE**: terreno minimo salino degassato addizionato di scavengers dell'ossigeno (es. cisteina), riempimento della bottiglia in modo da minimizzare lo spazio di testa, colture stazionarie; in questo caso, è opportuno fornire ammendanti, testati su diverse colture per l'efficacia, per consentire e accelerare la biodegradazione.

Le colture sono utili in fase di caratterizzazione di un sito, in quanto possono essere studiati i meccanismi di biodegradazione, i pathways metabolici e le specie batteriche presenti; inoltre, è possibile testare le diverse condizioni che consentono di accelerare la biodegradazione.

Inoltre, l'allestimento delle colture anche durante la bonifica consente di monitorare in laboratorio e in condizioni controllate quello che si sta realizzando in campo.

ANALISI MOLECOLARI

Come già accennato, gli studi preliminari sulle vie metaboliche degradative sono fondamentali per l'individuazione degli enzimi – chiave (e quindi dei relativi geni) e delle specie batteriche indiziate per la biodegradazione. Su queste basi è possibile disegnare specifiche sequenze di DNA (sonde o PRIMERS); se il Primer individua le specie batteriche viene chiamato **MARKER TASSONOMICO**, se invece individua un gene metabolico viene chiamato **MARKER FUNZIONALE**.

L'approccio scelto per caratterizzare un sito e, successivamente, seguire l'andamento della bonifica fa uso della tecnologia chiamata PCR (Polymerase Chain Reaction, o reazione a catena della polimerasi), nella sua versione quantitativa: qPCR. Questa tecnologia consente di amplificare in modo quantitativo i geni relativi alle specie o agli enzimi biodegradativi all'interno del DNA estratto dai campioni ambientali. Il principio di questa quantificazione risiede nella possibilità di determinare la quantità dello specifico marcatore all'interno di un campione amplificandolo e misurandone la quantità prodotta ad ogni ciclo di reazione (vedi Figura 3). Confrontando quindi i dati con una curva di taratura realizzata all'interno dello stesso esperimento con un target noto, è possibile stimare il numero di sequenze tassonomiche della specie desiderata oppure i geni funzionali all'interno di una comunità complessa. Questo nel caso di una caratterizzazione dà informazioni sul potenziale biodegradativo del sito (presenza e quantità delle specie degradative e degli specifici enzimi), mentre durante la bonifica permette di monitorare l'efficacia del trattamento in corso.

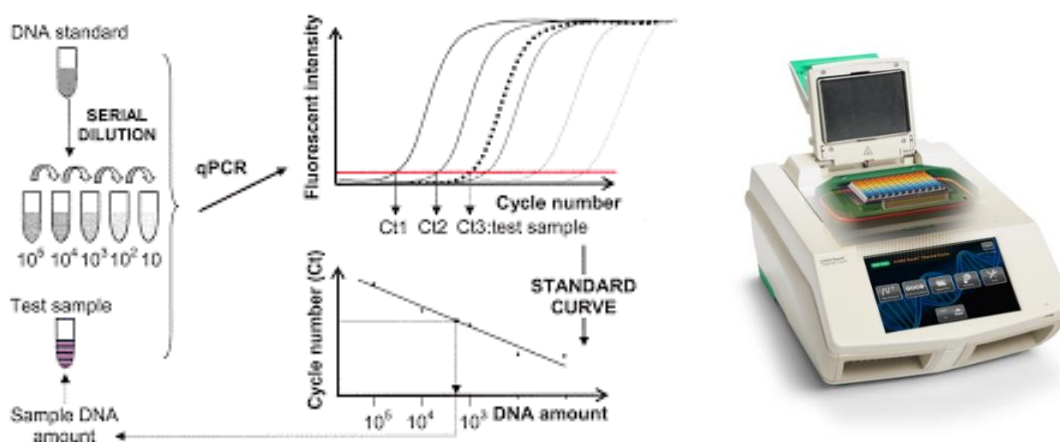


Figura 8-5: La reazione di qPCR e lo strumento dedicato

ANALISI ISOTOPICHE

L'analisi isotopica, o meglio la Compound Specific Isotopic Analysis (CSIA), si basa sull'utilizzo della gas-cromatografia accoppiata alla spettrometria di massa isotopica (GC-IRMS). Questa tecnologia permette sia l'identificazione della sorgente di contaminazione tra le diverse fonti plausibili (utilizzata per scopi di indagini forensi), che la determinazione della degradazione del contaminante stesso e dei pathway degradativi cui è soggetto; in questa seconda declinazione viene utilizzata in campo ambientale.

Gli esiti di questa analisi sono rappresentati dal valore del rapporto isotopico tra gli isotopi stabili degli atomi che prevalentemente costituiscono la gran parte dei contaminanti, ovvero Carbonio ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), Idrogeno ($^2\text{H}/^1\text{H}$) e Cloro ($^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$). Tale rapporto è caratteristico per ogni contaminante e legato a vari fattori, come ad esempio l'origine di fabbricazione (in base alle materie prime e ai processi produttivi), e varia in seguito ai processi biodegradativi, in quanto i microorganismi preferiscono aggredire e degradare le molecole che contengono l'isotopo più leggero, causando l'accumulo nell'ambiente delle molecole contenenti l'isotopo più pesante.

