

**Allegato di Piano 7 – Bonifiche: aspetti tecnici e progettuali**

<b>SOMMARIO</b>
-----------------

<b>PREMESSA .....</b>	<b>1</b>
<b>1. CARATTERIZZAZIONE DEI SITI INQUINATI: CRITERI GENERALI .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Ubicazione dei punti di campionamento.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Selezione delle sostanze inquinanti da ricercare.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Modalità di esecuzione dei sondaggi, dei piezometri e delle trincee esplorative.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Campionamento ed analisi dei terreni e delle acque sotterranee .....</b>	<b>2</b>
1.4.1 Campionamento delle matrici ambientali.....	2
1.4.2 Analisi chimiche.....	2
<b>2. ANALISI DI RISCHIO.....</b>	<b>3</b>
<b>3. BONIFICA DEI SITI CONTAMINATI .....</b>	<b>3</b>
<b>3.1 Criteri metodologici per la scelta della migliore tecnologia di bonifica da adottare.....</b>	<b>3</b>
3.1.1 Aspetti metodologici.....	3
3.1.2 Analisi di screening (valutazione).....	5
3.1.3 Valutazione di dettaglio delle opzioni prescelte .....	6
3.1.4 Analisi costi benefici .....	7
<b>3.2 Tecnologie di bonifica/messa in sicurezza: breve analisi .....</b>	<b>8</b>
3.2.1 Interventi di bonifica ex-situ.....	8
TRATTAMENTI FISICI .....	9
TRATTAMENTI CHIMICO-FISICI E TERMICI .....	10
<i>Inertizzazione chimica .....</i>	10
<i>Dealogenazione chimica .....</i>	10
<i>Soil washing .....</i>	10
<i>Lavaggio con solvente.....</i>	11
<i>Trattamento con carbone Granulato Attivo .....</i>	11
<i>Ossidazione a UV.....</i>	12
<i>Desorbimento termico.....</i>	13
<i>Incenerimento .....</i>	13
<i>Pirolisi.....</i>	13
TRATTAMENTI BIOLOGICI .....	14
<i>Biopile e Landfarming .....</i>	14
<i>Miscelazione con ammendanti .....</i>	14
3.2.2 Interventi di bonifica in situ.....	15
TRATTAMENTI CHIMICO-FISICI .....	16
<i>Soil Vapor Extraction (SVE).....</i>	16
<i>Ossidazione chimica (ISCO) .....</i>	17
<i>Soil flushing.....</i>	17
TRATTAMENTI BIOLOGICI .....	18
<i>Bioventing .....</i>	18
<i>Air Sparging .....</i>	19
<i>Bioslurping .....</i>	20
<i>Oxygen Release Compound .....</i>	21
FITOTRATTAMENTI .....	22
<i>Fitostabilizzazione .....</i>	23
<i>Fitoestrazione.....</i>	23
<i>Complessazione.....</i>	23
<i>Rizofiltrazione.....</i>	23
3.2.3 Interventi di bonifica con misure di sicurezza (d'urgenza, operativa e permanente) .....	23
MESSA IN SICUREZZA D'URGENZA .....	24
MESSA IN SICUREZZA OPERATIVA ( <b>MISO</b> ) .....	24

MESSA IN SICUREZZA PERMANENTE ( <b>MISP</b> ) .....	24
<i>Generalità sulle tecniche di isolamento delle discariche</i> .....	25
<i>Sistemi di isolamento superficiale</i> .....	25
<i>Cinturazioni perimetrali (barriera fisico)</i> .....	26
<i>Pump and Treat</i> .....	28
3.2.4 Attenuazione Naturale Controllata (ANC).....	29

\* § \*

## PREMESSA

Nel dettaglio il presente documento è relativo alla descrizione dell'insieme degli aspetti tecnici e progettuali che concorrono nella gestione dei siti contaminati ai sensi della normativa vigente. Il documento contiene una serie di nozioni tecniche relative a:

- caratterizzazione dei siti contaminati;
- applicazione dell'analisi di rischio;
- bonifica dei siti inquinati

### 1. CARATTERIZZAZIONE DEI SITI INQUINATI: CRITERI GENERALI

In tale capitolo si intende fornire un contributo metodologico aggiuntivo rispetto a quanto già previsto dagli allegati tecnici del Titolo V, Parte Quarta del d.lgs. n. 152/2006 smi. Per brevità si ribadisce, comunque, la necessità di ricorrere e rispettare quanto già definito dalla norma vigente sul territorio nazionale e quello regionale.

#### 1.1 Ubicazione dei punti di campionamento

Come previsto dall'Allegato 2 al Titolo V, Parte Quarta del d.lgs. n. 152/2006 smi, per ogni matrice ambientale (suolo, sottosuolo, acque sotterranee) è possibile percorrere due strategie per l'ubicazione dei punti di sondaggio e prelievo:

- a) *ubicazione ragionata*;
- b) *ubicazione sistematica*

Come noto, il d.lgs. n. 152/2006 smi non prevede un numero minimo di punti di campionamento in relazione alle dimensioni del sito da sottoporre ad indagini di caratterizzazione ambientale.

L'assenza di un numero minimo di punti di campionamento suggerisce di attenersi alle disposizioni previste dall'allegato 2 del previgente d.m. n. 471/1999 (Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ai sensi dell'articolo 17 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22, e successive modificazioni e integrazioni) che di seguito si riportano.

**Tabella 1. Numero minimo di punti di indagine in relazione alla dimensione del sito (Allegato 2, d.m. n. 471/1999) – SUOLO E SOTTOSUOLO**

Superficie	n. punti di indagine
< 10.000 mq	Almeno 5 punti
10.000 < A < 50.000 mq	Da 5 a 15 punti
50.000 < A < 250.000 mq	Da 15 a 60 punti
250.000 < A < 500.000 mq	Da 60 a 120 punti
> 500.000 mq	Almeno 2 punti ogni 10.000 mq

**Tabella 2. Numero minimo di punti di indagine in relazione alla dimensione del sito (Allegato 2, d.m. n. 471/1999) – ACQUE SOTTERRANEE**

Superficie	n. punti di indagine
> 50.000 mq	Almeno 4 punti
50.000 < A < 100.000 mq	Almeno 6 punti
100.000 < A < 250.000 mq	Almeno 8 punti
> 250.000 mq	Almeno 1 punto ogni 25.000 mq

## **1.2 Selezione delle sostanze inquinanti da ricercare**

La selezione dei parametri dovrà avvenire essenzialmente sulla base seguente processo:

- ü esame del ciclo produttivo e/o dei dati storici del sito;
- ü esame dello stato fisico, della stabilità e delle caratteristiche di reale pericolosità delle sostanze individuate;

In linea generale si suggerisce di **attenersi alle disposizioni previste dal documento “Linee guida per la selezione di elementi e composti da determinare analiticamente nella caratterizzazione dei siti contaminati”** (Provincia di Milano, Università degli Studi di Milano – Dipartimento di Scienze della Terra ‘A. Desio’, 2003) e, in particolare, all’appendice 5<sup>1</sup> per quanto riguarda la ricerca di contaminanti nella matrice ambientale suolo e sottosuolo e all’appendice 6<sup>2</sup> per la ricerca di contaminanti nella matrice ambientale acque sotterranee.

## **1.3 Modalità di esecuzione dei sondaggi, dei piezometri e delle trincee esplorative**

In via generale le perforazioni e gli scavi finalizzati a:

- ü ricostruire il profilo stratigrafico del sito mediante osservazione completa dei litotipi attraversati;
- ü effettuare il prelievo di campioni di terreno/acque sotterranee per le determinazioni chimiche analitiche;
- ü effettuare rilievi e misure e campionamenti sulle falde acquifere.

In linea di principio si ritiene che le perforazioni o gli scavi debbano essere dirette e seguite da un tecnico specializzato esperto in sondaggi ambientali, al quale spetta l’incarico di impostare il lavoro degli operai di macchina, compilare la stratigrafia, prelevare i campioni di suolo e di acque.

Da un punto di vista strettamente operativo i sondaggi, i piezometri e le trincee esplorative devono essere eseguite secondo le buone norme tecniche, nell’ottica di mantenere inalterata la matrice ambientale oggetto di campionamento. Per una trattazione dettagliata delle modalità operative attraverso le quali eseguire tale tipologia di indagini si rimanda al documento “Manuale indagini ambientali nei siti contaminati” (APAT – Manuali e linee guida n. 46/2006).

## **1.4 Campionamento ed analisi dei terreni e delle acque sotterranee**

### **1.4.1 Campionamento delle matrici ambientali**

Per quel che riguarda il campionamento dei terreni e delle acque sotterranee è necessario seguire le prescrizioni presenti nell’allegato 2 al titolo V del d.lgs. n. 152/2006 smi, al quale si rimanda per i dettagli tecnici. Si rimanda, inoltre, al documento “Manuale indagini ambientali nei siti contaminati” (APAT – Manuali e linee guida n. 46/2006) per una trattazione dettagliata delle modalità di campionamento.

### **1.4.2 Analisi chimiche**

In accordo a quanto previsto dall’Allegato 2 alla Parte Quarta, Titolo V del d.lgs. n. 152/2006 smi, i campioni di terreno da portare in laboratorio dovranno essere privi della frazione maggiore di 2 cm (da scartare in campo) e le determinazioni analitiche in laboratorio dovranno essere condotte sull’aliquota di granulometria inferiore a 2 mm. La concentrazione del campione dovrà essere determinata riferendosi alla totalità dei materiali secchi, comprensiva anche dello scheletro.

Sia per le analisi sui terreni che sulle acque, le analisi chimiche devono essere condotte adottando metodologie ufficialmente riconosciute, tali da garantire l’ottenimento di valori 10 volte inferiori rispetto ai valori di concentrazione limite.

<sup>1</sup> “Esempio di analiti da ricercare nel suolo e nel sottosuolo sulla base del D.M. 471/99 e della normativa IPPC”

<sup>2</sup> “Esempio di analiti da ricercare nelle acque sotterranee sulla base del d.m: 471/99 e della normativa IPPC”

## 2. ANALISI DI RISCHIO

A seguito della caratterizzazione ambientale di un sito e del confronto dei risultati analitici con le Concentrazioni Soglia di Contaminazione stabilite in allegato 5 alla parte IV del titolo V del DLgs 152/2006, la normativa prevede l'applicazione della procedura di Analisi di Rischio.

La normativa vigente individua, infatti, la procedura di Analisi di Rischio come livello progettuale successivo al Piano di Caratterizzazione Ambientale, nel caso in cui vengano rilevati dei superamenti dei valori di Concentrazione Soglia di Contaminazione (CSC) indicati in tabella 1 (suolo e sottosuolo) e tabella 2 (acque sotterranee) dell'allegato 5 alla parte IV, titolo V del D. Lgs. 152/2006. Mediante l'applicazione dell'analisi di rischio richiesta dalla normativa vigente è infatti possibile derivare la Concentrazione Soglia di Rischio (CSR) per ciascun contaminante per il quale è stato registrato un superamento del valore tabellare (CSC) in fase di caratterizzazione del sito. Le CSR sono, quindi, da intendersi come nuovi limiti di accettabilità per il sito in esame a carattere sito specifico ed a garanzia della tutela della salute umana.

Allo stato di fatto i documenti di riferimento per l'elaborazione dell'analisi di rischio, ai quali è strettamente raccomandato il ricorso, sono i seguenti:

- Allegato 1 (*Criteri generali per l'analisi di rischio sanitario ambientale sito-specifica*), Parte Quarta, Titolo V del d.lgs. n. 152/2006 smi;
- “Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi di rischio assoluta di rischio ai siti contaminati”<sup>3</sup> (rev. 02) [APAT, 2008] o “Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi di rischio assoluta di rischio alle discariche”<sup>4</sup> (rev. 0) [APAT, 2005] o “Appendice V – Applicazione dell'analisi di rischio ai punti vendita carburanti”<sup>5</sup> (ISPRA, 2009);

## 3. BONIFICA DEI SITI CONTAMINATI

### 3.1 *Criteri metodologici per la scelta della migliore tecnologia di bonifica da adottare*

#### 3.1.1 *Aspetti metodologici*

L'implementazione di una tecnologia di bonifica deve tener conto, oltre che della coerenza dell'intervento con le caratteristiche sito specifiche, anche degli effetti che l'intervento stesso può determinare in termini di impatto ambientale. In questo senso – in accordo con quanto previsto dall'allegato 3 al Titolo V, Parte Quarta del d.lgs. n. 152/2006 smi – si deve far ricorso alle BAT (Best Available Technologies).

