



Provincia
di Milano

Linea Guida 13

*Linee Guida per interventi di bonifica
mediante biopile e landfarming*





**Provincia
di Milano**

Presidente:
Assessora all'Ambiente e Parco Sud:

Filippo Luigi Penati
Bruna Brembilla

A cura della:
Direttore Centrale:

Direzione centrale risorse ambientali
Cristina Melchiorri

Coordinamento:
Supporto tecnico e redazionale:

Luca Raffaelli
Rosanna Cantore, Andrea Zelioli



**Università degli Studi
di Milano
Dipartimento di
Scienze della Terra 'A. Desio'**

Giovanni Pietro Beretta, Roberta Pellegrini

Questa pubblicazione è frutto della convenzione in atto tra la
Provincia di Milano e l'Università degli Studi di Milano

LINEE GUIDA PER INTERVENTI DI BONIFICA MEDIANTE BIOPILE E LANDFARMING

INDICE

1	PREMESSA	2
2	VALUTAZIONE DELL'APPLICABILITÀ DELLA TECNOLOGIA	5
2.1	CARATTERISTICHE DEL TERRENO	5
2.1.1	<i>Densità delle popolazioni microbiche</i>	5
2.1.2	<i>PH del terreno</i>	6
2.1.3	<i>Contenuto idrico del terreno</i>	6
2.1.4	<i>Temperatura del terreno</i>	6
2.1.5	<i>Concentrazione dei nutrienti</i>	7
2.1.6	<i>Tessitura del terreno</i>	7
2.2	CARATTERISTICHE DEI CONTAMINANTI	7
2.2.1	<i>Volatilità</i>	7
2.2.2	<i>Struttura chimica</i>	8
2.2.3	<i>Concentrazione e tossicità</i>	8
2.3	CONDIZIONI CLIMATICHE	9
2.3.1	<i>Temperatura ambiente</i>	9
2.3.2	<i>Piuvosità</i>	10
2.3.3	<i>Vento</i>	10
2.4	VALUTAZIONE PRELIMINARE DELL'EFFICACIA DEL TRATTAMENTO	10
3	VALUTAZIONE DEL PROGETTO PER LA BIOPILA	11
3.1	GENERALITÀ COSTRUTTIVE	16
4	VALUTAZIONE DEL PROGETTO PER IL LANDFARMING	18
5	PIANO DELLE ATTIVITÀ E MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA PER IL TRATTAMENTO TRAMITE BIOPILE	22
5.1	AVVIO DEL SISTEMA E VERIFICA DI FUNZIONAMENTO	23
5.1.1	<i>Monitoraggi periodici</i>	24
5.1.2	<i>Riparazioni ordinarie</i>	24
5.2	CAMPIONAMENTO	26
5.3	PIANO DI COORDINAMENTO E SICUREZZA	31
6	PIANO DELLE ATTIVITÀ E MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA PER IL LANDFARMING	33
6.1	ATTIVITÀ, MANUTENZIONE E MONITORAGGIO DEL LANDFARMING	33
6.2	CAMPIONAMENTO	35
6.3	PIANO DI COORDINAMENTO E SICUREZZA	37
7	CHIUSURA DELL'INTERVENTO	37
7.1	BIOPILE	37
7.2	LANDFARMING	38
	BIBLIOGRAFIA	40

1 PREMESSA

Le biopile ed il landfarming sono due tecniche di risanamento biologico dei terreni che si basano sulla capacità dei microrganismi autoctoni del terreno di degradare alcuni tipi di contaminanti in determinate condizioni ambientali. Generalmente vengono utilizzati per la bonifica di terreni contaminati da prodotti del petrolio. I terreni vengono scavati e sistemati in cumuli per essere decontaminati tramite biodegradazione. L'attività biologica aerobica viene infatti stimolata nei terreni attraverso aerazione e aggiunta di nutrienti, minerali e acqua, degradando così i prodotti, generalmente derivati del petrolio, adsorbiti al terreno.

L'utilizzo di biopile e del landfarming è particolarmente consigliato nei casi in cui la contaminazione raggiunga una profondità massima di 2.5 m dal piano campagna, per siti con aree contaminate piccole o in caso di molti siti che necessitano di un'area di trattamento comune.

Entrambe le tecniche sono basate sulla stimolazione della crescita e della moltiplicazione dei batteri aerobi tramite l'uso di ossigeno, per la degradazione aerobica dei contaminanti. La differenza principale tra le due tecniche è che nel landfarming il terreno viene ossigenato movimentandolo, mentre nelle biopile l'aria viene fatta circolare nel terreno attraverso tubature con tecniche di estrazione / iniezione.

Tabella 1.1 – Vantaggi e svantaggi delle biopile

Vantaggi	Svantaggi
Progettazione ed implementazione semplici	Difficile ottenere una riduzione delle concentrazioni superiore al 95% e concentrazioni finali inferiori a 0.1 mg/kg
Tempi di trattamento brevi: compresi tra 3 mesi e 2 anni in condizioni ottimali	Può non essere efficace per concentrazioni molto elevate (idrocarburi tot. > 50000 mg/kg)
Costi limitati: 25-80 €/t di terreno contaminato	La crescita microbica può essere inibita in presenza di alte concentrazioni di metalli pesanti (> 2500 mg/kg)
Efficace su composti organici con tassi di biodegradazione lenti	I composti volatili tendono a evaporare durante il trattamento piuttosto che biodegradarsi
Richiede meno spazio del landfarming	Richiede molto spazio, anche se meno del landfarming
Può essere progettato come sistema chiuso; è possibile controllare le emissioni gassose	La generazione di vapori durante l'aerazione può richiedere trattamento prima dello scarico
Può essere progettato per tutte le combinazioni tra condizioni del sito e tipo di contaminanti	Può essere necessario un rivestimento del fondo in caso di produzione di percolato consistente
Il terreno, una volta trattato, è pulito e non richiede contenimenti particolari	

Le biopile ed il landfarming si sono rivelati strumenti efficaci per la rimozione di contaminanti di origine petrolifera. I composti più leggeri tendono ad essere rimossi per volatilizzazione durante l'aerazione dei terreni, mentre gli altri componenti vengono rimossi per biodegradazione. Nel caso la presenza di componenti volatili sia elevata potrebbe essere necessario predisporre un impianto di trattamento delle emissioni gassose. Passando ai composti meno leggeri si nota una progressiva diminuzione della percentuale di volatilizzazione ed un aumento della percentuale di biodegradazione del composto.

L'uso di queste tecniche di trattamento viene consigliato nel caso il terreno sia contaminato principalmente da idrocarburi del petrolio, la presenza di contaminanti clorurati o refrattari sia limitata, il volume totale di terreno da trattare sia maggiore di 200 m³. In Tabella 1.1 e 1.2 vengono elencati i principali vantaggi e svantaggi rispettivamente dell'uso delle biopile e del landfarming come tecniche di risanamento.

Tabella 1.2 – Vantaggi e svantaggi del landfarming

Vantaggi	Svantaggi
Progettazione ed implementazione semplici	Difficile ottenere una riduzione delle concentrazioni superiore al 95% e concentrazioni finali inferiori a 0.1 mg/kg
Tempi di trattamento brevi compresi tra 6 mesi e 2 anni in condizioni ottimali	Può non essere efficace per concentrazioni molto elevate (idrocarburi tot. > 50000 mg/kg)
Costi limitati: 25-50 €/t di terreno contaminato	La crescita microbica può essere inibita in presenza di alte concentrazioni di metalli pesanti (> 2500 mg/kg)
Efficace su composti organici con tassi di biodegradazione lenti	I composti volatili tendono a evaporare durante il trattamento piuttosto che biodegradarsi
	Richiede molto spazio
	La generazione di vapori e polvere durante l'aerazione può richiedere trattamento prima dello scarico
	Può essere necessario un rivestimento del fondo in caso di produzione di percolato consistente

Il processo decisionale che porta alla scelta della biopila o del landfarming come sistema di bonifica per una determinata area, prevede tre fasi principali:

- Valutazione dell'applicabilità della tecnologia: in questa fase vengono identificati i fattori del terreno, dei composti e climatici che contribuiscono all'efficacia del trattamento. Una volta identificati, vengono confrontati con le condizioni operative ritenute accettabili.
- Valutazione del progetto: questa fase consente di determinare se i parametri operativi del sistema di trattamento sono stati definiti in modo appropriato, se i componenti progettuali essenziali sono stati specificati e se i dettagli costruttivi sono conformi alle pratiche standard.

- Valutazione dei piani di attività e di monitoraggio: questa fase consente di determinare se la fase iniziale ed il funzionamento del sistema ed i programmi di controllo a lungo termine siano sufficienti.

2 VALUTAZIONE DELL'APPLICABILITÀ DELLA TECNOLOGIA

L'efficacia di un trattamento biologico del terreno dipende da numerosi fattori, quali: le caratteristiche del terreno, le caratteristiche dei contaminanti e le condizioni climatiche. In Tabella 2.1 vengono schematizzate le caratteristiche principali da considerare nella valutazione dell'applicabilità di un trattamento tipo biopila o landfarming.

Tabella 2.1 – Parametri utilizzati per la valutazione dell'applicabilità di un tecnica di risanamento biologica (U.S.E.P.A., 1994)

Caratteristiche del terreno	Caratteristiche dei contaminanti	Condizioni climatiche
Densità della popolazione microbica	Volatilità	Temperatura ambiente
pH del terreno	Struttura chimica	Piovosità
Contenuto idrico	Concentrazione e tossicità	Vento
Temperatura del terreno		
Concentrazione dei nutrienti		
Tessitura del terreno		

Di seguito viene riportata una breve descrizione di ciascun parametro. Si tenga presente che, essendo la biopila ed il landfarming dei sistemi di trattamento fuori terra, la maggior parte dei parametri (escluse le condizioni climatiche) può essere modificata sia in fase progettuale sia in fase operativa. Quindi è fondamentale, durante la fase di progettazione, individuare quei parametri che influiscono negativamente sul funzionamento del sistema ed eventualmente modificarli in modo da renderli ottimali.

2.1 Caratteristiche del terreno

2.1.1 Densità delle popolazioni microbiche

Generalmente il terreno contiene una quantità di microrganismi (specialmente batteri) sufficiente a sostenere la biodegradazione. Tuttavia è possibile, prima dell'inizio del trattamento, arricchire il terreno con microrganismi coltivati (comunque autoctoni) e con nutrienti di varia natura. I microrganismi richiedono, per la crescita, nutrienti inorganici come azoto e fosforo; questi elementi sono normalmente presenti nel terreno in quantità sufficiente, ma a volte può essere necessario aggiungerne al terreno per incrementare le popolazioni microbiche.

I batteri, tramite un processo metabolico, ossidano il carbonio presente nei contaminanti e lo trasformano così in anidride carbonica. I batteri che utilizzano i composti organici (come i composti del petrolio) come fonte di carbonio si chiamano eterotrofi, mentre quelli che utilizzano i composti inorganici si chiamano autotrofi. Un'ulteriore distinzione esiste tra batteri aerobi (che utilizzano l'ossigeno) e anaerobi (che non utilizzano ossigeno, ma altri

composti quali nitrati e solfati). Per la degradazione di prodotti petroliferi è fondamentale che il terreno sia ricco di batteri aerobi eterotrofi.

Per verificare che il terreno contenga batteri in grado di degradare i contaminanti è possibile condurre analisi di laboratorio sui campioni del terreno del sito. Tali analisi devono includere il conteggio dei batteri in termini di "unità formanti colonie" (CFU) per grammo di terreno, che normalmente sono presenti in quantità dell'ordine di $10^4 \div 10^7$ CFU/g di terreno. Perché il trattamento sia efficace, il terreno deve contenere almeno 10^3 CFU/g. Se il terreno contiene una quantità di batteri inferiore è probabile che vi siano delle condizioni tossiche per i microrganismi (presenza di elevate concentrazioni di contaminanti o di metalli pesanti). In questi casi è comunque possibile applicare una tecnica di trattamento biologico previa aggiunta di ammendanti per ridurre le concentrazioni tossiche ed incrementare le popolazioni microbiche.

2.1.2 PH del terreno

Per favorire l'attività microbica, il pH dovrebbe essere compreso tra 6 e 8, un valore di 7 è ottimale. I terreni con valori di pH diversi da quelli sopra indicati possono essere corretti durante la costruzione o durante il trattamento. Il pH può essere aumentato tramite aggiunta di calce e diminuito tramite aggiunta di solfuri durante la costruzione. Mentre durante l'attività è possibile aggiustare il pH tramite aggiunta di soluzioni liquide.

2.1.3 Contenuto idrico del terreno

I microrganismi necessitano di un ambiente umido per crescere; tuttavia un eccesso di umidità può ridurre la permeabilità del terreno della biopila all'aria, riducendo l'apporto di ossigeno ai batteri. Il tasso di umidità ideale per il terreno nel sistema è compreso tra 40% e 85% della capacità di campo o compreso tra 12% e 30% in peso.

Periodicamente è necessario aggiungere acqua al terreno, che altrimenti tende ad asciugarsi in seguito ad evaporazione. In aree soggette a frequenti ed abbondanti precipitazioni, e comunque per mantenere più a lungo l'umidità ottimale nel terreno, è possibile predisporre una copertura impermeabile sopra la biopila. Tale copertura ha anche lo scopo di preservare il cumulo dall'erosione superficiale ad opera di acqua di ruscellamento superficiale e del vento.

2.1.4 Temperatura del terreno

Il tasso di crescita dei batteri è funzione diretta della temperatura. L'attività microbica infatti diminuisce drasticamente al di sotto dei 10°C e al di sopra dei 45°C e cessa totalmente al di sotto dei 5°C . Per temperature comprese tra 10°C e 45°C si è notato che l'attività microbica raddoppia per ogni aumento di temperatura di 10° . Essendo la temperatura del terreno influenzata dalle variazioni della temperatura dell'ambiente circostante, l'attività batterica sarà differente nei diversi periodi dell'anno.

2.1.5 Concentrazione dei nutrienti

I microrganismi, per la crescita, hanno bisogno di nutrienti quali azoto e fosforo, generalmente presenti in quantità adeguata nel terreno. Può tuttavia essere necessario aggiungere tali elementi al terreno per supportare l'attività microbica. Il rapporto ideale carbonio:azoto:fosforo nel terreno per la biodegradazione è compreso tra 100:10:1 e 100:1:0.5, a può variare a seconda del tipo di contaminanti e di microrganismi coinvolti nel processo di biodegradazione.

Il contenuto naturale del terreno per questi elementi può essere determinato tramite analisi chimiche su campioni provenienti dal sito. Le concentrazioni così riscontrate possono essere confrontate con i rapporti stechiometrici calcolati per il processo di biodegradazione. È possibile fare un'approssimazione della quantità di Carbonio presente assimilandola alla massa totale di contaminanti del sito (in realtà generalmente il carbonio costituisce circa il 90% in peso degli idrocarburi del petrolio). Con questa approssimazione è possibile calcolare speditamente le quantità di azoto e fosforo necessarie. Una volta calcolata la quantità di nutrienti necessaria ad una buona crescita microbica, si può calcolare la concentrazione ottimale dei nutrienti. Dopo il confronto con i valori presenti nel terreno, si determina la necessità o meno di un'aggiunta di nutrienti prima della formazione del cumulo.

Nel caso si riveli necessaria l'aggiunta di Azoto, si dovrebbe ricorrere a fonti di Azoto a lento rilascio, in quanto questo elemento può causare un abbassamento del pH.

2.1.6 Tessitura del terreno

La tessitura è un parametro di fondamentale importanza per l'efficienza di un sistema di trattamento biologico, in quanto influenza direttamente la permeabilità, il contenuto idrico e la densità del terreno. Infatti i terreni argillosi sono difficili da aerare e pertanto al loro interno possono raggiungere solo livelli di ossigeno molto bassi; in tali tipi di terreno è anche difficile ottenere una distribuzione omogenea dei nutrienti; infine a seguito di precipitazioni abbondanti possono mantenere un tasso di umidità elevato per lungo tempo.

