

ALLEGATO 7

**DESCRIZIONE ED ANALISI
PRELIMINARE DI
APPLICABILITÀ DELLE
TECNOLOGIE DISPONIBILI ALLO
"STATO DELL'ARTE" PER LA
BONIFICA DELL'ORIZZONTE
INSATURO**

DESCRIZIONE DELLE TECNOLOGIE DI BONIFICA APPLICABILI NELLA ZONA INSATURA

La descrizione delle tecnologie tiene conto delle seguenti possibilità di applicazione:

- *in situ*, ossia senza rimuovere la matrice contaminata dalla sua attuale posizione;
- *on site*, cioè rimuovendo la matrice contaminata dalla sua attuale posizione per trattarla e riutilizzarla nel sito stesso;
- *ex situ*, cioè con asportazione e trasferimento della matrice contaminata all'esterno del sito e successivo trattamento o smaltimento.

Per ogni tecnologia presa in esame sono indicati i principali vantaggi e svantaggi ed è formulata una valutazione in merito all'applicabilità al caso in esame:

- Scavo e Smaltimento
- Landfarming (LF)
- Biopile (BP)
- Soil Washing
- Solidificazione/Stabilizzazione (S/S)
- Estrazione di Vapori dal Sottosuolo (SVE)
- Iniezione di vapore (Steam injection SI)
- Stimolazione biologica attraverso ventilazione in situ (BV o Bioventing)

Scavo e Smaltimento

I terreni contaminati possono, in certe condizioni, essere rimossi e trasportati *off-site* presso impianti autorizzati di smaltimento per permettere il loro trattamento.

L'asportazione dei terreni contaminati avviene di norma attraverso la realizzazione delle seguenti operazioni:

- scavo mediante escavatore (durante le operazioni di scavo viene realizzata una preliminare selezione in modo da consentire una separazione qualitativa delle frazioni con evidenze di contaminazione da quelle apparentemente inerti);
- stoccaggio in cumuli presso aree predisposte;
- caratterizzazione dei cumuli, realizzata mediante campionamento dei terreni e successiva caratterizzazione di laboratorio;
- carico dei terreni contaminati su autocarri, trasporto e smaltimento presso una struttura esterna autorizzata.

Dopo la verifica della qualità del fondo scavo si procede al ripristino delle condizioni originali del sito. I terreni provenienti dai cumuli eventualmente non contaminati potranno essere riutilizzati per il riempimento degli scavi. Il completo ritombamento e ripristino delle aree di scavo sarà realizzato mediante posa di inerti provenienti da cave di prestito.

Vantaggi della tecnologia proposta:

- seguendo opportune attenzioni operative e procedure di sicurezza, la procedura è di semplice realizzazione.

Svantaggi:

- possibile impatto sull'ambiente e sugli operatori durante le fasi di scavo, movimentazione e trasporto dei terreni contaminati.;
- necessita di interventi di stabilizzazione degli scavi in caso di profondità superiori ai 3 metri;
- l'applicazione risulta economicamente svantaggiosa.

Applicabilità della tecnologia al caso in oggetto: **appropriata.**

Landfarming (LF)

Il landfarming è un trattamento biologico che consiste nello stendere un terreno contaminato sopra un letto sabbioso, sistemando un manto impermeabile in HDPE al fondo dello stesso per proteggere il sottosuolo. Il terreno così disposto è periodicamente dissodato per garantire un efficace miscelazione fra microrganismi naturalmente presenti o naturalmente inoculati, l'ossigeno, i nutrienti e le sostanze contaminate.

Generalmente si introduce un sistema di drenaggio nello strato sabbioso per raccogliere il percolato che è ricircolato direttamente o dopo un eventuale trattamento.

Vantaggi della tecnologia proposta:

- paragonato ad altre tecnologie, il landfarming è un trattamento relativamente semplice.