Nei dati, questo si traduce, attraverso l'applicazione di un'apposita equazione, in uno shift del rapporto isotopico da valori più negativi a valori via via meno negativi al proseguire della degradazione. L'entità di questo cambiamento viene calcolata con un fattore di arricchimento sito-specifico, legato sia al contaminante che al pathway degradativo cui è soggetto. Ad esempio, come riportato in Figura 4, nel caso di processi di dealogenazione di solventi clorurati questo shift risulta essere importante. In Figura viene riportato un esempio di grafico ottenuto dai valori dei campioni prelevati durante il monitoraggio di una bonifica, insieme all'analisi chimica del contaminante in oggetto (1,2- dicloroetano o 1,2-DCA).

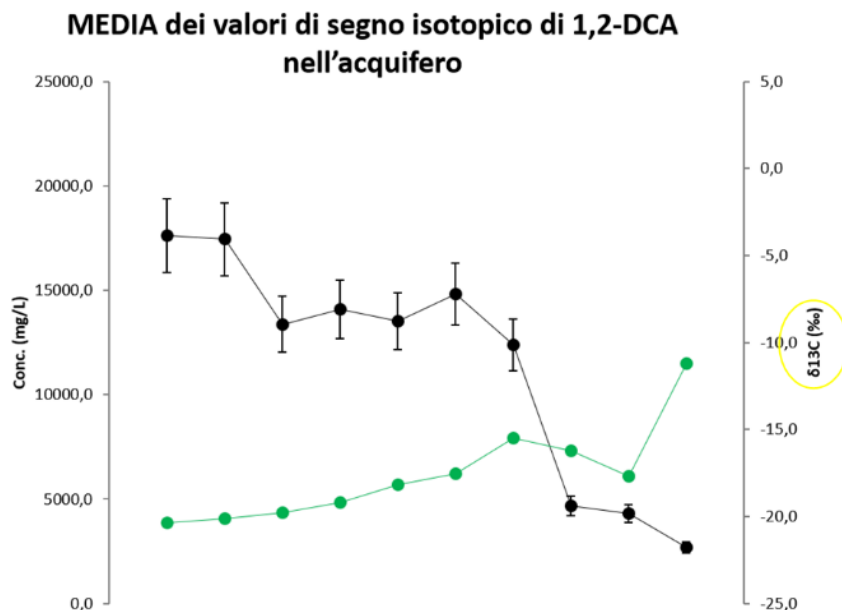


Figura 8-6:

Grafico che rappresenta la variazione del segno isotopico del Carbonio ($\delta^{13}C$, curva verde) insieme alla diminuzione della concentrazione di 1,2-DCA (curva nera) nel corso di un evento di bonifica.

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

La combinazione dei metodi proposta nella metodologia e-limina® permette una caratterizzazione della contaminazione più accurata, identificandone al contempo la sorgente e permettendo di valutarne il grado ed i processi di alterazione subiti nell'ambiente (velocità di degradazione e scelta della tecnologia di bonifica più efficace).

L'integrazione di protocolli di analisi CSIA con i metodi microbiologici e molecolari si sta dimostrando uno strumento potente per determinare origine ed eventuali processi degradativi dei contaminanti immessi nell'ambiente, ove le singole analisi potrebbero risultare non risolutive.

Vista la complessità della gran parte dei siti contaminati destinati ad attività di bonifica, dove possono coesistere meccanismi concomitanti di trasformazione e ripartizione dei contaminanti in condizioni 'naturali', è sicuramente opportuno affiancare le misure CSIA del sito con sperimentazione di laboratorio su matrici native ed utilizzare tecniche a supporto, che inquadrino i dati di frazionamento della molecola nell'ambiente ben caratterizzato a livello di diversità delle comunità microbiche.

Nell'iter di bonifica di un sito che prevede caratterizzazione, progettazione e realizzazione del Progetto Operativo di Bonifica (POB), un consolidamento della conoscenza in fase di caratterizzazione determina un risparmio di tempo e costi a livello dell'intero processo, poiché permette di diminuire il rischio di scelta di tecnologie non efficaci.

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
ACCURATEZZA		L'associazione delle diverse tecnologie di monitoraggio consente una caratterizzazione più puntuale
SELEZIONE DELLA TECNOLOGIA DI BONIFICA		Le tecnologie di monitoraggio associate consentono di selezionare la tecnologia di bonifica più efficace
COMPLESSITÀ DELLE ANALISI		Necessario il coinvolgimento di strumentazioni complesse e personale formato sia per l'esecuzione che per l'interpretazione delle analisi
APPLICABILITÀ GENERALE		Metodologia applicabile alle sole bonifiche di tipo biologico
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile a tutti i contaminanti passibili di biodegradazione
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Necessaria la conoscenza dei pathways biodegradativi. Indispensabile la presenza di condizioni di campo permissive per i microorganismi (T, pH, redox, salinità...)
COSTI DI INTERVENTO		Riduzione dei costi relativi alle infrastrutture e al personale dedicato
TEMPI DI INTERVENTO		L'applicazione concertata delle tecnologie di monitoraggio consente la riduzione dei tempi di bonifica biologica
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE		Ridotto impatto ambientale in termini di sostanze chimiche dannose, elevate temperature, alterazione del territorio.