Nel caso il sito da bonificare sia costituito da terreni argillosi potrebbe essere necessario, durante la costruzione del cumulo, miscelare il terreno con ammendanti (gesso) e materiali dilatanti (segatura, paglia o cippato) per garantire una tessitura più sciolta.

2.2 *Caratteristiche dei contaminanti*

2.2.1 Volatilità

La volatilità dei contaminanti da trattare è un elemento importante in quanto i composti volatili, durante l'iniezione o l'estrazione di aria dalla biopila, o durante il rivolgimento del terreno nel landfarming, tendono ad evaporare piuttosto che a biodegradarsi. Nel caso siano presenti composti volatili, se il trattamento viene effettuato tramite biopila, è opportuno che la circolazione d'aria venga operata tramite estrazione e non tramite

iniezione. In tal modo l'aria estratta dalla biopila, prima di essere liberata in atmosfera o rimessa in circolo nella biopila, può essere trattata. L'evaporazione di composti volatili può comunque essere ridotta minimizzando i tassi di estrazione o iniezione di aria, diminuendo però in tal modo anche il tasso di degradazione dei contaminanti non volatili.

I prodotti del petrolio più comuni nei siti contaminati spaziano da quelli con frazione volatile significativa (come la benzina) a quelli prevalentemente non volatili (come gli oli lubrificanti).

2.2.2 Struttura chimica

La struttura chimica dei contaminanti è importante nello stabilire la durata della biodegradazione. Infatti, pur essendo praticamente tutti i componenti del petrolio biodegradabili, a seconda della struttura molecolare il processo degradativo può richiedere tempi differenti: più è complessa la struttura molecolare, più è lungo il processo di degradazione. La maggior parte dei composti alifatici e monoaromatici a basso peso molecolare ($\leq C_9$) vengono biodegradati più facilmente dei composti organici alifatici o poliaromatici più pesanti. In Tabella 2.2 vengono riportati in ordine di biodegradabilità i composti più comuni trattabili con le tecniche considerate.

Una valutazione della struttura chimica dei composti contaminanti nel sito proposti per il trattamento con tecniche biologiche consente di determinare quali possono essere i composti più difficili da eliminare. Si consiglia pertanto di tarare le stime dei tempi di trattamento, gli studi di biotratatabilità, i test pilota, i piani di attività e monitoraggio su quegli elementi che si dimostrano più difficilmente degradabili.

2.2.3 Concentrazione e tossicità

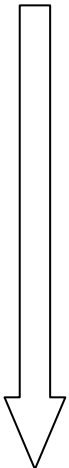
La concentrazione dei contaminanti e di altri elementi presenti nel sito è fondamentale per la determinazione delle condizioni di vita dei microrganismi. Infatti concentrazioni troppo elevate di contaminanti organici e/o di metalli pesanti nel terreno possono essere tossiche o inibire la crescita dei batteri biodegradatori. Al contrario, concentrazioni troppo basse di materia organica causano livelli bassi di attività batterica.

Generalmente vengono considerate tossiche per i microrganismi concentrazioni di idrocarburi totali (TPH) comprese tra 10000 e 50000 mg/kg e concentrazioni di metalli pesanti maggiori di 2500 mg/kg. In caso il terreno da trattare presenti concentrazioni elevate di tali composti, è opportuno che, prima dell'attivazione del sistema, il terreno venga miscelato con terreno pulito per diluire le concentrazioni dei contaminanti e portarle al di sotto dei valori considerati tossici. Viene comunque sconsigliato il trattamento con tecniche biologiche per concentrazioni di TPH superiori a 50000 mg/kg.

Oltre ai valori di concentrazione massima dei contaminanti, è necessario considerare anche i valori obiettivo della decontaminazione. Infatti al di sotto di certi valori soglia i batteri non dispongono di una sufficiente quantità di Carbonio per mantenere la loro attività. Pertanto il valore soglia di attività microbica (determinabile in laboratorio) deve essere inferiore al valore obiettivo della bonifica.

I valori soglia variano a seconda dei tipi di contaminanti e dei tipi di batteri, tuttavia si può considerare che non è possibile raggiungere valori inferiori alle 0.1 mg/kg con il solo trattamento biologico; è inoltre dimostrato che non si riescono ad ottenere riduzioni della contaminazione superiori al 95%, a causa della presenza di specie refrattarie alla degradazione biologica.

Tabella 2.2 – Struttura chimica e biodegradabilità di alcuni composti organici (U.S.E.P.A., 1994)

Biodegradabilità	Composti campione	Prodotti in cui si trovano i composti
Più degradabile  Meno degradabile	n-butano, l-pentano n-ottano	Benzina
	Nonano	Gasolio
	Metil butano Dimetilpentene Metilottano	Benzina
	BTEX	Benzina
	Propilbenzene	Gasolio, cherosene
	Decani	Gasolio
	Dodecani	Cherosene
	Tridecani	Combustibili per il riscaldamento
	Tatradecani	Oli lubrificanti
	Naftaline	Gasolio
	Fluoranteni	Cherosene
	Pireni	Oli per riscaldamento
	Acenafteni	Oli lubrificanti

2.3 Condizioni climatiche

2.3.1 Temperatura ambiente

La temperatura ambiente è considerata un parametro importante, in quanto influenza direttamente la temperatura del terreno. Come detto in precedenza le temperature ottimali per la crescita batterica sono comprese tra 10°C e 45°C. In caso la temperatura si discosti sensibilmente da questo intervallo, è possibile intervenire con opere di copertura, chiusura e riscaldamento dei cumuli per ottenere le condizioni ottimali di biodegradazione.

2.3.2 Piovosità

Alcuni progetti non includono la realizzazione di coperture impermeabili, esponendo pertanto il terreno in trattamento ai fattori climatici. La caduta di pioggia sul cumulo può causare l'aumento dell'umidità nel terreno e l'erosione superficiale. Variazioni impreviste del tasso di umidità del terreno, dovute a precipitazioni copiose o a siccità, possono influenzare l'attività batterica in modo non controllabile.

Se l'area è ubicata in un sito dove la piovosità annua è maggiore di 750 mm, è necessario predisporre una copertura per la protezione del cumulo. Inoltre si deve prevedere la realizzazione di sponde perimetrali e di un sistema di collettamento del percolato per il controllo del dilavamento dei terreni da parte dell'acqua piovana.

2.3.3 Vento

È possibile che si verifichi erosione dei cumuli di terreno anche da parte del vento, tuttavia tale inconveniente è rimediabile mantenendo un certo grado di umidità sulla superficie del terreno o predisponendo un sistema di copertura.

2.4 *Valutazione preliminare dell'efficacia del trattamento*

I test per la valutazione dell'efficacia del trattamento di biorisanamento sono particolarmente raccomandati nel caso siano presenti alti livelli di composti tossici nel terreno, che possono limitare l'attività microbica.

I test di trattabilità effettuati in laboratorio devono essere condotti in modo da restituire risultati che consentano una corretta progettazione ed implementazione degli interventi. I test devono fornire dati relativi alla biodegradabilità dei contaminanti, alla capacità dei microrganismi naturalmente presenti nel terreno di degradare i contaminanti, alle condizioni ottimali di crescita dei microrganismi, ai tassi di biodegradazione ed alla quantità di nutrienti naturalmente presenti nel terreno.

Esistono due tipi di test di laboratorio che generalmente vengono effettuati per verificare l'efficacia del trattamento biologico: i test in "buretta" (flask studies) ed i test in "vaschetta" (pan studies). Entrambi i tipi di test consentono di individuare le caratteristiche fisiche e chimiche di base dei terreni da trattare. In Tabella 2.3 vengono elencati i diversi tipi di analisi applicate ai terreni. Gli obiettivi di tali analisi sono:

- determinare il tipo e la concentrazione dei contaminanti nei terreni che saranno utilizzati nei test di trattabilità;
- stimare la concentrazione iniziale dei composti presenti nei campioni per poter poi valutare la riduzione dei contaminanti;
- determinare se i nutrienti sono presenti in quantità sufficiente per supportare buoni livelli di attività batterica;

- valutare eventuali parametri che possono inibire la crescita batterica (metalli pesanti, pH, ecc.).

Tabella 2.3 – Parametri fisici e chimici per gli studi di trattabilità (U.S.E.P.A., 1994)

Parametro	Proprietà misurate
Tossicità del terreno	Tipo e concentrazione dei contaminanti o dei metalli presenti, pH
Tessitura del terreno	Granulometria, contenuto di argilla, umidità, porosità, permeabilità, peso di volume
Nutrienti	Nitrati, fosfati, altri anioni e cationi
Biodegradabilità dei contaminanti	Concentrazione del carbonio organico totale (TOC), volatilità, struttura chimica

Dopo aver caratterizzato i campioni, è possibile effettuare i test di laboratorio in buretta o in vaschetta. I test in buretta sono dei test per la biodegradazione in acqua o nel terreno che utilizzano campioni composti da fanghi che costituiscono dei microcosmi. I test in vaschetta, più attendibili anche se più costosi dei precedenti, utilizzano terreno, senza aggiunta di acqua, posto in vaschette di vetro o di metallo per costituire dei microcosmi del tutto simili alle strutture di trattamento (cumuli per biopile o per landfarming). In entrambi i tipi di test si verifica la degradazione misurando la riduzione di concentrazione dei contaminanti, le variazioni nella popolazione batterica ed altri parametri nel tempo.

Un'ulteriore valutazione della trattabilità può essere fornita dall'interpretazione di prove respirometriche sui cumuli di materiale da trattare, la cui esecuzione è descritta nel capitolo 5.2.

3 VALUTAZIONE DEL PROGETTO PER LA BIOPILA

Una volta verificata la possibilità di applicare la biopila per la bonifica del terreno in esame, si può passare al progetto della biopila, che dovrà comprendere una descrizione dettagliata della struttura della biopila corredata da tavole dettagliate con il disegno della biopila e di tutti i servizi (sistemi di aerazione, sistemi di drenaggio e di raccolta percolato, ecc.) che verranno realizzati. In Figura 3.1 viene illustrato lo schema generale di funzionamento di una biopila.

Il primo passo da compiere in questa fase è decidere se il sito che ospiterà la biopila dovrà essere di tipo permanente o temporaneo. La differenza principale tra questi tipi di strutture risiede nella costruzione delle aree di stoccaggio del terreno e di trattamento. Nel caso di strutture temporanee è possibile operare su superfici asfaltate o cementate esistenti, oppure su sottofondo compattato di suolo o argilla. Una struttura permanente deve invece prevedere la costruzione di un sottofondo in cemento appositamente realizzato per la biopila. Alcune strutture di supporto alle attività di gestione, quali aree coperte per lo stoccaggio degli strumenti o del terreno e simili, possono essere costruite in caso di strutture permanenti.

Generalmente il trattamento in strutture temporanee è più pratico (in quanto non si deve trasportare il terreno presso la struttura di trattamento) e più economico. La costruzione di strutture permanenti può essere presa seriamente in considerazione qualora si prevedano tempi di utilizzo superiori ai 5 anni.

A prescindere dal tipo di struttura che si scelga di utilizzare, il progetto della biopila dovrà individuare diversi fattori fondamentali per la realizzazione dell'impianto quali (Brown e Cartwright, 1990):

- *Requisiti dell'area:* in generale il sito da destinare al posizionamento della biopila dovrebbe essere facilmente accessibile, essere piano e con terreno con buone qualità tecniche, essere ubicato al di fuori di aree esondabili per eventi di piena con tempi di ritorno di 100 anni, essere in un'area recintabile ed essere lontano da zone residenziali. Preferibilmente il trattamento tramite biopila dovrebbe essere effettuato on-site, cioè nello stesso sito di provenienza del terreno contaminato, minimizzando i costi di gestione e trasporto. È possibile calcolare l'area che occuperà la biopila dividendo la quantità di terreno da trattare per l'altezza prevista della biopila (compresa comunque tra 1 m e 3 m). Essendo la biopila costruita in modo da avere i lati con una determinata pendenza è necessario considerare un'area maggiore di quella calcolata, comprensiva anche delle sponde perimetrali e delle vie d'accesso. In genere non vi sono restrizioni areali per una biopila; l'area deve essere libera da ostacoli e piatta per consentire i movimenti di terra e la costruzione delle opere.

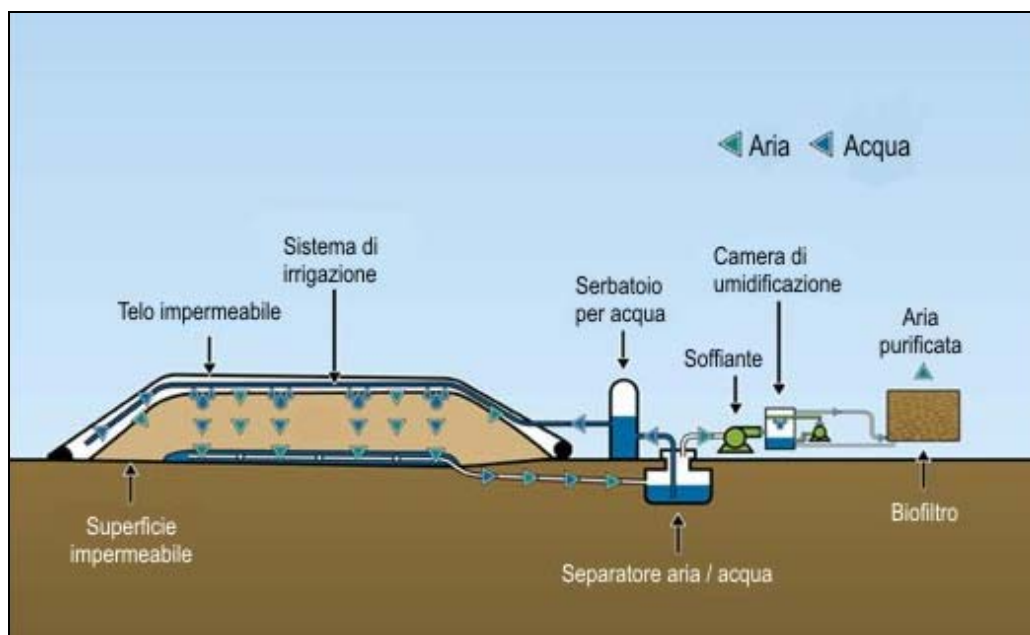


Figura 3.1 – Schema di funzionamento di una biopila (da www.biogenie-env.com).

Le vie d'accesso al sito (strade e ponti) devono essere in grado di sopportare il peso di veicoli con carichi notevoli (40 t circa). Deve essere considerata anche l'area di stoccaggio e preparazione del terreno (per la miscelazione con nutrienti, l'aggiunta di ammendanti, ecc.). Nelle vicinanze del sito deve possibilmente essere presente una connessione elettrica per l'alimentazione degli strumenti (pompe, soffiati, ecc.) ed una fonte di approvvigionamento idrico. In Tabella 3.1 vengono riassunti i requisiti

principali di idoneità di un'area ad ospitare una biopila. In Figura 3.2 viene illustrata una tipica configurazione di un'area di trattamento. A seconda della configurazione dell'area è possibile costituire una sola biopila o più biopile.