Svantaggi:

- trattandosi di una tecnologia on-site, è possibile un impatto sull'ambiente e sugli operatori durante le fasi di scavo, movimentazione e trasporto dei terreni contaminati.;
- necessita di interventi di stabilizzazione degli scavi in caso di profondità superiori ai 3 metri;
- è strettamente dipendente dalle condizioni climatiche (quasi tutti i processi si bloccano sotto i 10°C), quindi è difficile stabilirne precisamente i tempi di realizzazione.

Applicabilità della tecnologia al caso in oggetto: **appropriata.**

Biopile (BP)

Un sistema di trattamento con biopila consiste nella stesura di strati successivi di terreno inquinato sopra un telo impermeabile di base e la loro successiva copertura con un altro telo, impermeabile o semi-permeabile; tra uno strato e l'altro viene interposto un sistema di tubi forati con il quale far circolare all'interno della pila i fluidi di degradazione.

Tali fluidi possono essere soltanto ossigeno o miscele degradative con acqua e nutrienti, che incrementano la capacità dei microrganismi presenti di abbattere le concentrazioni degli inquinanti. Per incrementare le prestazioni del sistema, in termini sia di riduzioni di inquinanti che di riduzione dei tempi di lavoro, può essere fatta circolare nella biopila anche aria o acqua calda.

Il percolato che si viene a produrre dal sistema è quindi recuperato e rilanciato nella pila fino all'abbattimento delle concentrazioni di inquinanti a livelli accettabili. Il sistema è controllato continuamente nei suoi parametri guida, quali il pH, la

temperatura, i nutrienti e l'aerazione.

Vantaggi della tecnologia proposta:

- può essere applicato a terreni contenenti elevate concentrazioni di idrocarburi ed ha un tempo di applicazione piuttosto breve.

Svantaggi:

- come i precedenti, necessita di scavo, movimentazione e trasporto dei terreni contaminati, per cui è possibile un impatto sull'ambiente e sugli operatori;
- necessita di interventi di stabilizzazione degli scavi in caso di profondità superiori ai 3 metri;
- l'applicazione risulta economicamente svantaggiosa.

Applicabilità della tecnologia al caso in oggetto: **appropriata.**

Soil Washing

E' una tecnica di bonifica di tipo *on site* o *ex situ*. I terreni vengono rimossi e successivamente trattati mediante un processo di "lavaggio" che permette di estrarre i contaminanti adsorbiti nel terreno stesso. Il contaminante non viene trasformato o "distrutto", bensì unicamente trasferito dalla fase solida a quella liquida (lavaggio chimico). Nel caso di lavaggio fisico si tende a concentrare la contaminazione nella frazione fine.

Il soil washing è una tecnica di bonifica collaudata che consente di ottenere ottimi risultati soprattutto in caso di terreni a granulometria grossolana contaminati da sostanze inorganiche .

I **vantaggi** di questo metodo di bonifica sono i seguenti:

- può ridurre di molto il volume di materiale contaminato che necessita il trattamento di riduzione e stabilizzazione per lo smaltimento in discarica;
- il rendimento medio di rimozione dei contaminanti è compreso fra 80 e 90%;
- può essere recuperato e riutilizzato il materiale trattato (sabbie e ghiaie).

Gli **svantaggi** principali consistono in:

- necessità di ampi spazi per l'impianto e lo stoccaggio dei materiali;
- non è indicato per terreni con percentuale di terreno fine ($< 0,06$ mm) maggiore del 20%;
- possibile impatto sull'ambiente e sugli operatori durante le fasi di scavo e movimentazione dei terreni contaminati;
- necessità di interventi di stabilizzazione degli scavi in caso di profondità superiori ai 3 metri;
- i contaminanti non vengono distrutti ma solo trasferiti dalla fase solida alla fase liquida;
- l'acqua ed i fanghi risultanti dal lavaggio devono essere successivamente trattati.

