

RILASCI DI PRODOTTI PETROLIFERI PERICOLOSI PER L'AMBIENTE, RISCHIO AMBIENTALE E GESTIONE DEGLI INTERVENTI DI DISINQUINAMENTO

A. Brambillasca*, G. Corti*, M. Gotti*

* T.R.R. s.r.l., Piazza Papa Giovanni XXIII 2, Osio Sotto (BG)

info@trr.it

PREMESSA

Nel corso degli ultimi decenni il crescente interesse verso le problematiche ambientali nelle attività industriali ha guidato una rapida evoluzione delle scienze e delle tecnologie associate alla gestione dei rilasci di prodotti inquinanti e delle misure di disinquinamento nei siti di lavorazione.

Sinteticamente, il seguito di questa memoria pone particolare attenzione sullo stato delle attuali conoscenze in materia di dispersione di idrocarburi nel sottosuolo e presenta una rassegna di tecniche di intervento per il disinquinamento dei siti.

INTRODUZIONE

L'acronimo "LNAPL" è una comoda etichetta per identificare tutti quegli idrocarburi liquidi derivati dal petrolio grezzo aventi densità inferiore a quella dell'acqua e con essa immiscibili. Dal punto di vista dell'impatto ambientale le loro peculiarità sono:

- tipico posizionamento sulla superficie del piano della falda acquifera;
- immiscibilità con l'acqua. Questo implica che LNAPLs e acqua condividono i vuoti dei pori nel terreno coinvolto da un eventuale rilascio: tale condivisione è la causa della minore mobilità dei LNAPLs e dell'identificazione di questi rilasci in "problemi di trasporto di fluidi multifase";
- presenza di frazioni solubili in acqua. Qualora l'idrocarburo nel terreno venisse a contatto con acqua, tracce di composti organici si disciolgono in essa raggiungendo concentrazioni fino a qualche per cento in volume per le frazioni più solubili (questo accade pure durante l'infiltrazione di acqua piovana nel terreno).

In particolare, la riduzione della mobilità dei LNAPLs è fonte di complicazioni nelle attività di recupero mentre la bassa solubilità in acqua è causa di persistenza per lunghi periodi della sorgente di contaminazione compensata tuttavia dalla possibilità di formare fenomeni di attenuazione naturale (bioattenuazione).

1. RILASCI DI LNAPLs

Gli idrocarburi rilasciati nel terreno subiscono un meccanismo di migrazione verso il basso all'interno di un mezzo poroso e sotto l'azione della gravità. Nella zona al di sopra del piano di falda (detta "vadose zone") coesistono zone ove i vuoti dei pori sono condivisi da aria ("fase non bagnante") e acqua residua ("fase bagnante"): l'acqua è di preferenza attratta verso la parte solida (grani del terreno) formando una pellicola di copertura attorno i grani e riempiendo i vuoti più piccoli, la restante parte centrale dei pori essendo riempita da aria (Figura 1).

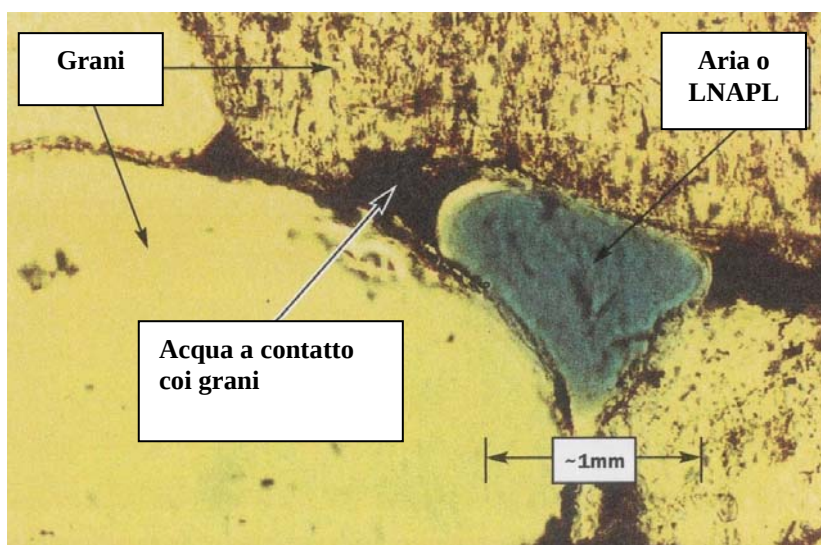


Figura 1: Riempimento dei vuoti di un mezzo granulare poroso.

La massa di LNAPL rilasciata si sposta attraverso gli interstizi del terreno comportandosi come fase non bagnante che progressivamente spiazza l'aria dai pori.