Buona



Media



Bassa

Tabella 8-2 Vantaggi e svantaggi e-limina

Campionatori passivi in LDPE

Definizione e criteri generali

E' un metodo per la determinazione di contaminanti organici e del loro profilo di distribuzione nei sedimenti e nei suoli tramite sistemi di campionamento passivo che operano in condizioni di equilibrio, basati su film di polietilene a bassa densità (LDPE) e sviluppati dalla ricerca centrale Eni, in collaborazione con Eni Rewind, con l'Università di Roma Tor Vergata e con il Massachusetts Institute of Technology.

Tali sistemi di campionamento passivo sfruttano il processo fisico della diffusione molecolare degli inquinanti sulla base del gradiente di concentrazione tra la matrice ambientale da monitorare (ad es. acqua, gas interstiziale, ...) e un sistema adsorbente (film di LDPE) presente nel campionatore. La ripartizione dei contaminanti ne comporta l'accumulo sui film del campionatore sino al raggiungimento dell'equilibrio, consentendo di determinare la concentrazione disponibile di composti inquinanti e la loro distribuzione anche lungo il profilo verticale.

I campionatori vengono esposti nella matrice ambientale per tempi sufficienti a garantire l'instaurarsi di condizioni di equilibrio tra la matrice e il sistema adsorbente. A questo punto, misurata la concentrazione dei contaminanti nel film di polietilene mediante analisi di laboratorio, la concentrazione mobile e disponibile dei contaminanti nella matrice si può determinare conoscendo i coefficienti di ripartizione tra il sistema adsorbente e la matrice campionata.

Nella fase iniziale del campionamento (vedi Figura 8-7), gli inquinanti vengono adsorbiti dal polietilene con un tasso che è direttamente proporzionale alla loro concentrazione nella matrice ambientale (zona di cattura lineare). Con il procedere del tempo di esposizione, il contaminante gradualmente raggiunge, nel campionatore, la sua concentrazione di equilibrio. I campionatori passivi a base di LDPE possono essere utilizzati per il campionamento della zona satura e insatura, in quanto la concentrazione dei contaminanti assorbita nel LDPE risulterà correlata alla concentrazione in fase acquosa e/o nel gas interstiziale, laddove presente, in funzione dei corrispondenti coefficienti di ripartizione polietilene-acqua (K_{pew}) e polietilene-aria (K_{pea}). Tali coefficienti di ripartizione dipendono da diversi fattori quali ad es. le proprietà chimico-fisiche del contaminante e le caratteristiche del polimero. In condizioni di equilibrio, sulla base delle concentrazioni degli analiti misurate nel polietilene al termine dell'esposizione, è quindi possibile stimare le concentrazioni dei contaminanti in fase acquosa o nel soil-gas sulla base dei coefficienti di ripartizione stimati per ciascuna sostanza. I dati forniti dai campionatori passivi possono quindi trovare applicazione per la stima della effettiva mobilità dei contaminanti, ad integrazione delle tradizionali tecniche di caratterizzazione, per meglio definire il modello concettuale del sito, con specifico riferimento ai percorsi di volatilizzazione e di lisciviazione e trasporto in falda dei contaminanti.

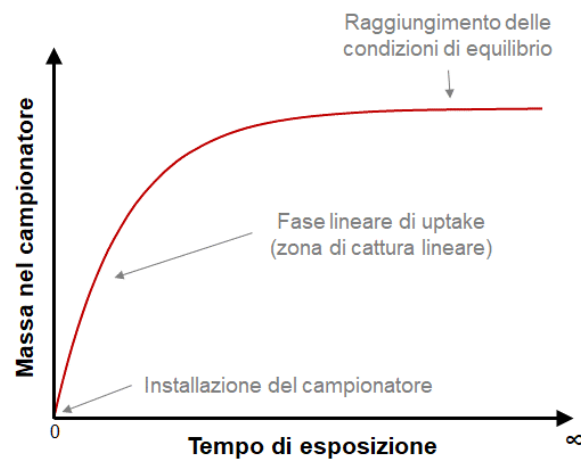


Figura 8-7: Massa di contaminante adsorbita nel campionatore passivo in funzione del tempo di esposizione.



Figura 8-8: Polietilene a bassa densità (LDPE) che può essere utilizzato per il monitoraggio passivo.