Applicabilità della tecnologia al caso in oggetto: **non appropriata.**

Solidificazione / Stabilizzazione (S/S)

L'obiettivo dei processi di solidificazione/stabilizzazione, è di ridurre la mobilità dei contaminanti, prevenendo o limitando al minimo il loro trasferimento nell'ambiente.

Tale obiettivo viene conseguito riducendo la superficie disponibile per la percolazione mediante la creazione di una superficie solida compatta (solidificazione) e/o riducendo la solubilità del contaminante e la sua capacità di reagire chimicamente (stabilizzazione). I trattamenti di inertizzazione possono essere realizzati sia *in situ* che *ex situ*.

Queste tecnologie sono particolarmente adatte per i metalli, e sono tipicamente limitate a suolo con contenuto di materiale organico inferiore a 1%.

La solidificazione viene realizzata addizionando al terreno materiale legante quale cemento Portland, fly ash, calce e/o altro materiale pozzolanico. Il materiale legante reagisce chimicamente con i metalli contenuti nel suolo formando silicati insolubili ed idrati.

Nel processo *in situ*, il terreno viene miscelato con gli additivi durante la perforazione del terreno realizzata con trivelle che possono arrivare fino a 2 m di diametro. In questo modo il terreno viene smosso ed efficacemente miscelato con gli additivi. Per evitare la formazione di "aree morte", viene adottata la tecnica della sovrapposizione parziale delle perforazioni. E' possibile spingere questo metodo di trattamento fino a profondità massime pari a 20-30 m (in relazione alla tipologia di terreno). La solidificazione completa del terreno richiede un tempo di maturazione di circa 28 giorni.

Test di laboratorio e test pilota devono essere effettuati al fine di selezionare la più adeguata ed efficace miscela riducente/legante da addizionare nel sito contaminato.

La S/S *ex situ* è ormai una tecnologia consolidata mentre non sono ancora state realizzate molte applicazioni *in situ*.

Vantaggi dell' S/S *ex situ*.

- il contaminante viene trasformato e fissato in una forma meno reattiva e lisciviabile;
- relativamente economico;
- tecnologia collaudata.

Svantaggi della S/S *ex situ*.

- il contaminante a volte necessita di essere ridotto prima di essere trattato;
- si genera un volume maggiore di massa solidificata, quindi parte di questa massa deve essere necessariamente smaltita o avviata a qualche forma di riutilizzo;
- nel corso dell'effettuazione degli scavi devono essere adottate particolari attenzioni ed attrezzature al fine di evitare che polveri contenenti contaminanti vengano in contatto con l'atmosfera e quindi possano diventare una minaccia per la salute umana;
- la presenza di infrastrutture attive condiziona l'applicazione della tecnologia.
- poco adatto ai contaminanti organici.

Vantaggi dell' S/S *in situ*.

- il contaminante viene trasformato e fissato in una forma meno reattiva e lisciviabile;

- non richiede escavazione e rimozione di terreno;
- applicabile a siti con falda superficiale;
- S/S in situ è economicamente vantaggioso rispetto all'applicazione ex situ soprattutto per grandi volumi di terreno da trattare.

Svantaggi della S/S in situ:

- il contaminante a volte necessita di essere ridotto prima di essere trattato
- poco adatto ai contaminanti organici.

Applicabilità della tecnologia al caso in oggetto: **non appropriata.**

Estrazione di vapori dal sottosuolo (S.V.E. Soil Vapour Extraction)

La contaminazione riscontrata nei terreni e la presenza di prodotto residuo ed in fase surnatante, richiedono il recupero ed il trattamento dei vapori in fase gassosa.