Qualora il rilascio in superficie avesse volume sufficientemente grande, il LNAPL potrà raggiungere lo strato di sottosuolo impregnato dell'acqua di falda, detta "zona satura": qui la massa immiscibile inizierà ad estendersi lateralmente e a dissolversi lentamente nel flusso di acqua. È importante sottolineare che l'idrocarburo non galleggia sul pelo dell'acqua (come potrebbe suggerire l'analogia dell'olio versato in un recipiente di acqua) bensì la massa di LNAPL assume una sistemazione simile a quella di un iceberg nel mare, con un volume abbondantemente sommerso. Inoltre, acqua e idrocarburo coesistono nei pori a diverse pressioni: la differenza tra queste pressioni è detta pressione capillare ed è responsabile del lento movimento laterale in cui la massa di LNAPL tende a spostare l'acqua dai pori ai margini della "lente" di idrocarburo. Tale zona occupata dalla lente di LNAPL è spesso indicata in letteratura col termine "smear zone".

Col trascorrere del tempo il LNAPL si esaurisce per discioglimento o altri meccanismi di rimozione e contestualmente diminuisce la frazione di vuoti occupata dall'idrocarburo (saturazione): in questo modo le traiettorie del moto diventano via via più corte e tortuose riducendo la mobilità del LNAPL finché la massa si arresta in bolle isolate e discontinue. La saturazione alla quale la massa è immobile prende il nome di saturazione residua.

In prossimità della lente di idrocarburo il discioglimento in acqua della frazione solubile forma col tempo un pennacchio di inquinante che si allunga progressivamente diluendosi in direzione parallela al gradiente di moto dell'acqua di falda. Tipicamente questi "plumes" di inquinante riducono la loro concentrazione per effetto di processi naturali al più entro distanze di poche centinaia di metri.

1.1 Ostacoli alla rimozione dell'inquinamento

L'esperienza degli ultimi decenni nel campo del recupero di LNAPLs dal sottosuolo ha insegnato che:

- i risultati migliori lasciano comunque nel terreno tracce residue di inquinamento;
- la frazione restante di LNAPL nell'acquifero spesso eccede i limiti imposti per gli standard di qualità delle acque.

L'intrappolamento di idrocarburo residuo nei pori del terreno, come descritto al punto precedente, è il fattore primario che limita il successo delle attività di disinquinamento.

Dal punto di vista tecnico i seguenti fattori sono rilevanti:

1. La progressiva rimozione di idrocarburo in prossimità della falda ha come effetto l'invasione dei pori da parte dell'acqua. Di conseguenza le traiettorie di moto per il LNAPL diventano più corte e tortuose, limitandone la possibilità di flusso attraverso i pori: le portate dei sistemi di recupero con pompaggi diretti diminuiscono quindi nel tempo fino a raggiungere incrementi percentuali trascurabili; efficienze di recupero oltre il 95% del massimo ottenibile non alterano significativamente la quantità residua nel terreno. Infine, il volume di idrocarburo recuperato è spesso significativamente minore di quanto rilasciato (circa < 50%), in larga parte dovuto all'intrappolamento del LNAPL in modo discontinuo nel terreno. In Figura 2 è rappresentata una tipica curva di recupero tramite pompaggio di inquinante verso la superficie.

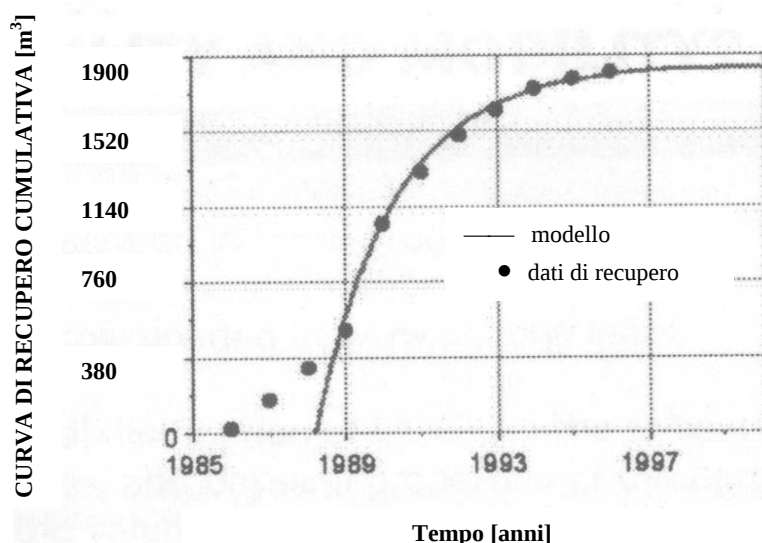


Figura 2: Curva tipica di recupero con pompaggio diretto

La quota del piano di falda è soggetta a fluttuazioni dovute alle maree oppure a contingenze climatiche con variabilità stagionale. In presenza di innalzamento della quota di falda, l'idrocarburo può restare intrappolato al di sotto del piano di falda sottoforma di bolle disposte con discontinuità. Viceversa, in presenza di diminuzione della quota della falda il LNAPL potrebbe drenare attraverso verso il basso con una mobilità superiore. Queste fluttuazioni, in ultimo, si riflettono in una variabilità dell'efficienza di recupero in funzione dei periodi di abbassamento / innalzamento del livello della falda.

