

# La bonifica di siti contaminati: un approccio divulgativo

Daniele Cazzuffi, Ilaria Pietrini

*Un'area viene considerata "sito contaminato" in presenza di alterazioni ambientali dovute a sostanze inquinanti in concentrazioni superiori al limite di legge e che sono in grado di produrre un rischio immediato o a medio-lungo termine per la salute umana o per l'ambiente.*

*La bonifica di un sito contaminato è il risanamento ambientale attraverso l'attuazione di interventi volti ad eliminare le sostanze inquinanti o a ridurle sino ad un valore uguale o inferiore ai valori delle concentrazioni soglia di rischio. Nelle aree urbane molti siti utilizzati in passato per scopi industriali e oggi "dismessi", sono spesso contaminati e il loro impatto ambientale può costituire un rischio potenziale per la salute umana e la qualità dell'ecosistema. Pertanto siti contaminati devono essere riqualificati e sottoposti ad importanti processi di bonifica con l'obiettivo di ridurre le concentrazioni dei contaminanti. In uno scenario di medio-lungo termine una bonifica dovrà risultare sostenibile dal punto di vista ambientale, economico e sociale.*

**U**n'area viene considerata "sito contaminato" quando al suo interno vengono riscontrate alterazioni ambientali dovute alla presenza di sostanze inquinanti in concentrazioni superiori al limite di legge, correlate ad attività umane svolte, o ancora in atto, e che sono in grado di produrre un rischio immediato o a medio-lungo termine per la salute umana o per l'ambiente [1].

La normativa italiana che regola le bonifiche dei siti contaminati è in continua evoluzione, a partire dal D.M. n. 471 [2] "Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati", poi sostituito dal D.Lgs. n. 152 [3], ulteriormente risistemato nel corso degli ultimi anni. Nel Titolo V "Bonifica di siti contaminati" della Parte Quarta di questo decreto sono riportati tutti i limiti di legge per le principali classi di contaminanti (metalli, inquinanti inorganici, composti organici aromatici, policiclici aromatici, alifatici clorurati cancerogeni e non, alifatici alogenati cancerogeni, nitrobenzeni, cloro-benzeni, fenoli e cloro-fenoli, ammine aromatiche, diossine e furani ed altre sostanze) nelle varie matrici ambientali (acque sotterranee, e terreni con diverse destinazioni d'uso). Tra le varie modifiche effettuate successivamente, non ve ne sono state di relative ai limiti di legge, i quali sono pertanto rimasti invariati dal 2006 ad oggi.

In entrambi i titoli dei decreti citati viene riportato il termine bonifica. Ma in cosa consiste in realtà una bonifica?

Con bonifica di un sito contaminato s'identifica l'obiettivo finale di risanamento ambientale, perseguito attraverso l'attuazione di una serie di interventi volti ad eliminare le sostanze inquinanti, o quanto meno a ridurle sino ad un valore uguale o inferiore ai valori delle concentrazioni soglia di rischio (CSR). Queste concentrazioni vengono determinate attraverso una tecnica internazionale chiamata Analisi di Rischio [4, 5]: per essere accettate, devono essere tali da assicurare la salute dell'uomo e la salvaguardia dell'ambiente.

In particolare, nelle aree urbane o semi-urbane ci sono molti siti utilizzati in passato per scopi industriali e che sono ormai abbandonati. Questi siti, in genere definiti "aree dismesse", sono spesso contaminati e il loro impatto ambientale può essere relazionata allo stato di degrado del sito, che si traduce in un rischio potenziale per la salute umana e la qualità dell'ecosistema.

Per tutti questi motivi, i siti contaminati devono essere riqualificati e vengono quindi sottoposti ed importanti processi di bonifica [6]. L'aspetto più importante da considerare è la scelta della metodologia di bonifica da applicare, che deve essere la più efficace per quello specifico sito. Infatti, le condizioni sito-specifiche hanno un'influenza determinante sul comportamento dei contaminanti nel