Hiller e Gaudemann (1989) descrivono l'andamento delle concentrazioni dei contaminanti nel gas estratto durante un processo estrazioni di vapori dalla zona vadosa in tre fasi:

- **fase dominata dall'advezione:** il gas interstiziale saturo di contaminanti è facilmente estratto dai pori del terreno. Predominano quindi i fenomeni di advezione legati al trasporto tramite gas; l'elevata concentrazione di COV presente nel gas decresce rapidamente.
- **fase di transizione:** è caratterizzata da una concentrazione di contaminanti nel gas interstiziale estratto inferiore dell'80% rispetto al valore iniziale.
- **fase dominata dalla diffusione:** è caratterizzata dalla lenta diffusione dei contaminanti dai pori isolati e dalle zone stagnanti, dall'evaporazione della fase disciolta e dal deadsorbimento dalla fase solida.

Il Soil Vapour Extraction (SVE), è una tecnica in situ di rimozione fisica di contaminanti organici volatili dalla zona insatura del sottosuolo.

La tecnologia prevede, utilizzando un sistema di aspirazione dei gas, di creare nel sottosuolo una opportuna depressione, con il duplice scopo di diminuire la concentrazione di inquinanti contenuti in fase gassosa nell'insaturo e di volatilizzare i contaminanti presenti in fase adsorbita sulla matrice terreno, rendendoli disponibili a loro volta per essere estratti.

Oltre ai pozzi di estrazione dei vapori, l'impianto di ventilazione è costituito da pozzi di monitoraggio (nests probes) e da eventuali pozzi di immissione di aria pulita, che hanno lo scopo di creare un ambiente aerobico per favorire la degradazione dei contaminanti.

L'aria estratta viene avviata a trattamento, solitamente costituito da filtri a carbone attivo o da combustori catalitici o termici (solo per concentrazioni di VOCs elevate).

Come già indicato in precedenza, la tecnologia SVE è principalmente applicabile ai composti organici volatili, cioè quelli che, alla temperatura del suolo, hanno una costante di Henry maggiore di $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{atm} / \text{mol}$ ed una pressione di vapore maggiore di 0,5 mm Hg.

I parametri di maggior importanza sono: la concentrazione di VOCs, la permeabilità del mezzo all'aria, la velocità di estrazione dell'aria, il raggio di influenza dei pozzi

di ventilazione, il numero dei pozzi necessari ed infine il dimensionamento della pompa per estrazione (blower).

La determinazione dei parametri di progetto è realizzata attraverso l'implementazione di un test pilota.

I principali **vantaggi** della tecnologia sono:

- Basso impatto sull'ambiente;
- consente una rapida bonifica della porzione insatura del sottosuolo, soprattutto per quanto concerne l'abbattimento delle concentrazioni di VOCs;
- favorisce la formazione di condizioni idonee alla biodegradazione da parte delle popolazioni batteriche indigene;
- la tecnologia viene applicata in situ, senza rimuovere il terreno;
- l'applicazione risulta poco costosa.

I principali **svantaggi** connessi all'applicazione di questa tecnologia sono:

- perdita di efficacia in terreni a bassa permeabilità ed elevato contenuto organico (alta capacità di adsorbimento dei contaminanti);
- i vapori estratti devono essere trattati on site (carboni attivi, ossidazione catalitico).

Il dimensionamento di un sistema di estrazione può essere condotto secondo due strategie:

- contenere e controllare i movimenti dei contaminanti organici nella zona insatura attraverso il calcolo del raggio di influenza (R_i);
- rimuovere le sostanze organiche inquinanti dalla zona vadosa sfruttando il concetto di "zona di recupero" (ZOR).

Il Raggio di Influenza si riferisce alla massima distanza dal pozzo di estrazione a cui è possibile indurre una depressione e perciò a cui è possibile creare un flusso di gas tale da incrementare la volatilizzazione dei contaminanti; il Raggio di Influenza è stimato estrapolando i dati di pressione e distanza durante il test pilota. Il raggio di influenza è influenzato da parametri come la portata di estrazione, la profondità dei pozzi, le condizioni al contorno, l'eterogeneità del terreno, la presenza di pozzi di iniezione e la permeabilità del suolo.