La concentrazione di un contaminante disciolto in acqua (C_W) oppure nel soil gas ($C_{SOIL\ GAS}$) si può quindi ottenere analizzando la concentrazione dei contaminanti adsorbiti sul PE al termine dell'esposizione e considerando il rispettivo coefficiente di ripartizione PE-acqua (K_{PE-W}) oppure il coefficiente di ripartizione PE-aria (K_{PE-A}):

$$C_W = \frac{C_{PE}}{K_{PE-W}}$$

$$C_{SOIL\ GAS} = \frac{C_{PE}}{K_{PE-A}}$$

Dove:

- C_W = concentrazione disciolta in acqua
- C_{PE} = concentrazione adsorbita sul PE
- K_{PE-W} = coefficiente di ripartizione PE-acqua
- $C_{SOIL\ GAS}$ = concentrazione nel soil gas
- K_{PE-A} = coefficiente di ripartizione PE-aria

Sviluppo della tecnologia

Le tecniche di campionamento passivo risultano già ben consolidate ed applicate per il monitoraggio dei contaminanti in fase disciolta nelle acque sotterranee e nei sedimenti. Per il monitoraggio delle sostanze in fase aeriforme, le prime applicazioni di sistemi di campionamento passivo risalgono già agli anni '70 e nei primi anni '80 hanno iniziato ad essere largamente utilizzati nell'ambito dell'igiene industriale. Negli ultimi anni a livello nazionale ed internazionale si stanno mettendo a punto dei sistemi di monitoraggio del soil gas basati sul campionamento passivo.

Condizioni e limiti di applicabilità

I campionatori passivi sono applicabili nelle seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Presenza di composti organici;
- Contaminazione presente in due o più fasi, compresa la presenza di prodotto surnatante;

CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO

- Sedimenti
- Terreni saturi e insaturi, permeabili o poco permeabili, anche eterogenei;
- Presenza di falda anche superficiale (terreni insaturi e saturi);

Di contro, **i campionatori passivi risultano non applicabili** quando si presentano le seguenti condizioni:

CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE E SUA DISTRIBUZIONE

- Contaminazione di metalli o composti inorganici;

La tabella seguente mostra il grado di efficacia dei campionatori passivi in rapporto alle condizioni ambientali di cui sopra.

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
TIPOLOGIA DI CONTAMINANTE	Composti volatili* e in particolari idrocarburi petroliferi. Contaminazione recente.	Composti semivolatili	Composti non volatili. Contaminazione "datata"

PARAMETRO	MOLTO EFFICACE	MEDIAMENTE EFFICACE	POCO EFFICACE
CARATTERISTICHE DELLA CONTAMINAZIONE			
FASE DELLA CONTAMINAZIONE	Contaminante disciolto e in fase gassosa. LNAPL	Contaminante adsorbito	DNAPL NAPL con spessori < 1 cm e densità molto vicina a 1
(*)La volatilità dell'inquinante è determinata dalla pressione di vapore, dalla costante di Henry, dalla sua composizione e dal punto di ebollizione.			

Tabella 8-3 Efficacia della tecnologia campionatori passivi

Componenti impiantistici di base e principali parametri di sviluppo

Per l'applicazione in campo di tale tipologia di campionatori vengono utilizzate aste in acciaio inossidabili finestate, posizionate alle profondità di interesse (Figura 3), al cui interno vengono inseriti film di polietilene, di qualche cm di lunghezza e del peso di qualche decina di mg.



Figura 8-9: Sonda in acciaio inossidabile al cui interno viene posizionato il film di polietilene per l'installazione in campo tramite tecniche a infissione diretta (direct push)

Questi dispositivi vengono inseriti nel suolo, manualmente, a diverse profondità a partire dal top soil fino al massimo a 1 m per poter ricostruire i profili di contaminazione ed i percorsi di migrazione. Il campionamento viene effettuato posizionando un campionario per ogni livello di profondità scelto.

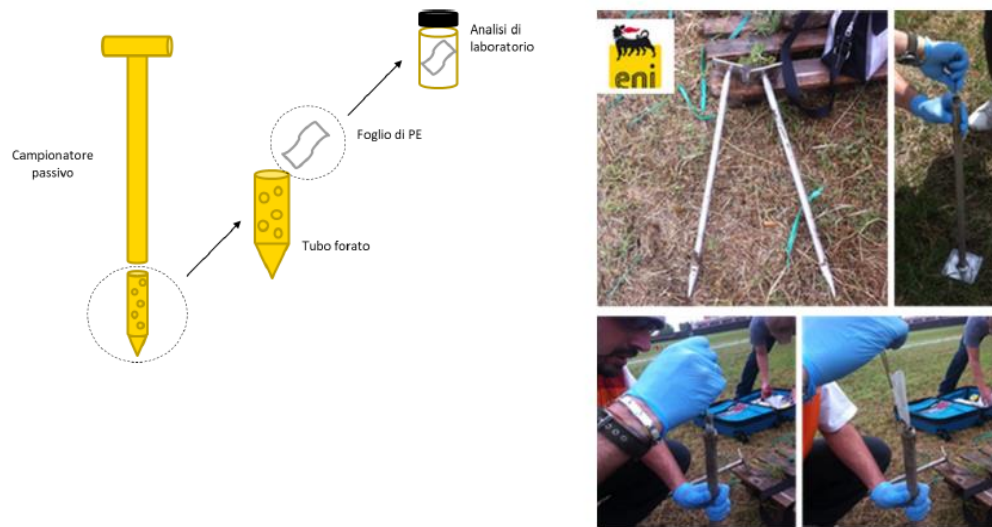


Figura 8-10: Campionatore passivo per monitoraggio superficiale – applicazione manuale

Per poter raggiungere profondità maggiori e studiare anche i percorsi di lisciviazione dei contaminanti dal top-soil alla falda sulla stessa verticale di campionamento, sono stati progettati campionatori che possono essere inseriti utilizzando i geoprobe.