2. Alcuni tipi di LNAPLs possono raggiungere viscosità fino a 20 ÷ 50 volte quella dell'acqua (es. greggio e olio combustibile): qualora questi rilasci si verificassero in terreni a bassa permeabilità, il loro recupero attraverso pompaggio risulterebbe oltremodo lento. D'altronde questi prodotti sono spesso caratterizzati da frazioni ad alto punto di ebollizione che presentano valori bassi di solubilità e volatilità: diminuzioni di concentrazione per volatilizzazione o per discioglimento in acqua di falda possono quindi essere processi molto lenti.
3. La complessità del sito ove si intende operare l'intervento di disinquinamento ha grande impatto sull'efficacia della tecnica adottata: le conformazioni geologiche spesso presentano disomogeneità e fratture mentre l'area in superficie può presentare ostacoli quali edifici, serbatoi, unità di processo, strade, etc. che ostacolano in modo pesante l'accessibilità alle ispezioni e all'installazione dei sistemi di intervento.
4. In alcune zone inquinate potrebbe presentarsi la necessità di raggiungere standard di qualità delle acque sotterranee estremamente stringenti. Nel caso del benzene, questo potrebbe richiedere la riduzione delle concentrazioni in acqua fino a 3 ÷ 5 ordini di grandezza rispetto alle concentrazioni iniziali in prossimità della sorgente di inquinamento: in questo caso gli interventi dovrebbero essere pianificati per il recupero a breve termine di tutta la massa rilasciata di LNAPL.

2. RIMOZIONE DELL'INQUINAMENTO DAGLI ACQUIFERI

Con il termine "disinquinamento dell'acquifero" si intende l'apprestamento di un sistema di opere finalizzate alla diminuzione o all'eliminazione degli inquinanti contenuti nell'acquifero (strato di terreno poroso compreso tra la quota del piano di falda e la quota dello strato geologico ad elevata impermeabilità, entro il quale è presente un significativo flusso di acqua).

Si possono individuare diversi tipi di intervento, classificabili ad esempio in base allo stato di inquinamento in atto e agli scopi prefissati, così come schematizzato nella successiva Tabella 1.

<i>Inquinamento</i>	<i>Obiettivo</i>	<i>Tecniche</i>
Acuto	Abbattimento	1. fissazione chimica in situ 2. asportazione del terreno inquinato e successivo riempimento con terreno "pulito"
	Recupero	1. pozzi di prelievo, trattamento delle acque sotterranee inquinate e ricarica dell'acquifero 2. pozzi di prelievo, trattamento delle acque sotterranee inquinate e scarico in acque superficiali 3. pozzi di prelievo e scarico in acque superficiali
Cronico	Abbattimento	1. fissazione chimica in situ 2. asportazione del terreno inquinato e successivo riempimento con terreno "pulito" 3. trincee drenanti delle acque inquinate per bloccare il flusso verso l'esterno dell'area 4. ricoprimento superficiale con materiale impermeabile per impedire l'infiltrazione del percolato prodotto 5. barriere sotterranee di materiale impermeabile per limitare il flusso idrico proveniente dalla sorgente inquinante 6. modifica delle modalità di pompaggio dei pozzi esistenti nella zona 7. iniezione di acqua pulita in una serie di pozzi disposti intorno alla sorgente o al pennacchio di contaminante per creare una barriera di contenimento al movimento dell'inquinante
	Recupero	1. pozzi di prelievo, trattamento delle acque sotterranee inquinate e ricarica dell'acquifero 2. pozzi di prelievo, trattamento delle acque sotterranee inquinate e scarico in acque superficiali 3. pozzi di prelievo e scarico in acque superficiali 4. trattamento chimico in situ 5. trattamento biologico in situ

Tabella 1: Tipi di intervento per il disinquinamento dell'acquifero.

Ad ogni modo, il requisito fondamentale durante la fase di progettazione del risanamento è la disponibilità di studi idrogeologici e idrochimici che devono aver determinato:

- la struttura idrogeologica dell'area;
- l'andamento della falda;
- la concentrazione e l'estensione delle aree inquinate;
- i modi e le sorgenti di inquinamento;
- le variazioni temporali delle concentrazioni;
- l'interferenza dell'inquinamento con gli usi in atto e/o previsti delle acque sotterranee e superficiali.

2.1 Pozzi di recupero

Questo sistema di intervento consiste nel creare una depressione piezometrica in grado di catturare i flussi idrici inquinanti. In altro modo, tale depressione può produrre deviazione delle linee di flusso preservando le captazioni poste più a valle oppure determinare un abbassamento del livello della falda in modo che le acque sotterranee non giungano a contatto con livelli di terreno inquinato.

Affinché l'intervento sia funzionale è però necessario che la forma della depressione artificiale coinvolga tutta l'area inquinata, che risulta allungata "a pennacchio" nella direzione di flusso della falda.