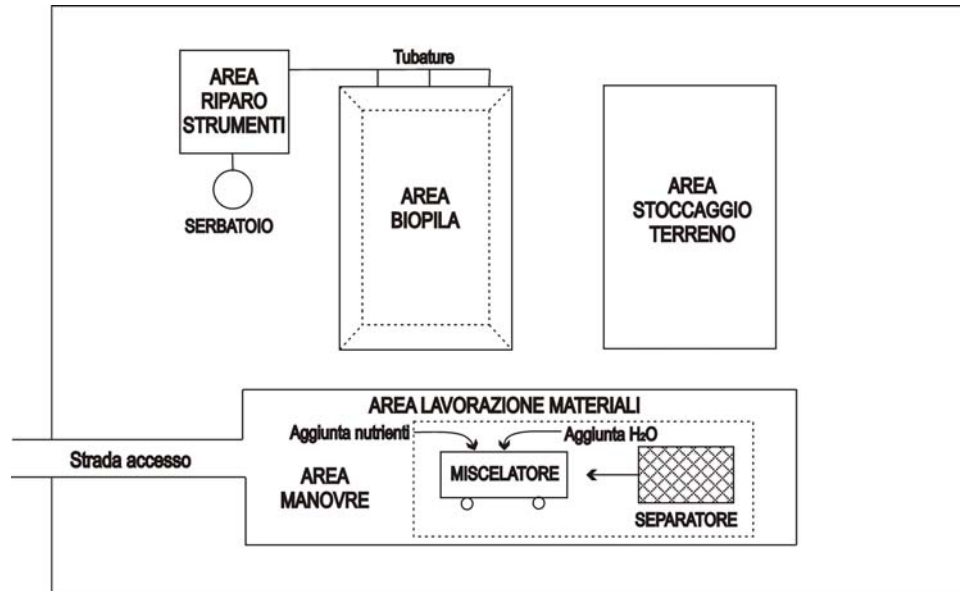


Figura 3.2 – Esempio di configurazione dell'area della biopila (NFESC, Battelle, 1998).

- *Costruzione della biopila:* include la preparazione del sito e della base della biopila, le sponde, i teli per la copertura (se necessari), disposizione dei sistemi di iniezione/estrazione di aria e di raccolta e trattamento del percolato, disposizione dei sistemi di iniezione dell'acqua e dei nutrienti, metodi di pre-trattamento del terreno, strutture per il trattamento dei vapori (se necessarie). In Figura 3.3 è schematizzata la struttura tipica di una biopila.
- *Preparazione della base:* la base della biopila assolve le seguenti funzioni. Innanzitutto costituisce una base stabile per supportare la biopila e le operazioni di rimaneggiamento del terreno ad essa associate. Inoltre ha funzione di barriera contro la migrazione di contaminanti nei terreni sottostanti la biopila; infine dovrebbe avere un'inclinazione dell' 1÷2% per impedire il ristagno di percolato alla base della biopila. La base della biopila può essere di nuova costruzione, in cemento Portland o in bitume, ma la biopila può anche essere costruita su una base preesistente come un parcheggio o un'area di stoccaggio. Per limitare la possibilità di migrazione dei contaminanti la base, costituita da terreno compattato o argilla, può essere ricoperta con un telo impermeabile. L'utilizzo di aree già pavimentate come base della biopila riduce i costi di costruzione, ma richiede interventi particolari per le vie di drenaggio e per la pendenza necessarie alla raccolta del percolato.
- *Sistema di aerazione:* l'aria può essere fatta circolare all'interno della biopila tramite un sistema di tubi collegato ad una soffiante. Generalmente i tubi vengono posizionati alla base della biopila, in uno strato drenante posto sopra lo strato impermeabilizzante. I componenti principali del sistema di aerazione comprendono una pompa di aerazione, un collettore con una condotta principale collegata alla pompa e valvole ai punti di diramazione del collettore. In caso si decida di aerare la biopila in modalità estrattiva è

necessario posizionare un sistema di abbattimento dell'acqua a monte della soffiante. Inoltre in questo modo è possibile integrare il sistema di raccolta del percolato al sistema di aerazione. I componenti aggiuntivi necessari sono: un serbatoio di abbattimento dell'acqua, un separatore a ciclone (opzionale), un serbatoio per la raccolta dell'acqua separata ed eventualmente un sistema di trattamento dei gas esausti.

Tabella 3.1 – Criteri per la selezione di un sito per una biopila

Parametro di selezione	Definizione	Raccomandazioni
Geografia	Ubicazione e condizioni del sito	Area con buon drenaggio e al di fuori di zona di esondazione con tempi di ritorno di 100 anni. Lontano da centri residenziali (almeno 500 m). Preferibile un sito già pavimentato (parcheggio, ecc.).
Accessibilità	Accesso ed uscita dal sito	Strade di accesso con fondo in ghiaia compattata, asfalto o cemento. Verifica dei limiti di portanza dei ponti. Sito vicino al sito di provenienza del terreno, se possibile. Sito disponibile per il tempo necessario.
Requisiti areali	Area necessaria per le attività correlate alla biopila	Include la strada di accesso, l'area di stoccaggio del terreno, l'area di trattamento, la biopila, il riparo delle pompe e delle soffianti, il serbatoio di stoccaggio.
Servizi	Fonti di approvvigionamento idrico ed elettrico	Per un'unica biopila dovrebbe bastare una linea a 110/220 V, 60 amp. Fonte di acqua presente nel sito.
Logistica	Trasporto, gestione e immagazzinamento del terreno	I mezzi devono avere una strada di accesso adeguata e spazio sufficiente per le manovre. Gli strumenti di gestione devono essere sempre disponibili per qualsiasi operazione di spostamento, miscelazione e trattamento del terreno. L'area dove si maneggia il terreno contaminato deve essere protetta con un telo impermeabile. Il terreno stoccato deve essere protetto dagli agenti climatici tramite la posa di un telo impermeabile o stoccandolo sotto una tettoia.
Sicurezza	Misure di controllo dell'accesso al sito	Area recintata con cancello d'ingresso. Cartello all'ingresso con descrizione del tipo di progetto e contatti. Chiusura con lucchetto delle aree di stoccaggio e delle attrezzature (pompe, soffianti, ecc.).

- *Sistemi di controllo delle acque e del percolato*: la realizzazione di sponde perimetrali consente il controllo delle acque sia in entrata (impedendone l'ingresso all'area della biopila) sia in uscita (collettando tutte le acque provenienti dalla superficie della biopila verso un serbatoio per consentirne il successivo eventuale trattamento). Oltre alle sponde, per la raccolta del percolato generalmente si dispone un sistema di tubature nei punti più bassi del cumulo, una pompa collegata al sistema di tubature ed un serbatoio. Nelle biopile di piccole dimensioni il sistema di raccolta del percolato può

essere incorporato al sistema di aerazione, in quanto l'esperienza ha dimostrato che gran parte dell'acqua viene risucchiata dal sistema di estrazione, mentre nelle biopile con copertura impermeabile il percolato non arriva ai punti più bassi del cumulo. Pertanto è sufficiente attrezzare il sistema di aerazione con un serbatoio per la separazione della fase liquida a monte della soffiante, collegandolo con una pompa a vuoto che può essere periodicamente attivata per aspirare l'acqua raccolta e trasferirla nel serbatoio di raccolta del percolato. In Figura 3.5 è schematizzato un sistema di raccolta del percolato incorporato in un sistema di aerazione.

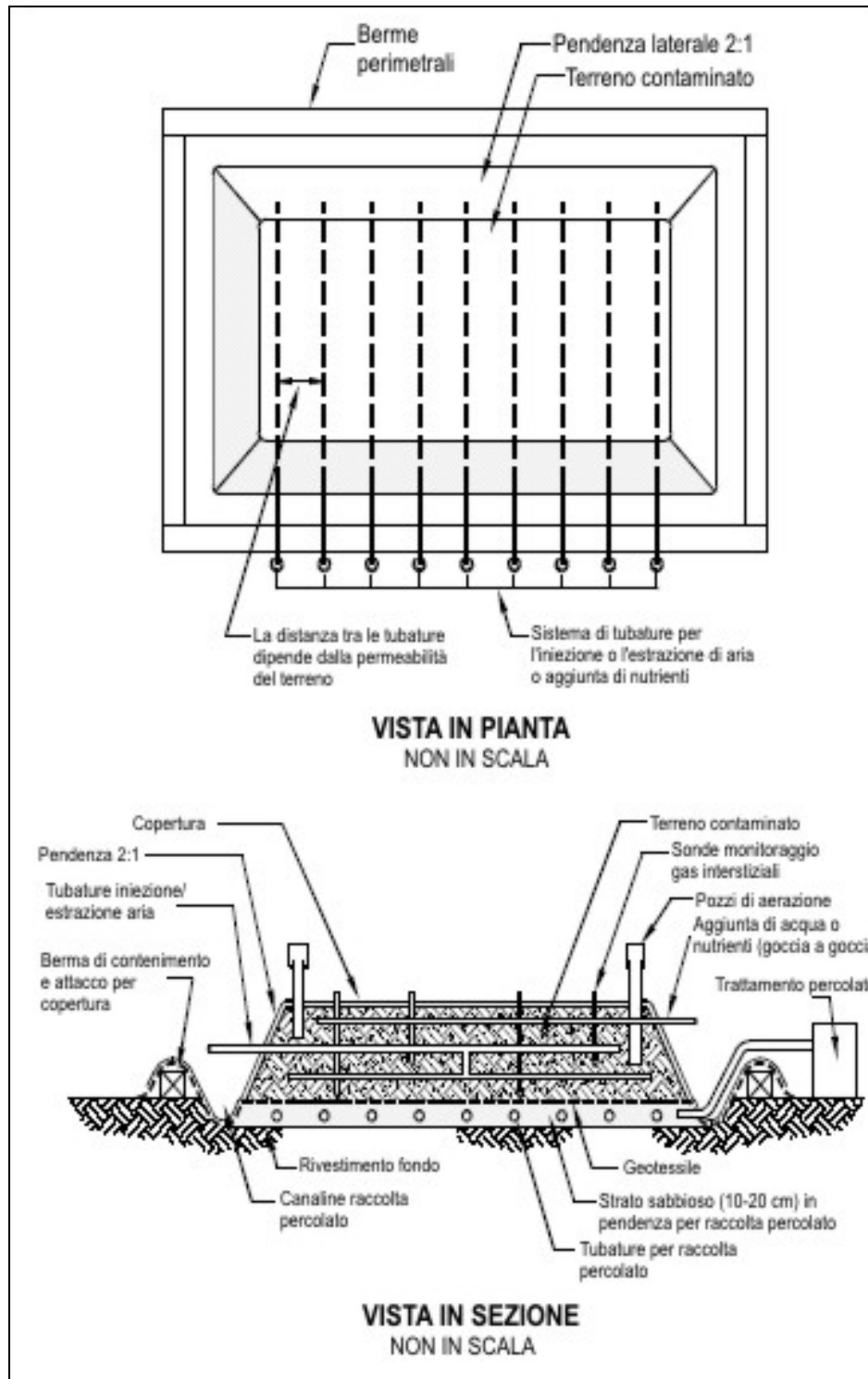


Figura 3.3 – Esempio di progetto di costruzione di una biopila.

- *Sistemi di controllo dell'erosione* da vento e acqua: realizzazione di fianchi con una determinata pendenza, copertura superficiale, costruzione di sistemi di controllo delle acque, irrorazione superficiale per evitare formazione di polvere.
- *Correzione dell'umidità*: l'acqua deve essere presente nel terreno in trattamento in quantità ottimale, in quanto sia l'eccesso, sia la scarsità di acqua possono essere dannose per la biodegradazione dei contaminanti. I microrganismi hanno bisogno di umidità per trasportare i nutrienti, per effettuare i processi metabolici e per mantenere la struttura cellulare. Un eccesso di acqua può causare una diminuzione della permeabilità all'aria ed un aumento della lisciviazione di nutrienti e contaminanti dalla biopila. Le caratteristiche di ritenuta dell'umidità ed il contenuto d'acqua possono essere corrette durante la preparazione iniziale del terreno per la biopila. Generalmente non è richiesta alcuna aggiunta di acqua al terreno, mentre è frequente che sia presente acqua in eccesso. In entrambi i casi è possibile aggiungere al terreno un agente dilatante che aumenti o diminuisca la capacità di ritenuta dell'umidità del terreno. Il tasso di umidità così raggiunto dovrebbe essere sufficiente per tutto il periodo operativo della biopila, a meno che non si faccia circolare aria secca o che il flusso d'aria sia eccessivo; una biopila con copertura perde circa l'1% ÷ 2% di umidità in un periodo di 3 ÷ 4 mesi.
- *Correzione di pH e nutrienti*: generalmente la correzione di nutrienti e pH si realizza nella fase di pre-trattamento del terreno, miscelandolo con fertilizzanti, calce o solfuri; un'alternativa è l'aggiunta di nutrienti liquidi, di soluzioni alcaline o acide dopo la costruzione della biopila, per iniezione, per nebulizzazione o per irrigazione goccia a goccia sulla superficie della biopila.
- *Sicurezza del sito*: è necessario fare in modo che i non addetti ai lavori non si possano avvicinare alla biopila ed entrare così in contatto con i contaminanti (cfr Cap. 5.3).
- *Controllo delle emissioni gassose*: è necessario predisporre un sistema di raccolta e trattamento dei gas in caso siano presenti tra i contaminanti dei composti volatili. Se si opera in modalità estrattiva, il sistema di trattamento dei gas è posto all'uscita della soffiante. Generalmente si tratta di due contenitori per carbone granulare, posti in serie, attraverso i quali viene fatta passare l'aria in uscita.

3.1 Generalità costruttive

Generalmente i terreni richiedono l'aggiunta di acqua e nutrienti prima del trattamento in biopile. Solo in alcuni casi il contenuto naturale dei terreni è sufficiente e la granulometria abbastanza grossolana da consentire di trattare il terreno tal quale senza lavorazioni preliminari.

In terreni ricchi di argilla può essere necessario, prima del trattamento, disgregare il terreno e miscelarlo con degli agenti a grana grossolana che ne aumentino la porosità. A tale scopo, dopo aver eliminato eventuali rocce o detriti dal terreno, è possibile miscelarlo con acqua e nutrienti e, per migliorarne la struttura, con sabbia o pezzetti di legno (cippato).

I dettagli relativi alla costruzione delle biopile sono molto flessibili. In genere le dimensioni e forme delle biopile sono condizionate dallo spazio disponibile e dalla logistica, più che da limitazioni dovute alle prestazioni. Ad esempio la costruzione risulta molto complicata quando le eccessive dimensioni della biopila non consentono il posizionamento del terreno tramite l'uso di una pala meccanica. Per questo l'altezza di una biopila non dovrebbe mai eccedere i 2.5 m. Non ci sono restrizioni per quanto riguarda la lunghezza o la larghezza della biopila, ma durante la preparazione la pala meccanica non dovrebbe passare sopra il terreno già messo in posto per il trattamento.

La necessità di aerare la biopila è un altro fattore limitante. Infatti biopile con un'altezza superiore ai 3 m richiedono più di un livello di tubature di aerazione, complicando così il processo di costruzione. Nel caso si utilizzino più livelli di aerazione, ogni livello viene posto a tetto di uno strato di terreno e coperto con il terreno dello strato successivo per consentire il posizionamento a diverse altezze delle tubature nella biopila. Nel caso di biopile di altezza inferiore ai 3 m, un sistema di aerazione posto alla base della biopila è generalmente sufficiente per l'aerazione della biopila. Le tubature devono essere posizionate in modo da non subire danneggiamenti durante le operazioni di movimento terra.

La costruzione di una biopila deve prevedere anche il posizionamento di alcuni strumenti per il monitoraggio dei parametri fondamentali, quali tubi per il campionamento dei gas nella biopila e termocoppie per la rilevazione della temperatura; è inoltre suggerita anche l'installazione di sensori per la misura dell'umidità.

A seguito della costruzione della biopila, è consigliabile coprirla con teli impermeabili per diversi motivi: mantenere il grado di umidità desiderato e una temperatura costante, impedire le infiltrazioni di acqua e l'erosione eolica, ostacolare la cementazione dello strato superficiale di terreno per cicli umido-secco.