sottosuolo, e la completa comprensione di questo comportamento è essenziale per la valutazione del rischio per la salute umana e per la sostenibilità ambientale [7]. L'incertezza dovuta alle condizioni specifiche del sito e per di più la storia del sito contaminato rendono la **caratterizzazione del sito** fondamentale nel processo decisionale. Il punto di partenza per l'applicazione dell'analisi di rischio è infatti lo sviluppo del Modello Concettuale del sito. In particolare, in questa fase, vengono investigati (individuati e quantificati) tre elementi principali, quali la sorgente di contaminazione (presenza di una sola sorgente di contaminazione o di più fonti a causa di varie produzioni anche pregresse); i percorsi di contaminazione degli inquinanti (all'interno del sistema, i contaminanti e le sostanze nutritive possono andare incontro a diversi meccanismi, essere trasportati in fase liquida, vaporizzati nell'aria dei pori, essere adsorbiti e assorbiti al terreno e al tempo stesso subire modifiche fisiche, chimiche e biologiche nei diversi comparti ambientali citati) ed i bersagli o i recettori della contaminazione nel sito o nel suo intorno. Sintetizzando, è necessario conoscere a fondo la natura, l'estensione ed il tipo di contaminazione insieme alle caratteristiche geotecniche, geologiche ed idrogeologiche dell'intero sistema, compresi suolo, sottosuolo ed acque sotterranee.

### **Tecnologie di bonifica**

Il termine "tecnologie di bonifica" indica l'insieme di interventi applicati alla riqualificazione del sistema contaminato, inclusa la caratterizzazione delle fonti contaminanti, e quindi la selezione dell'applicazione delle tecnologie di bonifica più efficace per ridurre le concentrazioni di agenti contaminanti a li-

velli accettabili. Le diverse metodologie attualmente disponibili possono essere suddivise in processi *in-situ* ed *ex-situ*. Nel primo caso, il recupero della matrice ambientale è effettuato nel sito senza manipolazione, mentre, nel secondo caso, la matrice viene trattata in un posto diverso dall'ambiente naturale. Questi approcci distinti portano a differenze nella progettazione e dei costi dei processi di bonifica, in particolare i processi *ex-situ* comprendono scavi, trattamenti e smaltimento delle matrici contaminate, danno risultati più rapidi rispetto ai processi *in-situ* ma con costi più elevati. Vi è un'ulteriore possibile classificazione basata sul tipo di trattamento applicato, che può essere biologico, fisico o chimico. Prima di approfondire la suddivisione, va premesso, relativamente ai trattamenti biologici, che l'azione microbica può essere stimolata in diverso modo, per rendere più completa e/o più veloce la trasformazione dei composti inquinanti in prodotti finali più stabili e meno (o per nulla) dannosi.

Va anche preliminarmente evidenziato che esiste un fenomeno di "attenuazione naturale" dei contaminanti, che comporta la riduzione delle relative concentrazioni per effetto di processi del tutto naturali (diffusione, decadimento, ecc., che si sviluppano senza alcun intervento da parte dell'uomo), che può essere controllato attraverso un monitoraggio a lungo termine del *plume* [8, 9]. Tale fenomeno potrebbe rappresentare la migliore strategia perseguibile dal punto di vista della sostenibilità sia economica che ambientale; purtroppo, raramente risulta essere efficace, per cui si rende necessario il ricorso all'intervento umano attraverso l'impiego di metodologie di bonifica.

### **Processi biologici *in-situ***

*Iniezione diretta di nutrienti o biostimulation*: metodologia utilizzata principal-

mente per ripulire terreni che sono stati interessati da sversamenti di prodotti petroliferi e di altri composti organici e prevede l'iniezione di particolari nutrienti ai suoli contaminati in modo da stimolare la crescita dei microrganismi indigeni e la loro attività biologica.

*Bioventing*: metodologia impiegata per la degradazione di composti organici adsorbiti alle particelle di suolo nella zona insatura. In questa zona, attraverso pozzi di immissione e di estrazione appositamente realizzati, si provvede all'introduzione di ossigeno e nutrienti, che stimolano l'incremento dell'attività dei batteri autoctoni.

*Biosparging*: metodologia utilizzata soprattutto nel trattamento di acque di falda che agisce nella zona satura, secondo il principio utilizzato nel *bioventing*. Entrambe le metodologie sono utili per il risanamento di siti contaminati da prodotti petroliferi leggeri, come benzina e diesel.

*Bioaugmentation* (può essere svolta anche *ex-situ*): prevede l'aggiunta di specifici microrganismi aventi la capacità metabolica di degradare i composti organici presenti nel sito di bonifica, laddove un precedente studio sulle comunità autoctone presenti nel sito ha stabilito che i microrganismi non possiedono tale capacità. Questa metodologia può essere impiegata per una vasta gamma di contaminanti, quali ad esempio, ammoniaca, insetticidi e prodotti petroliferi.

*Barriere attive permeabili*: viene definita una zona di trattamento con microrganismi, nutrienti e/o reattivi nel sottosuolo che stimolano la crescita dei batteri indigeni. Le barriere intercettano e trattano i pennacchi delle acque sotterranee contaminate. Nel caso in cui la barriera è costituita da un reattivo chimico, il trattamento viene considerato chimico-fisico.