Vantaggi e svantaggi di questa tecnica sono riassunti nello schema seguente:

<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
• efficace per il controllo dell'inquinamento in falda • predisposizione facile e rapida • possibilità di riutilizzo di pozzi preesistenti • possibilità di integrazione con la tecnica di ricarica dell'acquifero • elevata flessibilità di applicazione (possibili variazioni di portata) • costi più contenuti rispetto le barriere artificiali	• elevati costi di gestione e manutenzione • necessaria continuità dei controlli dopo l'installazione • rimozione congiunta di acqua inquinata e acqua pulita • possibile necessità di modelli matematici per valutazioni preliminari dell'efficacia di recupero • possibile necessità di sistemi di trattamento delle acque prima dello scarico in superficie • limitata applicabilità in presenza di sottosuolo con granulometria fine

Tabella 2: Vantaggi e svantaggi dell'impiego di pozzi di recupero.

2.2 Drenaggi superficiali e sotterranei

Questi sistemi consistono nell'asportazione dal sottosuolo delle acque contaminate mediante vari dispositivi. Il successivo trattamento delle acque consente il loro scarico nelle acque superficiali, nel sottosuolo o il riutilizzo della risorsa idrica.

I sistemi di drenaggio, siano essi superficiali o profondi, sono applicabili in caso di soggiacenza non elevata della falda e possono essere integrati con sistemi di pompaggio per l'estrazione degli inquinanti.

Inoltre, a fronte di costi di costruzione relativamente ridotti, si ha un notevole grado di occupazione del suolo e talora è necessario riempire le trincee con materiale drenante (ghiaia) o trattare il terreno con materiali speciali e sostegni per superare problemi di stabilità dei fronti di scavo.

Vantaggi e svantaggi di queste tecniche sono riassunti nello schema seguente:

<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
• costi di gestione contenuti fino a che il flusso verso i dreni avviene per gravità • fornisce un mezzo di raccolta senza l'ausilio di geomembrane • adattabilità in caso di integrazioni e modifiche della disposizione • affidabilità del sistema se sottoposto a controlli continui • semplicità delle tecniche di costruzione	• inadatto in presenza di terreni a bassa permeabilità • generalmente inapplicabile in presenza di costruzioni esistenti • controllo continuo per la verifica dell'adeguata raccolta del percolato

Tabella 3: Vantaggi e svantaggi dell'impiego dei drenaggi.

2.3 Ricarica

Le operazioni di ricarica della falda consistono nell'immissione di acqua di buona qualità nel sottosuolo, raggiungendo i seguenti benefici:

- diluizione delle concentrazioni di inquinanti;
- aumento della loro dispersione (contestualmente alla riduzione di concentrazione);
- barriera idraulica alla propagazione verso valle dei flussi inquinati, mediante la formazione di un gradiente idraulico inverso;
- barriera idraulica all'ingresso di acque salate negli acquiferi posti in zone costiere.

Tali operazioni possono essere realizzate mediante bacini di alimentazione o pozzi di iniezione; in entrambi i casi il requisito fondamentale è disporre di una sufficiente quantità d'acqua di caratteristiche qualitative idonee agli usi previsti. Oltre ai fattori tecnici (disponibilità idrica e occupazione dei suoli) si sottolinea che la possibilità di realizzazione di tale intervento è determinata dalla struttura idrogeologica in quanto devono essere presenti conformazioni geologiche di elevata porosità e permeabilità, la conoscenza dell'andamento della falda deve essere noto nei dettagli e i materiali adoperati non devono provocare interazioni chimiche con l'acqua artificialmente introdotta nel sottosuolo. Si sottolinea tuttavia che, data la stratificazione presente nei corpi geologici, si riesce ad ottenere una limitata diluizione delle acque presenti nell'acquifero e quindi si ottiene una minore efficienza del sistema ai fini della protezione dall'inquinamento.

Si osserva, infine, che interventi di ricarica e drenaggio della falda si possono abbinare in quanto è possibile iniettare acqua a monte della zona inquinata, diluendo l'inquinamento per prelevare così a valle una minore concentrazione di inquinanti.

2.4 Barriere fisiche

L'introduzione di barriere fisiche al flusso idrico sotterraneo ha lo scopo di:

- ridurre l'infiltrazione di acque dalla superficie (mediante coperture o sistemi di isolamento superficiale);
- impedire la percolazione di inquinanti da una zona di terreno contaminata o in cui si trovano liquidi inquinanti (mediante impermeabilizzazioni o sistemi di isolamento del fondo);
- ostacolare la fuga o il contatto laterale tra le acque di falda e una zona inquinata, impedire il contatto tra una massa inquinata e la falda mediante un abbassamento del suo livello (mediante diaframmi, muri, palancole o sistemi di isolamento delle pareti).

La diversità dei modi di realizzazione delle barriere fisiche è tuttavia ampia ed esula dagli scopi della presente memoria: si rimanda pertanto alla letteratura specializzata per informazioni dettagliate.

