

ANPA

AGENZIA NAZIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE

PERCORSO FORMATIVO SUL BIORECUPERO
DEI SUOLI CONTAMINATI

**Studio realizzato dal Dr. Pier Luigi Spampinato
presso l'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente**

Tutor:
Ing. Gaetano Battistella

Roma, ottobre 1999

INDICE

Presentazione	pag. 633
1. Premessa	pag. 635
2. Considerazioni generali	pag. 635
2.1 Definizione di terreno contaminato	pag. 636
2.2 Tipologie di terreni contaminati.....	pag. 636
2.3 La problematica internazionale	pag. 637
2.4 La problematica in Italia	pag. 638
3. Aspetti normativi	pag. 640
4. Il recupero con tecniche biologiche dei suoli contaminati	pag. 642
4.1 Aspetti chimici	pag. 642
4.2 Metodi di bonifica	pag. 643
4.3 La tecnologia in-situ e la Bioremediation	pag. 644
4.3.1 Parametri	pag. 644
4.3.2 Limiti e svantaggi	pag. 645
4.4 Tecniche di Bioremediation in-situ	pag. 645
4.4.1 Bioventilazione (Bioventing)	pag. 645
4.5 Tecniche di Bioremediation on-site e off-site	pag. 646
4.5.1 Bioreattori	pag. 646
4.5.2 White Rot Fungus (Fungo bianco della putrefazione)	pag. 646
4.5.3 Biopile	pag. 646
4.5.4 Landfarming	pag. 647
5. Possibili percorsi formativi	pag. 648
5.1 Obiettivi	pag. 648
5.2 Analisi professionale	pag. 648
5.3 Ipotesi di corso formativo	pag. 648
6. Conclusioni	pag. 650
Bibliografia	pag. 651
Allegato I: Bioremediation Glossary	pag. 652

PRESENTAZIONE

La presente tesina di studio è stata sviluppata nell'ambito della 1^a sessione di stages previsti per l'anno 1999 presso l'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (ANPA), da parte dello stagista Dr. Pier Luigi Spampinato.

L'attività ha preso lo spunto sia da alcune esperienze formative già avviate presso l'ANPA negli anni precedenti e, in particolare, dall'effettuazione dei corsi "Emergenza rifiuti" e "Bioremediation" portati avanti negli anni 1997 e 1998, sia da uno stato dell'arte della materia resosi necessario vista la complessità e attualità delle tematiche trattate e dei problemi da risolvere dovuti a:

- presenza di numerosi siti contaminati nelle Regioni italiane;
- esigenza di tecnologie a basso costo ed alto rendimento;
- necessità di tecnici addestrati ed esperti nella materia.

Il presente studio non ha lo scopo di approfondire i dettagli del problema risanamento, anche se ciò è accennato da una breve sottolineatura nella parte iniziale, ma quello piuttosto di collocare nella giusta posizione le esigenze formative relative al biorecupero.

La tematica del biorisanamento è assolutamente complessa e interdisciplinare, spazia dalle conoscenze dei suoli a quelle di fisica, di chimica e quindi di ingegneria ed è relativa ad aree ancora sperimentali e perciò di notevole interesse tecnico-scientifico.

Il quadro tracciato sia a livello internazionale che nazionale e regionale è oggi confortato dalla presenza di alcune iniziative in sito che possono essere di riferimento in termini di esperienze fatte e di risultati raggiunti validi, se non altro, per la qualificazione delle metodifiche e dei trattamenti.

Nonostante la presenza di un piccolo gruppo di esperti in materia anche nelle regioni italiane, le esigenze formative appaiono vaste in considerazione anche delle prospettive lavorative e applicative delle tecniche di bioremediation, e per questo motivo lo sforzo di aver individuato un percorso formativo di riferimento appare lodevole anche nell'ottica di una sua successiva personalizzazione a casi esempio regionali e territoriali per l'effettuazione di corsi, stages e contratti di formazione per siti da recuperare.

Gaetano Battistella

1. PREMESSA

Per i Paesi industrializzati la bonifica dei siti contaminati costituisce una vera e propria sfida per il prossimo decennio grazie allo sviluppo di una “coscienza ecologica” che ha portato alla consapevolezza della gravità della situazione attuale in termini di gestione della qualità dei comparti ambientali fondamentali quali aria, suolo e acqua.

Il management dei progetti di recupero ambientali e bonifica presenta aspetti particolari legati alla grande variabilità dei casi e alla reale disponibilità di risorse economiche e finanziarie che influenzano l’adozione di metodologie e tecnologie innovative.

Al momento attuale la situazione si presenta ancora tutta da definire nel dettaglio, essendoci da un lato forti esigenze territoriali e dall’altro notevoli spinte ad applicare tecnologie fortemente innovative in termini di metodologie, pratiche e costi relativi.

2. CONSIDERAZIONI GENERALI

Nelle recenti direttive del Ministero dell’Ambiente per un piano triennale di attività dell’Agenzia Nazionale per la Protezione dell’Ambiente relativo agli anni 1998-2000, è stata individuata la promozione di attività di educazione, formazione e ricerca scientifica attraverso l’individuazione delle esigenze prioritarie di educazione e formazione tecnico-scientifica in campo ambientale nonché nella promozione di adeguati progetti formativi.

Nell’attuale contesto di forte evoluzione tecnologica, economica, sociale e normativa le figure professionali che garantiscono la corretta interazione tra il mondo della tecnologia e quello dell’ambiente si fanno interpreti di nuove esigenze secondo nuovi modelli di gestione improntati al miglioramento continuo.

Nel campo ambientale si configurano nuove professionalità pronte a flessibilizzare e a sviluppare le risorse tecnico-scientifiche disponibili attraverso la promozione di modelli organizzativi più efficienti e l’attivazione di altre figure professionali, anche specialistiche, capaci di esprimere maggiore sensibilità, innovatività e responsabilità sui problemi ambientali, secondo missioni e strategie coordinate di formazione.