Tali campionatori sono dotati di:

- sistema di rivestimento (Dual Tube) da applicarsi al sistema di campionamento gas interstiziali attualmente in uso, per garantire l'esposizione esattamente alla profondità di campionamento scelta;
- una griglia metallica di protezione del film di polietilene, per evitare che il suolo vada ad impaccare il film durante il posizionamento, soprattutto ad elevate profondità, ma anche nel caso in cui non venga utilizzato in abbinamento alla camicia esterna, ad esempio nel caso di campionamenti manuali a bassa profondità.



Figura 8-11: Campionatore passivo per monitoraggio in profondità
– sistema di rivestimento e applicazione mediante peoprobe

Vantaggi e svantaggi nell'applicazione della tecnica

- Alta densità di campionamento
- Misura della sola frazione effettivamente mobile/disponibile
- Buona rappresentatività del grado di contaminazione
- Sistema semplice ed economico
- Applicabile anche in presenza di umidità
- Non perturba gli equilibri esistenti nelle matrici ambientali
- Evita il campionamento della matrice ambientale
- Possibilità di ottenere profili verticali

PARAMETRO	VALUTAZIONE IN TERMINI DI VANTAGGI/SVANTAGGI	NOTE
GRADO DI SVILUPPO, AFFIDABILITÀ E DIFFUSIONE		Tecnica affidabile e consolidata per i sedimenti e per i composti volatili nei soil-gas. Campionamento relativamente rapido. Determina la frazione mobile/disponibile, responsabile del rischio ambientale. Non perturba la matrice ambientale. Possibilità di ottenere dettagliata distribuzione dei contaminanti e anche profili verticali
		Necessità di ottimizzazione per lo studio dei percorsi di lisciviazione
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLA TIPOLOGIA DI CONTAMINAZIONE		Applicabile agli inquinanti volatili e semivolatili, in particolare agli idrocarburi petroliferi. Applicabile al monitoraggio di pesticidi nelle acque e sedimenti
		Metodologia da validare per lo studio dei percorsi di volatilizzazione e lisciviazione
APPLICABILITÀ IN FUNZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL SOTTOSUOLO		Applicabile in più contesti ambientali (zona insatura, frangia capillare e zona satura). Applicabile in terreni e suoli di diversa natura



Buona



Media



Bassa

Tabella 8-4 Vantaggi e svantaggi dei campionatori passivi

9.0 BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- Adriano D.C., Bollag J.M., Frankenberger W.T., Sims R.C., *Bioremediation of contaminated soils*, Agronomy, n. 37, 1999
- Aglietto I., Icardi A., *FEROX_{MP}: un metodo di trattamento innovativo a base di ferro zero-valente*, Siti Contaminati, n. 1, C.F.A., Torino, 2003
- Aglietto I., Icardi A., *Trattamenti con Biopile*, Siti Contaminati, n. 1, C.F.A., Torino, 2003
- Air Force Center for Environmental Excellence AFCEE, *Bioventing performance and cost summary*, Brooks Air Force Base, Texas, 1994
- Alexander M., *Biodegradation and bioremediation*, Academic Press, New York, 1994
- Alvarez-Cohen L., McCarty P.L., Boulygina E., Hanson R.S., Brusseau G.A., Tsien H.C., *Characterization of a methane-utilizing bacterium from a bacterial consortium that rapidly degrades trichloroethylene and chloroform*, Applied and Environmental Microbiology, vol. 58, Washington D.C., 1992
- American Petroleum Institute API, *Guide for assessing and remediating petroleum hydrocarbons in soils*, first edition, API Publication 1629, Washington D.C., 1993
- ARPA Lombardia. *LIFE European Project "Life Free PCB" (03/ENV/IT/000321)*
- Baciacchi R., Boni M.R., D'Aprile L., *Ossidazione chimica in situ*, Atti del 57° Corso di aggiornamento in Ingegneria Sanitaria-Ambientale, Milano, 2003
- Bais H. P., Weir T. L., Perry L. G., Gilroy S., Vivanco J. M., *The role of root exudates in rhizosphere interactions with plants and other organisms*, Annual Review of Plant Biology. Vol. 57: 233-266, 2006
- Baker, A.J.M.; Reeves R.D., Mcgrath S.P., *In situ decontamination of heavy metal polluted soils using crops of metal-accumulating plants: a feasibility study*, In: R.L. Hinchey and R.F. Olfenbuttel (eds.) *In situ bioreclamation*. Boston, Butterworth - Heinemann, 1991
- Barea J.-M., Pozo M.J., Azcón R., Azcón-Aguilar C., *Microbial co-operation in the rhizosphere*, Journal of Experimental Botany, n. 56, 1761-1778, 2005
- Beretta G.O., *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee*, Pitagora, Bologna, 1992
- Beretta G.P., *Metodologia per il disinquinamento degli acquiferi inquinati: l'approccio idrogeologico*, in AA. VV., *Protezione e recupero delle acque sotterranee*, I quaderni di Acque Sotterranee, n. 2, Geo-Graph, Segrate, 1994
- Billard A., Vincq C., Begassat P., Droissart-Long A., Dubrac N., Leprond H., *Guide méthodologique relatif au Plan de Conception des Travaux (PCT)*, MTES/DGPR/Bureau du sol et du sous-sol, ADEME, INERIS BRGM/Unité 3SP, Octobre 2019
- Boni M.R., *Fenomeni di inquinamento degli ambienti naturali. Principi e metodi di studio*, Carocci Editore, 2007
- Cerbini G., Gorla M., *Idrogeologia applicata – Principi, metodi e misure*, Geo-Impianti, Segrate, 2° edizione, 2009
- Chiesa G., *Inquinamento delle acque sotterranee*, Hoepli, Milano, 2° edizione, 1994
- Cohen R.M., Mercer J.W., Greenwald R.M., Beljin M.S., *Design guidelines for conventional pump-and-treat system*, EPA/540/S-97/504, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington D.C., 1997