Vantaggi e svantaggi di queste tecniche sono riassunti nello schema in tabella sotto presentata.

Vantaggi / svantaggi delle tecniche di disinquinamento mediante barriere fisiche		
<i>Vantaggi</i>		<i>Svantaggi</i>
	<i>Barriere naturali</i>	
• costi inesistenti legati alla raccolta e trattamento del percolato		• necessità di ambiente idrogeologico particolare
• ridotti costi di costruzione		• impatto a lungo termine
	<i>Impermeabilizzazione</i>	
• riduzione dell'impatto idrogeologico		• elevati costi di costruzione
• stabilizzazione delle perdite		• possibilità di inquinamento di acque in superficie
		• possibile diminuzione di efficacia in presenza di contaminanti organici (aumento della permeabilità fino a 2 ordini di grandezza)
	<i>Copertura</i>	
• riduzione dell'impatto idrogeologico dopo la copertura		• accresce i costi di copertura
• costi di costruzione ridotti se applicate geomembrane (membrane sintetiche)		• assenza di controllo del percolato durante la fase di gestione dell'impianto
		• necessità di monitoraggio a lungo termine e accuratezza nel modellamento della superficie di copertura

segue →

Vantaggi / svantaggi delle tecniche di disinquinamento mediante barriere fisiche (segue)	
<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
<i>Copertura e impermeabilizzazione</i>	
• riduzione degli impatti ambientali • minimizzazione dei costi di raccolta e smaltimento del percolato	• costi elevati di progettazione e costruzione • necessità di materiale impermeabilizzante (naturale o artificiale) di elevata qualità • tempi di stabilizzazione delle perdite elevati
<i>Palancole</i>	
• facilità di costruzione senza scavi • non esige manodopera ed impianti speciali • economicità della costruzione • assenza di manutenzione dopo la costruzione • possibilità di rivestimento del metallo per evitare fenomeni corrosivi	• iniziale mancanza di tenuta stagna (per palancole metalliche, ove l'intasamento delle giunzioni fa acquistare tenuta nel tempo) • difficoltà di infissione in terreni a granulometria grossolana • corrosione del metallo causata da agenti chimici
<i>Diaframmi a base cementizia</i>	
• molto efficaci se idoneamente progettati • esperienza consolidata nel ramo dell'ingegneria civile • disponibilità di diverse tipologie a seconda del terreno	• necessità di idonea granulometria del terreno per evitare perdite e intasamenti • mancanza di tenuta in presenza di terreni stratificati • limite di applicabilità in caso di elevate velocità del flusso di falda (diluizione del cemento ed elevato trasporto della contaminazione) • impossibilità di controllo dell'efficienza della barriera
<i>Diaframmi a base bentonitica</i>	
• semplicità delle tecniche di costruzione • scarsa incidenza sulla piezometria della falda nelle aree limitrofe • scarso deterioramento nel tempo della bentonite • scarsa necessità di manutenzione • eliminazione dei rischi di perdite e danneggiamenti in fase di costruzione • non sono necessari sistemi di raccolta del percolato	• costi elevati di trasporto del materiale • necessità di scavi preventivi in presenza di massi • deterioramento della bentonite in presenza di percolato ad alto contenuto ionico ($\text{pH} < 7$) • impossibilità di adeguata conoscenza sulla formazione impermeabile • mancanza di sicurezza riguardo l'installazione senza discontinuità

Tabella 4: Vantaggi e svantaggi dell'impiego di barriere fisiche.

2.5 Trattamenti in situ

Il trattamento dell'inquinamento è una tecnica poco praticata in Italia. Si distingue in tre categorie: trattamento fisico (variazione della temperatura del sottosuolo favorendo l'evaporazione dei composti più volatili oppure creazione di correnti elettriche in grado di provocare la migrazione dei composti polari contenuti negli additivi); trattamento fisico-chimico (iniezione nel terreno di sostanze che, mediante reazioni di ossido-riduzione con l'inquinante, possono formare composti non pericolosi o comunque immobilizzare l'inquinamento); trattamento biologico (degradazione da parte di microrganismi che utilizzano come fonte di nutrimento le stesse sostanze inquinanti nel sottosuolo, producendo dapprima sostanze organiche semplici ed infine anidride carbonica e acqua).

Quest'ultimo trattamento, in particolare, è di notevole interesse in quanto alcuni di questi funghi e batteri sono stati riconosciuti responsabili della degradazione di idrocarburi. Alcuni dei maggiori composti organici soggetti a tali trasformazioni sono elencati in Tabella 5.