La figura dello specialista nella individuazione delle tecniche di disinquinamento del suolo è una figura professionale che associa e combina assieme una formazione tecnico-ingegneristica, geochimico-biologica e amministrativo-giuridica secondo un approccio di tipo integrato.

Il disinquinamento, infatti, richiede un approccio di tipo sistemico e pluridisciplinare per la individuazione delle soluzioni dei problemi riguardanti la contaminazione sotto il profilo della stima dei rischi e dei costi nei contesti delle strutture industriali, della Pubblica Amministrazione e delle imprese specializzate.

Le figure professionali proposte sono adeguate alla fornitura di servizi nello spirito delle linee tendenziali delle normative sulla pianificazione territoriale, nella tutela del suolo e delle risorse idriche.

Data la complessità della materia vengono riportate alcune definizioni utili per la comprensione dell’argomento.

2.1 Definizione di terreno contaminato

Italia (dalle “Linee guida per interventi di bonifica di terreni contaminati della Regione Piemonte”):

- Terreno: qualsiasi terreno destinato ad uso agrario, commerciale, industriale, od altro che sia suscettibile di inquinamento;
- terreno inquinato: terreno colpito da inquinamento da parte di uno o più inquinanti presenti in concentrazioni superiori alle corrispondenti concentrazioni di riferimento;
- terreno da bonificare: terreno colpito da inquinamento da parte di uno o più inquinanti presenti in concentrazioni tali per cui se ne renda necessaria la riduzione ai fini del mantenimento dell'integrità ambientale del territorio;
- bonifica o intervento di bonifica: complesso di attività miranti al ripristino, totale o parziale, delle condizioni ambientali di un'area inquinata rispetto alle condizioni naturali locali ovvero rispetto alle concentrazioni di riferimento.

Danimarca: terreno che rappresenta una minaccia alle risorse idriche sotterranee o alla salute di coloro che vi risiedono.

Germania: terreno che potenzialmente provoca un impatto negativo (diretto o indiretto) sulla salute o sul benessere dell'uomo e delle risorse naturali economicamente importanti (bestiame, coltivazioni agricole, acquiferi, ecc.).

Gran Bretagna: terreno, che a causa dell'uso fatto in precedenza, contiene attualmente sostanze che ne possono compromettere il riutilizzo previsto; pertanto necessita di uno studio approfondito atto a stabilire se il riuso proposto sia attuabile o se, altrimenti, risulti indispensabile qualche azione di risanamento.

Olanda: terreno che contiene sostanze pericolose in concentrazioni superiori a quelle normalmente attese, e nel quale una o più funzioni risultano irrimediabilmente compromesse.

2.2 Tipologie di terreni contaminati

Nell'ambito delle tipologie di terreni contaminati, si riportano nel seguito alcune specificazioni utili per l'individuazione delle fonti e delle cause principali cui l'inquinamento dei suoli fa riferimento, anche per stabilire una certa omogeneità nei concetti di base.

Discariche:

- incontrollate;
- abusive;
- in regime di autorizzazione d'emergenza;
- controllate.

Aree industriali:

- diffusioni accidentali da impianti produttivi a seguito di guasti improvvisi di apparecchiature di processo o per inefficienza di sistemi di allarme;
- penetrazioni attraverso piazzali di servizio di prodotti chimici durante la loro movimentazione;
- infiltrazioni da sistemi superficiali di ritenuta (bacini naturali o artificiali);
- perdite da tubature e da cisterne interrate;
- infiltrazioni di percolati a seguito di dilavamento di rifiuti, materie prime o prodotti impropriamente ammassati sul suolo;
- rovesciamenti accidentali derivati da disconnessioni di tubature, da cadute di serbatoi sopraelevati, ecc.,;
- rilasci di routine;
- scarico di liquami;
- emissioni in atmosfera;
- smantellamento di impianti a fine vita operativa;
- strutture e impianti contaminati.

Rilasci cronici nel sottosuolo:

- serbatoi interrati;
- tubature interrate;
- rifiuti idrici urbani e industriali;
- prodotti dell'industria petrolifera.

Depositi abusivi:

- ex depositi petroliferi;
- vecchie fornaci;
- cave esaurite.

Scarichi abusivi:

- sversamenti nel terreno;
- sversamenti nelle acque;
- rifiuti interrati.

Incidenti:

- mezzi di trasporto;
- reattori;
- serbatoi;
- oleodotti,
- insediamenti produttivi.

2.3 La problematica internazionale

Il mercato complessivo delle tecnologie applicabili all'ambiente è stato stimato pari a 200 miliardi di dollari nel 1990 e a 300 miliardi di dollari nel 2000 e, all'interno di questo, la componente biotecnologica occupa circa il 15-25% pari a circa 70 miliardi di dollari.

Accanto ai dati economici del problema va evidenziato il dato di rischio per l'ambiente, infatti nel 1992 negli Stati Uniti sono stati registrati oltre 32.000 siti potenzialmente contaminati, mentre un rapporto del 1995 indica la presenza dell'Unione Europea di oltre 200.000 siti potenzialmente contaminati in Germania, 500.000 in Olanda, 25.000 in Finlandia, 12.000 in Danimarca, 6.000 in Svezia e più di 2.000 in Norvegia.

All'inizio degli anni '90, tra i Paesi a tecnologia avanzata, la spesa per l'applicazione pratica del biorecupero dei suoli all'interno delle tecnologie ambientali era la seguente:

- Stati Uniti: 18%
- Olanda: 16%
- Giappone: 12%
- Gran Bretagna: 3%

A seguito del successo dell'applicazione della bioremediation nei siti contaminati dalla fuoriuscita di petrolio dalla petroliera Exxon-Valdez in Alaska, questa tecnologia ha subito un rapido incremento e l'EPA statunitense ha sviluppato un piano strategico per l'applicazione della bioremediation a tutto il comparto dei rifiuti pericolosi e alla bonifica dei siti abbandonati da attività produttive.