La scelta della migliore tra le possibili tipologie di intervento descritte nei paragrafi precedenti applicabile in un determinato caso di inquinamento di un sito comporta il bilanciamento di vari interessi in presenza di numerose variabili, sia di ordine generale che soprattutto sito-specifiche, quali in particolare:

- 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;
- l'entità dei costi di progettazione, realizzazione, gestione monitoraggio, etc. 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”, contenuta nella Direttiva 96/61/CE, recepita nel nostro ordinamento, che per la prevenzione ed il controllo integrati dell'inquinamento di talune categorie di impianti considera tale “la più efficiente ed avanzata fase di sviluppo di attività e relativi metodi di esercizio indicanti l'idoneità pratica di determinate tecniche a costituire, in linea di massima, la

<sup>3</sup> nel caso di un sito contaminato generico (area industriale, area commerciale etc)

<sup>4</sup> nel caso di iter di bonifica relativo a discariche

<sup>5</sup> nel caso di iter di bonifica relativo a punti vendita carburante

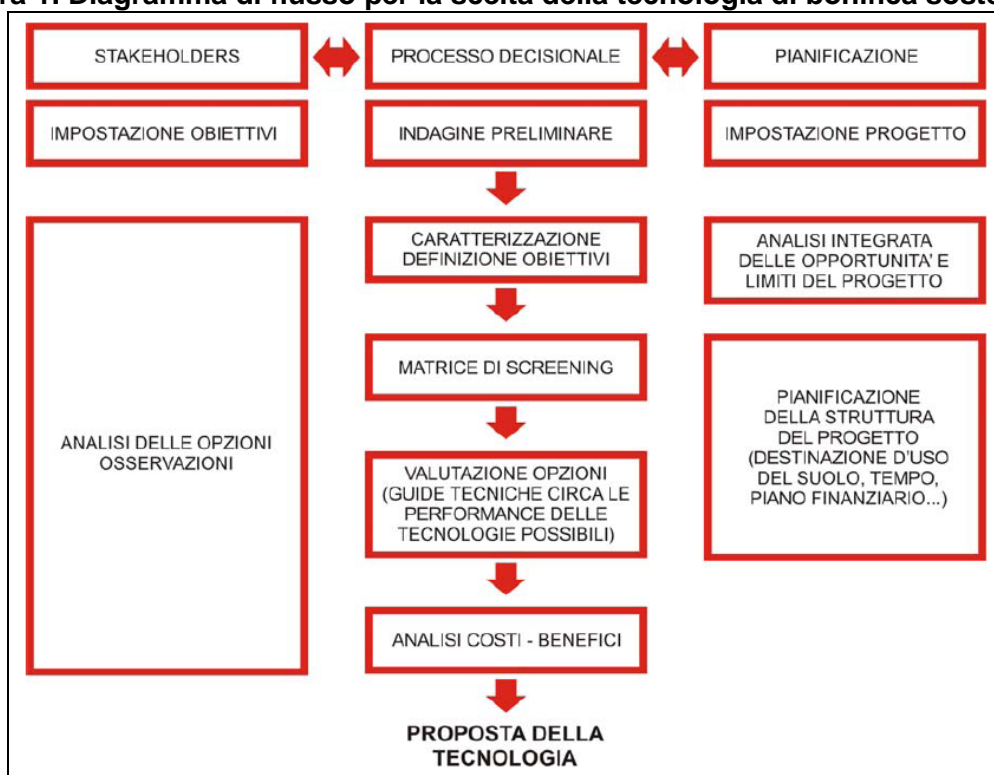
base dei valori limite di emissione intesi ad evitare oppure, ove ciò si riveli impossibile, a ridurre in modo generale le emissioni e l'impatto sull'ambiente nel suo complesso". E specifica che si intende per

- «tecniche», sia le tecniche impiegate sia le modalità di progettazione, costruzione, manutenzione, esercizio e chiusura dell'impianto;
- «disponibili», 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 cui si tratta, purché il gestore possa avervi accesso a condizioni ragionevoli;
- «migliori», le tecniche più efficaci per ottenere un elevato livello di protezione dell'ambiente nel suo complesso.

Strumenti di supporto nel processo decisionale che porta alla scelta sito-specifica della "migliore tecnica disponibile" da adottare sono costituiti dalle metodiche di analisi costi - efficacia e/o costi – benefici.

Un buon processo decisionale deve prendere in considerazione a) la futura destinazione d'uso del sito e la sua situazione ambientale; b) considerare in maniera olistica lo sviluppo sostenibile e la gestione del rischio sul sito; c) i pareri derivanti dalla partecipazione degli stakeholders; e deve essere robusto, consistente, trasparente, dinamico e pragmatico.

**Figura 1. Diagramma di flusso per la scelta della tecnologia di bonifica sostenibile**



Fonte: Piano Regionale delle Bonifiche della Regione Puglia

Circa la matrice di screening, di seguito sarà riportata la matrice suggerita dall'ISPRA per i terreni e le acque sotterranee. Per l'analisi dei costi – benefici e della fattibilità economica, esistono una serie di Decision Support Tools quali:

- Environmental Risk Assessment (ERA)
- Multi-Criteria Analysis (MCA): Desyre, Boss, Electre
- Multi-attribute techniques (MAT)
- Cost-Benefit Analysis (CBA): Wilma

- Cost Effectiveness Analysis (CEA)
- Life Cycle Assessment (LCA): Rec, ABC
- SRT (Sustainable remediation Tool)

In definitiva gli step importanti di tale procedura e i supporti ad essi, possono essere riassunti in tre fasi:

- Analisi di Screening (Matrice);
- Valutazione dettagliata delle diverse opzioni (Guide tecniche delle performance delle tecnologie a disposizione);
- Analisi costi – benefici (Decision Support Tools), includendo anche i costi ambientali

Nei seguenti paragrafi si vanno a descrivere gli step da seguire nella valutazione di una tecnologia di bonifica che potranno essere meglio dettagliati nei successivi paragrafi.

### **3.1.2 *Analisi di screening (valutazione)***

Le procedure per l'applicazione delle tecniche di bonifica da adottare sono state formulate dall'ISPRA congiuntamente all'Istituto Superiore di Sanità (ISS), nel corso dell'attività istruttoria per i Siti di Interesse Nazionale (SIN), più specificatamente per il SIN di Porto Marghera e sono state prese a riferimento dal Ministero anche per altri siti d'interesse nazionale.

In tale ambito ISPRA ha realizzato una matrice di screening a supporto delle decisioni relative alle tecnologie di bonifica da adottarsi. Questa matrice è ispirata a quella sviluppata dalla Federal Remediation Technologies Roundtable. La matrice prodotta risulta implementata per alcuni contaminanti, particolarmente significativi a livello italiano. La matrice costituisce uno strumento di supporto all'individuazione delle tecnologie di bonifica applicabili in funzione delle caratteristiche generali della contaminazione rinvenuta nel sito. In fase di elaborazione di un progetto di bonifica quindi, si suggerisce di partire dalla matrice di seguito riportata, al fine di individuare le potenziali tecnologie applicabili. La matrice indica 38 tecnologie in situ e ex situ per la bonifica del suolo e delle acque sotterranee e prende in considerazione variabili quali tempi, necessità di monitoraggi a lungo termine, limiti ed applicabilità. La matrice, di seguito riportata, è rinvenibile nel sito web di ISPRA, al seguente percorso.

[http://www.apat.gov.it/site/files/Suolo\\_Territorio/Matrice\\_tecnologie\\_ISPRA\\_rev03\\_02\\_2010.pdf](http://www.apat.gov.it/site/files/Suolo_Territorio/Matrice_tecnologie_ISPRA_rev03_02_2010.pdf)



Figura 2. Matrice di valutazione delle tecnologie di bonifica per suolo/sottosuolo ISPRA

	Composti Inorganici										Composti Organici										Tempi	Necessità di manutenzione/ monitoraggio a lungo termine	Impatti a breve e lungo termine sulle risorse naturali	Applicabilità e limiti	Casi Studio		
	Arsenico	Cadmio	Cromo	Piombo	Mercurio	Zinco	Altri metalli e composti inorganici	Idrocarburi Aromatici	Idrocarburi Policiclici Aromatici	Idrocarburi Alifatici clorurati cancerogeni	Idrocarburi Alifatici clorurati non cancer.	Idrocarburi Alifatici alogenati cancer.	Nitrobenzeni	Clorobenzeni	Fenoli non clorurati	Fenoli clorurati	Ammine aromatiche	Fitofarmaci	Diossine e furani								
<b>Suolo, sedimenti</b>																											
<b>- trattamento biologico in situ</b>																											
- Bioventing	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html	
- Bioremediation	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Phytoremediation	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>- trattamento chimico-fisico in situ</b>																											
- Ossidazione chimica	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Ossidazione elettrochimica	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Separazione elettrocinetica	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Soil Flushing	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Soil Vapour Extraction	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Solidificazione/Stabilizzazione	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>- trattamento termico in situ</b>																											
- Trattamento termico	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>- trattamento biologico ex situ (con escavazione)</b>																											
- Biopile	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Compostaggio	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Landfarming	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Bioreattori	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>- trattamento chimico-fisico ex situ (con escavazione)</b>																											
- Estrazione chimica	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Ossidazione/riduzione chimica	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Soil Washing	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Solidificazione/Stabilizzazione	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	pdf
<b>- trattamento termico ex situ (con escavazione)</b>																											
- Incenerimento/Pirolisi	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Desorbimento termico	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>- altro</b>																											
- Copertura superficiale (Capping)	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Scavo e smaltimento in discarica	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>Acque sotterranee, acque superficiali</b>																											
<b>- trattamento biologico in situ</b>																											
- Bioremediation	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Attenuazione naturale monitorata	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Phytoremediation	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>- trattamento chimico-fisico in situ</b>																											
- Air Sparging	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Ossidazione chimica	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Ossidazione elettrochimica	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- In-Well Air Stripping	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Dual/Multi Phase Extraction	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Barriere permeabili reattive	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>- trattamento biologico ex situ</b>																											
- Bioreattori	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Lagunaggi	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
<b>- trattamento chimico-fisico ex situ (con estrazione delle acque e conferimento in idoneo impianto)</b>																											
- Processi di ossidazione avanzata	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Air Stripping	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Carboni attivi	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Pump and treat	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html
- Scambio ionico	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	🟡	txt	html

Giudizio		🟢 = Buono	🟡 = Medio	🔴 = Basso
<b>Contaminanti trattati</b>		Efficienza dimostrata	Limitata efficienza	Efficienza non dimostrata
<b>Tempi</b>	<b>suolo in situ</b>	Meno di 1 anno	Da 1 a 3 anni	Oltre 3 anni
	<b>suolo ex situ</b>	Meno di 0,5 anno	Da 0,5 a 1 anno	Oltre 1 anno
	<b>acque</b>	Meno di 3 anni	Da 3 a 10 anni	Oltre 10 anni
<b>Necessità di manutenzione/ monitoraggio a lungo termine</b>		Necessità di un basso grado di manutenzione	Necessità di un medio grado di manutenzione	Necessità di un alto grado di manutenzione
<b>Impatti a breve e lungo termine sulle risorse naturali</b>		Bassi impatti sulle risorse naturali/Alta sostenibilità	Medi impatti sulle risorse naturali/Medi sostenibilità	Alti impatti sulle risorse naturali/Bassa sostenibilità

### 3.1.3 Valutazione di dettaglio delle opzioni prescelte

In funzione delle caratteristiche della contaminazione, delle caratteristiche geologiche del sito e degli obiettivi da ottenersi, sarà possibile selezionare – tra le tecnologie sopra riportate – quelle tecnicamente impiegabili per il risanamento del sito.

A tal punto, sarà necessario – scendendo nel dettaglio – valutare tutti gli aspetti che potranno suggerire la maggiore o minore idoneità di una tecnologia per il risanamento del sito.

### 3.1.4 *Analisi costi benefici*

Al fine di ottimizzare l'analisi dei costi-benefici finalizzata all'individuazione di una tecnologia di bonifica si ritiene fondamentale implementare la stessa con la valutazione delle emissioni di gas serra, consumo di risorse naturali o di energia che la tecnologia può determinare.

Considerare questi aspetti nella selezione della tecnologia potrebbe migliorare le prestazioni ambientali e potrebbe assicurare processi sostenibili capaci – in ogni caso – di perseguire gli obiettivi imposti dal d.lgs. n. 152/2006 s.m.i. La monetizzazione di aspetti quali l'emissione di CO<sub>2</sub>, consumo di energia etc, rappresenta la strada per l'applicazione di metodiche di analisi costi-benefici complete e capaci di osservare tutti gli aspetti (non solo economici) che entrano in gioco nell'esecuzione di un lavoro di bonifica.

Come peraltro suggerito dal Piano Regionale delle Bonifiche della Regione Puglia si suggerisce il ricorso – dove possibile nella valutazione dei costi-benefici – a strumenti di calcolo capaci di raffrontare gli aspetti economici, ambientali e sociali associati alle diverse tecnologie di bonifica.

Si segnala, in tal senso, lo strumento di calcolo sviluppato da US AFCEE (Air Force Center for Engineering and the Environment). Lo strumento (SRT™ - Sustainable Remediation Tool) consente di effettuare una dettagliata analisi benefici-costi al fine di individuare la migliore tecnologia da applicarsi al fine di:

- comparare gli approcci sulla base di metriche sostenibili;
- fornire dei metodi per valutare l'ottimizzazione di una tecnologia di bonifica.

Allo stato attuale il software è in grado di valutare la sostenibilità di diverse tecnologie di bonifica, tra le quali si sottolineano le seguenti:

- scavo e smaltimento/trattamento in discarica;
- Soil Vapor Extraction (SVE)
- Pump and treat;
- Bioremediation
- Trattamenti termici;
- Ossidazione chimica in situ (ISCO);
- Barriera permeabile reattiva (PRB)
- Attenuazione Naturale Controllata

Il software prende in considerazione, monetizzandoli, i seguenti aspetti intimamente connessi con la realizzazione di un intervento di bonifica:

- emissioni di CO<sub>2</sub>;
- emissioni di NO<sub>x</sub>;
- emissioni di SO<sub>x</sub>;
- PM<sub>10</sub>;
- energia totale consumata;
- costi della tecnologia
- sicurezza dei lavoratori.