*Fitorisanamento*: sfrutta la capacità di alcune piante verdi, e dei microrganismi

ad esse associate, di estrarre/utilizzare i contaminanti, prevalentemente metalli pesanti ma anche composti organici, dai terreni contaminati. Molte piante, infatti, hanno la capacità di accumulare metalli pesanti essenziali allo sviluppo quali ad esempio, ferro, manganese, zinco, rame, magnesio e nichel. Una volta terminata la bonifica, le piante, a questo punto contaminate, vanno recise e confinate in modo appropriato.

### **Processi biologici *ex-situ***

*Landfarming*: prevede la disposizione di strati di terreno contaminato e di modificatori, come i nutrienti, su una superficie impermeabile, che vengono periodicamente lavorati per favorirne l'aereazione e per mantenere le condizioni ottimali per lo sviluppo delle popolazioni microbiche. In questo sistema, i contaminanti sono degradati, trasformati e immobilizzati mediante processi microbiologici e di ossidazione

*Bio-pile*: derivata dal *landfarming*, prevede un'impilazione di terreno e dei modificatori. Si tratta di un sistema chiuso, con una base che comprende un letto di trattamento e sistemi di aereazione, di approvvigionamento delle sostanze nutritive e di raccolta del percolato, costituiti da tubi forati e tubi di estrazione dell'aria dall'ammasso inseriti tra i vari strati.

### **Processi chimico-fisici *in-situ***

*Ossidazione chimica*: prevede l'iniezione di sostanze chimiche ossidanti come perossido di idrogeno, permanganato di potassio o ozono nei pressi della sorgente di contaminazione del pennacchio.

*Soil venting extraction*: durante l'applicazione di questa tecnologia, un vuoto viene applicato attraverso i pozzi vicino alla fonte di contaminazione. I costi-

tuenti volatili “evaporano” ed i vapori vengono estratti dai pozzi di estrazione e quindi trattati come necessario (comunemente assorbimento con carboni attivi) prima di essere rilasciati nell’atmosfera. Questa metodologia è applicata nella zona insatura.

*Air sparging*: iniezione di aria priva di contaminanti nella zona satura, consentendo una fase di trasferimento di idrocarburi adsorbiti al suolo o disciolti nelle acque sotterranee in fase vapore. L’aria viene poi estratta.

*Soil flushing*: iniezione di soluzioni di acqua e additivi (come gli emulsionanti, co-solventi, chelanti, solventi, acidi e basi) attraverso pozzi o gallerie, nelle zone del terreno interessate dalla contaminazione per migliorare la solubilità dei contaminanti, che si sciolgono nelle soluzioni di lavaggio vengono dilavati nelle acque sotterranee poi estratte e trattate. L’applicazione del *soil flushing* avviene in terreni con bassa permeabilità ed è efficace in casi di contaminazione del suolo da parte di metalli pesanti e pesticidi.

*Desorbimento termico*: i contaminanti organici volatili e semivolatili sono scaldati fino ad una temperatura sufficiente a desorbirli e volatilizzarli e quindi separarli dai suoli contaminati attraverso uno scambio termico diretto o indiretto.

*Distruzione termica*: calore e vuoto sono impiegati simultaneamente sul terreno contaminato per volatilizzare e/o distruggere i composti organici volatili o semivolatili. La frazione vaporizzata viene estratta controcorrente rispetto al flusso di calore, in pozzi di estrazione sottovuoto.

Come più volte sottolineato, ogni area contaminata possiede alcune peculiari caratteristiche sito-specifiche che rendono la scelta della/delle metodologia/metodologie di bonifica un punto cruciale nel processo di risanamento. Tutte

le metodologie sono valide, ma ognuna ha vantaggi e limiti che devono essere soppesati e tenuti in considerazione al momento della scelta. Le tecnologie illustrate sono soggette a continui sviluppi, grazie a ricerche condotte sia in campo universitario che in quello delle aziende private che lavorano nel settore delle bonifiche ambientali. Un esempio in tal senso è rappresentato dallo studio effettuato da Petrangeli Papini et al. [10], che ha visto la progettazione e la realizzazione di un intervento di messa in sicurezza operativa con l’installazione della seconda barriera permeabile attiva (PRB) costruita in Italia (la prima con configurazione *Funnel&Gate*) per il contenimento di una contaminazione da tetracloroetilene e tricloroetilene. Alla barriera, è stata accoppiata la metodologia di *Enhanced Natural Attenuation* come intervento di risanamento della sorgente. Un altro studio che può essere citato avente come obiettivo l’ottimizzazione delle tecniche già esistenti, è quello condotto da Vaccari et al. [11] al fine di valutare l’influenza di diversi parametri (ad es. temperatura esterna, granulometria ed umidità del suolo, pH, porosità, capacità di campo, ecc.) sull’efficienza del trattamento con biopile per la rimozione degli idrocarburi totali. Così come si assiste ad un’evoluzione delle metodologie a disposizione, negli ultimi anni è stata puntata l’attenzione anche su strumenti innovativi per la caratterizzazione del sito contaminato e dei processi in atto, come le metodologie di fingerprinting composizionale e isotopico. Entrambe le metodologie permettono di identificare la sorgente della contaminazione da prodotti petroliferi o solventi clorurati e di determinare i processi ed il grado di alterazione (comprendere il destino dei contaminanti una volta nell’ambiente, valutarne il trasporto ed i processi fisici, chimici e biologici che hanno diversi effetti sui diversi contaminanti;