Per quanto riguarda l'Europa l'Olanda ha stilato un programma integrato di ricerca sul suolo (IRSP) approvato nel 1986, mentre la Germania ha avviato un progetto dimostrativo nel sito di Eppelheim per lo sviluppo di tecniche di risanamento da idrocarburi clorurati nel suolo, acque sotterranee e aria.

Riassumendo le esperienze a carattere internazionale positivamente concluse sono state fino ad oggi le seguenti:

- Bioremediation delle spiagge rocciose in Alaska (USA) dopo l'incidente della Exxon-Valdez.
- Bioremediation di un suolo e di acque sotterranee contaminate da pesticidi nel Nord Dakota (USA).

- Biodegradazione di idrocarburi in Cecoslovacchia dopo il ritiro dell'esercito sovietico.
- Progetto dimostrativo integrato di decontaminazione nel sito modello di Eppenheim nello stato di Baden-Wuttemberger in Germania.

2.4 La problematica in Italia

In Italia il censimento dei siti contaminati è un processo avviato solo da pochi anni e, a livello locale, sono solo tre le Regioni che hanno attivato una campagna organica di catalogazione ed elaborazione di piani specifici (Toscana, Lombardia e Piemonte), mentre in Campania è in atto una catalogazione delle discariche a cura dell'ANPA.

Il numero e l'estensione dei siti contaminati nazionali è molto consistente e, nel 1998, essi ammontavano a 301.270 Km² pari a 8.873 siti, anche se una stima complessiva ne prevede oltre 10.000, in quanto le Regioni Calabria, Campania, Lazio, Umbria, Valle d'Aosta e Veneto non sono state in grado di rilasciare dati precisi.

Si riportano in tabella 1 il numero dei siti potenzialmente contaminati divisi per regioni (Fonte: Ministero dell'Ambiente, 1997. *I siti contaminati in Italia, la legislazione, i piani di bonifica regionale, le attuali strategie di bonifica*. Bonifica e Riuso Aree Contaminate da Rifiuti, Ravenna 1997), da cui si osserva che la maggior parte di essi è localizzato nelle Regioni Emilia Romagna, Lombardia e Puglia.

Tabella 1.

La legge 426/98 (Nuovi interventi in campo ambientale) all'articolo 1, comma 4 considera, tra i primi interventi di bonifica, 14 aree industriali e siti ad alto rischio ambientale per ambiti già perimetrati, il cui elenco completo è il seguente:

1. Venezia (Porto Marghera);
2. Napoli orientale;
3. Gela e Priolo;
4. Manfredonia;
5. Brindisi;
6. Taranto;
7. Cengio e Saliceto;
8. Piombino;
9. Massa e Carrara;
10. Casal Monferrato;
11. Litorale Domizio-Flegreo e Agro aversano (Caserta-Napoli);
12. Pitelli (La Spezia);
13. Balangero;
14. Pieve Vergonte.

Tra questi siti contaminati quelli che godono di una priorità per il risanamento e bonifica sono:

a) Porto Marghera (Venezia).

Interessa un'area vasta circa 2.000 ettari che presenta accumuli di sostanze inquinanti molteplici e tutte talmente pericolose come metalli pesanti, cianuri, ipa (idrocarburi policiclici aromatici), diossine, pcb (policlorobifenili), solventi clorurati, clorofenoli, benzene, pesticidi, ecc., tutti derivati da varie lavorazioni (chimica, petrolchimica, metallurgia, elettrometallurgia, meccanica, cantieri navali, produzione di energia elettrica).

Attualmente il Ministro dell'Ambiente ha stanziato 106,5 miliardi di lire per i programmi di risanamento relativi.

b) Napoli orientale

Totalmente supera i 720 ettari divisi in tre zone produttive: 345 ettari di industrie petrolifere, 175 ettari di attività manifatturiere e commerciali, 200 ettari di lavorazioni meccaniche ferrose e non.

c) Gela e Priolo (Caltanissetta e Siracusa).

Entrambe le aree sono state dichiarate "aree di elevato rischio di crisi ambientale" e sono costituite da impianti petroliferi e petrolchimici con grossi depositi di rifiuti incontrollati, associati a fenomeni di inquinamento derivanti dalla dispersione di liquami civili e zootecnici e da pratiche agricole.

d) Manfredonia.

E' prevista la perimetrazione di tutte le aree interessate dall'inquinamento in una zona caratterizzata da siti industriali ad elevato rischio di crisi ambientale.

e) Brindisi.

Presenta un'area a rischio di 512 Km² con uno sviluppo costiero di 50 Km e una popolazione residente pari a un terzo dell'intera popolazione regionale. Nell'insediamento industriale sono stoccati oltre 100.000 tonnellate di rifiuti speciali e pericolosi derivati da attività dismesse.

f) Taranto.

Nel 1998 è stato approvato il *piano di disinquinamento e risanamento del territorio di Taranto* che interessa 564 Km², uno sviluppo costiero di 35 Km e una popolazione residente di 280.000 abitanti. A Taranto è insediato il più grande polo siderurgico italiano, una raffineria Agip, la cementeria Cementir e un centinaio di industrie manifatturiere. g) Cengio e Saliceto.

Necessitano di bonifica tutte le aree adiacenti allo stabilimento dell'Acna di Cengio che ha una estensione complessiva di 550.000 m² ed è specializzata in numerosi processi chimici destinati alle industrie della gomma, della chimica per l'agricoltura, dei coloranti sintetici e dei farmaci.

Questo sito presenta gravissime forme di inquinamento del suolo e delle falde acquifere, stoccaggio di reflui industriali altamente tossici, materiali da riporto di origine industriale e discariche di rifiuti solidi interne ed esterne all'area industriale.

I lavori di contenimento dell'inquinamento sono stati iniziati nel 1986 e nel 1992 è stata avviata una grossa opera di bonifica impiegando le più avanzate tecnologie disponibili.