Il software, costituito da un applicativo funzionante su piattaforma excel, è liberamente scaricabile dal sito  
<http://www.afcee.af.mil/resources/technologytransfer/programsandinitiatives/sustainableremediation/srt/index.asp>.

Di seguito si riporta un'immagine della maschera di interfaccia del software.

Figura 3. Matrice di valutazione delle tecnologie di bonifica per suolo/sottosuolo ISPRA

**SUSTAINABLE REMEDIATION TOOL**

**1. Enter Project Information.**

Site Name:

Location:

Site/Project Phase for Calculation:

Tier 1  Tier 2

**Fuel Costs**

Gasoline	\$2.00	\$/gallon
Diesel	\$2.00	\$/gallon
Electricity	\$0.10	\$/kWh
Natural gas	\$11.00	\$/mcf


**Instructions:**

- = Enter your data here. Click button to the right of the cell for help.
- = Use this default value or override with **your own**.
- = Calculated value. You cannot change this.

For help, click on the square gray buttons located throughout the SRT.

**New users:** Fill in the boxes as indicated above. Choose Soil or Groundwater. Click buttons on Recommended Flow to proceed through the screens.

**Advanced users:** Follow Recommended Flow, or click on tabs to navigate.



**2. Choose Environmental Media**

**Soil...**

Recommended flow:

```

graph LR
    Man --> SoilInput[Soil Input]
    SoilInput --> Excavation
    SoilInput --> SVE
    SoilInput --> ThermalTreatment[Thermal Treatment]
    Excavation --> Output
    SVE --> Output
    ThermalTreatment --> Output
  
```

**...or Groundwater.**

Recommended flow:

```

graph LR
    Man --> GWInput[GW Input]
    GWInput --> PumpAndTreat[Pump & Treat]
    GWInput --> EnhancedBioremediation[Enhanced Bioremediation]
    GWInput --> InSituChemOxidation[In Situ Chem. Oxidation (ISCO)]
    GWInput --> PermeableReactiveBarrier[Permeable Reactive Barrier (PRB)]
    GWInput --> MNA_LTM[MNA / LTM]
    PumpAndTreat --> Output
    EnhancedBioremediation --> Output
    InSituChemOxidation --> Output
    PermeableReactiveBarrier --> Output
    MNA_LTM --> Output
  
```

Copyright AFCEE 2009. All rights reserved.  
DRAFT 01 Oct 2009

Fonte: US AFCEE, in [www.afcee.af.mil](http://www.afcee.af.mil)

Il software, oltre a visualizzare il risultato numerico di output, è in grado di fornire gli strumenti per l'interpretazione dei risultati.

### 3.2 Tecnologie di bonifica/messa in sicurezza: breve analisi

Nel presente paragrafo si riporta una sommaria trattazione delle tecnologie di bonifica più comunemente utilizzate a livello nazionale ed internazionale.

Lo schema proposto illustra, in termini qualitativi, alcune delle caratteristiche fondamentali di ogni processo individuato quali tipologie di sostanze residue prodotte, tempistica di bonifica, costi, modalità di trattamento. È, inoltre, indicata la tipologia di contaminanti che può essere rimossa mediante ciascun trattamento oltre che le tipologie di terreno a cui ciascun intervento può essere applicato.

#### 3.2.1 Interventi di bonifica ex-situ

Come intervento di bonifica ex situ convenzionale si intende la sequenza di operazioni di rimozione ed allontanamento della fonte di contaminazione dal sito.

In tale contesto si può inserire una serie di trattamenti ex situ da eseguire sul materiale escavato che, in alcuni casi, può portare al miglioramento dell'efficienza tecnica, economica ed ambientale dell'intervento.

In generale i trattamenti ex situ comprendono tutte quelle tecniche di risanamento fisiche, chimico-fisiche (anche termici) o biologiche che operano a mezzo di particolari sistemi mobili (**on site**) o fissi (**off site**) previa rimozione e movimentazione della fonte di contaminazione. Lo scopo è il raggiungimento di quelle caratteristiche chimico-fisiche che rendono il materiale idoneo alla rimessa a dimora, recupero e/o smaltimento.

Nella seguente tabella sono schematizzate le caratteristiche essenziali di alcune delle tecnologie ex situ dettagliate nei punti successivi.

**Tabella 3. Interventi di bonifica ex-situ:  
applicazione, costi parametrici e tempistiche esecutive**

Tipologia intervento	Tecnica	Matrice ambientale	Tipologia inquinante	Costi
Trattamenti fisici	Selezione meccanica	Suolo	Composizione granulometrica <sup>6</sup>	30 – 50 €/ton
Trattamenti chimico-fisici e termici	Inertizzazione	Suolo	Inorganici	150 – 200 €/ton
	Dealogenazione chimica	Suolo	VOC, pesticidi e diossine	150-300 €/ton
	Soil washing	Suolo	Inorganici	200 – 400 €/ton
	Lavaggio con solvente	Suolo/fanghi	VOC, PCB, HC (C>12 e C<12)	75-300 €/ton
	Trattamento con Carbone Granulato Attivo	Acque sotterranee	VOC, sVOC, PCB, Pesticidi e metalli	-
	Ossidazione a UV	Acque sotterranee	VOC, sVOC, Pesticidi, PCB	2 €/l
	Desorbimento termico	Suolo	VOC, sVOC, Pesticidi, PCB	100-400 €/ton
	Incenerimento	Suolo	VOC, sVOC, Pesticidi, PCB	100-1.000 €/ton
	Pirolisi	Suolo	VOC, sVOC, Pesticidi, PCB	250 €/ton
Trattamenti biologici	Biopile	Suolo	IPA, Hc (c>12), Hc (c<12), BTEX	50 – 90 €/ton
	Landfarming	Suolo	IPA, Hc (c>12), Hc (c<12)	30 – 50 €/ton
	Miscelazione con ammendanti	Suolo	IPA, Hc (c>12), Hc (c<12)	10 – 20 €/ton

#### TRATTAMENTI FISICI

Tra i trattamenti fisici ex situ, on site ed off site, la selezione granulometrica mediante vagliatura rappresenta una delle tecniche maggiormente utilizzate perché efficiente sia dal punto di vista tecnico che economico. Essa viene utilizzata principalmente su suoli contaminati da sostanze inorganiche (i.e. metalli pesanti) per minimizzare la volumetria del materiale contaminato da avviare a smaltimento, recupero od eventualmente ad interventi di trattamento successivi (es. Inertizzazione chimica, Soil Washing, Landfarming, Biopile, etc...) attraverso la separazione delle differenti frazioni granulometriche nel terreno.

Dopo le operazioni di escavazione, il terreno contaminato viene avviato al trattamento di selezione meccanica mediante l'utilizzo di un vaglio mobile (Selezione meccanica on site) o presso un impianto esterno (Selezione meccanica off site) per il frazionamento del terreno in base al diametro delle particelle che lo costituiscono (generalmente si utilizza la macro-suddivisione:  $\bullet >70$  mm,  $30 < \bullet < 70$  mm,  $2 < \bullet < 30$  mm e  $\bullet < 2$  mm). Il materiale così trattato può essere avviato in maniera diversificata, in relazione alle frazioni granulometriche separate, a successive attività di

<sup>6</sup> L'efficacia della selezione meccanica viene valutata sulla base della composizione granulometrica anziché sulla tipologia di contaminante

smaltimento o recupero in conformità con la normativa vigente in materia di rifiuti oppure, in funzione della tipologia di contaminazione, ad idonee operazioni di trattamento.

In generale la scelta di tale tecnica è legata alle caratteristiche granulometriche (percentuale di frazioni grossolane) del materiale da trattare che possono influire sull'efficienza di trattamento.

#### TRATTAMENTI CHIMICO-FISICI E TERMICI

Di seguito si riportano le tecnologie di bonifica tramite trattamenti chimico-fisici e termici ex situ più comunemente testate ed utilizzate in campo nazionale ed internazionale.

##### **Inertizzazione chimica**

L'inertizzazione è essenzialmente un processo costituito da una fase fisica di selezione meccanica del materiale contaminato e da una fase chimica di miscelazione con reagenti opportunamente selezionati in relazione alla tipologia di contaminazione presente.

La fase fisica consta di un processo di vagliatura (vedi sopra) mediante il quale separare il materiale fine che deve essere sottoposto al processo di inertizzazione. Esso infatti è caratterizzato da elevata porosità (sinonimo di elevata superficie interna a disposizione) e, quindi, costituisce la frazione maggiormente contaminata perché interessata da fenomeni di adsorbimento dei contaminanti. La fase chimica del processo prevede, invece, la miscelazione del materiale con additivi opportunamente selezionati e dosati in grado di inibire la cessione del contaminante.

Prima di attivare il processo chimico di inertizzazione è necessario, quindi, definire la tipologia ed i quantitativi degli additivi da aggiungere, a tale scopo si procede con prove di laboratorio e test pilota in scala ridotta per la calibrazione del processo.

##### **Dealogenazione chimica**

Il processo prevede un mescolamento del terreno contaminato con un reagente [APEG, costituito da un idrossido di un metallo alcalino terroso, come KOH o NaOH e polietilenglicole (PEG)]. Il mescolamento implica la sostituzione delle molecole di alogeno o una decomposizione o parziale volatilizzazione del contaminante. Durante il riscaldamento, l'idrossido reagisce con il metallo del contaminante per formare il sale non tossico, mentre la molecola PEG occupa il posto dell'alogeno.

La tecnologia è attiva per il trattamento di terreni contaminati da:

- composti volatili alogenati e/o non alogenati;
- pesticidi
- Diossine, furani e PCB

##### **Soil washing**

Il soil washing è una tecnica ex situ che si basa sulla separazione del contaminante dalla matrice attraverso un processo di lavaggio in soluzione acquosa. Le tappe del processo sono: escavazione del terreno, rimozione dei detriti, aggiunta di acqua ed agenti estraenti, filtrazione e lavaggio. Ci sono due modi di rimozione dei contaminanti:

- ü per dissoluzione o sospensione degli stessi nella soluzione acquosa;
- ü per concentrazione degli stessi attraverso separazione per gravità o per "attrition scrubbing".

L'acqua contaminata proveniente dal processo è trattata con le tecnologie adattabili alle sostanze pericolose presenti. La durata del trattamento di soil washing è in genere a breve o a medio termine.

Il trattamento di Soil Washing consiste, generalmente, in una serie di operazioni di lavaggio fisico del terreno escavato al fine di rimuovere la contaminazione rilevata. Tale tecnologia è applicabile per il risanamento di terreni prevalentemente sabbiosi. La matrice sabbiosa costituisce il substrato adatto ad una tipologia di trattamento coinvolgente operazioni di lavaggio in quanto le particelle che la costituiscono sono caratterizzate da bassi valori di porosità ovvero bassa capacità adsorbente.

La tecnologia di Soil Washing necessita, comunque, di prove pilota per verificarne la fattibilità in relazione alle caratteristiche fisiche del suolo ed alla tipologia di contaminazione. I fattori che possono influenzarne la buona riuscita sono, in genere, un'alta percentuale di argilla e silt nella matrice contaminata e la presenza di contaminanti idrofobici che richiedono emulsionanti o solventi organici per la rimozione. Comunque anche la presenza di miscele complesse di contaminanti possono rendere difficoltoso il processo. Infine, l'uso di additivi può creare difficoltà nel trattamento delle acque di lavaggio.

### **Lavaggio con solvente**

La tecnologia si basa sui principi del soil washing, utilizzando solventi per separare composti pericolosi presenti nel suolo contaminato. Un tipico impianto è costituito da una unità di estrazione, dove vengono inseriti il suolo e il solvente. Il tempo di residenza nell'unità varia in funzione del tipo di suolo e di contaminante, dalla concentrazione dei composti inquinanti, ma generalmente varia da 10 a 40 minuti. La miscela suolo-solvente è trasportata fuori dall'unità di estrazione, per una separazione in un idrociclone.

Prima dell'estrazione sono previsti stadi preliminari di separazione fisica per suddividere il terreno in frazioni granulometriche, in quanto la frazione più fine contiene la maggior parte del contaminante. Talora tale tecnologia è utilizzata in combinazione con altre tecnologie (Solidificazione, Incenerimento o Soil Washing).

La tecnologia è attiva per il trattamento di terreni, fanghi e sedimenti contaminati da:

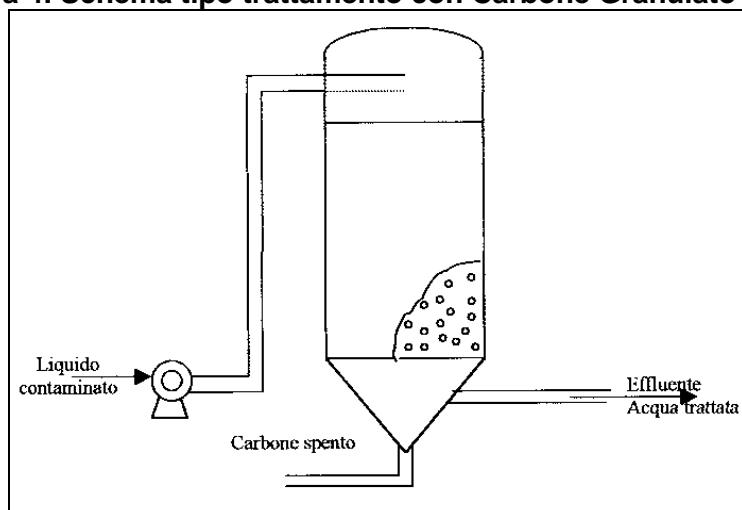
- composti volatili alogenati e/o non alogenati;
- HC C> e C<;
- PCB

### **Trattamento con carbone Granulato Attivo**

La tecnologia, applicata per il trattamento di acque di falda contaminate da VOC, sVOC, PCB, Pesticidi e metalli, prevede l'immissione del liquido contaminato dall'alto della colonna ed esce dal fondo. Durante il passaggio i contaminanti sono assorbiti e, dunque, trattenuti.