Alcoli	Lattami
Aldeidi	Composti nitrosi
Alifatici (saturi e insaturi)	Composti organici di: As, P, Mg, Sn, S
Ammine	Solfuri
Aromatici	Uree
Eteri	Eterocicli
Alogenuri	Chetoni

Tabella 5: Gruppi organici soggetti a trasformazioni da parte di microrganismi

L'attività dei microrganismi dipende da svariati fattori: salinità, potenziali di ossido-riduzione, concentrazione dell'inquinante, pH (contenuto tra 6 e 8), temperatura, umidità e presenza di sostanze nutrienti (potassio, azoto, fosforo, sodio) in diverse forme e proporzioni. Agendo su questi fattori l'attività batterica già presente nel terreno può essere aumentata mediante iniezione di un substrato nutritivo adatto oppure mediante ossigenazione del terreno ("trattamenti di miglioramento").

Vantaggi e svantaggi di questo trattamento sono riassunti nello schema seguente:

<i>Vantaggi</i>	<i>Svantaggi</i>
• utile nella rimozione di idrocarburi e altre sostanze organiche, in basse concentrazioni e difficilmente rimovibili con altri sistemi • valido dal punto di vista ambientale perché non crea prodotti di rifiuto e non determina variazioni ecologiche • veloce, sicuro e in generale economico • mobilità del trattamento assieme al pennacchio di inquinamento • valido per trattamenti a breve termine di acque sotterranee inquinate	• non applicabile alla rimozione di metalli pesanti • possibilità di intasamento dei pori del terreno da parte dei batteri, riducendone la permeabilità • possibilità di cattivi odori e sapori emessi dai residui di decomposizione • costoso se necessita immissione a lungo termine di nutrienti e in presenza di un suo mantenimento • lenta biodegradazione rispetto i trattamenti fisici se sono presenti elevate concentrazioni di inquinanti • sconosciuti gli effetti a lungo termine • difficilmente accettabile dalle autorità • incapacità di riduzione di concentrazioni dell'ordine del $\mu\text{g/L}$ senza ricorrere a tecnologie complementari

Tabella 6: Vantaggi e svantaggi dell'impiego di trattamenti in situ.

3. FATTORI DI PRESTAZIONE

L'indicatore di prestazione che illustra sinteticamente l'efficacia di una tecnica di disinquinamento è basato sulla stima della riduzione di flusso di inquinante e di massa di inquinante.

La seguente Tabella 7 riassume, per ognuna delle risorse attualmente disponibili, alcune fonti autorevoli in cui sono definiti i fattori di riduzione del flusso e della massa di inquinante nella falda acquifera, in modo da disporre degli elementi utili alla predisposizione del miglior piano di intervento. Si nota a questo proposito che esiste notevole incertezza associata alla stima dei fattori di prestazione, attribuibile principalmente alla carenza di informazioni certe sulle seguenti variabili: quantità iniziale di massa rilasciata; eterogeneità delle condizioni del terreno, anche su scala ridotta; distribuzione della concentrazione di LNAPL nel terreno; caratteristiche idrogeologiche.

Tecniche di rimozione					
<i>Tipo</i>	<i>Zona interessata</i>			<i>Riferimenti per la stima dei fattori di riduzione dell'inquinamento</i>	<i>Condizioni tipiche di applicabilità</i>
	<i>vd</i>	<i>sm</i>	<i>gw</i>		
Escavazione	√	√		EPA, 1991 [7]	• DTW > 3 m • DOI < 6 m
Pompaggio e trattamento delle acque			√	EPA, 1996 [8]	• $K > 10^{-4}$ cm/s
Bioattenuazione			√	ASTM, 1998 [9]	• effetti a lungo termine • recettori non inquinati • pennacchio stabile / in riduzione
Assorbenti di LNAPLs		√			• piccoli accumuli di LNAPL
Asportazione di LNAPLs		√		API, 1999 [10] API, 2002 [11] API, 2003 [12]	• DOI < 6 m • alte capacità di recupero (ordine di alcuni L/g) ed elevata permeabilità della falda
Ossigenazione con aria			√	API, 1995 [13]	• $K > 10^{-4}$ cm/s • DTW > 3 m • formazioni geologiche omogenee
Estrazione multifase / Bioslurping	√	√	√	AFCEE, 1985 [14]	• $10^{-5} < K < 10^{-3}$ cm/s • DTW < 7 m
Pompaggio combinato dei fluidi totali		√	√		• $K > 10^{-4}$ cm/s
Tecniche di contenimento					
Contenimento idraulico			√	EPA, 1996 e 1997 [8, 15]	• $K > 10^{-4}$ cm/s
Trincee drenanti / barriere fisiche			√	EPA, 1998 [16]	• DOI < 15 m
Coperture / impermeabilizzazione	√			EPA, 1987 e 1993 [17, 18]	
Barriere biologiche			√		
vd = "vadose zone" sm = "smear zone" gw = falda					K = conducibilità idraulica DTW = profondità del piano di falda DOI = profondità dell'inquinamento

Tabella 7: Tecnologie di intervento disponibili e risorse per determinarne l'efficacia

4. COSTI

Nonostante i dati di costo per predisporre le misure di intervento siano stati forniti dalle raffinerie, questi sono da ritenersi comunque limitati. Inoltre, i dati raccolti dagli autori del report [4] non sono tali da poter fornire cifre sicure: tuttavia quanto presentato nel seguito può ritenersi indicativo delle cifre utili per valutazioni di massima.