Per quanto concerne gli stanziamenti finanziari sono stati messi a disposizione 600 miliardi di lire per la bonifica dei siti individuati dalla legge 426/98 nel triennio 1998-2000.

3. ASPETTI NORMATIVI

Le direttive europee sui rifiuti, sui rifiuti pericolosi e sugli imballaggi (direttive CEE 156/91, 689/91 e 62/94), sono recepite nel Decreto Legislativo 5 febbraio 1997 n. 22 (art. 17 e 51-bis) che prevede l'attuazione di norme specifiche in materia di bonifiche. Attraverso questo strumento viene colmato il vuoto normativo presente in Italia in merito ai siti contaminati.

In passato l'unico riferimento era costituito dalla Legge n. 447/87 che obbligava le Regioni ad approvare dei piani per la bonifica, con il risultato che solamente otto di queste hanno provveduto in tal senso, provocando altresì una certa disomogeneità nelle procedure di approccio alla problematica.

A seguito del D.Lgs. 22/97 il Ministero dell'Ambiente è tenuto alla redazione di apposite norme tecniche che definiscano i limiti di accettabilità della contaminazione dei suoli, gli standards di riferimento sul prelievo e le metodologie di analisi, i criteri per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti contaminati, oltre ai criteri per la redazione dei progetti di bonifica.

Ultimamente è stata approvata la Legge 9 dicembre 1998, n. 426 (Ronchi-ter) che rivede e coordina gli articoli 17 (disciplina normativa) e 51-bis (sistema sanzionatorio) del D. Lgs. 22/97 in materia di bonifica e ripristino ambientale dei siti contaminati.

A tutt'oggi però le indicazioni contenute nell'art. 17 non sono ancora applicabili, in quanto non è stato ancora emanato il relativo decreto attuativo (previsto dal comma 1, lettera a) che dovrà stabilire i limiti di accettabilità della contaminazione dei vari corpi recettori quali suoli, acque superficiali e sotterranee.

In tabella 2 è riportato l'elenco ragionato delle disposizioni di norma relative alle attività di bonifica contenute nel D.lgs 22/97.

Tabella 2.

4. IL RECUPERO CON TECNICHE BIOLOGICHE DEI SITI CONTAMINATI

4.1 Aspetti chimici

Vengono riportate, allo scopo di uniformare la terminologia di riferimento dei successivi temi trattati, le principali classi di sostanze inquinanti di natura organica che possono essere così sintetizzate con particolare riguardo ai meccanismi di degradazione attivabili:

- **Composti alifatici alogenati:** vengono applicati meccanismi aerobici ed anaerobici. Molti composti alifatici alogenati sono degradati tramite la dealogenazione riduttiva.
- **Composti aromatici alogenati:** il miglior meccanismo degradativo sperimentato è quello della *dealogenazione riduttiva* che è una variante della biodegradazione in condizione anaerobica. I composti alogenati complessi vengono mineralizzati attraverso una combinazione di fasi anaerobiche e aerobiche.
- **Idrocarburi alifatici ed aliciclici:** vengono degradati tramite meccanismo aerobico che varia in modo significativo in base alla loro complessità strutturale.
- **Idrocarburi aromatici:** i composti basati sull'anello benzenico sono mineralizzati in condizioni aerobiche e degradati in condizioni anaerobiche (denitrificazione, solfato riduzione e fermentazione).
- **IPA, Idrocarburi Policiclici Aromatici:** sono composti da molecole che associano 2 o più anelli benzenici, contengono solo atomi di carbonio e idrogeno, che in alcuni casi possono essere sostituiti da atomi di zolfo, azoto e ossigeno. Si originano in seguito alla combustione di materiale organico (prodotti petroliferi). Gli IPA con 2 o 3 anelli aromatici vengono facilmente degradati aerobicamente e anaerobicamente da batteri e funghi presenti nel terreno, la velocità dipende dal numero, dal tipo e dalla posizione degli atomi di sostituzione. Gli idrocarburi aromatici sono ossidati da una vasta varietà di funghi.
- **PCB, Policlorobifenili:** i PCB con 4 o più atomi di cloro si dimostrano difficili da degradare in condizioni aerobiche, mentre per i restanti la biotrasformazione sia aerobica che anaerobica si dimostra efficace.
- **Pesticidi alifatici alogenati:** è applicata la dealogenazione riduttiva anaerobica e il cometabolismo aerobico.
- **Pesticidi alifatici ciclici clorurati:** i composti altamente clorurati sono difficili da degradare in condizione aerobica, pertanto vengono trattati con la dealogenazione tramite microrganismi anaerobici e la degradazione viene applicata tramite il cometabolismo.
- **Pesticidi florurati anilina-base:** hanno un vasto range di mineralizzazione, minima o completa.
- **Pesticidi "Cyclodiene":** sono molto persistenti e vengono degradati per cometabolismo.
- **Nitro-pesticidi:** subiscono svariate trasformazioni microbiologiche anaerobiche e aerobiche ad opera di funghi e popolazioni batteriche.
- **Pesticidi "Pyrethroid":** degradabili in condizioni anaerobiche e aerobiche.
- **Pesticidi organofosforici:** sono metabolizzati velocemente da diversi batteri.

Per progettare un intervento di biorisanamento di un terreno inquinato, una volta determinate le sostanze inquinanti presenti, bisogna innanzitutto valutare due aspetti essenziali dal punto di vista biochimico e cinetico:

1. la quantità complessiva delle sostanze da fornire ai batteri per innescare e completare la biodegradazione degli inquinanti.
2. la modalità di somministrazione delle sostanze al terreno.

La dose di nutrienti occorrenti per la degradazione degli inquinanti rilevati mediante analisi chimica e il numero di moli necessarie come accettori di elettroni, sono calcolabili attraverso l'equazione stechiometrica globale di ossido-riduzione per un dato composto organico contaminante o, più esattamente, per la struttura chimica media rappresentativa della miscela di inquinanti rinvenuta nel terreno.