[12-14]). Un altro aspetto del processo di caratterizzazione in evoluzione è quello relativo al campionamento, ed in particolare allo sviluppo di tecniche di campionamento passivo: tale aspetto si sta diffondendo sempre di più nel Nord America ma in Italia non viene ancora utilizzato perché non previsto nelle linee guida ISPRA [15].

In questo quadro piuttosto complesso e variegato, sarebbe allora estremamente opportuno mettere a punto linee guida specifiche che permettano un'armonizzazione dei metodi di prova tra i vari laboratori in fase di caratterizzazione del sito, in modo da supportare una rete inter-laboratorio atta a rafforzare la validità del dato analitico ottenuto, riducendo così il rischio di contenziosi e quindi di ripetizioni delle analisi, sulla base della norma UNI EN ISO/IEC 17025 [16]. In questo senso, in Italia, si sta muovendo il Gruppo di Lavoro "Controlli analitici in campo ambientale" costituito nel 2009 e che vede coinvolti ARPA, Federchimica, Unione Petrolifera, alcune aziende e laboratori privati. I 600 laboratori partecipanti vengono verificati, attraverso un'attività sperimentale da Unichim, che provvede ad identificare la cause delle differenze analitiche ed a proporre rimedi al riguardo, a cui seguiranno pubblicazioni di linee guida sotto forma di manuali Unichim. Questi obiettivi vengono perseguiti attraverso il censimento e l'analisi dei metodi di prova disponibili, la valutazione degli aspetti che determinano la qualità del dato analitico e l'elaborazione statistica dei dati di serie storiche di prove inter-laboratorio [17].

Mentre si sta cercando di operare nel modo migliore nella sfera dei contaminanti finora normati, nell'ultimo decennio è stato registrato un crescente interesse per la presenza di "composti organici emergenti" (EOCs) che vengono ritrovati in concentrazioni rilevanti come conseguenza sia di attività passa-

te che recenti. Infatti, il termine EOCs viene usato per identificare non solo composti recentemente sviluppati, ma anche composti che solo recentemente, grazie agli sviluppi analitici, possono essere determinati nell'ambiente. Gli EOCs comprendono una vasta gamma di composti diversi, tra cui ad esempio prodotti farmaceutici o per la cura personale (PPCP), prodotti veterinari, composti industriali, additivi alimentari e le tecnologie di ingegneria dei nano materiali [18], da cui dovranno essere risanate le matrici ambientali interessate. In ogni caso, comunque, l'obiettivo primario delle bonifiche è la diminuzione delle concentrazioni dei contaminanti, ma, su uno scenario a medio-lungo termine una bonifica dovrà risultare sostenibile dal punto di vista ambientale, economico e sociale. Il primo aspetto è ovviamente legato al decremento delle concentrazioni e ad un miglioramento delle risorse ambientali mentre il secondo è principalmente legato alla tecnologia di bonifica utilizzata, ad esempio nella differenza di approccio tra le metodologie *in-situ* ed *ex-situ*. Come precedentemente affermato, anche le caratteristiche del sito e l'uso finale che si intende fare della zona influenzano i costi del progetto. Con sostenibilità sociale, invece, s'intende la crescente comprensione da parte del pubblico della problematica ambientale, il ripristino dello stesso e l'assicurazione di una vita sana o nel caso di popolazioni che vivono in aree contaminate in corso di bonifica, di una struttura sociale in grado di provvedere assistenza alle popolazioni colpite [19].

Generalizzando, i progetti di bonifica ambientale con costi più bassi sono possibili in siti caratterizzati da contaminazioni costituite da un solo contaminante o da pochi contaminanti diversi, assenza di rifiuti ed applicazione di un solo tipo di tecnologia di bonifica. Al contrario, la presenza contemporanea

di diversi contaminanti e di rifiuti (anche se non pericolosi) e la necessità di combinare diversi tipi di tecnologie rendono il costo della bonifica ambientale superiore.