Colombano S., Saada A., Guerin V., Bataillard P., Bellenfant G., Beranger S., Hude D., Blanc C., Zornig C. et Girardeau I., *Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-benefices Rapport Final*, BRGM, France, Juin 2010

Dineen D., Slater J.P., Hicks P., Holland J., Clendening L.D., *In situ biological remediation of petroleum hydrocarbons in unsaturated soils*, in Kostecki P.T., Calabrese E.J. (eds.), *Petroleum contaminated soil*, vol. 3, Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, 1990

Eni Corporate University, Management of health, safety, environment and quality systems, XI Edizione, San Donato (Milano), 2019

EPA 542-R-01-004, *Treatment technologies for site cleanup: annual status report* (10th edition), 2001

ERSAF, SuSAP – *Supplying Sustainable Agriculture Production*, Regione Lombardia, 2000

Fitton D., Warner K., Fricke L., *Co-oxidation used to remove PCE DNAPL at drycleaner site*, Technology News & Trends, n. 4, Washington D.C., 2003

Fruchter J.S., Cole C.R., Williams M.D., Vermeul V.R., Teel S.S., Amonette J.E., Szecsody J.E., Yabusaki S.B., *Creation of a subsurface permeable treatment barrier using in situ redox manipulation*, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, 1997

Gargini A., Lerner D.N., Mastrocicco M., Thornton S.F., Davison R.M., *L'impiego dell'attenuazione naturale controllata come tecnica di bonifica a basso costo di acquiferi contaminati: due casi di studio*, Acque Sotterranee, n. 85, Geo-Graph, Segrate, 2003

Gauglitz P.A., Bergsman T.M., Caley S.M., Heath W.O., Miller M.C., Moss R.W., Robert J.S., Shalla R., Schlender M.H., Jarosch T.R., Eddy-Dilek C.C., Looney B.B., *Six phase soil heating for enhanced removal of contaminants: volatile organic compounds in non-arid soils integrated demonstration, Savannah River Site*, PNL-10184, US-406, Prepared by Battelle Pacific Northwest Laboratory for Office of Technology Development, U.S. Department of Energy, Richland, Washington, 1994

Ghiselli L., *Panoramica sulle principali tecnologie di bonifica*, in Ordine dei Geologi della Lombardia, *Corso base sulla bonifica dei siti contaminati*, Milano, 2009

Gorla M., *Pozzi per acqua – Manuale tecnico di programmazione*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2010

Gorla M., *Determinazione del grado di vulnerabilità e inquinamento delle risorse idriche sotterranee*, Corso di formazione per Dario Flaccovio Editore, Milano, 2010

Gorla M., *Siti Contaminati*, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2012

Gruppo Nazionale Difesa Catastrofi Idrogeologiche GNDCl, *Guida al disinquinamento degli acquiferi – Volume 1*, Pubblicazione n. 1027, Pitagora, Bologna, 1994

Hazen T., Fliermans C., Enzien M., Dougherty J., Lomnabrd K., *In situ methanotrophic bioremediation using horizontal well technology*, in AA. VV., *IGT symposium on gas, oil and environmental technology*, Colorado Springs, Colorado, 1994

Hoepfel R.E., Kittel J.A., Goetz F.E., Hinchey R.E., Abbott J.E., *Bioslurping technology application at naval middle distilled fuel remediation sites*, in AA. VV., *In-situ and on-site bioreclamation – Proceedings of the 3rd International Symposium*, San Diego, California, 1995