Tali determinazioni sono necessarie per la progettazione sia in termini di costi e tempi di realizzazione dell'intervento che per il dimensionamento delle strutture necessarie (pozzi, tubature, pompe, reattori, serbatoi di stoccaggio, sostanze chimiche, ecc.).

Pertanto le reazioni chimiche relative ai fenomeni di biorecupero sono generalmente dipendenti dai seguenti parametri:

$$f(\text{O}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{Nt}, \text{pH}, t)$$

dove:

- O_2 : quantità di ossigeno
- H_2O : acqua
- Nt: quantità di nutrienti
- pH: livello di pH
- t: temperatura.

4.2 Metodi di bonifica

I metodi di bonifica vengono divisi principalmente in tre categorie:

- Metodi In-Situ (senza rimozione di materiali)
- Metodi On-Site (con rimozione del terreno nell'ambito dello stesso sito)
- Metodi Off-Site (con rimozione del terreno e trasporto all'esterno del sito)

Il procedimento di bonifica di un sito contaminato è riportato in sintesi nello schema seguente, dove sono evidenziati i processi di bioremediation.

(Inserire schema)

4.3 La tecnologia in-situ e la Bioremediation

Il vantaggio principale del trattamento in situ è la possibilità di trattare il terreno direttamente nel sito contaminato senza essere scavato e trasportato, con conseguenti riduzioni dei costi potenzialmente significative. Tuttavia, il trattamento in Situ richiede generalmente dei periodi di tempo più lunghi e si ha una certezza minore circa l'uniformità del trattamento a causa della variabilità nelle caratteristiche dello strato acquifero e del terreno e perché l'efficacia del processo è più difficile da verificare.

Tra le tecniche In-Situ di maggior successo figura la Bioremediation (biorisanamento) che raggruppa una serie di metodologie basate sull'utilizzo di microrganismi naturali e, nel prossimo futuro, bioingegnerizzati.

Batteri, funghi e lieviti degradano le sostanze inquinanti in sostanze non tossiche o a tossicità minore presenti nel terreno e nell'acqua contaminata, metabolizzando sostanze organiche, come ad esempio combustibili e solventi, trasformandoli in prodotti inoffensivi come acqua e anidride carbonica. Una volta che gli agenti inquinanti sono esauriti, la popolazione microbica muore riportando il terreno esattamente allo stato originario.

La bioremediation sfrutta sia microrganismi indigeni (già presenti nel suolo), sia microrganismi esogeni, nell'uno e nell'altro caso le tecnologie di bioremediation ottimizzano le condizioni ambientali in modo che i microrganismi possono trovare le migliori condizioni per la loro crescita e attività metabolica, ciò può avvenire nelle condizioni aerobiche o anaerobiche. In generale, questo significa fornire una giusta combinazione di ossigeno, di sostanze nutrienti, di umidità, di temperatura e di pH che possa catalizzare la reazione biochimica. Tali parametri vanno costantemente e periodicamente monitorati e mantenuti sotto controllo per sviluppare la bonifica biologica.

I processi biologici sono gestibili a costi bassi e molto spesso gli agenti inquinanti vengono distrutti quasi completamente senza la necessità di applicare trattamenti successivi.

Anche se non tutti i residui organici sono favorevoli alla biodegradazione, le tecniche di bioremediation sono state usate con successo nei terreni, nei fanghi e nell'acqua sotterranea contaminata da idrocarburi del petrolio, da solventi, da antiparassitari, e da altri prodotti chimici organici.

La bioremediation non è applicabile per il trattamento degli agenti inquinanti inorganici.

Le tecnologie biologiche in situ sono sensibili a determinati parametri del terreno. Per esempio, la presenza di argilla o di materiali umici causa delle variazioni sensibili nelle prestazioni biologiche di processo. Per tale motivo è fondamentale un'opportuna conoscenza a priori delle caratteristiche dei terreni trattati e delle caratteristiche fisico-chimiche.

4.3.1 Parametri

Affinché l'**ossigeno** sia fornito ad un tasso sufficiente viene veicolato tramite iniezione di perossido di idrogeno o di aria forzata.

Il perossido di idrogeno diluito (H_2O_2) una volta immesso nel suolo libera acqua e ossigeno, molto spesso però il suo uso è limitato in quanto ad alte concentrazioni (superiore a 100 ppm, o a 1.000) risulta tossico ai microrganismi. Le circostanze anaerobiche possono essere usate per degradare gli agenti inquinanti altamente clorurati, anche se ad un tasso molto lento. Ciò può essere seguito dal trattamento aerobico per completare la biodegradazione dei residui parzialmente dechlorurati come pure gli altri agenti inquinanti.

L'**acqua** serve come mezzo di trasporto per le sostanze nutrienti ed i costituenti organici per le cellule microbiche e per l'eliminazione dei residui metabolici dalle cellule verso l'esterno. L'eccesso d'acqua tuttavia può essere nocivo, perché può inibire il passaggio di ossigeno attraverso il terreno (a meno che le circostanze anaerobiche siano volute).

Le sostanze nutrienti richieste per sviluppo delle cellule sono azoto, fosforo, potassio, zolfo, magnesio, calcio, manganese, ferro, zinco, rame ed oligoelementi.

Se le sostanze nutrienti non sono disponibili negli importi sufficienti, l'attività microbica sarà limitata.

L'azoto e il fosforo sono le sostanze nutrienti più carenti in ambiente contaminato. Questi sono aggiunti

solitamente al sistema di bioremediation in una forma utilizzabile (sotto forma di ammonio per l'azoto e come fosfato per il fosforo).

Un eccesso di fosfati può dimostrarsi dannoso in quanto la reazione del fosforo con alcuni minerali (calcio e ferro) crea dei precipitati che ostruiscono i pori presenti nel terreno, diminuendo così l'efficacia della soluzione circolante.