Per limitare i costi del posizionamento dei teli è possibile utilizzare, per il fissaggio, degli pneumatici usati o dei sacchi di sabbia alla base della biopila. In alternativa è possibile utilizzare un edificio preesistente o una tensostruttura al posto della copertura con teli.



Figura 3.4 – esempi di disposizione delle tubature di aerazione della biopila con e senza sponde perimetrali (<http://emaq.aeat.com> e www.flindersbioremediation.com).

Una buona costruzione della biopila è necessaria per evitare l'eccessivo rialzo della temperatura interna. Infatti i processi di degradazione biologica producono calore. Un lieve

rialzo della temperatura può favorire la biodegradazione, tuttavia un eccessivo rialzo ($T > 40^{\circ}\text{C}$) può causare la drastica diminuzione dell'attività batterica.

Il progetto della biopila dovrebbe comprendere anche un piano di smantellamento della biopila a fine trattamento ed una decontaminazione della strumentazione e della base del sito utilizzato.

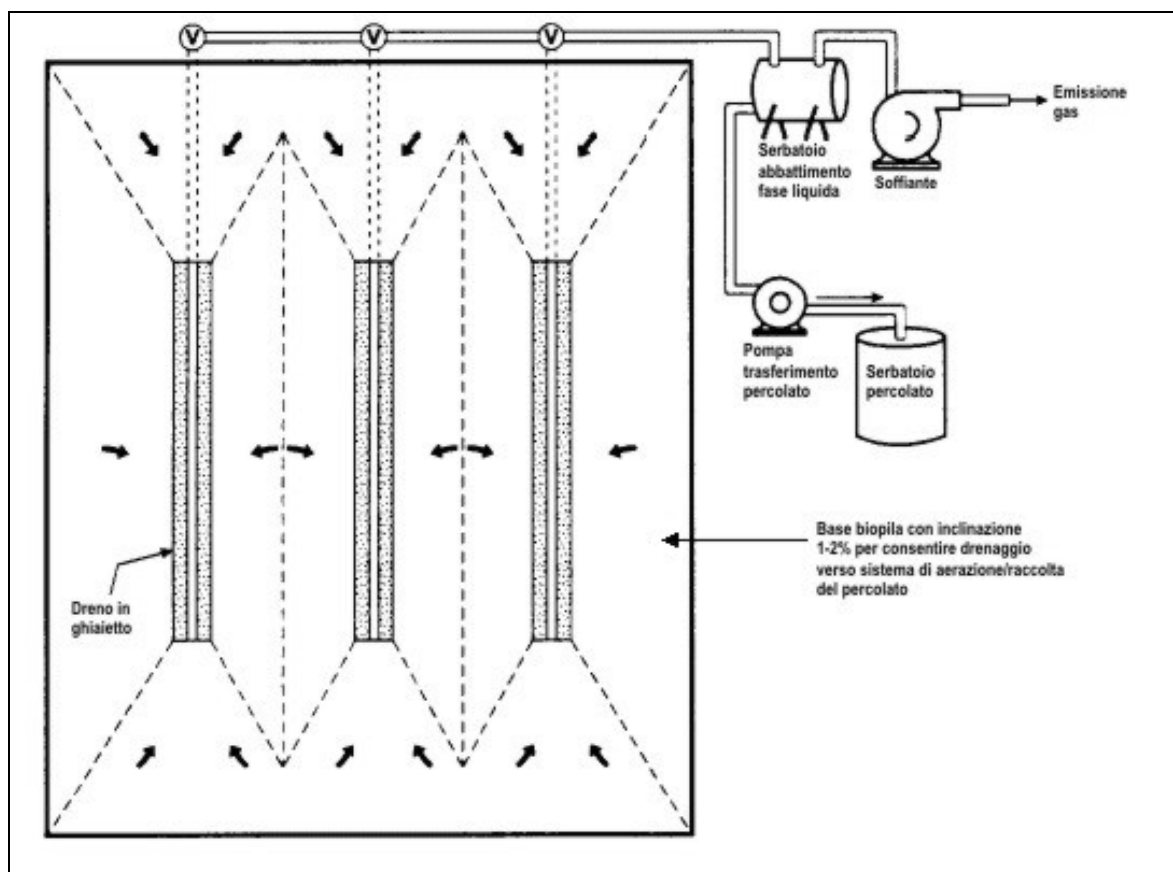


Figura 3.5 – Schema di sistema di raccolta del percolato incorporato al sistema di estrazione di aria (NFESC, Battelle, 1998).

4 VALUTAZIONE DEL PROGETTO PER IL LANDFARMING

Come per le biopile, una volta verificato che le condizioni generali consentono l'applicazione del metodo biologico, è possibile passare alla valutazione del progetto del landfarming. Nel progetto dovranno essere considerati tutti gli aspetti ingegneristici relativi alla formazione dei cumuli ed ai servizi necessari al trattamento.

In particolare dovranno essere incluse nel progetto tutte le informazioni relative ai seguenti aspetti:

- *Requisiti dell'area*: la cella di trattamento deve essere ubicata in una zona dove la falda abbia una soggiacenza minima di 2 m (considerando anche le escursioni stagionali) rispetto al piano di posa del telo impermeabile alla base del cumulo; deve inoltre

essere al di fuori della zona con eventi di piena con tempi di ritorno di 100 anni. L'area necessaria per la disposizione dei cumuli può essere calcolata dividendo il volume del terreno da trattare per l'altezza del cumulo. In genere il terreno da trattare tramite landfarming viene disposto in lunghi cumuli a sezione triangolare o trapezoidale di altezza variabile tra 30 e 50 cm circa, a seconda del tipo di macchine rivoltatrici utilizzato per l'aerazione del terreno. Oltre all'area occupata dalle file di cumuli, deve essere considerata anche l'area occupata dalle sponde perimetrali e per l'accesso, oltre allo spazio necessario alle operazioni di stoccaggio e lavorazione del terreno prima della messa in opera del cumulo.

- *Struttura del landfarming*: generalmente la struttura dell'area dipende dalla disponibilità di spazio e dalla configurazione del sito scelto per il trattamento. Il terreno può essere disposto in uno o più cumuli.
- *Messa in opera del landfarming*: la messa in opera avviene in diverse fasi. Innanzitutto si procede alla preparazione del sito (estirpazione della vegetazione, pulitura e preparazione del fondo), si preparano le sponde perimetrali, lo strato compatto ed i teli per l'impermeabilizzazione del fondo (se necessari), il sistema di raccolta del percolato, i sistemi per il pre-trattamento del terreno (vagliatura, miscelazione e aggiunta di nutrienti ed ammendanti, ecc.), i sistemi di chiusura del sito ed eventuali sistemi di trattamento dei vapori (se necessari). Un tipico progetto di struttura per il landfarming è illustrato in Figura 4.3.
- *Sistema di aerazione*: generalmente è costituito da macchine agricole rivoltatrici (Figura 4.1). Si consiglia l'uso di macchine trainate da trattori, di modo che il terreno appena rivoltato non venga pressato dagli pneumatici del trattore. I rivoltamenti sono più frequenti (ogni 2 settimane circa) nel primo periodo, quando l'attività microbica è più intensa, per fornire maggiore ossigenazione al terreno e per evitare lo sviluppo eccessivo di calore. Successivamente, col ridursi della concentrazione dei contaminanti e la conseguente diminuzione dell'attività microbica, i rivoltamenti potranno essere diradati.



Figura 4.1 – Macchina per le operazioni di rivoltamento del terreno
(www.gastechnology.org)

- *Sistema di gestione delle acque*: le acque meteoriche possono influire notevolmente sul sistema di trattamento. Le sponde perimetrali hanno il doppio scopo di prevenire l'ingresso di acque dall'esterno e di contenere l'uscita di acque contaminate verso l'esterno, colluttandole verso un sistema di raccolta dove possono essere stoccate, trattate o scaricate secondo le regole vigenti.
- *Sistema di raccolta del percolato*: consiste nella posa di teli impermeabilizzanti alla base del cumulo e di uno strato compatto di argilla impermeabilizzante, di uno strato drenante sabbioso e di un sistema di tubi fessurati di raccolta del percolato. È buona norma, dove possibile, creare una pendenza del fondo dell'1% per favorire il deflusso del percolato verso il sistema di raccolta (Figura 4.2). Il problema maggiore nel creare un tipo di sistema di raccolta di questo tipo deriva dal passaggio di macchinari sopra i cumuli. A trattamento terminato i cumuli vengono rimossi con escavatori. C'è il rischio che durante questa operazione venga rimossa anche una parte dello strato drenante. Per ovviare a questo inconveniente è sufficiente posare uno strato di separazione a granulometria grossolana (ghiaia o ciottoli) di facile individuazione per l'operatore addetto alla rimozione del terreno pulito. Per evitare l'intasamento dei tubi è possibile rivestirli con geotessili. I tubi devono collettare il percolato verso un serbatoio da cui poi possono essere pompate e trattate o scaricate.
- *Controllo dell'erosione* da parte di vento e acqua. Generalmente il controllo di questo tipo di erosione viene effettuato disponendo il terreno in cumuli allungati, nel raccogliere le acque reflue e nel mantenere umida la superficie dei cumuli con un sistema di irrigazione superficiale per ridurre la formazione di polveri anche durante il rivoltamento del terreno (Figura 4.1). In caso di aree molto ventose o piovose è possibile disporre delle coperture con teli semipermeabili o delle tensostrutture di copertura che consentano lo scambio di gas tra l'interno e l'esterno.

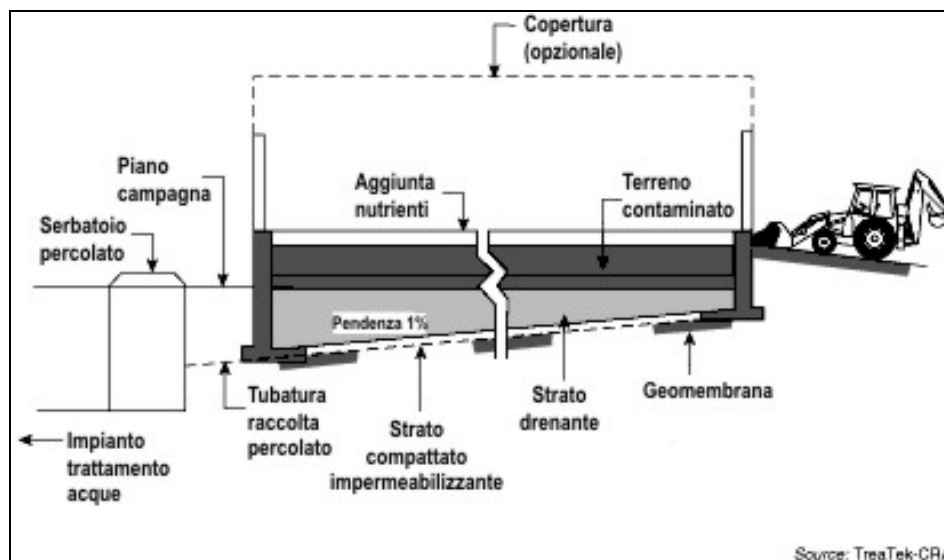


Figura 4.2 – Sezione schematica di un impianto di landfarming e del sistema di raccolta del percolato (modificato da www.frtr.gov).

- *Aggiustamento del pH e aggiunta di nutrienti*: questi trattamenti vengono effettuati tramite aggiunte periodiche di fertilizzanti allo stato solido, calce e/o solfuri durante le operazioni di preparazione del terreno prima della posa in cumuli, oppure aggiungendo nutrienti allo stato liquido tramite irrigazione dei cumuli stessi. La composizione dei

nutrienti e delle soluzioni acide o alcaline per il controllo del pH viene studiata durante l'esecuzione dei test di trattabilità e la frequenza di applicazione varia secondo la necessità riscontrata durante il trattamento.

- *Sicurezza del sito*: è necessario che alle persone non addette ai lavori sul sito venga impedito l'accesso. Pertanto si devono predisporre barriere o altri mezzi di sicurezza che evitino che le persone possano entrare in contatto con il terreno contaminato.

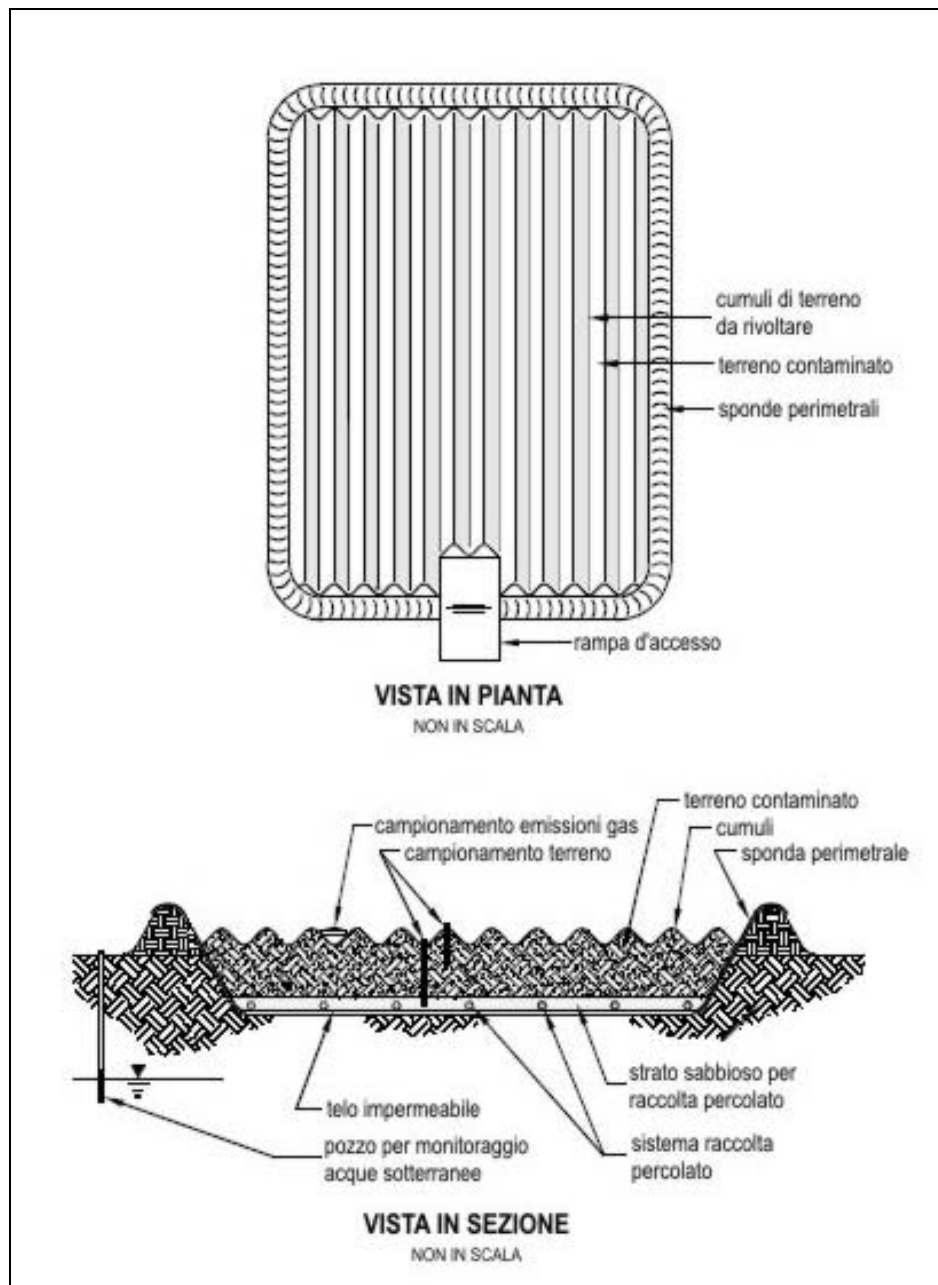


Figura 4.3 – Esempio di progetto di una struttura per il landfarming.