La tecnologia non è adatta nei casi in cui: (a) il liquido è fortemente contaminato (rapida saturazione dei carboni); (b) i volumi di liquido da trattare sono particolarmente ingenti (continua sostituzione dei carboni e, dunque, rallentamenti del processo).

**Figura 4. Schema tipo trattamento con Carbone Granulato Attivo**



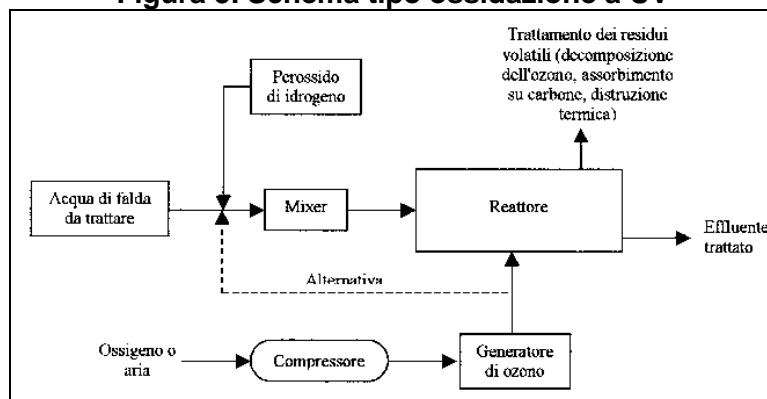
Fonte: Banca Dati Tossicologica Regione Puglia, in <http://bdt.regione.puglia.it/tecniche/1r.htm>

### **Ossidazione a UV**

La tecnologia, applicata per il trattamento di acque di falda contaminate da VOC, sVOC, Pesticidi, PCB, basa la propria funzionalità sull'uso di raggi ultravioletti (UV) combinata con l'ossidazione chimica con ozono o perossido di idrogeno. Attraverso la fotolisi diretta le radiazioni UV reagiscono con il perossido di idrogeno per formare specie altamente reattive, come i radicali ossidrilici. Le specie radicaliche così formate attaccano i contaminanti organici che sono trasformati in diossido di carbonio, acqua e sali inorganici. Il processo è anche sostenuto dalla fotolisi delle molecole organiche mediante le radiazioni UV, che possono rompere o attivare alcuni legami atomici inducendo una più facile ossidazione.



Figura 5. Schema tipo ossidazione a UV



Fonte: Banca Dati Tossicologica Regione Puglia, in <http://bdt.regione.puglia.it/tecniche/1r.htm>

### Desorbimento termico

La tecnologia, applicata per il trattamento di terreno contaminato da VOC, sVOC, Pesticidi, PCB, consiste nella volatilizzazione dei contaminanti dalla matrice ambientale a seguito di un trattamento termico di questa all'interno di un forno rotante (o a letto fluido o in camera di distillazione). Il materiale da trattare viene escavato ed immesso nel ciclo di produzione. I gas prodotti sono inviati al sistema di trattamento o al recupero, mentre la matrice trattata è recuperata. La stessa tecnologia può essere applicata come tecnologia in situ, come meglio descritto più oltre.

### Incenerimento

La tecnologia, applicata per il trattamento di terreno contaminato da VOC, sVOC, Pesticidi, PCB, consiste nell'incenerimento (ma anche volatilizzazione) dei contaminanti dalla matrice ambientale a seguito di un trattamento termico di questa all'interno di un inceneritore, nel quale vengono raggiunte temperature superiori a 500°C in presenza di ossigeno.

Le camere di combustione dell'inceneritore possono essere di diversi tipi, come segue:

- inceneritore a tamburo rotante*, consistente in un cilindro inclinato che ruota sul suo asse orizzontale all'interno del quale si hanno le combustioni primarie. Segue una camera di combustione secondaria dove sono ulteriormente distrutte le sostanze organiche non combuste e quelle nocive;
- inceneritore a letto fluido*, consistente in una camera di raccordo nella quale il materiale fatto entrare in sospensione da aria insufflata ad alta velocità viene mescolato con il combustibile. Segue una separazione delle particelle più pesanti dal gas mediante uno o più cicloni;
- inceneritore d infrarossi*, il materiale è posto in una camera principale dove è riscaldato mediante resistenze elettriche. In questo caso i gas prodotti attraversano una camera di combustione secondaria. Lo stadio seguente consente una rimozione del particolato e cattura e neutralizzazione degli acidi presenti nei gas, che sono successivamente liberati in atmosfera.

### Pirolisi

La tecnologia, applicata per il trattamento di terreno contaminato da VOC, sVOC, Pesticidi, PCB, consiste nella degradazione termica di contaminanti in assenza di ossigeno. La pirolisi, nel dettaglio, determina la trasformazione delle sostanze organiche pericolose in composti gassosi e residui carboniosi. I prodotti gassosi sono costituiti da CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e altri idrocarburi di basso peso molecolare. I principali meccanismi che ricorrono nel sistema di pirolisi sono la distruzione e la rimozione dei contaminanti.

La distruzione si osserva quando le molecole organiche si scindono in composti a peso molecolare ridotto mentre la rimozione quando i contaminanti vengono desorbiti (volatilizzati).



## TRATTAMENTI BIOLOGICI

Di seguito si riportano le tecnologie di bonifica tramite trattamenti biologici ex situ più comunemente testate ed utilizzate in campo nazionale ed internazionale.

### **Biopile e Landfarming**

Tali tecniche sfruttano la capacità delle popolazioni microbiche indigene di biodegradare i composti idrocarburici in condizioni aerobiche. Tra gli approcci di bioremediation, le Biopile ed il Landfarming hanno più margini di applicabilità potendo superare i vincoli tecnologici (bassa permeabilità ed alta eterogeneità del suolo, presenza di falde sensibili, etc...) che caratterizzano le tecnologie biologiche in situ di cui si parlerà in seguito.

Da un punto di vista chimico-fisico, i contaminanti presenti nella matrice da bonificare fungono da datori di elettroni e vengono ossidati con una serie di reazioni catalizzate da enzimi, sino alla completa mineralizzazione ad anidride carbonica ed acqua. In queste reazioni l'ossigeno, normalmente prelevato dall'aria, funge da accettore finale di elettroni.

Da un punto di vista microbiologico, i contaminanti vengono utilizzati come fonte di carbonio (più raramente di altri elementi nutritivi) e di energia per la moltiplicazione cellulare di una complessa comunità microbica di batteri, lieviti e funghi normalmente già presente nella matrice da decontaminare essendo sopravvissuta alla pressione selettiva esercitata dalla presenza dei contaminanti stessi.

Per quanto riguarda l'impianto di Biopile e Landfarming, esso prevede l'allestimento di una superficie impermeabile attrezzata di sistema drenante per il recupero del percolato dotata inoltre di strumenti per il controllo della qualità dell'aria, indispensabili nel caso di trattamento di suoli inquinati da sostanze volatili.

Il materiale da trattare deve essere vagliato ed omogeneizzato prima dell'allestimento del cumulo. Il sottovaglio, da destinare alla realizzazione della biopila o del campo di Landfarming, deve avere la massima omogeneità possibile per ottenere una distribuzione coerente di contaminanti. Se il suolo ha le caratteristiche acide, il pH deve essere corretto con l'aggiunta di calce sino a valori prossimi alla neutralità. Inoltre, suoli limosi ed argillosi devono essere ammendati con idonei "bulking agents" per assicurare un adeguato passaggio dell'aria durante la fase di esercizio degli impianti. Materiali adatti per l'ammendamento sono ad esempio prodotti organici espansi (perlite, silice, pomice, etc...) comunemente usati per l'edilizia o per l'agricoltura, compost di ottima qualità o cippati di legno.

Durante la fase di preparazione del suolo possono essere aggiunti direttamente i nutrienti a base di azoto e fosforo necessari allo sviluppo dei microrganismi, con ampi margini di variabilità si può utilizzare il rapporto C:N:P = 100:5:1. Per assicurare tale bilanciamento si suggerisce l'impiego di fosfato ammonico, fosfato potassico e nitrato ammonico comunemente utilizzati per l'agricoltura.

Tutti gli inquinanti organici biodegradabili presenti in suolo possono essere abbattuti in impianti di solid phase fermentation (Biopile e Landfarming) con l'esclusione di quelli ad elevata volatilità. Tipicamente le biopile ed il Landfarming sono state impiegate per bonificare suoli inquinati da petrolio o da prodotti petroliferi. Generalmente, il trattamento con Biopile permette di abbattere contaminanti in miscele complesse comprendenti frazioni volatili e concentrazioni non elevate occupando superfici meno estese di quelle necessarie al Landfarming. Quest'ultimo, d'altra parte, permette di bonificare suoli contaminati da sostanze non volatili come i fanghi di raffineria e comunque matrici ad elevate concentrazioni di contaminanti.

### **Miscelazione con ammendanti**

Come specificato in premessa al presente paragrafo, la miscelazione con ammendanti costituisce una valida tecnica preparatoria ai trattamenti biologici di landfarming o biopile. Infatti, il principio funzionale sul quale si basa la miscelazione con ammendanti è sempre quello di creare condizioni ottimali allo sviluppo di batteri autoctoni atti a degradare i contaminanti ed accelerare, quindi, anche i tempi di risanamento.

Nel suolo, infatti, sono già presenti microrganismi in grado di degradare i contaminanti, ma non potendo operare in condizioni ottimali o, addirittura, dovendo far fronte all'azione di fattori inibenti (temperatura bassa, pH acido, carenza di ossigeno, presenza di sostanze tossiche, assenza di nutrienti, contenuto insufficiente di acqua), i tempi richiesti per questa degradazione spontanea sono spesso incompatibili con le esigenze di risanamento.

La miscelazione del terreno contaminato con un adatto substrato organico può portare ai seguenti vantaggi:

- facilitare l'acclimatazione e lo sviluppo della biomassa in virtù della disponibilità di un substrato più facilmente biodegradabile rispetto al contaminante;
- migliorare le caratteristiche strutturali del terreno, come ad esempio la porosità e, quindi, la circolazione di ossigeno, la capacità di campo e, quindi, il contenuto di acqua;
- tamponare condizioni di acidità per migliorare le capacità di degradazione;

Svariate applicazioni sono state eseguite mediante l'impiego di compost classificato fuori specifica (a causa di elevate concentrazioni di sostanze estranee quali plastica, vetro, od altro) in virtù del basso costo e della facile reperibilità sul mercato.

Tuttavia l'utilizzo di compost fuori specifica deve prevedere l'esecuzione di attività preliminari finalizzate all'ottenimento di quelle caratteristiche chimiche e fisiche idonee al suo impiego come substrato, quali ad esempio operazioni di vagliatura meccanica e determinazioni analitiche sul contenuto di metalli pesanti.

### 3.2.2 Interventi di bonifica in situ

I trattamenti in situ comprendono tutte quelle tecniche di risanamento chimico-fisiche o biologiche che operano direttamente in loco escludendo operazione di escavazione e movimentazione del materiale contaminato. Per semplificare l'articolazione del presente documento di seguito sono stati presi in considerazione sia interventi in situ sulla matrice insatura quali soil vapour extraction e bioventing, sia quelli sulla zona vadosa quali air sparging, bioslurping od oxygen release compound. In tale sede vengono riportate anche alcune note tecniche relative di risanamento di suoli ed acque concettualmente basati su principi depurativi di essenze vegetali (fitorimediazione). Nella seguente tabella sono schematizzate le caratteristiche essenziali di alcune delle tecnologie in situ a maggior diffusione.

**Tabella 4. Interventi di bonifica in situ:  
applicazione, costi parametrici e tempistiche esecutive**

Tipologia intervento	Tecnica	Matrice amb.	Tipologia inquinante	Costi (€/ton)	Tempi
Trattamenti chimico-fisici	Soil vapor extraction	Suolo	HC (C<12), BTEX	30 – 60	12 – 24 mesi
Trattamenti biologici	Bioventing	Suolo	HC (C>12), HC (C<12)	50 – 90	6 – 24 mesi
	Air sparging	Acque	HC (C<12), BTEX, MTBE	20 – 40	6 – 24 mesi
	ORC	Suolo / Acque	IPA, BTEX, MTBE, HC (C>12), HC (C<12), Organo clorurati	10 – 30	12 – 36 mesi
	Ossidazione chimica	Suolo/acque			
Fitotrattamenti	Fitoremediation	Suolo / Acque	Inorganici	10 – 30	12 – 60 mesi

## TRATTAMENTI CHIMICO-FISICI

**Soil Vapor Extraction (SVE)**

Tra i trattamenti chimico fisici si segnala il principio fisico del **Soil Vapor Extraction (SVE)** è costituito dalla volatilità della maggior parte dei composti idrocarburi.