Il pH è in relazione con la solubilità e, conseguentemente, con la disponibilità di molti costituenti del terreno che possono interessare l'attività biologica. Molti metalli, potenzialmente tossici ai microrganismi, sono insolubili a pH elevato e da ciò ne consegue che elevare il pH del sistema di trattamento può ridurre il rischio di avvelenamento dei microrganismi stessi.

La temperatura interessa l'attività microbica nell'ambiente. Il tasso di biodegradazione è rallentato a basse temperature e quindi nei climi nordici la bioremediation può essere inefficace durante alcuni mesi dell'anno a meno che sia effettuato un riscaldamento della massa inquinata. I microrganismi rimarranno passivi alle temperature sotto lo zero e riprenderanno l'attività quando la temperatura aumenterà.

Al contrario una temperatura troppo alta può essere nociva ad alcuni microrganismi e può causare una sterilizzazione del terreno.

La temperatura inoltre interessa le perdite non biologiche degli agenti inquinanti principalmente con l'aumento della volatilità. La solubilità degli agenti inquinanti aumenta alle alte temperature tuttavia alcuni idrocarburi sono più solubili alle basse temperature che alle alte temperature. Anche la solubilità dell'ossigeno diminuisce con l'aumento della temperatura.

4.3.2 Limiti e svantaggi

- In alcune circostanze anerobiche gli agenti inquinanti possono essere degradati ad un prodotto che risulta essere più pericoloso della sostanza inquinante originale.
- L'introduzione di acqua fredda o gas può abbassare la temperatura ritardando così il processo degradativo.
- I terreni a bassa permeabilità (ad esempio ricchi di argille fini) non sono adatti al processo.
- La circolazione delle soluzioni a base d'acqua attraverso il terreno può aumentare la mobilità dell'agente inquinante e rendere necessario il trattamento anche della falda freatica.
- L'uso di soluzioni nutritive a base di nitrati può essere contaminante per le falde acquifere.

4.4 Tecniche di Bioremediation in situ

4.4.1 Bioventilazione (Bioventing)

La bioventilazione è una tecnologia che stimola la biodegradazione naturale, in condizioni aerobiche, di tutti i residui inquinanti degradabili presenti nel terreno attraverso l'immissione di ossigeno vettoriato in un fluido d'aria.

Contrariamente a tutti i metodi basati sull'aspirazione e trattamento di vapori dal sottosuolo (Soil Vapor Extraction - SVE, Air Sparging e Stream Stripping), la bioventilazione usa delle portate di aspirazione basse per fornire soltanto l'ossigeno necessario per sostenere l'attività microbica.

L'ossigeno è fornito il più comunemente attraverso l'iniezione diretta dell'aria tramite la realizzazione di uno o più pozzi d'estrazione collegati con delle pompe a vuoto che garantiscono la circolazione d'aria forzata nel terreno insaturo contaminato. Oltre ai pozzi estrattivi possono essere accoppiati dei pozzi in cui l'aria viene iniettata internamente alla massa contaminata.

Il tasso di degradazione naturale è limitato generalmente dalla scarsa quantità di ossigeno iniettata e dalla elevata quantità di sostanze inquinanti presenti che si comportano come recettori di elettroni durante la biodegradazione, piuttosto che dalla mancanza di sostanze nutrienti (donatori di elettroni).

I sistemi di bioventilazione passivi sfruttano invece lo scambio di aria naturale per trasportare l'ossigeno nel sottosuolo tramite i pozzi. Una valvola unidirezionale è installata alla sommità di uno sfiato esterno, che permette l'entrata dell'aria nel pozzo quando la pressione all'interno della massa inquinata è più bassa della

pressione atmosferica.

La bioventilazione è in media una tecnologia a lunga durata. Il risanamento varia da alcuni mesi e parecchi anni.

4.5 Tecniche di Bioremediation on-site e off-site

4.5.1 Bioreattori

Bioreattore è un termine generico che indica un sistema capace di degradare le sostanze inquinanti presenti nell'acqua e nel terreno tramite microrganismi. Le categorie di bioreattori più comunemente usate si distinguono in reattori orizzontali a tamburo ruotante e a sospensione.

I bioreattori sono usati soprattutto per trattare i residui organici volatili (VOC) e gli idrocarburi, mentre sono meno efficaci per il trattamento degli antiparassitari.

Prove condotte in laboratorio hanno dimostrato un buon funzionamento sia in condizioni aerobiche che anaerobiche con una netta diminuzione della presenza degli elementi inquinanti e dei sottoprodotti intermedi. I bioreattori di base sono una tecnologia ben sviluppata che è stata usata nel trattamento di acqua di scarico urbano ed industriale.

Recentemente sono stati condotti numerosi studi per il trattamento di acque freatiche e terreni contenenti grandi concentrazioni di inquinanti chimici. Parecchi progetti pilota sono stati completati per la degradazione dei residui clorurati.

I bioreattori presentano ancora alcuni limiti per quanto riguarda il risanamento dell'acqua freatica che è spesso troppo diluita per sostenere una popolazione microbica. Nel caso di terreni che contengano una grossa quantità di sostanze volatili è necessario accoppiare al bioreattore dei sistemi di controllo dell'atmosfera interna, in modo che questa non risulti tossica ai microrganismi stessi.

Con i materiali esplosivi o i solventi clorurati, alcuni prodotti intermedi di degradazione possono risultare più tossici dell'agente inquinante originale.

4.5.2 Fungo bianco della putrefazione (White Rot Fungus)

Questa è una tecnica di bioremediation che sfrutta la capacità di alcuni funghi di degradare una grande varietà di sostanze inquinanti grazie alla secrezione di enzimi da parte del fungo stesso.

Le applicazioni fino ad oggi intraprese si sono dimostrate valide per degradare sostanze esplosive, antiparassitari e i Policlorobifenili (PCB) attraverso l'uso di bioreattori in-situ.