- *Controlli delle emissioni gassose*: per evitare la dispersione di vapori contaminati è opportuno predisporre delle coperture dei cumuli o delle strutture chiuse che contengano i vapori. Se le concentrazioni dei vapori contaminati sono tali da non

consentirne lo scarico diretto in atmosfera, si deve disporre anche un sistema di aspirazione e trattamento dei vapori. Ciò risulta possibile solo in caso di isolamento della massa di terreno da trattare in strutture chiuse.

5 PIANO DELLE ATTIVITÀ E MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA PER IL TRATTAMENTO TRAMITE BIOPILE

A seguito della messa in opera della biopila, è necessario verificarne il corretto funzionamento. A questo scopo si deve predisporre un piano di monitoraggio dell'attività della biopila per assicurare l'ottimizzazione dei tassi di biodegradazione, per seguire la riduzione delle concentrazioni dei contaminanti, per monitorare le emissioni di vapori o la migrazione di contaminanti nei terreni al di sotto della biopila (in mancanza di rivestimento del fondo della stessa), e per verificare la qualità delle acque sotterranee.

Tabella 5.1 – Schema delle attività di monitoraggio di una biopila (U.S.E.P.A., 1994)

Matrice da monitorare	Scopo	Frequenza di campionamento	Parametri da analizzare
Terreno della biopila	Determinare la degradazione dei contaminanti e le condizioni di biodegradazione	Campionamento mensile o trimestrale durante l'attività della biopila	Popolazione batterica, concentrazione contaminanti, pH, ammoniaca, fosforo, contenuto idrico, ecc.
Aria estratta dalla biopila	Determinare la degradazione dei contaminanti e le condizioni di biodegradazione	Settimanale durante i primi 3 mesi e poi mensile o trimestrale	CO ₂ , O ₂ , CH ₄ , H ₂ S, VOC
Aria	Rischi di salute per il personale del sito e per la popolazione	Bisettimanale durante le prime due settimane, e trimestrale successivamente	Composti volatili, particolato
Acque di ruscellamento	Composti solubili o sospesi	Come richiesto dalle leggi per lo scarico acque	Come richiesto dalle leggi per lo scarico acque
Terreno sotto la biopila	Migrazione di contaminanti	Trimestrale o due volte l'anno	Composti pericolosi
Acque sotterranee a valle della biopila	Migrazione di contaminanti solubili	Annuale	Composti pericolosi, solubili

Il piano delle attività deve prevedere l'eventualità di modifiche della gestione dell'intervento, a seconda di quanto rilevato in corso d'opera relativamente alle variazioni di concentrazione dei contaminanti e all'attività batterica. Inoltre esso deve tener conto delle variazioni climatiche stagionali, della quantità di precipitazioni e della temperatura: l'aerazione e l'aggiunta di acqua e nutrienti dovrebbero essere generalmente maggiori nei mesi più caldi e asciutti. Se la biopila è stata coperta con teli impermeabili è necessario

verificare periodicamente che siano in posto e che non siano danneggiati, nel qual caso se ne deve prevedere la sostituzione.

Il monitoraggio deve essere organizzato in modo da garantire il controllo periodico dell'avanzamento della bonifica; in particolare deve prevedere: controllo dei terreni della biopila per la verifica della riduzione dei contaminanti e delle condizioni di biodegradazione (es: CO₂, O₂, CH₄, H₂S), prove respirometriche periodiche, monitoraggio delle emissioni di vapori in caso di presenza di composti volatili, monitoraggio dei terreni e delle acque sotterranee per individuare eventuali migrazioni di contaminanti all'esterno dell'area della biopila, campionamento delle acque di ruscellamento (se possibile) per verificarne la composizione prima dello scarico. Uno schema delle attività di monitoraggio è proposto in Tabella 5.1.

5.1 Avvio del sistema e verifica di funzionamento

Una volta messa in opera la biopila, si deve effettuare un'ispezione iniziale per verificare la corretta installazione di tutti i componenti. Inoltre è opportuno valutare il corretto funzionamento di tutti i componenti del sistema biopila ed assicurarsi che il tasso di flusso d'aria sia adeguato.

Si deve effettuare un'ispezione visiva della biopila per controllare la copertura, le sponde perimetrali, le tubature, il serbatoio per il percolato, il sistema di abbattimento dell'umidità, la soffiante, la tubatura di scarico della soffiante, la strumentazione ed il sistema di trattamento dei gas estratti. In particolare ci si deve assicurare che le linee di scarico e di ingresso dell'aria non siano ostruite; in questo caso la soffiante potrebbe operare con un flusso di aria ridotto ed eventualmente surriscaldarsi. Si deve mantenere un registro della temperatura ambiente, dell'umidità relativa e della pressione atmosferica.

Il flusso d'aria dovrebbe essere ottimizzato prima della sistemazione del terreno della biopila. Infatti è necessario verificare che il flusso sia uguale in tutte le tubature. Successivamente, una volta posato il terreno, si deve misurare la concentrazione di O₂ presso tutti i punti di monitoraggio. Questo è il parametro di controllo più importante per la biopila. Il controllo della composizione del gas nei punti di monitoraggio deve essere compiuto ogni poche ore fino alla stabilizzazione della concentrazione di O₂. A questo punto il flusso deve essere regolato in modo da garantire una concentrazione minima di ossigeno del 15% presso ciascun punto di monitoraggio. Successive variazioni del tasso di flusso possono essere effettuate solo dopo il raggiungimento della condizione di stabilità.

Dopo la messa in posto del terreno della biopila si possono prelevare campioni di terreno, per disporre della conoscenza della situazione pre-trattamento, seguendo ad esempio gli standard per il campionamento dei rifiuti (ASTM D 4687, UNI 10802, Cap. 5.2). Generalmente viene utilizzato uno schema di campionamento sistematico su griglia predefinita. Le analisi sui campioni di terreno prelevati devono individuare: il tipo di terreno, il contenuto idrico, il contenuto di nutrienti, il tipo di contaminanti e la loro concentrazione. Devono essere misurati inoltre i parametri iniziali quali: temperatura, pressione e concentrazione dei gas nel terreno (O₂, CO₂ e vapori degli TPH). Deve essere

effettuata, sempre in questa fase, una prova respirometrica iniziale per la valutazione dell'attività microbica.

5.1.1 Monitoraggi periodici

Il funzionamento della biopila è soggetto a numerose modifiche in corso d'opera, pertanto tutto il sistema deve essere molto flessibile. Lo scopo principale è di ottimizzare la distruzione biologica dei contaminanti riducendo al minimo la volatilizzazione. Un monitoraggio periodico è necessario per verificare l'efficienza del sistema e per effettuare correzioni per l'adattamento alle condizioni per l'adattamento alle condizioni mutate del sistema (calo delle concentrazioni di contaminanti o altre variazioni nel sistema o nell'ambiente).

È possibile programmare un sopralluogo a cadenza settimanale per la verifica dell'attività della biopila. Il sopralluogo deve essere volto all'ispezione visiva della struttura, al controllo della copertura, delle sponde, della soffiante e delle tubature. Si deve prestare attenzione anche alle caratteristiche organolettiche (presenza di odori o rumori anomali) che possono indicare il malfunzionamento degli strumenti o l'inadeguata aerazione del sistema.

Si deve inoltre programmare un monitoraggio mensile che includa i seguenti aspetti: misura della temperatura ambiente, ispezione visiva degli strumenti, concentrazione dei gas nel terreno (O_2 , CO_2 e TPH) presso tutti i punti di monitoraggio, misura del flusso in entrata alla soffiante, misura del flusso presso ogni sistema di tubi, misura della concentrazione di vapori di TPH presso i punti critici (ingresso, interno e uscita dal sistema di trattamento dei gas estratti) e campionamento di acque sotterranee in un punto a valle della biopila.

La concentrazione di O_2 presso ogni punto di monitoraggio deve essere del 15% circa. In caso sia minore o maggiore il flusso va aumentato o diminuito.

La biodegradazione della massa, nella maggior parte dei casi, non procede in modo uniforme su tutta la biopila, ma si hanno inizialmente dei settori dove le reazioni operano più velocemente vicine ad altri in cui sono più lente; ciò in ragione di aspetti legati alle condizioni litologiche (creazione di percorsi preferenziali di circolazione dell'aria, diversa distribuzione dell'umidità, ecc.) e biologiche (differente densità della popolazione batterica).

In generale una certa stabilizzazione delle condizioni si realizza successivamente, al proseguimento dell'attività batterica.

5.1.2 Riparazioni ordinarie

Le biopile, nonostante siano sistemi relativamente semplici, necessitano comunque di una manutenzione che ne garantisca il buon funzionamento. In particolare gli elementi che necessitano di manutenzione ordinaria sono:

- *condotte di aerazione*: è possibile che dopo un certo periodo di funzionamento si creino delle vie preferenziali di circolazione dell'aria all'interno della biopila, in particolare alle

estremità, penalizzando così l'aerazione della parte interna della biopila. Questo fenomeno è facilmente individuabile in quanto: la pressione nei punti di monitoraggio ubicati in prossimità delle estremità della biopila risulta minore di quella nei punti aventi uguale profondità al centro della biopila; la concentrazione di ossigeno in detti punti risulta maggiore e, nel caso si effettuino test respirometrici, la concentrazione di elio nei punti di monitoraggio perimetrali mostra una perdita iniziale ingente. Per correggere questi corto-circuiti si deve ridurre il flusso nella tubatura interessata aggiungendo un sottile strato di terreno pulito ai versanti inclinati della biopila e compattandolo, oppure riducendo il flusso nella tubatura agendo sulle valvole di regolazione del flusso stesso.

- *copertura della biopila*: eventuali rotture della copertura possono risultare molto dannose per la biopila; possono causare infatti l'ingresso di acqua piovana e l'asportazione di terreno contaminato da parte del vento. Se le rotture del telo avvengono in zone depresse della biopila, è facile che lo strappo o il buco si allarghino. In tal caso è opportuno, prima di riparare lo strappo, ricreare una superficie piana sulla biopila e poi procedere alla riparazione del telo. Se la riparazione viene fatta in modo semplice, ad esempio mediante un nastro adesivo, si deve verificare che, prima dell'applicazione dello stesso, le superfici di contatto siano state ben ripulite da polvere ed umidità. Se lo strappo non può essere riparato è necessario rimpiazzare il telo danneggiato.
- *tubature*: i sopralluoghi possono evidenziare eventuali danni alle tubature o alle valvole di raccordo tra le stesse. Piccole rotture nelle tubature di plastica possono essere riparate con coperture plastiche, o in alcuni casi può risultare più semplice inserire un tubo integro di diametro leggermente minore all'interno della tubatura danneggiata. In caso di danni più estesi può essere necessario rimpiazzare la tubatura danneggiata o la valvola. Se si prevede l'esposizione delle tubature al sole per lunghi periodi è possibile utilizzare delle tubature di plastica anti raggi UV.
- *soffiante*: eventuali ostruzioni nelle tubature della soffiante devono essere riparate il più presto possibile. Il funzionamento della soffiante con la tubatura ostruita può causare il suo spegnimento per surriscaldamento o una sua rottura. Indizi di ostruzione della tubatura possono essere:
 - riconoscimento visivo dell'ostruzione o suoni insoliti provenienti dalla soffiante;
 - diminuzione della lettura del misuratore della pressione di vuoto;
 - diminuzione del flusso di aria;
 - diminuzione della pressione in uscita dalla soffiante (indica un'ostruzione nella tubatura di suzione della soffiante);
 - aumento della pressione in uscita dalla soffiante (indica un'ostruzione della tubatura in uscita dalla soffiante).

In ogni caso la soffiante deve essere lubrificata e mantenuta in efficienza seguendo le indicazioni del costruttore.

- *sistema di trattamento dei gas estratti*: la manutenzione del sistema di trattamento dei gas deve essere effettuata seguendo le indicazioni del costruttore e dipende dal tipo di sistema scelto. La maggior parte dei sistemi di trattamento comprende comunque

un'unità a carboni attivi granulari o un biofiltro. Tali unità vanno ispezionate regolarmente per escludere la presenza di ruggine e perdite. Nel caso di filtri a carboni attivi l'unità è generalmente composta da due contenitori dei carboni attivi, posti in serie. Le attività di routine devono prevedere la misurazione del gas in uscita dal sistema e della caduta di pressione tra i contenitori. Si deve anche misurare con una frequenza settimanale la composizione dei gas tra i contenitori. Quando il contenitore a monte mostra perdite di vapori di TPH, deve essere sostituito con il contenitore a valle, il quale a sua volta deve essere sostituito con un contenitore nuovo.

5.2 Campionamento

Il campionamento della biopila deve essere effettuato con diversi criteri a seconda della matrice considerata. Infatti il campionamento deve interessare tutte le matrici costituenti la biopila: il terreno, il gas interstiziale, il gas in uscita dalla soffiante, il percolato e le acque sotterranee a valle della struttura. Un primo campionamento del terreno e dei gas interstiziali deve essere eseguito al termine della messa in posto del terreno, prima di iniziare l'attività della biopila. Successivamente, dopo aver posizionato i punti di monitoraggio dei gas per le prove respirometriche, si posiziona la copertura, assicurandosi che i raccordi con i punti di monitoraggio dei gas raggiungano il limite esterno della copertura (Figura 5.1).

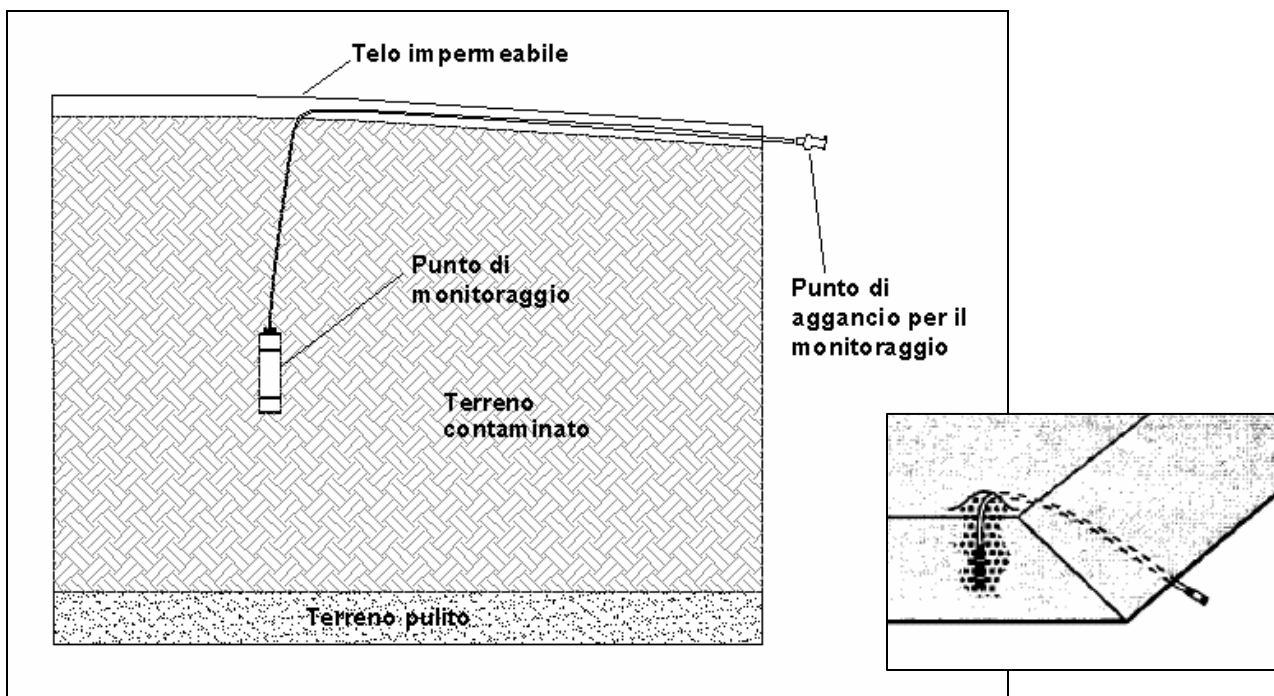


Figura 5.1 – Esempio di posizionamento di un punto per il monitoraggio dei gas interstiziali. Il punto di aggancio deve essere posizionato oltre il bordo esterno del telo impermeabile per consentirne un facile accesso (modificato da Battelle, 1998).