Questa tipologia di sostanze è rappresentata in larga parte da molti idrocarburi clorurati (tricloroetilene, tetracloroetilene, cloroformio, metilcloroformio, etc..), da idrocarburi aromatici (benzene, toluene, xilene, etc..), da oli minerali leggeri e metano.

Non è possibile applicare il SVE su contaminanti inorganici e su organici dotati di pressione di vapore bassa. La pressione di vapore delle sostanze fornisce, infatti, un'indicazione fondamentale sull'applicabilità e la fattibilità di rimozione dei composti presenti nel terreno: il SVE è applicabile a composti che hanno una pressione di vapore maggiore di 0,1 kPa o 0,5 mmHg (a 20°C) ed una solubilità in acqua relativamente bassa.

La ventilazione in suolo risulta una tecnica relativamente facile e poco costosa per rimuovere sostanze organiche volatili dalla zona insatura di terreno contaminato.

L'efficacia del processo è funzione di alcuni fattori, dai quali dipendono sia la mobilità dei contaminanti e sia la permeabilità del suolo all'aria:

- ü umidità, l'incremento del contenuto d'acqua riduce il flusso d'aria e, quindi, la diffusione;
- ü contenuto organico, un incremento nell'assorbimento (che solitamente avviene su matrice organica) riduce la concentrazione delle sostanze volatili nell'aria interstiziale e, quindi, riduce la loro diffusione;
- ü granulometria, in particolare il sistema risulta applicabile in terreni con conducibilità idraulica elevata.

Ed i fattori che possono contribuire all'efficacia dell'intervento sono rappresentati da:

- ü temperatura, un incremento della temperatura comporta una maggiore concentrazione in saturazione nell'aria interstiziale e, quindi, un incremento di diffusione;
- ü costante di Henry, parametro che indica il grado di partizione tra fase disciolta (o libera) e fase gassosa. Sostanze con elevata costante di Henry, presentano maggiore tendenza alla diffusione.

In seguito alla ventilazione del suolo, indotta da uno o più pozzi di estrazione di vapori, s'instaurano condizioni dinamiche che portano d un lato allo strippaggio dei composti presenti in fase gassosa e dall'altro ad un'ulteriore volatilizzazione dei composti volatili. Le sostanze volatili, che evaporano fino a quando non si esauriscono la fase liquida e solida, sono convogliate verso il punto di estrazione dal sottosuolo.

Operativamente il SVE si colloca tra le tecnologie di trattamento in situ e consiste nella realizzazione di pozzi o dreni di estrazione vapori, fenestrati a differenti profondità e tenuti in depressione per mezzo di idonei sistemi di aspirazione; i gas estratti vengono avviati a sistemi di abbattimento degli idrocarburi quali Ossidazione termica, Ossidazione Catalitica od Adsorbimento con carboni attivi.

L'estrazione di gas dal sottosuolo, da una parte consente di controllare ed intercettare la migrazione di composti volatili presenti (es. metano, idrocarburi leggeri ed organo alogenati), dall'altra favorisce lo spostamento dell'equilibrio di ripartizione liquido-gas degli idrocarburi verso la fase vapore, determina il prelievo forzato di gas interstiziale dal suolo, liberando il terreno dalle frazioni di idrocarburi ad elevata volatilità.

La durata effettiva del SVE è funzione della necessità di liberare tutti i pori del terreno dai gas interstiziali contaminati da idrocarburi volatili e di spostare l'equilibrio liquido-gas il più possibile verso la fase gassosa. In funzione dell'area contaminata di interesse, dello spessore di terreno da trattare, della porosità efficace del suolo, si valuta il volume di gas interstiziale da coinvolgere e si dimensionano gli impianti, prestando attenzione a garantire la copertura totale dell'area.

Per predisporre un sistema di SVE efficace relativamente alle caratteristiche specifiche del sito, al tipo di contaminazione ed alla sua distribuzione nel sottosuolo vengono realizzati test pilota su campi prova che prevedono:

- ü punti di estrazione vapori (tubazioni in PVC da 2” a 12 “, generalmente con fessurazione da 2 mm) fenestrati a differenti profondità;
- ü punti di monitoraggio attrezzati con sonde per il rilevamento dei gas interstiziali a differenti profondità;
- ü unità di estrazione vapori (es. ventilatori, etc..);
- ü unità di trattamento dei vapori mediante bruciatore catalitico o carboni attivi.

Viene applicata una depressione nella zona vadosa del sottosuolo attraverso gli intervalli microfessurati di punti di estrazione di vapore, predisposti a profondità differenti ed a distanze progressive. In tal modo vengono determinate le depressioni misurate mediante manometri e i raggi di influenza del sistema misurate direttamente con tubetti fumogeni o indirettamente con prelievo di gas interstiziale. La determinazione dell'efficienza del sistema viene valutata mediante la misurazione nelle sonde di monitoraggio di anidride carbonica, ossigeno, metano, vapori organici e depressioni indotte.

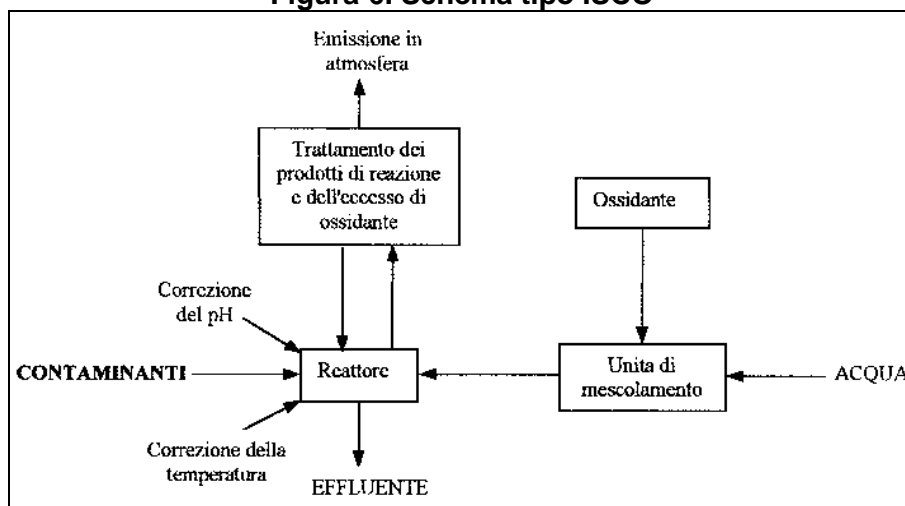
### **Ossidazione chimica (ISCO)**

Tecnologia applicata on site, consiste nella distribuzione – tramite pozzi di iniezione verticali o orizzontali, trivelle di mescolamento o fratture idrauliche – di sostanze reagenti nel sottosuolo e/o acquifero che agiscono ossidando i contaminanti in diossido di carbonio o in composti non pericolosi. La tecnologia è attiva per il trattamento di matrici ambientali contaminate da:

- BTEXS;
- composti volatili alogenati e/o non alogenati;
- IPA

La tecnologia viene impiegata per la bonifica sia dei terreni che delle acque sotterranee. Non è applicabile su inquinamenti inorganici ed è limitata da granulometrie fini e elevati contenuti di umidità della matrice solida.

**Figura 6. Schema tipo ISCO**



Fonte: Banca Dati Tossicologica Regione Puglia, in <http://bdt.regione.puglia.it/tecniche/1r.htm>

### **Soil flushing**

La tecnica del Soil Flushing consiste nell'estrazione dei contaminanti dal terreno in situ per dissoluzione degli stessi contaminanti in un fluido acquoso. Il fluido viene immesso in una serie di pozzi o trincee ubicate a monte dell'area contaminata e recuperato, carico degli inquinanti, in pozzi (o trincee) ubicate a valle. Il liquido viene successivamente recuperato e avviato a scarico o riciclato in testa. La tecnologia avviene per dissoluzione o dispersione. I fluidi di lavaggio possono essere di diverso tipo, anche in relazione alla diversa tipologia di contaminante da trattare, come di seguito evidenziato:

- acqua non additivata, per il trattamento di terreni presentati un arricchimento in fenoli;
- acqua con tensioattivi, per il trattamento di terreni contaminati da idrocarburi, BTEXS, solventi clorurati, PCB, pesticidi clorurati;

- soluzioni acide, per il trattamento di terreni contaminati da metalli pesanti;
- soluzioni acide, per il trattamento di di terreni contaminati da arsenico;
- agenti complessanti (ad es. EDTA), per il trattamento di terreni contaminati da metalli pesanti;

#### TRATTAMENTI BIOLOGICI

Nel presente sottoparagrafo sono presentate quali tecnologie di trattamento biologico di potenziale interesse il bioventing, l'air sparging, il bioslurping e l'oxygen release compound.

##### **Bioventing**

Gli interventi di bonifica degli idrocarburi hanno come presupposto essenziale il principio che la maggioranza dei composti idrocarburici è soggetta a biodegradazione ad opera di microrganismi. Gli organismi presenti naturalmente nel sottosuolo dimostrano di avere la capacità di mineralizzare le sostanze le sostanze contenute nelle benzine, nei gasoli e nelle miscele più pesanti fino al petrolio grezzo, trasformando i composti organici che sono distribuiti sulla matrice solida dell'acquifero o contenuti nei pori.

Solitamente la mancanza di ossigeno rappresenta il fattore limitante per lo sviluppo di microrganismi destinati a condurre attività degradative sugli idrocarburi; l'ossigeno viene infatti utilizzato come accettore elettronico finale nella respirazione cellulare e pertanto ambienti nei quali sussistono condizioni aerobiche risultano più idonei a processi biodegradativi. Pertanto un aumento del contenuto di ossigeno nel substrato provoca un aumento della popolazione degli organismi che degradano gli idrocarburi e quindi aumenta la percentuale di rimozione degli stessi.

L'obiettivo principale del processo di biodegradazione è quello di fornire ossigeno in eccesso al sottosuolo.

Il Bioventing consiste appunto nell'introduzione nel sottosuolo di ossigeno gassoso (aria ambiente). La bioventilazione è una tecnica in situ che permette, sotto condizioni adeguate, la degradazione di composti petroliferi da parte di microrganismi autoctoni già presenti nel terreno. La bioventilazione, infatti, ha lo scopo di accelerare il processo di biodegradazione naturale fornendo ai microrganismi ossigeno e nutrienti.

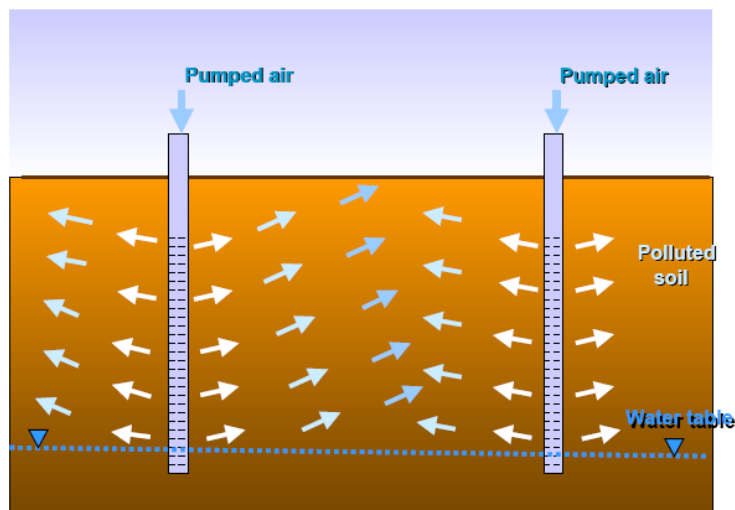
La progettazione del sistema di bonifica mediante Bioventing deve prevedere l'acquisizione di dati specifici del sito mediante la realizzazione di test pilota in corrispondenza delle aree contaminate (test respirometrici). Tali test constano in prove di respirazione in situ finalizzate alla raccolta di tutte quelle informazioni necessarie all'implementazione del sistema di bioventing a scala reale. La necessità di implementare un test pilota risiede nella determinazione dei parametri da ottimizzare per una gestione corretta ed efficace del trattamento di bioventing a scala reale, alcune delle quali sono la biodisponibilità della popolazione microbica, la portata d'aria da insufflare secondo il raggio d'influenza calcolato in sede pilota ed il quantitativo di nutrienti da somministrare per accelerare il processo di degradazione dei contaminanti.

Il test di respirazione in situ prevede l'iniezione nel sottosuolo, tramite compressore a diaframma, di aria e di una piccola percentuale di elio. L'elio (puro al 99%) è il gas inerte tracciante per stimare il valore della diffusione dei gas interstiziali nelle zone areate. L'aria è iniettata nel terreno per un periodo di tempo che va dalle 20 alle 24 ore, tempo sufficiente per esaurire la domanda di ossigeno nella zona d'interesse. Una volta terminata la fase di iniezione d'aria e di elio, i gas interstiziali sono campionati ed analizzati per valutare il tenore di ossigeno, biossido di carbonio e idrocarburi totali. La durata della fase di monitoraggio è determinata sperimentalmente in base alle evidenze offerte dal test. Inizialmente la rilevazione dei parametri ha una frequenza piuttosto alta (2, 4, 6, 8 ore) ed in seguito si riduce progressivamente. Il test di respirazione termina una volta che i parametri monitorati tornano ai valori rilevati prima del test.

Una volta terminato il test, la rete di monitoraggio e di aerazione dell'area contaminata installata per il test pilota viene quindi integrata nel sistema globale di bioventilazione.