I limiti sono rappresentati dalle alte concentrazioni di inquinanti (in particolare TNT che possono risultare tossiche al fungo, dalla concorrenza operata dalle popolazioni batteriche e da altri funghi che ne limitano l'efficacia.

E' una tecnologia conosciuta da più di 20 anni, che però ha avuto finora una scarsa applicazione; interessante è l'esperienza pilota portata avanti nella base militare della US Navy di Bangor, nello Stato di Washington (USA), presso un poligono di tiro dove questi funghi sono riusciti a degradare oltre il 41% di TNT. Attualmente si sta considerando di utilizzare la stessa tecnica in terreni contaminati da PCB nell'aeroporto di Moffett in California.

4.5.3 Biopile

Il trattamento di Biopile è una tecnologia in grande scala, in cui il terreno escavato viene disposto in pile poggianti su una griglia di tubi fessurati che forniscono ossigeno. Esso può essere attuato in due metodi: a pile semplici o a pile sovrapposte.

L'aria viene fornita tramite ventilatori o pulsometri.

L'umidità, il calore, le sostanze nutrienti, l'ossigeno ed il pH possono essere facilmente gestiti attraverso un semplice dispositivo di irrigazione; il dosaggio dei nutrienti e dell'ossigeno si effettua tramite l'acqua di drenag-

gio in appositi bioreattori e poi ricircolata nella massa tramite un sistema di pompaggio.

La durata del biorisanamento può durare da alcune settimane a diversi mesi.

Il metodo a biopile si è dimostrato indicato in particolar modo per i residui organici volatili (VOC) non clorurati e per i combustibili, per i VOC clorurati e gli antiparassitari l'efficacia del processo non sempre si dimostra efficace.

I fattori che possono limitare l'applicabilità e l'efficacia del processo sono.

- la necessità di scavo dei terreni contaminati;
- la necessità di applicare preventivamente una "prova di trattabilità" per determinare la biodegradabilità degli agenti inquinanti e i tassi di carico adatti degli elementi nutritivi e di ossigenazione;
- i processi in fase solida hanno efficacia discutibile per i residui alogenati e non possono essere molto efficaci nei prodotti degradanti di trasformazione degli esplosivi;
- i processi di trattamento statici possono essere meno uniformi rispetto ai processi che coinvolgono la miscelazione periodica.

4.5.4 Landfarming

Usato con successo per la bonifica da prodotti petroliferi, da oli minerali e da pesticidi, consiste nel realizzare un bacino di trattamento che incorpora solitamente rivestimenti ed altri metodi per controllare la lisciviazione degli agenti inquinanti. Nel bacino vengono sovrapposti diversi strati di materiali composti da terreno contaminato, argilla compattata, sabbia e un sistema di drenaggio e ricircolo dell'acqua.

Gli stati del terreno sono monitorati spesso per ottimizzare il tasso di degradazione dell'agente inquinante. I parametri critici normalmente includono:

- tenore d'acqua (irrigazione);
- aerazione (il terreno viene mescolato e aerato con frequenza predeterminata);
- pH (attenuato vicino a pH neutro aggiungendo calcare o calce fertilizzante in polvere);
- altre correzioni (per esempio, agenti del terreno, sostanze nutritive, ecc.).

5. Possibili percorsi formativi

5.1 Obiettivi

I principali obiettivi del progetto sono:

- la formazione di specialisti nel biorisanamento dei suoli contaminati;
- la messa a punto e l'ottimizzazione di un modello di pacchetto/i formativo/i da riprodurre in vari contesti spaziali e temporali;
- la verifica della consistenza della figura professionale e della validità del modello di formazione mediante l'interazione e il confronto con le diverse realtà territoriali durante il corso (es: stages).

5.2 Analisi Professionale

Figura professionale da formare: *Specialista nella gestione e applicazione del biorisanamento di suoli contaminati.*

Nel caso di personale occupato nella Pubblica Amministrazione è ipotizzabile un seguente caso:

Figura professionale iniziale: *Addetto ai Servizi Tecnici dell'Amministrazione Locale.*

Figura professionale finale: *Tecnico specialista nella gestione e applicazione del biorisanamento di suoli contaminati.*

Contenuti dei compiti professionali della figura da formare sono ipotizzabili:

- capacità di verificare il grado di contaminazione del suolo
- capacità di verificare il tipo di inquinante presente nel suolo
- capacità di verificare la fattibilità dell'intervento di bioremediation
- capacità di predisporre specifiche progettuali per attività di risanamento biologico
- capacità nella gestione dell'impianto di bioremediation
- capacità nelle gestioni della logistica degli interventi applicativi
- capacità di verifica finale del biorisanamento
- capacità di gestione a distanza dell'impianto di bioremediation

5.3 Ipotesi di corso formativo

Il corso formativo si articola in 7 moduli formativi più 1 di Orientamento e Omogenizzazione del linguaggio collocato all'inizio dell'attività didattica (circa 200 ore).