Nella Tabella 5.2 vengono indicati i criteri temporali per il campionamento delle varie matrici delle biopile.

Tabella 5.2 – Criteri temporali per il campionamento della biopila.

Matrice da campionare	Intervallo di campionamento
Terreno	Alla costruzione della biopila e successivamente come suggerito dalle prove respirometriche e dal campionamento dei gas
Gas interstiziali	All'inizio del trattamento, dopo una settimana e poi ogni mese
Prove respirometriche (in corso d'opera e finali)	Tra 24 e 48 ore dopo l'accensione della soffiante, una settimana dopo il primo test e poi ogni mese
Gas in uscita dalla soffiante	Ogni settimana
Gas in uscita dalla soffiante per analisi di laboratorio	Ogni mese

- *Campionamento del terreno*: il campionamento del terreno deve essere eseguito per valutare il tasso di degradazione nel tempo dei contaminanti nella biopila, per stimare la durata minima del trattamento per il raggiungimento degli obiettivi di risanamento.

È possibile utilizzare diversi metodi per la raccolta dei campioni di terreno dalla biopila, tuttavia generalmente si utilizzano delle trivelle a mano (data la piccola profondità da raggiungere), che possono essere abbinata a campionatori manuali. Questa combinazione consente di campionare anche i VOC; tuttavia, in caso non vi sia necessità di campionare composti volatili, è possibile trasferire il campione direttamente dalla trivella nel contenitore.

Per quanto riguarda la strategia di campionamento si deve determinare la griglia di campionamento in modo da garantire la raccolta di almeno 1 campione ogni 50 m³ di terreno. I campioni andranno equamente suddivisi tra superficiali (da 0 a -1 m dalla superficie) e profondi (in un punto medio tra -1 m dalla superficie del cumulo e la base del cumulo).

- *Campionamento dei gas interstiziali, prove respirometriche e rilevazione della temperatura*: la prova respirometrica iniziale viene condotta utilizzando i punti di monitoraggio dei gas interstiziali predisposti nella biopila. Generalmente si considerano sufficienti 2 punti ogni 100 m³ di terreno. I punti di monitoraggio devono essere disposti in modo da fornire informazioni sulle diverse aree della biopila. Ad esempio può essere utile posizionarne due su angoli diagonalmente opposti, uno al centro, uno sopra una tubatura di aerazione, uno vicino al bordo della biopila, ecc. In questo modo si dovrebbero raccogliere informazioni sufficienti sul flusso all'interno della biopila.

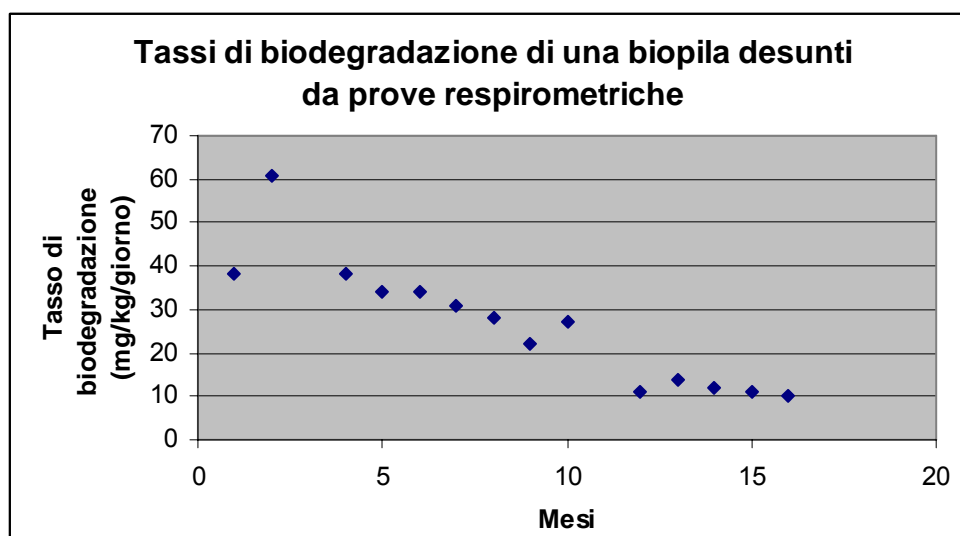


Figura 5.2 – Esempio di andamento nel tempo dei tassi di biodegradazione di una biopila, desunti dalle prove respirometriche. Quando i tassi di biodegradazione cessano di diminuire è possibile effettuare la prova respirometrica di chiusura ed il campionamento finale del terreno.

La prova viene condotta tramite iniezione di He all'interno della biopila per un tempo sufficiente ad aerare completamente il terreno. Successivamente vengono misurate le concentrazioni di O₂, CO₂, He e TPH. Per l'esecuzione della prova respirometrica ed il calcolo dei tassi di biodegradazione si rimanda all'Appendice 5 delle "Linee guida per il controllo ed il monitoraggio di interventi di bonifica in situ" della Provincia di Milano. Plottando su un grafico i tassi di biodegradazione ottenuti tramite l'interpretazione delle prove respirometriche successive si può osservare una progressiva diminuzione del tasso di biodegradazione (Figura 5.2). Si tenga conto che i tempi per l'aerazione completa del cumulo sono molto inferiori a quelli richiesti per le prove respirometriche in situ, pertanto per cumuli di 400 m³ sono sufficienti tempi di aerazione con gas inerti (He) di massimo 6 ore. Per quanto riguarda la frequenza di campionamento invece si può seguire lo schema li indicato.

La prova respirometrica di chiusura del trattamento generalmente risulta più semplice di quella iniziale in quanto la soffiante viene utilizzata nella modalità estrattiva e non viene utilizzato il gas inerte (He). Idealmente, dopo il primo test, si dovrebbe eseguire una prova respirometrica ogni mese per valutare i tassi di biodegradazione. Nella prova di chiusura della biopila si misurano solo i gas O₂, CO₂ e TPH. La prova è del tutto simile a quella iniziale per quanto riguarda la raccolta dei campioni e la loro interpretazione. Una volta che le concentrazioni di ossigeno nella biopila si sono stabilizzate e sono state misurate, si spegne la soffiante per iniziare il test respirometrico di chiusura.

Per quanto riguarda il campionamento dei gas interstiziali, è possibile utilizzare metodi attivi di campionamento, come descritto nel Capitolo 3.3.1 delle "Linee guida per l'utilizzo di strumenti e la selezione di strategie di campionamento delle matrici ambientali". Si può utilizzare il campionamento con borsa Tedlar o il campionamento diretto. In generale il campionamento dei gas interstiziali dovrebbe essere effettuato con cadenza mensile, all'inizio delle prove respirometriche. È possibile inoltre effettuare dei campionamenti nei periodi tra le prove respirometriche per valutare l'efficienza della biopila. Il campionamento diretto può essere utilizzato solo se la

concentrazione di ossigeno nei gas interstiziali è > 10%. Altrimenti può essere necessario effettuare il campionamento dei vapori di TPH tramite il diluente 1:1.

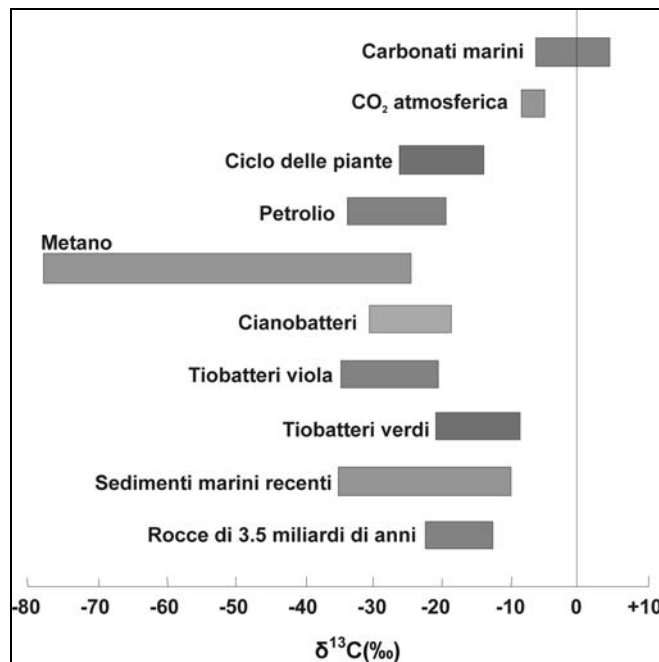


Figura 5.3 – Composizione isotopica di diverse sostanze. Si noti che il cippato (ciclo delle piante) che può essere aggiunto al terreno come ammendante ha una segnatura isotopica molto diversa rispetto a quella del petrolio e dei suoi derivati (Madigan et al., 2003).

La rilevazione della temperatura deve essere effettuata contemporaneamente al prelievo dei campioni di gas, attraverso una termocoppia posizionata all'interno del punto di monitoraggio. Per valutare la variazione netta di temperatura nella biopila è necessario misurare ogni volta anche la temperatura ambiente.

- *Analisi sui gas per la determinazione degli isotopi stabili del carbonio:* il rapporto tra gli isotopi stabili del carbonio (¹³C/¹²C) può essere utilizzato per l'identificazione degli idrocarburi del petrolio e dei solventi clorurati, per valutare l'origine del prodotto ed il grado di biodegradazione. Il rapporto tra i due isotopi è espresso come δ¹³C in parti per mille (‰), confrontato con il valore standard di riferimento (PDB – Pee Dee Belemnite) secondo la seguente relazione:

$$\delta^{13}\text{C} = (R_{\text{campione}} / R_{\text{PDB}} - 1) \times 1000$$

La tecnica consiste nella combustione di campioni di CO₂ ed H₂O ad alta temperatura, seguita dall'analisi della composizione isotopica della CO₂ purificata tramite gas cromatografia abbinata a spettrometria di massa del rapporto isotopico (GC-IRMS). Con questa tecnica è possibile determinare la composizione di ciascun composto anche in miscele complesse, in quanto ogni sostanza ha una composizione isotopica precisa (Figura 5.3). Inoltre è possibile valutare il grado di attenuazione naturale e di biodegradazione dei contaminanti organici misurando il frazionamento degli isotopi e la loro distribuzione.

Quando gli idrocarburi subiscono una intensa degradazione (dovuta a cause biologiche o naturali) la composizione isotopica può subire cambiamenti notevoli. In particolare il

dilavamento da parte delle acque meteoriche porta in genere ad un impoverimento della frazione degli aromatici leggeri (come i BTEX), che sono molto ricchi in ^{13}C , lasciando una frazione impoverita in ^{13}C . La biodegradazione invece porta alla rimozione degli n-alcani e degli aromatici, aumentando la quantità relativa di iso- e ciclo-alcani, ricchi di ^{13}C (Figura 5.4). Un'ulteriore applicazione della tecnica isotopica

A seguito dell'aggiunta di cippato come ammendante nel caso vi sia la necessità di migliorare la tessitura del terreno, è possibile che il cippato subisca un certo grado di biodegradazione. Tramite la caratterizzazione isotopica è possibile individuare quale sia la frazione rimasta nel terreno, e quindi riconoscere la biodegradazione delle sostanze dilatanti aggiunte rispetto a quella degli idrocarburi.

- *analisi gas cromatografica dei composti tramite GC/IRMS*: l'analisi della composizione dei contaminati tramite GC/IRMS fornisce una grande quantità di informazioni. Sono stati determinati (Mansuy et al. 1997) gli effetti dell'alterazione sulla composizione isotopica di singoli n-alcani e la possibilità di correlazione con gli oli non alterati. È stato osservato che la biodegradazione ha degli evidenti effetti sulla composizione degli oli (decremento degli n-alcani con C_{14} - C_{15} e degli iso- e ciclo-alcani), individuabili tramite i gas-cromatogrammi (Figura 5.5).

Dalla figura si osserva come, nel caso della biodegradazione, si abbia uno sviluppo nei grafici di un innalzamento della linea di base del tracciato. L'innalzamento più o meno marcato della linea di base indica l'intensità e quindi la durata del processo di biodegradazione subito dall'olio in esame. Da un punto di vista tecnico questa "gobba" è dovuta alla presenza di alcuni composti che non vengono separati dai composti analizzabili. Tali composti arrivano al detector insieme agli altri composti causando un innalzamento della linea di base del cromatogramma. In generale i composti che formano la "gobba" sono: alcuni composti della famiglia degli acidi grassi, gli alcoli, aldeidi e chetoni, tutti derivati dai processi di degradazione naturale dei terreni. Per poter valutare l'effettiva concentrazione dei diversi composti nel singolo campione è necessario effettuare un'analisi sul singolo picco, considerando come linea di base il profilo superiore della linea di base. Tuttavia tale calcolo deve essere comunque accompagnato dal calcolo totale degli idrocarburi effettuato considerando anche le sostanze non risolte.

- *Campionamento del percolato*: l'acqua di ruscellamento superficiale viene raccolta nel serbatoio per il percolato, dalla quale può essere prelevata direttamente per le analisi. Un volta prelevata dal serbatoio una quantità d'acqua con un contenitore, la si deve trasferire rapidamente in una fialetta per l'analisi degli organici volatili. Con la stessa acqua raccolta è possibile riempire più fialette, in modo da avere una quantità di acqua sufficiente per le analisi.
- *Campionamento delle acque sotterranee*: per verificare che non vi siano perdite dalla base del sistema biopila, è fondamentale effettuare con una certa frequenza anche delle analisi sulla qualità delle acque sotterranee in un punto di monitoraggio a valle della biopila, sia esso preesistente alla costruzione della biopila, sia esso costruito ad hoc. La cadenza consigliata per il monitoraggio della matrice acque sotterranee è mensile.
- *Monitoraggio e campionamento dei gas in uscita*: il monitoraggio dei gas in uscita dal sistema dovrebbe essere effettuato con cadenza mensile, per verificare l'andamento

della bonifica e il buon funzionamento del sistema. Generalmente il monitoraggio viene effettuato direttamente in sito con dei misuratori portatili. In caso non si disponga di dispositivi portatili per l'analisi sul terreno o in caso si voglia comunque un riscontro analitico di laboratorio, è possibile raccogliere i campioni in fiale e inviarli ai laboratori per l'analisi.