ICPE, *Surveillance de la qualité des eaux souterraines – ICPE et sites pollués*, Mai 2018

IRET-CNR, *Le piante per le fitotecnologie – Raccolta di schede sulla botanica e le potenzialità di alcune specie utilizzate per fitorimediazione, fitodepurazione e fitocontenimento*, REMIDA, web site

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale ISPRA, *Matrice di screening delle tecnologie di bonifica*, 2018

Istituto Superiore di Sanità ISS, *Banca dati ISS INAIL* revisione marzo 2018

ITRC (Interstate Technology and Regulatory Cooperation), *Decision tree- Phytoremediation*, 1999

ITRC (Interstate Technology and Regulatory Cooperation), *Phyto-technology Technical and Regulatory Guidance document*, 2001

Johnson R.L., Johnson P.C., McWhorter D.B., Hinchey R.E., Goodman I., *An overview of in situ air sparging*, Ground Water Monitoring and Remediation, vol. 13, n. 4, Westerville, Ohio, 1993

Jury W.A., Winer A.M., Spencer W.F., Focht D.D., *Transport and transformations of organic chemicals in the soil-air-water ecosystem*, Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, vol. 99, 1987

Kittle J.A., Hinchey R.E., Hoepple R.E., Miller R., *Bioslurping-vacuum-enhanced free-product recovery coupled with bioventing: a case study*, in AA. VV., *Petroleum hydrocarbons and organic chemicals in groundwater: protection, detection and remediation configuration*, Houston, Texas, 1994

Lageman R.C., *Electro reclamation: a new technique for in situ and on/off soil remediation*, Pollution Prevention, vol. 1, n. 1, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1991

Marley M.C., Hall R.L., *Control of arsenic in ground water using sparging technologies*, in AA. VV., *Proceedings of the first international symposium on in-situ air sparging for site remediation, 24-25 october 1996, Las Vegas, Nevada*, INET, Potomac, Maryland, 1996

Masten S.J., Davies S.H.R., *Efficacy of in-situ ozonation for the remediation of PAH contaminated soils*, Journal of Contamination Hydrology, vol. 28, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1997

Miller R.N., Downey D.C., Carmen V.A., Hinchey R.E., Leeson A., *A summary of bioventing performance at multiple air force sites*, in AA. VV., *Petroleum hydrocarbons and organic chemicals in ground water: prevention, detection and restoration, 10-12 november 1993*, Houston, Texas, API and NGWA, Washington D.C., 1993

Ministère de la Transition écologique et solidaire, *Surveillance de la qualité des eaux souterraines appliquée aux ICPE et sites pollués*, Mai 2018

Peters R.W., Enzine M.V., Bouillard J.X., Frank J.R., Srivastava V.J., Kilbane J., Hayes T., *Nonaqueous-phase-liquid contaminated soil/groundwater remediation using foams*, in AA. VV., *In situ remediation: scientific basis for current and future technologies – Proceedings of the 33rd Hanford Symposium on health and the environment, 7-11 november 1994, Pasco*, Washington, Battelle Press, Columbus, Ohio, 1994

P. Berbenni, C. Di Toro, *Stabilizzazione/solidificazione di terreni contaminate contenuto nella pubblicazione degli interventi nell'ambito del "57° Corso di aggiornamento in ingegneria sanitaria-ambientale – Siti Contaminati: Tecnologie di risanamento"* Milano, 17-21 febbraio 2003.

Prosperi G.A., *Tecnologie per la bonifica di siti contaminati: fondamenti teorici ed applicazioni*, Ordine Regionale dei Geologi di Sicilia VI Convegno Regionale, Siracusa, 11 aprile 2014

Provincia di Milano, *Linee guida per il monitoraggio delle barriere idrauliche*, Direzione Centrale Ambiente, Milano, 2003

Provincia di Milano, *Linee guida per la verifica ed il controllo delle barriere impermeabili per la messa in sicurezza di siti contaminati*, Direzione Centrale Ambiente, Milano, 2003

Provincia di Milano, *Linee guida per il controllo e il monitoraggio di interventi di bonifica in situ*, Direzione Centrale Ambiente, Milano, 2004

Raskin, I., Smith, R.D., Salt, D.E., *Phytoremediation of metals: using plants to remove pollutants from the environment*, Curr. Opin. Biotechnol. 8, 221–226, 1997

Roots D.S., *In situ flushing*, Technology Evaluation Report TE-97-02, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, Pennsylvania, 1997

Runnels D.D., Lasron J.L., Laboratory study of electromigration and a possible field technique for the removal of contaminants from groundwater, Groundwater Monitoring Review, vol. 7, n. 3, Columbus, Ohio, 1986

Sbaffoni S., *Bonifica dei siti contaminati*, SAPIENZA - Università di Roma, 11-12 febbraio 2010

Schnoor, *Phytoremediation. Technology Evaluation Report*, GWRTAC-E-SERIES TE-98-01, 1997