Da un punto di vista geologico la bioventilazione può essere applicata con successo a terreni con permeabilità intrinseca all'aria maggiore di 10<sup>-9</sup> cm<sup>2</sup> (National Research Council, 1993).

Figura 7. Schema tipo bioventing



### Air Sparging

L'Air Sparging viene applicato a scala reale su terreni contaminati da prodotti petroliferi (idrocarburi alifatici ed aromatici semplici), distillati leggeri del petrolio ( benzina, cherosene, jettfuel) ed oli minerali leggeri.

Il principio dell'Air Sparging è costituito sia dalla volatilità di alcuni composti idrocarburici, sia dal fatto che tali composti possono essere soggetti a biodegradazione ad opera di microrganismi presenti anche all'interno dell'acquifero, dove il sistema di Air Sparging viene applicato.

L'Air Sparging consiste nell'immissione di aria atmosferica in pressione direttamente nell'acquifero al duplice scopo di rimuovere fisicamente (con volatilizzazione) e biodegradare (attraverso la stimolazione della popolazione di batteri eterotrofi già presenti ed in grado di degradare gli idrocarburi disciolti fino alla loro completa mineralizzazione) i contaminati disciolti nella falda o presenti nella frangi capillare. L'aria iniettata è in grado perciò:

- ü di spiazzare l'acqua;
- ü di creare un flusso d'aria nei pori altrimenti saturi d'acqua;
- ü di volatilizzare e rimuovere la fase disciolta ed adsorbita della contaminazione;
- ü di effettuare un trasferimento di ossigeno dentro l'acquifero.

L'efficacia del metodo è determinata principalmente dal grado di contatto tra l'aria immessa e la contaminazione nel suolo e nelle acque.

Tale metodo risulta efficace in presenza di acquiferi ad elevata permeabilità (sabbie e ghiaie) con conducibilità idraulica maggiore di 10<sup>-5</sup> m/sec.

Operativamente consiste nella realizzazione di pozzi estesi sino in falda, fenestrati a quote opportune nel saturo, tenuti sotto pressione per mezzo di un idoneo sistema di immissione d'aria.

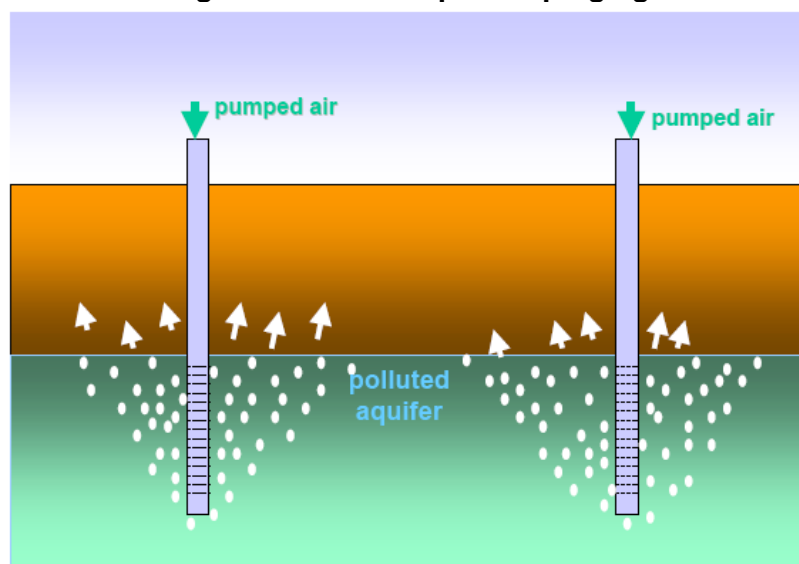
L'Air Sparging è una tecnologia che viene spesso accoppiata ad altre tecnologie in grado di intercettare e rimuovere le sostanze che si volatilizzano dal processo e arrivano negli strati insaturi (SVE e Bioventing).

Per realizzare un sistema di Air Sparging efficiente e commisurato alla situazione idrogeologica specifica del sito, occorre predisporre dei test pilota. Tali test sono costituiti da impianti che una volta terminato il test possono essere integrati al sistema di bonifica a scala reale. Essi sono configurati come segue:

- ü un punto di iniezione d'aria (pozzo);
- ü punti di monitoraggio (piezometri) attrezzati per il rilievo delle pressioni e dei gas interstiziali;
- ü unità di iniezione d'aria (compressore) con elettrovalvola per lo scarico della condensa, pressostati di regolazione e flussimetri.

Le prove vengono eseguite iniettando aria a differenti portate e misurando, nei punti di monitoraggio: i livelli di falda, le pressioni indotte e i parametri ossigeno disciolto, vapori organici, ossigeno e anidride carbonica.

**Figura 8. Schema tipo air sparging**



### **Bioslurping**

Il Bioslurping è utilizzato in caso di contaminazione organica ed, in particolare, quando si è verificato lo sversamento di un prodotto organico più leggero dell'acqua (LNAPL) con il conseguente raggiungimento della frangia capillare della falda acquifera. In questa zona il grado di saturazione con acqua di ritenzione aumenta gradualmente verso il basso (frangia capillare sospesa) fino a raggiungere una completa saturazione dei pori già sopra la superficie piezometrica (frangia capillare continua). La migrazione del prodotto, una volta raggiunta la frangia capillare, prosegue orizzontalmente proporzionalmente al contenuto di acqua nei pori. Poco sopra la frangia capillare continua, dove il grado di saturazione in acqua aumenta, i prodotti petroliferi si diffondono lateralmente e creano uno strato di olio surnatante, quindi la fase surnatante non si accumula sopra la superficie piezometrica, bensì sopra la frangia capillare continua.

In questi casi, i processi di risanamento convenzionali del sito prevedono come primo e prioritario intervento il recupero della fase libera al fine di interrompere il continuo rilascio di contaminanti in fase disciolta nelle acque di falda. Tale intervento avviene con prelievo ad opera di pompe allocate all'interno di pozzi o trincee drenanti realizzate allo scopo (Free Product Recovery – FPR). In un secondo tempo poi, è necessario intervenire con l'implementazione di altre tecnologie di risanamento adeguate per il risanamento della zona vadosa.

Da questo punto di vista la tecnologia di Bioslurping è alquanto innovativa in quanto prevede il recupero sotto vuoto assistito del prodotto ed il trattamento di bioventilazione per il risanamento del suolo nella zona vadosa simultaneamente. Diversamente dalle tecnologie convenzionali, la tecnica di bioslurping sfrutta la sinergia di due distinte tecnologie di risanamento, FPR e Bioventing, combinando elementi di ambedue tali tecnologie per operare il recupero del prodotto e l'aerazione della zona vadosa.

Il sistema "slurper" opera un'estrazione sotto vuoto (120 a 500 mm di Hg) nel pozzo di recupero creando così un gradiente di pressione che forza il movimento del prodotto surnatante verso il pozzo. Il sistema induce un leggero abbassamento del livello piezometrico nell'acquifero riducendo così la propagazione orizzontale del prodotto. Il suolo nella zona vadosa è, in questo modo, bioventilato grazie all'attività di aspirazione dei gas interstiziali dal pozzo di recupero.

L'azione di gorgogliamento (slurping) del sistema bioslurper opera ciclicamente tra l'operazione di recupero di liquido (prodotto surnatante e/o acqua di falda) e quella di recupero di gas interstiziali.

La portata di estrazione di gas interstiziali dipende da quella di recupero di liquido dal pozzo. Quando l'attività di recupero di prodotto giunge al termine, il sistema di bioslurper può essere convertito ad un sistema di bioventing convenzionale in modo da completare il risanamento della zona vadosa ottimizzando, tra l'altro, la portata del flusso d'aria.

La combinazione di diversi fattori rendono il sistema di bioslurping un metodo economicamente efficace per il risanamento di siti che presentano prodotto surnatante in falda in quanto:

- ù aumenta l'efficienza di recupero di prodotto surnatante, ciò contrae la durata del trattamento di risanamento;
- ù minimizza il quantitativo di acqua aspirata e, quindi, i costi di trattamento;
- ù favorisce il biorisanamento della zona vadosa;
- ù può essere convertito ad un sistema convenzionale di Bioventing ottimizzato allorché le attività FPR sono concluse.

I costi del trattamento di Bioslurping sono competitivi e talvolta risultano anche minori di quelli dei sistemi "FPR dual-pump" convenzionali. Tra tali sistemi è necessario introdurre brevemente la tecnica di bonifica denominata "Pump&Treat" ad oggi comunemente utilizzata nelle operazioni di bonifica e di messa in sicurezza delle acque di falda nel caso in cui l'inquinamento sia dovuto alla presenza di composti relativamente solubili, acquiferi permeabili e soggiacenze della falda che rendono inaccessibili le acque sotterranee con altri sistemi.

Il sistema consiste nel creare una depressione piezometrica per mezzo di un sistema di emungimento delle acque sotterranee e nel trattamento dei volumi emunti per mezzo di opportuni impianti, generalmente filtri di adsorbimento con carboni attivi. I limiti di utilizzo del Pump&Treat sono sostanzialmente legati al contesto idrogeologico (i.e. bassa permeabilità, elevata eterogeneità dell'acquifero), alla tipologia ed alle condizioni di flusso e trasporto degli inquinanti (i.e. alta mobilità e bassa solubilità dei contaminanti), nonché ai costi di gestione generalmente elevati e proporzionali alla durata dell'intervento.

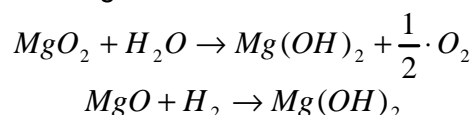
### **Oxygen Release Compound<sup>7</sup>**

Si tratta di un metodo brevettato già ampiamente sperimentato negli Stati Uniti ed in Canada; in ambito europeo è stato impiegato in Olanda, in Danimarca, in Inghilterra ed in Polonia, mentre in Italia è stato applicato ancora solamente in alcuni siti e non si dispone di bibliografia specifica relativa a tali sperimentazioni.

ORC®, potenziando l'efficienza dei processi aerobici naturali, fa sì che si crei una barriera all'interno del plume di inquinamento, limitando così la propagazione areale ed innescando principalmente una serie di reazioni chimiche al contatto con l'acqua. L'ambiente, arricchito localmente in O<sub>2</sub>, va ulteriormente a creare l'habitat ottimale di proliferazione di microbi aerobici metanogeni, naturalmente già presenti nel sottosuolo, in grado di spezzare, le catene di molecole di un'ampia varietà di componenti organici.

L'applicazione di ORC® per interventi sulle falde, prevede il posizionamento del prodotto all'interno di pozzi ubicati nel cuore del plume d'inquinamento, in quantità variabili in ragione dell'entità della contaminazione, delle caratteristiche idrogeologiche e litologiche del sito. La manutenzione del sistema risulta praticamente nulla e la liberazione di ossigeno in falda crea una barriera continua e stabile contro il contaminante con una durata media di 4-6 mesi per ogni iniezione di prodotto.

ORC® contiene sia ossido di magnesio (MgO) sia perossido di magnesio (MgO<sub>2</sub>), è inoltre anche presente una piccola percentuale di fosfato di potassio commestibile (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> o K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>). Al contatto con l'acqua ORC® rilascia ossigeno: il MgO<sub>2</sub> consumato è convertito in Mg(OH)<sub>2</sub>, la stessa reazione avviene per il quantitativo di MgO presente, che viene semplicemente idratato nella forma di idrossido, secondo le seguenti reazioni stechiometriche (Koenigsberg, Norris, 2000):



<sup>7</sup> "Bonifica di un acquifero contaminato da idrocarburi mediante "Oxygen Barrier"



Per entrambi i costituenti, il prodotto finale della reazione ORC® risulta essere  $Mg(OH)_2$ ; la sicurezza di questo materiale è conosciuta, in quanto, la sospensione di idrossido di magnesio in acqua è notoriamente conosciuta come latte di magnesia, prodotto farmaceutico usato come digestivo.

$MgO$  è in commercio come additivo vitaminico del bestiame e largamente usato come fertilizzante;  $MgO_2$  e  $Mg(OH)_2$  sono atossici da ingerire e sono entrambi utilizzati come antiacidi; inoltre il perossido di magnesio è largamente utilizzato nei prodotti di odontoiatria, dentifrici e altri prodotti affini.

La piccola percentuale di  $KH_2PO_4$ , contenuta all'interno della matrice cristallina del  $MgO_2$ , è in grado di rallentare il tasso di idratazione della molecola ed il conseguente rilascio di ossigeno; tale sostanza, normalmente utilizzata come fertilizzante, risulta praticamente innocua, in quanto la sua natura fosfatica la rende metabolizzabile da ogni substrato microbico, aerobico o anaerobico.

Questi prodotti, sono stati approvati nel registro dei fertilizzanti del Ministero dell'Agricoltura Americano, in quanto in grado di soddisfare i criteri di sicurezza per la loro introduzione nell'ambiente e nella catena alimentare. I livelli rilasciati di  $Mg(OH)_2$  non hanno effetti indiretti negativi, in quanto sia il  $MgO_2$ , sia  $Mg(OH)_2$  sono insolubili.

Recenti conferenze con gli Enti Locali di diversi stati U.S.A. (U.S. EPA, 1998) hanno definito concordemente che la deposizione in falda, o nel terreno, dell'ORC® è accettabile perché non risulta avere effetti di alterazione sugli equilibri fisico-chimici degli acquiferi.