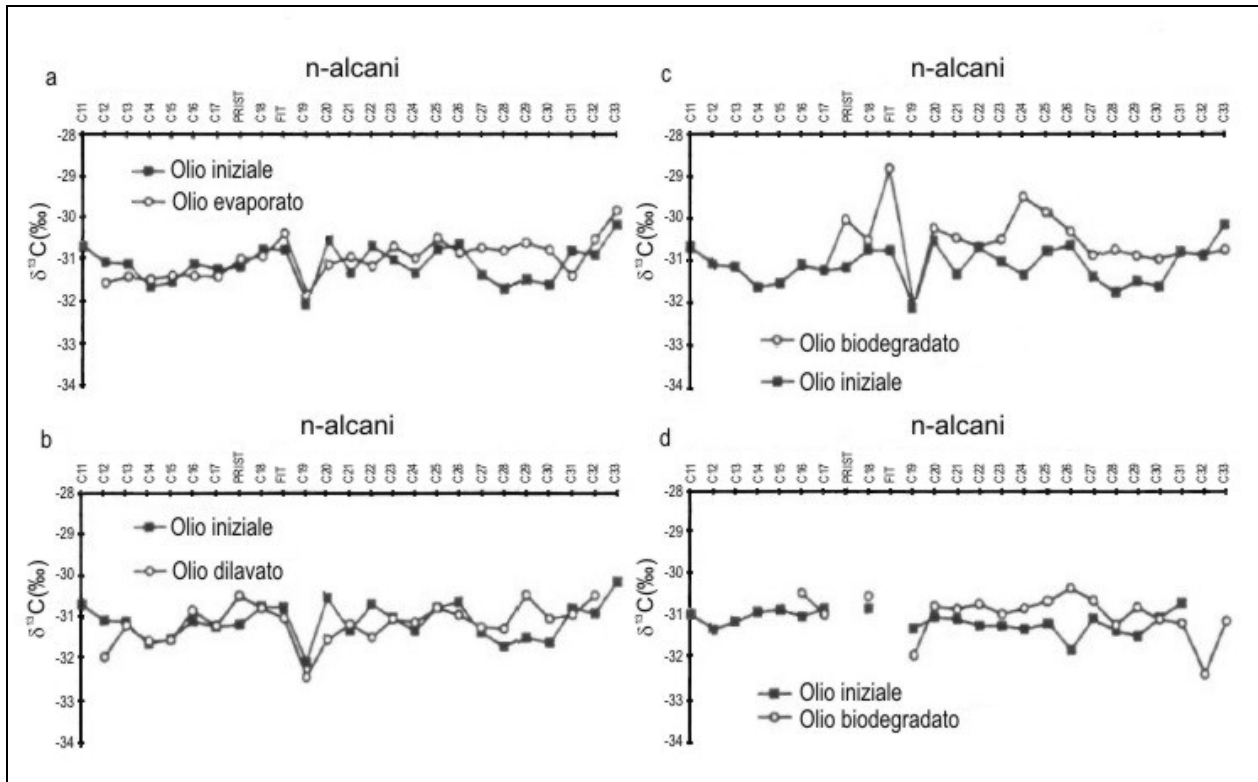


Figura 5.4 – Composizione isotopica di n-alcani sottoposti a diversi tipi di alterazione, confrontati con oli non alterati. Si osservi l'arricchimento in ^{13}C degli oli biodegradati e la comune buona correlazione tra gli oli alterati e quelli non alterati.

5.3 Piano di coordinamento e sicurezza

Tutte le operazioni di installazione, monitoraggio, campionamento e smantellamento della biopila devono essere implementate in modo da non costituire alcun rischio per i lavoratori e per la popolazione. Pertanto i lavoratori devono essere a conoscenza dei rischi chimici e fisici derivanti dalla gestione di terreni contaminati. Inoltre deve essere garantito l'accesso alla biopila solo di terreno accompagnato da documenti attestanti la provenienza, la quantità ed il tipo di contaminazione.

Non possono essere accettati per il trattamento in biopile terreni contenenti i seguenti contaminanti: organici clorurati, metalli tossici, contaminanti esplosivi, pesticidi, PCB, IPA, diossine e furani, rifiuti solidi.

Allo scopo di regolare tutte le attività e di evitare rischi deve essere redatto il Piano di Coordinamento e Sicurezza (PCS) ai sensi del D. Lgs. 494/96 e s.m.i. e del D.P.R. 222/03.

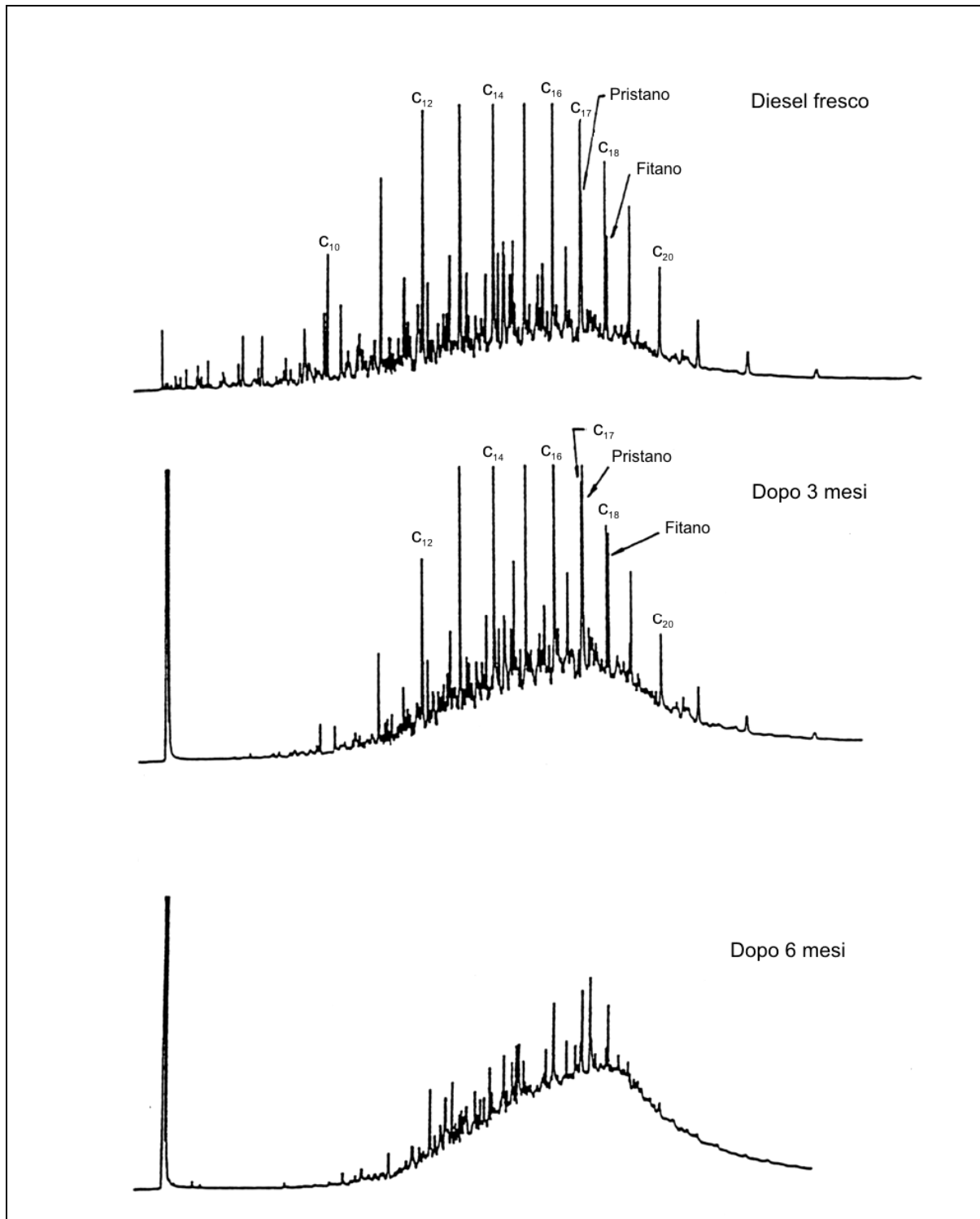


Figura 5.5 – Esempio di gas-cromatogramma di un terreno contaminato da diesel al momento della contaminazione, dopo 3 mesi e dopo 6 mesi. Si osserva l'innalzamento progressivo della linea di base con l'avanzare della biodegradazione (www.mfe.govt).

6 PIANO DELLE ATTIVITÀ E MONITORAGGIO IN CORSO D'OPERA PER IL LANDFARMING

Perché il landfarming dia dei buoni risultati è necessario progettare un piano delle attività ed un piano di monitoraggio adeguati. Un monitoraggio regolare è fondamentale per ottimizzare i tassi di biodegradazione, per verificare la riduzione di concentrazione dei contaminanti, per controllare le emissioni di vapori, la migrazione di contaminanti al di sotto dei cumuli di trattamento e per controllare la qualità delle acque sotterranee.

Un ulteriore accorgimento consiste nel vagliare il terreno prima del suo posizionamento nella cella di trattamento, per eliminare il materiale troppo grossolano eventualmente presente. Nei cumuli disposti per il trattamento non dovrebbe essere presente materiale con dimensioni superiori agli 8 cm, per evitare il danneggiamento delle attrezzature per l'aerazione.

Il piano delle attività deve includere la frequenza prevista dell'aerazione del terreno, dell'aggiunta di nutrienti e di acqua per mantenere il grado di umidità necessario. Il piano deve essere flessibile e modificabile in funzione degli esiti del monitoraggio periodico. Esso deve tener conto anche delle variazioni di temperatura e delle precipitazioni nel corso delle stagioni, aumentando la frequenza delle operazioni di aerazione, irrigazione e aggiunta di nutrienti nelle stagioni più calde e asciutte. Se il terreno è coperto da teli, l'integrità di questi deve essere periodicamente monitorata e, qualora fosse compromessa, se ne deve prevedere la sostituzione.

Il piano di monitoraggio deve essere dettagliato ed includere il controllo della riduzione dei contaminanti e delle condizioni di biodegradazione (CO₂, O₂, CH₄, H₂S, ecc.), il controllo delle emissioni gassose in caso siano presenti contaminanti volatili, il controllo dei terreni e delle acque sotterranee per verificare che non ci siano perdite di contaminanti dal sistema, il campionamento delle acque reflue e la loro analisi per l'eventuale scarico. Il numero di campioni e la loro ubicazione verranno trattati nel Capitolo 6.2.

I terreni dei cumuli dovrebbero essere campionati almeno ogni tre mesi per le determinazioni di pH, contenuto idrico, popolazioni batteriche, nutrienti e concentrazione dei contaminanti. Gli esiti di questi controlli, che possono essere seguiti con strumentazioni elettroniche, con strumenti portatili o in laboratorio, sono fondamentali per il funzionamento ottimale del landfarming. I risultati dei controlli vengono utilizzati per la taratura della frequenza di aerazione, dei tassi di aggiunta di nutrienti e di acqua, e di correzione del pH. Per ottenere tassi maggiori di biodegradazione è necessario che questi parametri vengano mantenuti ai livelli ottimali. Uno schema delle attività di monitoraggio è riportato in Tabella 6.1.

6.1 Attività, manutenzione e monitoraggio del landfarming

Una volta posizionati i terreni in cumuli, è possibile iniziare le operazioni di landfarming, le quali una volta iniziate non possono essere sospese fino alla fine del trattamento. L'unica condizione che comporta una sospensione delle attività è un calo della temperatura al di

sotto dei 5°C. In questo caso le attività devono essere sospese finché la temperatura non ritorni sopra i 5°C.

Di seguito vengono elencate le principali attività di routine da effettuare durante il landfarming:

- *controllo dei teli*: il passaggio di mezzi pesanti per rivoltare i terreni può causare danni ai teli impermeabili posti alla base dell'area di trattamento. Pertanto, ogni volta che il terreno viene rimosso, prima di passare allo stendimento successivo, è opportuno controllare che i teli non siano danneggiati. Nel caso si riscontrino danni si deve provvedere alla sostituzione o alla riparazione dei teli.

Tabella 6.1 – Schema delle attività di monitoraggio per trattamenti tramite landfarming.

Matrice da monitorare	Scopo	Frequenza di campionamento	Parametri da analizzare
Terreno in cumuli per landfarming	Determinare la degradazione dei contaminanti e le condizioni di biodegradazione	Campionamento mensile o trimestrale durante il trattamento	Popolazione batterica, concentrazione contaminanti, pH, ammonio, fosforo, contenuto idrico, ecc.
Aria	Rischi di salute per il personale del sito e per la popolazione	Durante le prime due operazioni di aerazione, e trimestrale successivamente	Composti volatili, particolato
Acque di ruscellamento	Composti solubili o sospesi	Come richiesto dalle leggi per lo scarico acque	Come richiesto dalle leggi per lo scarico acque
Terreno sotto i cumuli in trattamento	Migrazione di contaminanti	Due o quattro volte distribuite nell'arco di tempo del trattamento	Composti pericolosi
Acque sotterranee a valle del sistema	Migrazione di contaminanti solubili	Almeno una volta	Composti pericolosi, solubili

- *rivoltamento e aerazione*: il rivoltamento del terreno può essere effettuato tramite macchine rivoltatrici. Questa operazione, per essere più efficace, dovrebbe essere effettuato cambiando ogni volta la direzione di marcia (Figura 6.1). Il rivoltamento non dovrebbe essere eseguito entro le 24 ore da un evento di pioggia o da un'irrigazione che porti il terreno a saturazione. Un'irrigazione lieve del terreno prima del rivoltamento può invece essere utile a ridurre il sollevamento di polvere durante l'operazione. Il terreno dovrebbe essere rivoltato una volta ogni quindici giorni, a meno che il monitoraggio non indichi valori di ossigeno nei gas interstiziali superiori al 2% in volume; in questo caso il rivoltamento può essere rimandato. Se invece si notano valori di ossigeno molto bassi si deve aerare il terreno con frequenza maggiore.

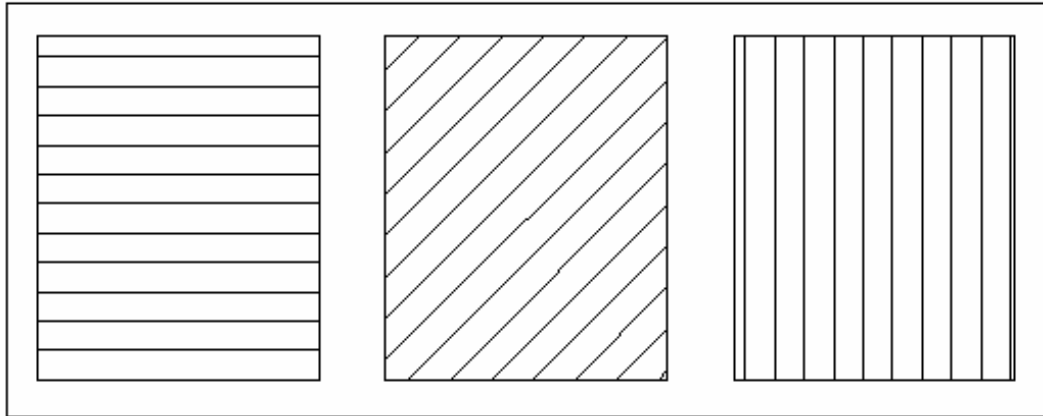


Figura 6.1 – Esempio di esecuzione del rivoltamento del terreno, da effettuarsi ogni volta in direzione di marcia diversa.

- *controllo del contenuto idrico*: la capacità di ritenuta del terreno deve essere controllata una volta prima del trattamento e, successivamente alla messa in posto del terreno per il landfarming, il contenuto idrico deve essere controllato due o tre volte alla settimana con strumenti di campo, in almeno due punti. All'inizio del trattamento il controllo sul campo deve essere integrato con un controllo in laboratorio su almeno due campioni prelevati immediatamente dopo il test di campo e più vicino possibile ai punti dei test, almeno ogni due settimane. Trascorso un mese dall'attivazione del landfarming, i controlli in laboratorio possono essere diradati fino a due campioni ogni due mesi.
- *irrigazione*: quando i test indicano un contenuto idrico del terreno inferiore al 40% della capacità al campo, si deve procedere all'irrigazione del terreno in trattamento. Il tasso di irrigazione non dovrebbe superare i 13 mm/h. L'irrigazione deve provvedere al ripristino delle condizioni ideali di umidità nell'arco di 24 h. Durante l'irrigazione non si devono formare ristagni d'acqua sulla superficie del terreno, né si devono creare deflussi superficiali. Qualora si osservasse uno di questi fenomeni, l'irrigazione deve cessare immediatamente. Il tasso di applicazione dell'acqua ed il volume totale di acqua utilizzato devono essere registrati, come pure l'entità di ogni evento piovoso.