## Bibliografia

1. EPA-Environmental Protection Agency (2009) *Contaminated sites. Environment protection policy*. Publication 09/0771, Canberra, Novembre 2009, 1-43.
2. D.M. n. 471 (1999) Regolamento recante criteri, procedure e modalità per la messa in sicurezza, la bonifica e il ripristino ambientale dei siti inquinati. *Gazzetta Ufficiale*, n. 293, 15 dicembre 1999 - Supplemento Ordinario n. 218
3. D.Lgs. n. 152 (2006) Norme in materia ambientale. *Gazzetta Ufficiale* n. 88, 14 aprile 2006 - Supplemento Ordinario n. 96
4. Committee on the Institutional Means of risks to Public Health, National Academy of Science (1983) *Risk assessment in the Federal government: managing the process*. National Academic Press, Whashington D.C., 191 pp.
5. EPA-Environmental Protection Agency (1993) (RfD): *Description and use in health risk assessments. Background Document 1A*. Marzo 1993.
6. Cazzuffi D., Pietrini I. (2012) *Siti contaminati e tecnologie di bonifica: la situazione e le prospettive di sviluppo / Contaminated sites and remediation technologies: the present situation and a possible scenario*. In: Cazzuffi, D., Pietrini, I. (Eds.), *Atti dei Convegni Nazionali RemTech 2012*. DEA Edizioni. RemTech, Ferrara, 2-6.
7. Morais S.A., Delerue-Matos C. (2010) A perspective on LCA application in site remediation services: Critical review of challenges. *Journal of Hazardous Materials*, 175, 12-22.
8. EPA-Environmental Protection Agency (1999a) *Monitored Natural Attenuation of chlorinated solvents. U.S. Epa remedial technology sheet*. Maggio 1999.
9. EPA-Environmental Protection Agency (1999b) *Monitored Natural Attenuation of petroleum hydrocarbons. U.S. Epa remedial technology sheet*. Maggio 1999.
10. Petrangeli Papini M., Pierro L., Baric M., Rossetti S., Matturro B., De Giorgi D., Lucchini L. (2013) *Intervento di messa in sicurezza operativa con PRB&gate e mitigazione della sorgente mediante ENA. Dalla sperimentazione di laboratorio alla piena scala*. In: Cazzuffi, D., Pietrini, I. (Eds.), *Atti dei Convegni Nazionali RemTech 2013*. DEA Edizioni. RemTech, Ferrara, 146-153.
11. Vaccari M., Collivignarelli M.C., Zanaboni S., Righini L. (2009) *Operation and optimization of biopile treatment for petroleum hydrocarbons contaminated soils remediation*. In: Cazzuffi, D., Pietrini, I. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on Contaminated Soils and Sediments*. DEA Edizioni. RemTech, Ferrara, 172-178.
12. Aelion C.M., Höhener P., Hunkeler D., Aravavena R. (2009) *Environmental isotopes in biodegradation and bioremediation*. CRC Press, 464 pp.
13. Murphy B. L., Morrison D. L. (2002) *Introduction to environmental forensics*. Second Edition. Edited by Murphy, B. L., Morrison, D. L. Elsevier Academic Press.
14. EPA-Environmental Protection Agency (2008). *A guide for assessing biodegradation and source identification in organic groundwater contaminant using Compound Specific Isotope Analysis (CSIA)*. EPA 600/R\_0/148, Dicembre 2008.
15. Cazzaniga A., Bentivoglio N., Davit J.P., Chiarbonello D (2013) *Passive vs traditional groundwater sampling methods: a comparative analysis*. In: Cazzuffi, D., Pietrini, I. (Eds.), *Atti dei Convegni Nazionali RemTech 2013*. DEA Edizioni. RemTech, Ferrara, 55-56.
16. UNI EN ISO/IEC 17025 (2005) *Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura*.
17. Perego G. (2013) *Il progetto delle linee guida ed il collegamento con le prove di laboratorio*. Presentazione Sessione "Linee guida UNICHIM per l'armonizzazione dei metodi di prova in campo ambientale. Prove interlaboratorio e stato di avanzamento del progetto". RemTech 2013, Ferrara.
18. Lapworth D.J., Baran N., Stuart M.E., Ward R.S. (2012) Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence. *Environmental Pollution*, 163, 287-303.
19. Oughton D.H. (2011) Social and ethical issues in environmental remediation projects. *Journal of Environmental Radioactivity*, doi: 10.106/j.jenvrad.2011.08.019.