Studi condotti dalla casa produttrice hanno valutato che gli effetti del sistema ORC® sulla falda acquifera sono riconducibili a modesti innalzamenti dei valori di pH: il pH di ORC® è attorno a 9.0, le reazioni di idrossidazione generano pH prossimi a 10. Considerata, inoltre, la natura insolubile dell'ORC®, l'aumento di pH rimane elevato solo localmente, e comunque è stato dimostrato che la presenza di alti livelli di pH, all'interno della barriera, possono controllare l'eccessiva proliferazione microbica.

Tale metodologia è adatta per le bonifiche in situ laddove altre metodologie comportano problemi connessi all'ossigenazione dell'acquifero generato appunto da un'eccessiva proliferazione microbica.

La metodologia ORC® per la bonifica delle falde prevede l'utilizzo del prodotto in due diverse forme:

- ü sotto forma di miscela iniettabile (slurry ORC®), miscela preparata in cantiere ed iniettata a bassa pressione nei pozzetti, avente un contenuto solido di polvere ORC® di circa 67%; tale polvere contiene ossido e perossido di magnesio ed una percentuale del 3% di fosfato di potassio, il diametro dei granuli che la compongono è di circa 44  $\mu$ m;
- ü sotto forma di filter-socks, "calze" filtranti contenenti ossidi di magnesio e silice inerte, in grado di contenere l'idrossido di magnesio prodotto dalla reazione.

#### FITOTRATTAMENTI

La fitoremediation è una tecnica di bonifica basata sulla mutua interazione tra microrganismi del suolo ed essenze vegetali. La presenza della pianta stimola il metabolismo microbico mediante rilascio di molecole organiche e contribuisce allo sviluppo della rizosfera. La fitoremediation può rappresentare una soluzione per il recupero ambientale se l'inquinamento del suolo risulta concentrato ad una profondità compatibile con la presenza dell'apparato radicale e se le caratteristiche chimico-fisiche dello stesso risultano adatte alla crescita vegetale (i.e. granulometria, sostanza organica, capacità di scambio ionico). I meccanismi di azione attraverso cui agisce tale tecnologia possono essere distinti in: Fitostabilizzazione, fitoestrazione, fitotrasformazione e rizofiltrazione.

### **Fitostabilizzazione**

La fitostabilizzazione viene definita come la capacità di riduzione della mobilità degli inquinanti per azione fisico-meccanica da parte dell'apparato radicale delle specie vegetali utilizzate nel trattamento. Intervendo in tal senso il processo di fitostabilizzazione limita al minimo la dispersione degli inquinanti mediante l'erosione e la dissoluzione in soluzione acquosa.

Il ricorso a tale tipologia di trattamento risulta indicata per suoli moderatamente inquinati e piuttosto estesi. Lo sviluppo delle piante deve essere favorito da trattamento con ammendanti fosfatici, sostanza organica al fine di aumentare la capacità di immobilizzazione dei metalli pesanti nel suolo.

### **Fitoestrazione**

La fitoestrazione è una particolare tecnica di fitotrattamento che prevede l'utilizzo di particolari piante definite iperaccumulatrici per la loro alta propensione all'assimilazione di composti inorganici e più in particolare di metalli pesanti quali Cd, Ni, Zn, As, Se e Cu. La scelta delle specie vegetali da impiegare nell'applicazione su singolo caso deve essere effettuata sulla base di una serie di parametri tra cui capacità di accumulo, fattore di accumulazione (rapporto tra quota di metalli pesanti presente nel tessuto della pianta e quella contenuta nel suolo prima del trattamento) e produttività in termini energetici (espressa come produzione di sostanza secca per ettaro all'anno in funzione di un riutilizzo della pianta come biomassa).

### **Complessazione**

La complessazione prevede l'utilizzo di alcune piante in grado non solo di assimilare i composti inorganici ma anche di trasformarli, attraverso le loro vie metaboliche, in prodotti di natura chimica differente. Un esempio di tale fenomeno è costituito dalla complessazione dei metalli pesanti che avviene mediante aggregazione alle fitochelatine, una classe di peptidi, e successivo accumulo all'interno delle cellule delle piante.

### **Rizofiltrazione**

Ulteriore tecnologia ad sperimentata nel campo applicativo della decontaminazione mediante impiego di essenze vegetali è costituito dalla rizofiltrazione. Tale tecnica, così come la fitostabilizzazione, si basa essenzialmente sulle capacità fisico chimiche degli apparati radicali di assorbire, concentrare e precipitare gli inquinanti sottraendoli, quindi, alla matrice. La rizofiltrazione costituisce, inoltre, il principio su cui si basa anche il trattamento della matrice liquida (fitodepurazione a flusso orizzontale). A tal proposito merita sottolineare come la fidepurazione possa essere considerata una valida alternativa ai trattamenti tradizionali di acque di falda. Negli ultimi anni particolare attenzione è stata dedicata alle potenzialità di applicazione di tale tecnica alla gestione dei percolati di discarica già largamente testata in ambito europeo.

L'impiego di sistemi di fitodepurazione nel trattamento dei percolati di discarica consente di creare unità di trattamento a basso impatto ambientale dal punto di vista paesaggistico / naturalistico in quanto si minimizza l'utilizzo di infrastrutture (i.e. vasche di trattamento in cemento armato), ed economicamente vantaggioso in quanto si minimizzano i costi di implementazione e gestione dell'intervento rispetto alle tecniche convenzionali (i.e. raccolta e smaltimento periodico off site presso impianti di depurazione convenzionali).

### **3.2.3 Interventi di bonifica con misure di sicurezza (d'urgenza, operativa e permanente)**

Gli interventi di messa in sicurezza sono finalizzati alla rimozione e all'isolamento delle fonti inquinanti, e al contenimento della diffusione degli inquinanti per impedirne il contatto con l'uomo e con i recettori ambientali circostanti.

Essi possono essere suddivisi come segue:

- a) messa in sicurezza d'urgenza, in caso di rilasci accidentali o di improvviso accertamento di una situazione di contaminazione o di pericolo di contaminazione;

- b) messa in sicurezza operativa, in caso di continuità e compatibilità con le lavorazioni svolte nei siti produttivi in esercizio;
- c) messa in sicurezza permanente, in caso di cui – in siti non interessati da attività produttive in esercizio – non sia possibile procedere alla rimozione degli inquinanti pur applicando le migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili.

#### MESSA IN SICUREZZA D'URGENZA

Si fa tendenzialmente riferimento ad interventi in condizioni di urgenza, connessi alla repentina eliminazione delle fonti primarie e secondarie di contaminazione, quali:

- ù rimozione dei rifiuti ammassati in superficie, svuotamento di vasche, raccolta sostanze pericolose sversate;
- ù pompaggio liquidi inquinanti galleggianti, disciolti o depositati in acquiferi superficiali o sotterranei;
- ù installazione di recinzioni, segnali di pericolo e altre misure di sicurezza e sorveglianza; - installazione di trincee drenanti di recupero e controllo; - costruzione o stabilizzazione di argini;
- ù copertura o impermeabilizzazione temporanea di suoli e fanghi contaminati;
- ù rimozione o svuotamento di bidoni o container abbandonati, contenenti materiali o sostanze potenzialmente pericolosi.

#### MESSA IN SICUREZZA OPERATIVA (**MISO**)

Per quanto concerne gli interventi di messa in sicurezza operativa (MISO) si fa usualmente riferimento alle tecniche ingegneristiche precedentemente descritte. Queste, come previsto dal d.lgs. n. 152/2006 smi, devono essere finalizzate alla riduzione della movimentazione, al trattamento in sito ed al riutilizzo dei materiali sottoposti a bonifica.

Gli interventi – in ogni caso – devono garantire il raggiungimento di valori di concentrazione residui nelle matrici ambientali coinvolte tali da garantire condizioni di tutela dell'ambiente e della salute pubblica (ossia inferiori alle Concentrazioni Soglia di Rischio determinate in seno all'Analisi di Rischio).

#### MESSA IN SICUREZZA PERMANENTE (**MISP**)

Sempre facendo riferimento alla normativa vigente in materia di bonifiche, gli interventi di messa in sicurezza definitiva vengono applicati ogni qual volta le fonti di contaminazione (i.e. discariche) sono tali che non è possibile procedere alla loro rimozione pur applicando le migliori tecnologie disponibili a costi sopportabili, secondo i principi della normativa comunitaria. In tal senso la messa in sicurezza permanente è un intervento che non permette di raggiungere le Concentrazione Soglia di Contaminazione determinate ma consente di isolare la fonte inquinante in modo definitivo rispetto alle matrici ambientali ed ai bersagli circostanti. Associate agli interventi di messa in sicurezza definitiva sono da predisporre azioni di monitoraggio periodico e limitazioni sull'uso dell'area.

Gli interventi devono privilegiare, ove possibile, il ricorso a tecnologie di trattamento di rifiuti e di riduzione del volume dei rifiuti stessi al fine di limitare la superficie e il volume complessivi da mettere in sicurezza. Parte integrante della progettazione è costituita dalla definizione di accurati piani di monitoraggio e controllo atti a verificare l'efficacia di tali interventi con durata almeno quinquennale.

In qualità di misura di sicurezza possono inoltre essere previste esplicite limitazioni rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici.

Interventi di messa in sicurezza definitiva vengono spesso utilizzati per il risanamento di discariche incontrollate di rifiuti urbani e rifiuti speciali le cui volumetrie non consentono di rimuovere i rifiuti stoccati sia per motivi tecnici che economici.

Di seguito si riportano le tecniche di isolamento più comunemente adottate per la MISP di discariche che, come noto, rappresentano la tipologia più diffusa di sito inquinato nel territorio nazionale.

### **Generalità sulle tecniche di isolamento delle discariche**

L'isolamento dei rifiuti in situ tramite sistemi di contenimento a bassa permeabilità, si presenta come un intervento di controllo e ripristino ad oggi più adatto per le discariche incontrollate.

Le tecniche di isolamento sono utilmente classificate in quattro distinte categorie:

- ü Sistemi di isolamento superficiale (capping);
- ü Cinturazioni perimetrali e altri sistemi di contenimento;

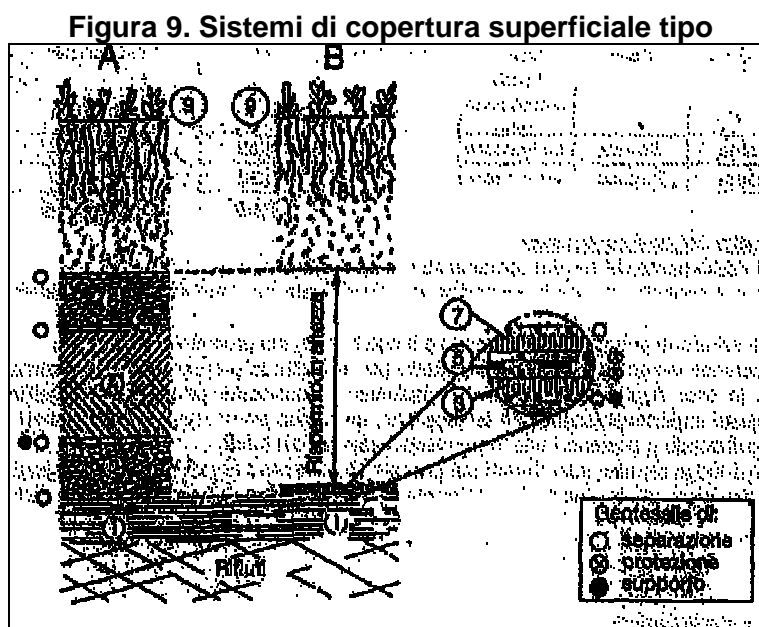
Di seguito si riporta dettaglio delle principali tecniche di isolamento utilizzate.

### **Sistemi di isolamento superficiale**

Uno degli Interventi di messa in sicurezza più rapido ed efficace è l'impermeabilizzazione superficiale finalizzata allo svolgimento delle seguenti funzioni:

- a) prevenire o limitare l'infiltrazione delle acque meteoriche, per evitare o ridurre la formazione di percolato che può contaminare il suolo o la falda sottostante la discarica;
- b) consentire il recupero dell'area degradate e la sua integrazione con l'ambiente circostante, mediante attraverso la piantumazione di essenze arbustive/arboree e la semina di una copertura erbacea;
- c) assorbire eventuali cedimenti differenziali senza comportare aumenti di permeabilità;
- d) resistere a condizioni climatiche critiche (cicli gelo-disgelo/ essiccamento ...).

Risulta allora evidente la necessità di progettare sistemi di copertura multistrato per ottenere una risposta soddisfacente alle esigenze appena menzionate. Due tipici, ma alternativi, sistemi di tal tipo (denominati per semplicità "A" e "B") sono di seguito rappresentati in figura.



La copertura B ha il vantaggio geometrico di impegnare altezze complessive minori rispetto all'alternativa A, e può tornare utile nei casi di discariche incontrollate con rifiuti di poco affioranti sul p.c., nel momento in cui, per motivi estetico-funzionali, si vogliono minimizzare le modificazioni altimetriche del sito a seguito della realizzazione del sistema di isolamento.