6.2 Campionamento

Durante il trattamento è necessario effettuare dei campionamenti periodici per valutare l'avanzamento della bonifica e l'eventuale necessità di correzioni del sistema di landfarming. È infatti frequente che durante il trattamento le condizioni chimico-fisiche del sistema cambino e debbano essere ripristinate le condizioni per un tasso di biodegradazione ottimale. Pertanto, al fine di mantenere l'attività microbica ai massimi livelli è opportuno prevedere le seguenti attività di controllo in corso d'opera:

- *controllo di qualità delle acque reflue*: le acque reflue provenienti dal cumulo devono essere periodicamente controllate prima del loro riutilizzo per l'irrigazione del cumulo. Il test deve essere effettuato sull'acqua raccolta nel serbatoio per i parametri pH e conducibilità. I test possono essere effettuati raccogliendo l'acqua del serbatoio in

contenitori per l'analisi oppure immergendo direttamente la sonda dello strumento di analisi nel serbatoio.

- *controllo dei nutrienti*: la concentrazione di azoto e fosforo nel terreno deve essere controllata entro due settimane dall'inizio del trattamento e successivamente ogni tre mesi circa. L'analisi sui nutrienti, e l'eventuale addizione, possono essere effettuate durante il pre-trattamento del terreno. Il campionamento per l'analisi dei nutrienti può essere di tipo composito e deve prevedere la formazione di almeno un campione composito ogni 1000 m³. L'analisi sull'Azoto deve prevedere l'analisi dei seguenti parametri: nitrati, ammoniaca e Azoto totale; per il Fosforo andranno analizzati invece: Fosforo solubile in acidi diluiti e fosfati. Quando l'Azoto totale risulta inferiore a 50 mg/kg di N, si deve aggiungere del fertilizzante per ripristinare i livelli ottimali di Azoto. L'aggiunta di Azoto (nitrati e ammoniaca) non deve essere superiore ai 0,18 kg/m³ di N. Se i livelli di Fosforo sono inferiori a 5 mg/kg di P, si devono applicare fertilizzanti contenenti Fosforo. Ad ogni aggiunta di fertilizzante si devono registrare: il nome del prodotto, la quantità utilizzata, la composizione in termini di rapporto N:P:K.
- *controllo della temperatura*: la temperatura del terreno deve essere controllata con cadenza mensile. Il controllo della temperatura dovrebbe essere effettuato presso tre punti in tre orari diversi della giornata (mattino, mezzogiorno e sera), sempre presso gli stessi punti, per verificare che la temperatura sia adeguata in tutta la cella di trattamento e durante tutta la giornata. La rilevazione della temperatura va effettuata a 10 cm di profondità dalla superficie del terreno in trattamento; è necessario annotare anche la temperatura ambiente al momento della rilevazione.
- *pH del terreno*: nelle prime fasi di trattamento, il pH del terreno dovrebbe essere controllato settimanalmente e, dopo il primo mese, ogni due mesi circa. Per il controllo si deve analizzare un campione composito di terreno ogni 1000 m³. Al primo controllo devono essere formati due campioni, per verificare l'attendibilità del test di campo. I controlli successivi possono essere effettuati direttamente sul terreno. Se il pH risulta superiore a 8.5 o inferiore a 6, il campione di terreno deve essere inviato ad un laboratorio per analisi più approfondite e per stabilire la quantità di ammendante che deve essere aggiunta al terreno per aggiustare il pH. La prima volta che si effettua una correzione del pH, si deve agire solo su 1/5 dell'area di landfarming. Il resto dell'area deve essere trattata solo dopo aver verificato che l'aggiustamento del pH ha portato ad un aumento dei tassi di biodegradazione. Ogni aggiunta di ammendante deve essere registrata, con dettaglio del nome del prodotto e della sua composizione. Per l'aggiustamento del pH non devono essere utilizzati liquidi caustici.
- *controllo degli odori*: è opportuno che l'eventuale riscontro di odori provenienti dal cumulo venga notificato e che si provveda al loro contenimento o eliminazione nel più breve tempo possibile.
- *controllo dell'attività microbica*: il controllo dell'attività microbica deve essere effettuato tramite test respirometrici a cadenza settimanale nel primo mese di landfarming e successivamente ogni 2 settimane. Il monitoraggio dei gas interstiziali deve essere eseguito almeno in 5 punti ubicati casualmente nel cumulo. I test respirometrici devono valutare la concentrazione di ossigeno e anidride carbonica. Si richiede l'uso di strumenti che siano in grado di rilevare concentrazioni di 0.1% in volume. La misura deve essere effettuata ad una profondità di circa 20 cm della superficie del cumulo, aspirando una quantità d'aria non superiore a 10 ml. I test devono essere effettuati

preferibilmente alla stessa ora ogni volta, per ottenere risultati confrontabili. Si dovranno documentare anche i valori della t ambiente, del grado di umidità del terreno ed il tempo trascorso dall'ultimo rivoltamento.

- *controllo del tasso di biodegradazione*: come descritto nel Capitolo 5.2 per le biopile, anche per gli impianti di landfarming può essere utile valutare il grado di biodegradazione tramite analisi gas-cromatografica dei composti contaminanti ed eventualmente tramite analisi degli isotopi stabili del carbonio.
- *concentrazione dei contaminanti*: le analisi per verificare la concentrazione dei contaminanti devono essere effettuate prima dell'inizio del trattamento ed alla fine presunta del trattamento, quando cioè i test respirometrici indicano un arresto dell'attività microbica dovuto alla completa degradazione dei contaminanti. È possibile effettuare anche un campionamento intermedio per verificare che la degradazione proceda come previsto. Si consiglia il campionamento sistematico con griglia massima di 100 m² e scelta casuale dei punti di campionamento all'interno della maglia. È consigliabile, dato il tipo di trattamento e le vaste aree occupate dai cumuli, oltre al loro ridotto spessore, l'esecuzione di un campionamento composito formato da 4 aliquote prelevate all'interno della singola maglia. Il campione composito risulterebbe in questo caso più rappresentativo, riducendo notevolmente i costi delle analisi.

6.3 Piano di coordinamento e sicurezza

Tutte le operazioni di installazione, monitoraggio, manutenzione, rivoltamento, campionamento e smantellamento degli impianti per il landfarming devono essere implementate in modo da non costituire alcun rischio per i lavoratori e per la popolazione.

A tale scopo deve essere redatto il Piano di Coordinamento e Sicurezza (PCS) ai sensi del D. Lgs. 494/96 e s.m.i. e del D.P.R. 222/03.

7 CHIUSURA DELL'INTERVENTO

7.1 Biopile

Per definire correttamente la conclusione dell'intervento di bonifica tramite biopila, è necessario stabilire e dimostrare che gli obiettivi di decontaminazione sono stati raggiunti. Dovrà essere stilata una relazione riassuntiva di tutte le caratteristiche del trattamento, quali: tipo di contaminanti, concentrazioni iniziali dei contaminanti, obiettivi di risanamento stabiliti con gli enti (valori limite da raggiungere), caratteristiche progettuali e operative della biopila e attività di monitoraggio svolte, esiti del campionamento e delle analisi per l'ottenimento degli obiettivi di bonifica, destino finale del terreno decontaminato.

I parametri che indicano in modo definitivo se il terreno è pulito sono le concentrazioni dei contaminanti nei gas interstiziali e nel terreno.

Per quanto riguarda i gas interstiziali, come specificato in precedenza (Cap. 5.2), si effettua una prova respirometrica dopo lo spegnimento della soffiante (prova respirometrica di chiusura). In effetti i campioni di terreno per la verifica dell'avvenuta decontaminazione dovrebbero essere raccolti solo se le prove respirometriche indicano che il terreno è decontaminato (questo anche per ridurre i costi delle analisi). Man mano che il grado di contaminazione diminuisce, decrescono anche i tassi di respirazione. Quando i tassi respirometrici si approssimano a zero, si ha una buona probabilità che il terreno sia pulito (sempre ammesso che non vi siano condizioni ossigeno-limitanti o che vi siano condizioni di umidità che inibiscono l'attività microbica), e si può procedere al campionamento del terreno.

I fattori che possono ridurre i tassi respirometrici, oltre alla riduzione della contaminazione, sono: un basso tasso di umidità del terreno, una corto-circuitazione del flusso d'aria nella biopila, insufficienza di nutrienti e temperature basse. Generalmente i tassi respirometrici diminuiscono nel tempo al diminuire della contaminazione e sono quasi nulli al raggiungimento degli obiettivi di decontaminazione. Se i tassi respirometrici sono vicini a zero ma le analisi del terreno mostrano concentrazioni superiori ai valori soglia di contaminazione, è necessario analizzare le condizioni della biopila per determinare se sia possibile continuare con il trattamento dopo aver apportato alcune modifiche al sistema (aggiunta di nutrienti, aggiunta di acqua tramite irrorazione, ecc.). Dopo ogni eventuale modifica al sistema si deve effettuare una prova respirometrica per verificare se l'attività batterica è ripresa in modo efficace. In caso non si riscontrino fattori limitanti e la concentrazione dei contaminanti sia ancora alta, è probabile che vi sia un corto-circuito del flusso d'aria nella biopila. Si può valutare questa eventualità effettuando una prova respirometrica come quella iniziale, utilizzando un gas inerte (He) come tracciante.

La decisione finale di chiusura del sistema per avvenuta decontaminazione può essere presa solo dopo aver effettuato l'analisi del terreno. Per determinare con certezza l'esito della bonifica è necessario che i campioni siano raccolti in numero adeguato. Per consentire un confronto diretto con le condizioni iniziali, i campioni dovrebbero essere prelevati dagli stessi punti da cui sono stati prelevati i campioni iniziali (cfr. Cap. 5.1). Il terreno può essere considerato pulito se le concentrazioni dei contaminanti risultano inferiori alle concentrazioni soglia di contaminazione o alle concentrazioni soglia di rischio determinate nella fase progettuale della biopila.

Il raggiungimento degli obiettivi di decontaminazione deve essere documentato nella relazione finale contenente gli esiti di tutte le fasi del monitoraggio e gli esiti delle analisi sui campioni di terreno raccolti nella fase di chiusura.

7.2 Landfarming

Il processo che porta alla chiusura del trattamento tramite landfarming è progressivo, in quanto il monitoraggio delle condizioni di avanzamento della bonifica del terreno è continuo. Pertanto quello che viene richiesto per la decisione finale di chiusura del landfarming per un lotto di terreno è un campionamento confermativo. Quando i test

respirometrici ed i campioni di terreno indicano una riduzione dei tassi di respirazione e della concentrazione dei contaminanti, è possibile effettuare un campionamento di terreno che confermi l'attestazione della concentrazione dei contaminanti al di sotto dei valori soglia. Il campionamento del terreno deve essere effettuato come indicato nel capitolo 6.2. Ciascun campione deve essere rappresentativo di tutta la profondità del cumulo, per garantire l'avvenuto risanamento del cumulo nella sua completezza.

Se le analisi finali rilevano il raggiungimento degli obiettivi di bonifica, il terreno bonificato potrà essere riutilizzato per il ripristino delle aree da cui è stato rimosso.

Se le analisi rilevano uno stato di contaminazione residua nel cumulo, o anche solo in alcuni punti del cumulo, è necessario proseguire il trattamento fino al raggiungimento degli obiettivi di bonifica. Perché il trattamento vada a buon fine devono essere effettuati gli aggiustamenti necessari, come correzione del pH, aggiunta di nutrienti, ecc. In questo caso il responsabile della bonifica deve predisporre una relazione riguardo ai punti della cella che non hanno raggiunto gli standard qualitativi previsti, indicando: probabili cause del mancato raggiungimento degli obiettivi, misure da adottare per evitare che si ripresentino casi analoghi (ad esempio con i lotti di terreno successivi), un piano delle attività che si intendono eseguire per continuare il trattamento delle aree non risanate. Durante il trattamento supplementare devono comunque essere effettuate tutte le operazioni previste di monitoraggio ordinario, fino al completo risanamento del terreno.

Una volta verificato tramite campionamento del terreno che gli obiettivi di risanamento sono stati raggiunti, è possibile procedere alla smobilitazione del terreno nel cumulo. Le aree da cui proveniva il terreno trattato devono essere ripristinate. Inoltre, una volta terminato il trattamento di tutto il terreno, si deve procedere al ripristino dell'area temporaneamente adibita al landfarming. Devono essere rimossi i teli alla base e tutte le strutture dell'eventuale sistema drenante, le sponde perimetrali, le eventuali coperture di contenimento dei gas, e tutte le strutture temporanee dedicate al landfarming.

Tutti i macchinari e gli strumenti utilizzati per le diverse operazioni di rivoltamento, monitoraggio, trattamento, ecc. devono essere decontaminati. Le acque reflue devono essere scaricate in modo adeguato a seconda della loro composizione. Il materiale non utilizzato (resti di ammendanti e fertilizzanti non utilizzati) va comunque rimosso dal sito.

Al termine del ripristino dell'area si deve effettuare un campionamento del terreno sottostante l'area di trattamento e delle acque di falda a valle dell'area, per escludere la presenza di perdite dal sistema durante l'attività di landfarming. L'area può essere considerata completamente pulita e ripristinata solo se l'esito di queste analisi dimostra che la concentrazione di contaminanti nel terreno è inferiore ai valori soglia di contaminazione o ai valori soglia di rischio.

BIBLIOGRAFIA

Alimi H., Trefiletti P., Schug B., Ertel T. (2001) – *Localization and identification of contaminants. Literature study. State of the art in contaminant “fingerprinting”*. INCORE (Integrated Concept for Groundwater Remediation). Dicembre 2001, Stuttgart.

Alvarez P.J.J., Illman W.A. (2006) - *Ex situ bioremediation system*. In “Bioremediation and Natural Attenuation – Process Fundamentals and Mathematical Models”, Wiley, pp. 425-429.

ASTM (1987) – *Standard guide for general planning of waste sampling*. ASTM D 4687, Philadelphia.

Brown R.A., Cartwright R.T. (1990) – *Biotreat sludges and soils*. Hydrocarbon processing. 68 (Ott.): pp 93-97.

EPA (1994) - *How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers* (EPA 510-B-94-003; EPA 510-B-95-007; and EPA 510-R-04-002).

FRTR (2002) – *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0*. Gennaio 2002, Washington DC.

Madigan J.T., Martinko J.M., Parker J. (2003) – *Brock biology of microorganisms*, 10° edizione Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, U.S.A..

Mansuy L., Philip P., Allen J. (1997) – *Source identification of oil spills based on the isotopic composition of individual components in weathered oil samples*. Environmental Sciences and Technologies n.31, pp. 3417-3425.

Naval Facilities Engineering Service Center (1996) – *Biopile design and construction manual*. Technical Memo TM-2.

Naval Facilities Engineering Service Center (1996) – *Biopile operations and maintenance manual*. Technical Memo TM-2.

Provincia di Milano (2004) – *Linee Guida N.8 – Linee Guida per il controllo e il monitoraggio di interventi di bonifica in situ*. Servizio Bonifiche Suolo e Sottosuolo, Dicembre 2004, Milano.

USACE, NAVFAC, AFCEA, NASA (2006) – *Bioremediation of soils using landfarming systems*. Unified Facilities Guide Specifications. Aprile 2006.

UNI – Ente Nazionale Italiano di Unificazione (2004) – *Rifiuti liquidi, granulari, pastosi e fanghi. Campionamento manuale e preparazione ed analisi degli eluati*. UNI 10802, Milano.

Von Fahnestock F.M., Wickramanayake G.B., Kratzke R.J., Major W.R. (1998) – *Biopile design, operation and maintenance handbook for treating hydrocarbon-contaminated soils*. Battelle Press, Columbus, Richland.