È comunque evidente il forte costo che deve essere sostenuto da un'attività di raffineria per la protezione del suolo e delle acque sotterranee: le cifre riportate per preventivi di investimento possono essere variabili tra **250,000 €/anno** fino a **2,500,000 €/anno**.

4.1 Drenaggi superficiali e sotterranei

Pur non essendo esplicitamente citati, i costi di questi metodi di intervento possono essere desunti per analogia a quelli stimati per la posa o risanamento delle reti fognarie.

Sulla base dei costi sostenuti da tre raffinerie sono forniti i seguenti dati:

<i>Installazione</i>	
in superficie con materiali a base di resina epossidica	1500 €/m
<i>Sostituzione / Incamiciatura</i>	
	1600 €/m
<i>Manutenzione / Risanamento</i>	
	300 €/m

Tabella 8: Valori indicativi per i costi specifici dei drenaggi.

4.2 Impermeabilizzazione con membrane

I costi di questa attività possono essere parecchio influenzati da fattori contingenti quali, ad esempio, l'occupazione della superficie che comporterebbe la rimozione dei serbatoi / apparecchiature oppure l'installazione concomitante di tubazioni di drenaggio.

Escludendo le suddette attività collaterali, i seguenti costi sono indicativi:

<i>Materiale di posa</i>	<i>Costo specifico</i>
Argilla	13 €/m²
Asfalto	24 €/m²
Cemento	30 €/m²
Bentonite	18 €/m²
HDPE	23 €/m²

Tabella 9: Valori indicativi per i costi specifici delle impermeabilizzazioni.

4.3 Barriere

Un solo dato disponibile da raffineria indica il costo di **750 €/m** per l'inserimento di una barriera impermeabile in HDPE lungo i confini dello stabilimento.

4.4 Sistemi con pozzi di recupero

Pur non essendo esplicitamente citati, i costi di questi metodi di intervento possono essere desunti per analogia a quelli stimati per la messa in opera di sistemi di monitoraggio delle acque sotterranee mediante pozzi attrezzati con piezometri.

<i>Installazione</i>	250 ÷ 2800 €/pozzo
<i>Campagna di monitoraggio</i>	78 €/anno/pozzo
<i>Analisi di laboratorio</i>	7000 €

Tabella 10: Valori indicativi per i costi specifici dei sistemi di recupero.

CONCLUSIONI

Quanto presentato è indicativo di come un intervento di disinquinamento possa essere non solo costoso ma anche soggetto a possibili insuccessi qualora fosse pianificato senza la necessaria conoscenza di dettaglio del sottosuolo e adottando tecniche inadatte agli intenti prefissati.

A supporto dell'attività di pianificazione degli interventi ambientali è indubbiamente utile un'attività di indagine basata sull'analisi dei rischi e delle possibili conseguenze, attività peraltro ampiamente consolidata e prevista in ambito internazionale (es. [19], [20], [21], [22]). In questa fase di studio è quindi conveniente disporre di strumenti adatti a supportare un'attività di screening per individuare il settore e le modalità ottimali di intervento.

Svariati strumenti sono attualmente disponibili per sviluppare una valutazione preliminare di come una strategia di intervento possa influire sulla distribuzione di inquinante residuo nel sottosuolo. Questi strumenti possono essere semplici fogli elettronici così come simulatori complessi 3D di dispersione di idrocarburi. Chiaramente, lo strumento più adatto dipende dall'obiettivo prefissato.

Un primo passo potrebbe essere la stima del profilo di distribuzione verticale di LNAPL nel sottosuolo a partire da poche informazioni sul mezzo poroso e sul tipo di idrocarburo rilasciato. In questa maniera è possibile ricavare indicazioni del volume intrappolato e della quantità di LNAPL recuperabile con strumenti idraulici di pompaggio; nella fase successiva potrebbe essere valutata la curva di recupero teoricamente ottenibile dal sistema.

A complemento di questo tipo di attività esistono parecchi modelli numerici, certamente più sofisticati, con maggiori complessità di utilizzo e richiedono un set di dati più completo e dettagliato. In aggiunta, per avere un'interpretazione adeguata dei risultati deve essere prevista una buona conoscenza dei meccanismi di trasporto di fluidi multifase nei mezzi porosi. Si sottolinea tuttavia che, su un piano di analisi preliminare delle attività di disinquinamento, la maggiore complessità del modello non è necessariamente garanzia di migliori risultati.