In breve la copertura superficiale è costituita da:

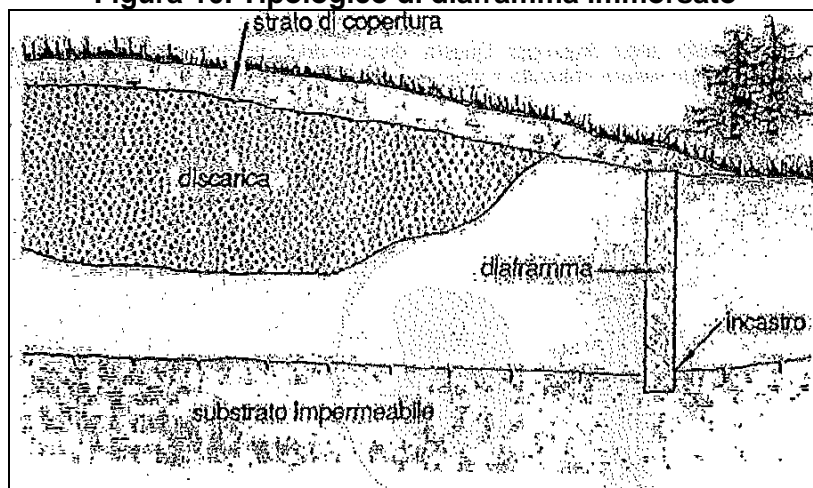
- una copertura vegetale che permette principalmente un incremento dell'evapotraspirazione, con conseguente riduzione della frazione di acque meteoriche. La scelta del tipo adatto di vegetazione deve essere condotta tenendo conto della profondità e ramificazione dell'apparato radicale, della pendenza attribuita al sottostante terreno di copertura, della disponibilità d'acqua di irrigazione, delle resistenze vegetale a condizioni climatiche stressanti che si verificano nel sito (gelo, aridità), delle caratteristiche del suolo di impianto (in termini di granulometria, struttura, permeabilità, pH etc);
- un terreno di copertura adatto alla coltivazione del manto vegetale e con funzioni di accumulo di acqua e di nutrienti per le piante, drenaggio delle acque superficiali per ruscellamento ed infiltrazione. Lo spessore dello strato è funzione delle caratteristiche chimico-fisiche del materiale utilizzato e del tipo di vegetazione da supportare.
- un sistema di drenaggio delle acque meteoriche inserito in direzione planare tra il terreno di copertura e il sottostante strato di impermeabilizzazione. Possono essere utilizzati allo scopo materiali naturali o, in altro caso, si possono utilizzare le cosiddette geomembrane o polimerici. La geomembrana viene generalmente installata tra due geotessili aventi funzione di protezione meccanica del telo medesimo. La facilità della posa in opera delle geomembrane costituiscono un fattore di interesse determinante nel loro impiego: un semplice srotolamento dei teli, associato ad alcuni accorgimenti nella fase di stesura fornisce infatti notevoli garanzie alla qualità dei sistemi di isolamento in cui tali materiali vengono impiegati;
- un sistema di drenaggio del gas/biogas che ha il compito di intercettare il gas prodotto dalla degradazione dei rifiuti sottostanti ed indirizzarlo verso apposite tubazioni che lo convogliano all'esterno della discarica ove viene lasciato defluire liberamente in atmosfera oppure trattato termicamente.

#### **Cinturazioni perimetrali (barriera fisico)**

In base alla configurazione verticale possono essere distinte due diverse tipologie geometriche:

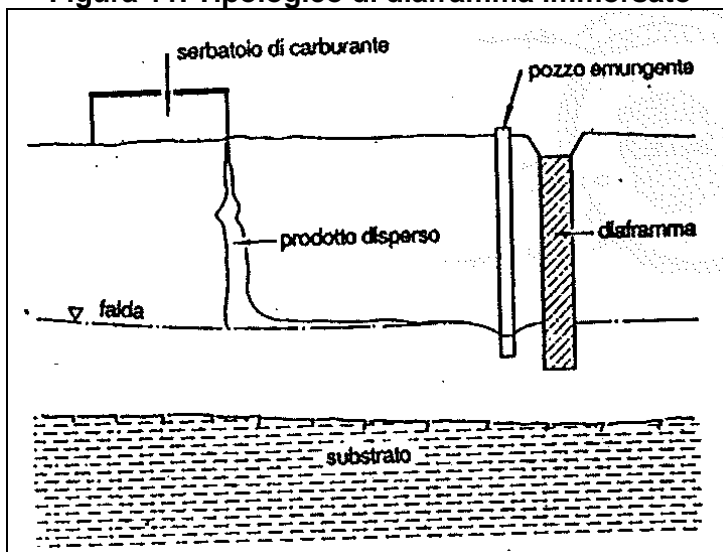
- a) **diaframma immerso fin dentro al sottostante substrato impermeabile**, realizzato quando debbono essere contenuti inquinanti pesanti e miscibili nelle acque sotterranee;

**Figura 10. Tipologico di diaframma immerso**



- b) **diaframma sospeso** che isola soltanto la parte superficiale dell'acquifero ed è quindi da utilizzare quando l'inquinante di bassa densità è sostanzialmente immiscibile in acqua.

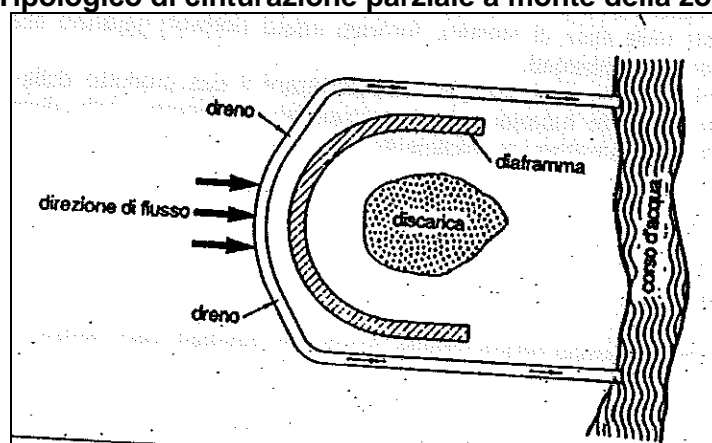
Figura 11. Tipologico di diaframma immerso



In base alla configurazione planimetrica possono essere distinte tre diverse tipologie geometriche:

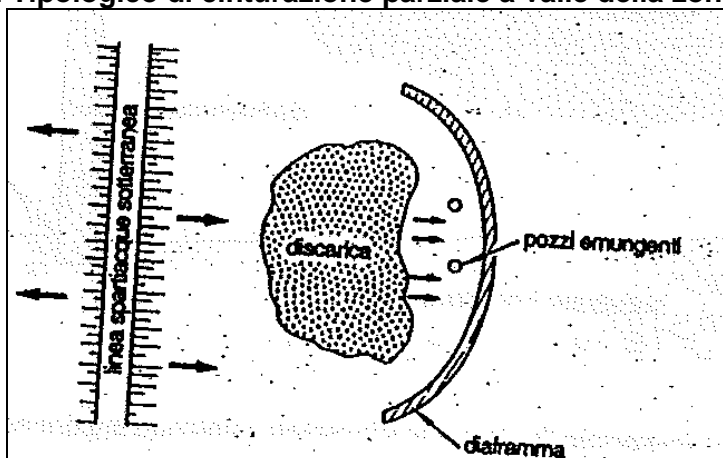
- **cinturazione parziale a monte della zona inquinata**, consente di deviare il flusso di acqua di falda non contaminata proveniente da monte, evitando che vada a lisciviare il deposito inquinante

Figura 12. Tipologico di cinturazione parziale a monte della zona inquinata



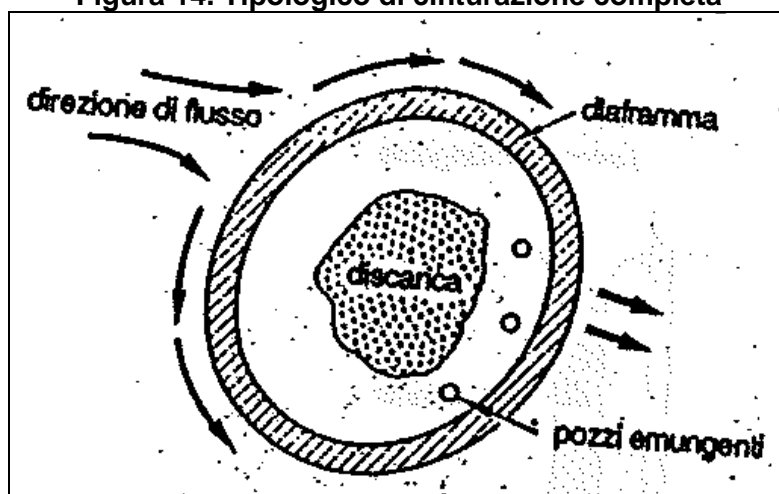
- **cinturazione parziale a valle della zona inquinata**, questa disposizione planimetrica non contrasta la contaminazione di nuove acque e può essere utilizzata soltanto in situazioni che vanifichino la realizzazione della barriera di monte;

Figura 13. Tipologico di cinturazione parziale a valle della zona inquinata



- **cinturazione completa**, è la configurazione più sicura ed utilizzata, che, soprattutto se impiegata in associazione ad una copertura superficiale della discarica incontrollata ha il grande vantaggio di isolare idraulicamente in modo completo la fonte inquinante (sorgente primaria di contaminazione) ed il pennacchio contaminato da essa generato

Figura 14. Tipologico di cinturazione completa



### Pump and Treat

Il pump and treat è uno dei sistemi di bonifica di falde inquinate più applicati al livello nazionale e internazionale. I sistemi di Pump and Treat possono avere l'obiettivo di rimuovere i contaminanti dissolti o anche di sbarrare idraulicamente il deflusso delle acque contaminate verso potenziali recettori presenti all'esterno dell'area contaminata. In presenza di prodotto in galleggiamento, i sistemi di recupero delle fasi separate (NAPL) sono progettati per effettuare il pompaggio dei NAPL e dell'acqua di falda da pozzi trincee di recupero. Il pompaggio rimuove l'acqua e, abbassando il livello piezometrico in corrispondenza del pozzo, crea un cono di depressione che favorisce il richiamo della fase separata presente in galleggiamento, all'interno del pozzo. Il pompaggio può essere realizzato utilizzando una o due pompe: nella configurazione con pompa singola (Single Pump) la fase separata viene estratta insieme all'acqua rendendo spesso necessario l'implementazione in superficie di un sistema di separazione delle fasi. Nella configurazione a doppia pompa (Dual Pump) una pompa viene posizionata sul fondo del pozzo per l'emungimento dell'acqua e la conseguente creazione del cono di depressione, la seconda pompa viene posta all'interfaccia acqua prodotto, per il recupero della fase separata.

### 3.2.4 *Attenuazione Naturale Controllata (ANC)*

La tecnica di risanamento basata sull'attenuazione naturale di fatto esula da quelle che sono le tipologie di intervento previste dalla normativa vigente. Tuttavia negli ultimi anni si sta assistendo ad un sempre maggiore interesse verso questo tipo di intervento che di fatto, a causa dei lunghi tempi richiesti, viene spesso utilizzato congiuntamente ai metodi tradizionali.

In generale per Attenuazione Naturale Controllata si intende l'utilizzo di processi spontanei al fine di raggiungere specifici obiettivi di bonifica in un sito contaminato. I processi che naturalmente concorrono al risanamento dei terreni o delle acque sotterranee contaminati includono l'advezione, la dispersione idrodinamica, l'adsorbimento, la biodegradazione, la volatilizzazione ed il decadimento radioattivo. Alcuni sono processi distruttivi, che tendono all'eliminazione della sostanza contaminante, altri ne riducono semplicemente la mobilità o la concentrazione, altri ancora la trasformano in composti meno tossici. Questi processi avvengono sia nei terreni insaturi che in quelli saturi, ma è soprattutto in falda dove si raggiungono gli effetti più intensi.

La comprensione e la quantificazione accurata di tutti i processi che presiedono all'attenuazione naturale sono ancora oggetto di ricerca e, nonostante le sempre più numerose applicazioni, un notevole grado d'incertezza resta legato all'impiego dell'attenuazione naturale controllata. Per questa ragione sono fondamentali le attività di monitoraggio a lungo termine e l'intervento diretto sulle sorgenti della contaminazione.

La scelta dell'attenuazione naturale controllata richiede comunque attività d'indagine del sito (caratterizzazione geologica ed ambientale, risk assessment) e individuazione del miglior metodo di bonifica (confronto tra le diverse opzioni d'intervento, monitoraggio delle prestazioni). Anzi, proprio la fase di caratterizzazione del sito e della contaminazione, l'individuazione dei percorsi e dei tempi di migrazione, la valutazione quantitativa dei processi che portano all'attenuazione del carico contaminante rivestono un ruolo fondamentale e ancor più decisivo rispetto ad interventi di bonifica attivi. I maggiori costi legati al dettaglio necessario in fase preliminare sono poi spesso ampiamente ripagati in fase d'intervento (specialmente per le spese delle attrezzature e della loro manutenzione).

Le categorie di contaminanti che più si prestano a trattamenti di bonifica mediante processi di attenuazione naturale riguardano essenzialmente idrocarburi petroliferi in genere (con la sola esclusione degli MTBE) ed i solventi clorurati alifatici. Per effetto di reazioni di ossidoriduzione e adsorbimento sulla superficie dei granuli è possibile ottenere effetti positivi anche per gli elementi inorganici.