A Omogenizzazione del linguaggio

A1 Richiami di matematica e fisica

A2 Richiami di chimica generale, chimica del suolo e microbiologia

B Inquinamento del suolo

B1 Sorgenti di contaminazione e trasferimento degli inquinanti

B2 Processi di accumulo e interazione con la biosfera

B3 Verifiche e valutazioni

C Misura dell'inquinamento e procedure di campionamento

C1 Criteri per la caratterizzazione degli inquinanti

C2 Criteri per la caratterizzazione geologica e geomorfologica del sito

C3 Metodi di indagine e misura quantitativa della contaminazione

- C4 Verifiche e valutazioni
- D Normativa
 - D1 Comunitaria
 - D2 Nazionale
 - D3 Regionale
- E Tecniche e modalità di intervento
 - E1 Tecnologie di contenimento
 - E2 Tecnologie di stoccaggio
 - E3 Tecnologie di bioremediation
 - E4 Parametri fondamentali chimico-fisici del biorisanamento
 - E5 Visita guidata ad impianti di bioremediation
 - E6 Verifiche e valutazioni
- F Gestione degli impianti di bioremediation
 - F1 Controlli
 - F2 Manutenzione ordinaria
 - F3 Verifiche funzionamenti e progettazione interventi di adeguamento
 - F4 Gestione del materiale contaminato
 - F5 Gestione dei parametri della reazione biologica
 - F6 Gestione a distanza
 - F7 Monitoraggio del risanamento
 - F8 Adempimenti nei confronti delle Autorità competenti
 - F9 Simulazione ed esercitazioni di interventi pratici
 - F10 Stage
- G Progettazione di impianti di bioremediation
 - G1 Dimensionamento
 - G2 Schema di gestione come criterio di progettazione
 - G3 Scelta delle soluzioni adeguate in funzione della situazione
 - G4 Attività pratiche di progettazione.

H Modalità e tecniche di riuso dei suoli risanati

6. CONCLUSIONI

Il presente studio ha cercato di focalizzare, in via preliminare, le principali tematiche connesse alle tecniche di biorecupero di suoli contaminati, attraverso uno stato dell'arte della materia rivolto più che altro ad identificare gli argomenti di riferimento di possibili percorsi formativi per tecnici esperti della materia in grado di poter gestire tali attività in campo.

Data la durata temporale limitata dello stage sono stati presi in considerazione soltanto gli aspetti ritenuti fondamentali e maggiormente qualificanti una attività formativa di riferimento, oltre ad un quadro generale della materia.

Il percorso formativo standard emergente dallo studio appare ulteriormente personalizzabile a realtà territoriali specifiche attraverso attività "ad hoc" da eventualmente effettuarsi a valle, ma già rappresenta un primo prodotto utilizzabile subito per corsi introduttivi rivolti a tecnici operanti nel settore a livello territoriale (regionale e comunale).

Dato che le uniche esperienze attuate a livello territoriale sono afferenti al mondo industriale di lingua anglosassone e che, pertanto, molta della bibliografia di riferimento è in tale lingua, si riporta in allegato un utile glossario in inglese della terminologia essenziale di più frequente utilizzo, a uso e consumo di quanti vorranno approfondire tale materia.

Bibliografia

- **AA.VV. 1994.** *Proposte per le nuove norme sulle bonifiche dei siti inquinati.* Impresa Ambiente 5/97.
- **AA.VV. 1994.** *Siti Contaminati. Tecniche ottimali di risanamento.* Giornate europee di studio sull'ambiente. Palermo, 29 novembre - 1 dicembre 1995. CIPA Editore.
- **AA.VV. 1994.** *Il Mercurio nel suolo.* Ambiente Risorse Salute, settembre 1994.
- **Abollino O., Barberis R., Boschetti P., 1996.** *Concentrazioni di metalli pesanti in terreni non inquinati - Parte 2 - Rassegna delle concentrazioni di fondo in terreni italiani.* Ingegneria Ambientale, 11-12/1996.
- **Abollino O., Barberis R., Boschetti P., 1996.** *Concentrazioni di metalli pesanti in terreni non inquinati - Parte 1 - Rassegna delle concentrazioni di fondo in terreni di tutto il mondo.* Ingegneria Ambientale, 10/1996.
- *Bonifica di siti contaminati: teoria e pratica dell'analisi di rischio nel contesto italiano.* Atti del seminario. Milano, 27 marzo 1998.
- **Cenci P., Vitaioli M., Stefanati A., Prati L., 1995.** *Proposta di un metodo per la valutazione qualitativa dell'inquinamento chimico del suolo. Nota I: inquinanti inorganici.* Ingegneria ambientale, 9/1995.
- *Contaminated sites.* European Environment Agency 1998.
- **Davis-Hoover W., 1994.** *Ex-Situ Bioremediation of TNT, Dinoseb and other pesticides/herbicides.* EPA - United States Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory.
- **De Fraja Frangipane E., Andreottola G., Tatano F., 1994.** *Terreni contaminati. Identificazione - Normative - Indagini - Trattamenti:* CIPA Editore.
- **De fraja Frangipane E., Andreottola G., Tatano F., 1995.** *Aspetti di processo, d'impianto e di progetto nel biorisanamento dei terreni contaminati. parte I: trattamenti in situ.* Ingegneria Ambientale, 3/95.
- **De Fraja Frangipane E., Tatano F., 1995.** *Rapporto conclusivo e di sintesi.* Giornate europee di studio sull'ambiente. Palermo, 29 novembre - 1 dicembre 1995. Ingegneria Ambientale, 11/12/95.
- **De Percin P., 1994.** *Vacuum Extraction/Air Sparging with Bioremediation for Organics.* EPA - United State Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory.
- **Harrington J.B., 1994.** *Unique Multi-Vendor Bioremediation Demonstration Begins.* New York State Department of Environmental Conservation.
- **Morselli L., Riva :, 1997.** *Siti contaminati da rifiuti. Bonifica e riuso.* Longo Editore, Ravenna.
- **Sprocati A.R..** *Decontaminazione di suoli mediante processi biologici.* ENEA, Dipartimento Innovazione.
- *Suoli contaminati. Criteri per la messa in sicurezza, la bonifica e ripristino ambientale dei siti inquinati, nonché per la redazione dei progetti di bonifica.* ANPA, 27 novembre 1997.
- **Venosa A. D., 1995.** *Delaware Oil Spin Bioremediation field study.* EPA - United States Environmental Protection Agency, Risk Reduction Engineering Laboratory.
- **Volterra L., Drei P., 1994.** *Il biorecupero di suoli contaminati da composti idrocarburici naturali e di sintesi.* ambiente Risorse Salute, settembre 1994.
- *What is Bioremediation?* United States Environmental Protection Agency, Office of Underground Storage Tanks. 1999.

(Inserire allegato I - 10 tabelle)