Si segnalano nel seguito, dunque, alcuni strumenti software disponibili per le attività di studio e caratterizzazione dei siti inquinati:

<i>Nome</i>	<i>Scopo</i>	<i>Riferimenti</i>
HSSM	Valutazione della dispersione di idrocarburi nel sottosuolo	[3]
UTCHEM	Valutazione della dispersione di idrocarburi nel sottosuolo (3D)	[23]
BIOPLUME III	Sistema di supporto agli interventi di bioattenuazione, recupero e impermeabilizzazione	[24]
LNAST	Valutazione dell'efficacia di recupero di LNAPL con mezzi idraulici	[25], [11]
LNAPL	Progettazione di base di sistemi per il recupero di idrocarburi	[12]
LNAPL Database	Database per la caratterizzazione preliminare del sito e del movimento dell'inquinamento da LNAPL	[26]
Groundwater Sensitivity Toolkit	Valutazione preliminare della vulnerabilità delle acque del sottosuolo e recettori sensibili	[27]

Tabella 11: Alcuni strumenti software disponibili per l'analisi preliminare.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.P. Beretta, *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee*, Pitagora Ed. Bologna, Bologna, pp.665-735 (1992)
- [2] C.J. Newell, J.A. Conner, D.L. Rowen, *Groundwater Remediation Strategies Tool*”, API Publishing Services, Washington D.C. (2003)
- [3] J.W. Weaver, R.J. Charbeneau, J.D. Tauxe, B.K. Lien, J.B. Provost, *The Hydrocarbon Spill Screening Model (HSSM)*, U.S. Environmental Protection Agency
- [4] D. Dando, W. Hafker, T. Walden, E. Martin, *Best available techniques to reduce emissions from refineries – soil and groundwater*, CONCAWE, Bruxelles (1999)
- [5] *Answer to Frequently Asked Questions About Managing Risk at LNAPL Sites*, API Soil and Groundwater Research Bulletin Number 18, Washington D.C. (2003)
- [6] R.A. Freeze, J.A. Cherry, *Groundwater*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (1979)
- [7] EPA, *Survey of Materials-Handling Technologies Used at Hazardous Waste Sites*, EPA publication, Washington DC (1991)
- [8] EPA, *Pump-and-Treat Ground-Water Remediation: A Guide for Decision Makers and Practitioners*, EPA publication, (1996)
- [9] ASTM, *Standard Guide for Remediation of Ground Water by Natural Attenuation at Petroleum Release Sites*, ASTM publication 1943-98, West Consohocken (1998)
- [10] API, *Free-Product Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids*, API publication 4682, Washington D.C. (1999)
- [11] API, *Evaluating Hydrocarbon Removal from Source Zones and its Effect on Dissolved Plume Longevity and Concentration*, API publication 4715, Washington D.C. (2002)
- [12] API, *Models for Design of Free-Product Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids*, API publication 4729, Washington D.C. (2003)
- [13] API, *In Situ Air Sparging: Evaluation of Petroleum Industry Sites and Considerations for Applicability, Design and Operation*, API publication 4609, Washington D.C. (1995)
- [14] AFCEE, *Test Plan and Technical Protocol for a Field Treatability for POL Free Product Recovery: Evaluating the Feasibility of Traditional and Bioslurping Technologies*, draft, (1995)
- [15] EPA, *Design Guidelines for Conventional Pump-and-Treat Systems*, (1997)
- [16] EPA, *Evaluation of Subsurface Engineered Barriers at Waste Sites*, Technology Report, (1998)
- [17] EPA, *Geosynthetic Design Guidance for Hazardous Waste Landfill Cells and Surface Impoundments*, EPA publication, (1987)
- [18] EPA, *Construction Quality Control and quality Assurance at Waste Containment Facilities. Technical Guidance Document*, Cincinnati (1993)
- [19] CONCAWE, *European oil industry guideline for risk-based assessment of contaminated sites*, Rpt. 2/97, Bruxelles (1997)
- [20] ASTM, *Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites*, ASTM publication E 1739-95, West Consohocken (1995)
- [21] UNICHIM, *Suoli e falde contaminati – Analisi di rischio sito-specifica, Criteri e parametri*, manuale UNICHIM 196/1, (2002)
- [22] EPA, *Guidelines for Ecological Risk assessment*, Risk Assessment Forum, Washington DC, (1198)
- [23] G.A. Pope, K. Sepehrmoori, M.M. Sharma, D.C. McKinney, G.E. Speitel Jr., R.E. Jackson and Duke Engineering and Services Inc., *Three-dimensional NAPL fate and transport model*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati (1999)
- [24] H.S. Rafai, C.J. Newell, J.R. Gonzales, S. e B. Dendrou, L. Kennedy, J.T. Wilson, *Bioplume III – Natural Attenuation Decision Support System*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati (1998)
- [25] D. Huntley, G.D. Beckett, *Evaluating hydrocarbon removal from source zones: tools to assess concentration reduction*, API review, Washington D.C. (2001)
- [26] G.D. Beckett, S. Joy, *Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPL) Parameters Database*, estratto da API publication 4731, Washington D.C. (2003)
- [27] API, California MTBE Research Partnership, *Groundwater Sensitivity Toolkit*, API publication 4722, Washington D.C. (2002)