In generale il raggio di influenza aumenta all'aumentare della portata estratta, della profondità dei pozzi, della permeabilità del suolo, dell'anisotropia k_x (conducibilità all'aria orizzontale) e k_z (conducibilità all'aria verticale).

Applicabilità della tecnologia al caso in oggetto: **appropriata.**

Iniezione di vapore (Steam Injection S.I.)

Un metodo per il trattamento *in situ* per le sostanze che posseggono, a condizione ambiente, un basso valore di tensione di vapore è l'iniezione di vapore (*Steam Injection - SI*).

La Steam Injection è una tecnica di rimozione fisica che sfrutta la possibilità di volatilizzare le sostanze nel terreno mediante vapori caldi e la successiva mobilitazione fisica delle componenti più leggere nella fase gassosa tramite l'aspirazione forzata dei gas interstiziali nel sottosuolo.

Il riscaldamento della sostanza avviene insufflando vapore acqueo attraverso pozzi di iniezione e aspirando contemporaneamente i gas interstiziali da pozzi di

ventilazione prossimi a quelli di iniezione.

Vantaggi della tecnologia:

- consente una bonifica relativamente veloce della zona vadosa e della frangia capillare;
- l'innalzamento di temperatura favorisce comunque lo strippaggio dei volatili anche dalle porzioni sature;
- l'intervento è relativamente poco costoso se si dispone di un vettore di calore.
- la tecnologia viene applicata in situ, senza rimuovere il terreno;

Svantaggi:

- la tecnologia perde di efficacia in terreni a bassa permeabilità ed elevato contenuto organico (alta capacità di adsorbimento dei contaminanti);
- il rendimento di rimozione per i composti semivolatili si attesta intorno al 30 – 40%;
- i vapori estratti devono essere trattati on site (carboni attivi, ossidatore catalitico, etc.);

Le dinamiche dell'iniezione del vapore agiscono sostanzialmente sull'incremento di temperatura della zona interessata dall'iniezione.

Applicabilità della tecnologia al caso in oggetto: **appropriata**.

Stimolazione biologica attraverso ventilazione in situ (BV Bioventing)

Con il termine Bioventing viene indicata una tecnologia consolidata che sfrutta la naturale attività di biodegradazione dei composti organici stimolando, in situ, l'attività vitale dei microrganismi aerobici presenti nel sottosuolo.

Il sistema prevede l'apporto di ossigeno e nutrienti nel sottosuolo per innescare i processi di biodegradazione.

Tale tecnica è particolarmente indicata per la degradazione degli idrocarburi e la loro bonifica quando presenti in fase adsorbita sui terreni.

- I parametri di maggior importanza necessari per la progettazione preliminare di un sistema di bonifica BV sono la definizione della presenza naturale di colonie di microrganismi aerobici e la garanzia che possano essere mantenuti in vita con un'adeguata aerazione del sottosuolo oppure mediante il dosaggio di idonei nutrienti. Per questo motivo occorre, da un lato misurare la permeabilità all'aria e il grado di saturazione dei terreni, dall'altro definire la temperatura, il pH (che deve essere compreso tra i valori 6 ed 8) e il contenuto di nutrienti (azoto e fosforo) ottimali per creare l'habitat di crescita per i microrganismi.

I principali **vantaggi** della tecnologia sono:

- poco impattante sull'ambiente circostante;
- l'applicazione risulta poco costosa;
- la tecnologia viene applicata in situ, senza rimuovere il terreno;
- consente di valutare la mobilità dei contaminanti.

Biodegradazione e volatilizzazione

La percentuale di contaminante biodegradata può essere quantificata, durante

l'attività estrattiva, con misure dirette delle concentrazioni di ossigeno e di biossido di carbonio mediante prove respirometriche e valutando il tasso di crescita dei microrganismi aerobici pre e dopo l'inizio della prova.

Applicabilità della tecnologia al caso in oggetto: **appropriata.**