Schnoor J.L., *Phytoremediation. Technology Evaluation Report TE-98-01*, Prepared for Ground-Water Remediation Technology Analysis Center, 1998

Schnoor, *Phytoremediation of soil and groundwater. Technology Evaluation Report*, GWRTACE- SERIES TE-02-01, 2002

Shimp J.F., Tracey J.C., Davis L.C., Lee E., Huang W., Erickson L.E., and Schnoor J.L., *Beneficial Effects of Plants in the Remediation of Soil and Groundwater Contaminated with Organic Materials*, Critical Review in Environmental Science & Technology, 23: 41–77, 1993

Siegrist R.L., Lowe K.S., Muroch L.C., Case T., Pickering D.A., *In situ oxidation by fracture emplaced reactive solids*, Journal of Environmental Engineering, vol. 125, 1999

Thomas A.O., Chiampo A., Norris G., *Zero-valent metals: a new methodology for the remediation of halogenated hydrocarbons – A review of the methodology and a practical application in the UK*, in AA. VV., *Protezione e recupero delle acque sotterranee e dei terreni inquinati*, I quaderni di Acque Sotterranee, n. 4, Geo-Graph, Segrate, 1996

Tunesi S. e Napoleoni Q., *Tecnologie di bonifica dei siti inquinati*, I libri di Ambiente e Sicurezza, Il Sole 24 Ore, 2003

U.S. Army Corps of Engineers USACE, *Multi-phase extraction*, Engineer Manual 1110-1-4010, Washington D.C., 1999

U.S. Army Corps of Engineers USACE, *Precipitation/coagulation/flocculation*, Engineer Manual EM 1110-1-4012, Washington D.C., 2001

U.S. Army Corps of Engineers USACE, *Soil vapor extraction and bioventing*, Engineer Manual 1110-1-4001, Washington D.C., 2002

U.S. Army Corps of Engineers USACE, *In-situ air sparging*, Engineer Manual 1110-1-4005, Washington D.C., 2008

U.S. Army Corps of Engineers USACE, *Design: In-situ thermal remediation*, Engineer Manual 1110-1-4015, Washington D.C., 2009

U.S. EPA, *Permeable reactive barrier technologies for contaminants remediation*, EPA/600/R-98/125, Office of Research and Development, Washington D.C., 1998

Van Cauwenberghe L., *Electrokinetics*, Technology Overview Report TO-97-03, Ground Water Remediation Technology Analysis Center, Pittsburgh, Pennsylvania, 1997

Wackett L.P., Brusseau G.A., Householder S.R., Hanson R.S., *Survey of microbial oxygenases: trichloroethylene degradation by propane-oxidizing bacteria*, Applied and Environmental Microbiology, vol. 55, Washington D.C., 1989

Wenzel W.W., Lombi E., Adriano D.C., *Biogeochemical processes in the rhizosphere: role in phytoremediation of metal-polluted soils*, In: Prasad, M.N.V. and Hagemeyer, J. eds. *Heavy metal stress in plants - From molecules to ecosystems*, Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1999

Wilson J.L, *Double cell hydraulic containment of pollutant plumes*, in AA. VV., *Aquifer restoration and groundwater monitoring, fourth national symposium, 23-25 may 1984, Columbus, Ohio*, Natural Water Well Association NMMA, Dublin, Ohio, 1984

Wilson J.T., Wilson B.H., *Biotransformation of trichloroethylene in soil*, Applied and Environmental microbiology, vol. 49, Washington D.C., 1985

Yin Y., Allen H.E., *In situ chemical treatment*, Technology Evaluation Report TE-99-01, Ground Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, Pennsylvania, 1999

Normativa di riferimento considerata

Decreto Legislativo 03 Aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale" e s.m.i.;

Decreto Legislativo 16 Gennaio 2008, n. 4 "Ulteriori disposizioni correttive ed integrative del decreto legislativo 3 Aprile 2006, n. 152, recante norme in materia ambientale";

D.M. 12 Febbraio 2015, n. 31 "Regolamento recante criteri semplificati per la caratterizzazione, messa in sicurezza e bonifica dei punti vendita carburanti, ai sensi dell'articolo 252, comma 4, del decreto legislativo 3 Aprile 2006, n. 152".

Siti web consultati per la redazione del Vademecum

Banca dati ISS-INAIL, documento di supporto: http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/suolo-e-territorio/siti-contaminati/banca_dati_documento_supporto_marzo_2018.pdf

EPA Contaminated Site Clean-up Information: <https://clu-in.org/techfocus/>

ISS Banca Dati Bonifiche: <https://old.iss.it/site/BancaDatiBonifiche/>

ISS Banca Dati Cancerogeni: <https://old.iss.it/site/BancaDatiCancerogeni/>

ISPRA Sistema Nazionale per la Protezione dell' Ambiente, Analisi di Rischio dei siti contaminati: <http://www.isprambiente.gov.it/it/temi/suolo-e-territorio/siti-contaminati/analisi-di-rischio>



rewind

remediation & waste into development