

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle
Infrastrutture

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria per l'ambiente e il territorio**

Tesi di Laurea Magistrale

Tecniche di bonifica per il recupero di LNAPL ad elevata viscosità: analisi e applicazione ad un ex sito industriale



Relatore

Ing. Alessandro Casasso

Candidato

Simone Simone

A mamma, papà e Giulia

INDICE

ABSTRACT.....	3
1. INTRODUZIONE.....	4
1.1 Concetti di base sulla bonifica di siti contaminati	4
1.2 Caratteristiche dei contaminanti.....	6
1.2.1 Classificazione dei contaminanti	6
1.2.2 I LNAPL e i loro meccanismi di propagazione.....	9
1.3 Descrizione del caso di studio.....	16
1.3.1 Inquadramento geologico ed idrogeologico	16
1.3.2 Contaminanti rinvenuti.....	19
1.3.3 Proprietà reologiche del prodotto libero	20
1.3.4 Spessore del LNAPL	21
1.3.5 Obiettivi di bonifica	24
1.4 Tecnologie di bonifica applicabili	25
2. METODI	28
2.1 Software utilizzati	28
2.1.1 FEFLOW	28
2.1.2 LDRM (LNAPL Distribution and Recovery Model).....	32
2.2 Oil skimming.....	35
2.2.1 Descrizione della tipologia di intervento	35
2.2.2 Recupero della fase surnatante	37
2.3 Multi phase extraction/bioslurping	39
2.3.1 Descrizione della tipologia di intervento	39
2.3.2 Recupero della fase surnatante	41
2.3.3 Simulazione di flusso con Feflow	44
2.4 Groundwater heat recirculation cell	45
2.4.1 Descrizione della tipologia di intervento	45
2.4.2 Simulazione di flusso e trasporto di calore con Feflow.....	47
2.4.3 Recupero della fase surnatante	53
2.5 Thermal conductive heating TCH.....	54
2.5.1 Descrizione della tipologia di intervento	54

2.5.2	Simulazione di flusso e trasporto di calore con Feflow	56
2.5.3	Recupero della fase surnatante	63
3.	RISULTATI E DISCUSSIONE	64
3.1	Dimensionamento e prestazioni	64
3.1.1	Oil skimming.....	64
3.1.2	Multi phase extraction/bioslurping	64
3.1.3	Groundwater heat recirculation cell	65
3.1.4	Thermal conductive heating	66
3.2	Vantaggi e svantaggi delle tecniche analizzate	67
3.2.1	Oil skimming.....	67
3.2.2	Multi phase extraction	68
3.2.3	Groundwater heat recirculation cell	69
3.2.4	Thermal conductive heating	71
3.3	Analisi economica	72
3.3.1	Groundwater heat recirculation cell	74
3.3.2	Thermal conductive heating	76
3.4	Scelta della tecnica di bonifica	77
4.	CONCLUSIONE	84
5.	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	86

ABSTRACT

La crescente necessità di bonificare i siti industriali dismessi, per un riutilizzo come stabilimento produttivo o per una riqualificazione urbanistica dell'area, pone numerose sfide riguardo la fattibilità tecnica ed economica.

In questo caso studio si esamina una contaminazione da LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquids) ad elevata viscosità, cioè sostanze oleose non miscibili in acqua, che ha interessato le matrici terreni e acque sotterranee. Rappresenta una contaminazione molto diffusa nei siti industriali caratterizzati da una presenza massiccia di oli idraulici e lubrificanti.

La tecnica più affidabile per il risanamento ambientale in tempi brevi è rappresentata dallo scavo e smaltimento in discarica dei terreni contaminati, una tecnica senza dubbio efficace ma troppo onerosa. Da questa considerazione è nata l'esigenza di analizzare dal punto di vista tecnico ed economico diverse tecnologie applicabili al sito in esame (oil skimming, multi phase extraction MPE, groundwater heat recirculation cell GHRC e thermal conductive heating TCH) in modo da identificare quella più adatta.

Dal punto di vista tecnico, si determina per ogni tecnologia una configurazione di progetto che garantisce il raggiungimento degli obiettivi di bonifica preposti. Le simulazioni di intervento e di recupero del LNAPL per ciascuna tecnologia esaminata vengono realizzate attraverso l'aiuto di due software:

- FEFLOW per la simulazione del flusso e del trasporto di calore;
- LDRM per la simulazione del recupero della frazione d'olio presente in sito attraverso l'utilizzo di skimmer o pozzi multi phase extraction.

Da questo primo approfondimento, si definiscono le tecniche che garantiscono una buona efficacia d'intervento scartando le altre (oil skimming e multi phase extraction) che invece sono di realizzazione e gestione troppo complessa.

Dal punto di vista economico, per ciascuna tecnica è stato valutato il costo indicativo dell'intervento in progetto.

Infine, per rendere il confronto più oggettivo possibile si è valutata economicamente l'efficacia della configurazione di progetto pianificata considerando ogni criticità come un costo tecnico aggiuntivo che probabilmente dovrà essere sostenuto durante l'intervento.

I risultati di quest'ultima analisi delineano la TCH come la tecnica più adatta per il sito in esame in quanto presenta minori criticità progettuali ed un costo dell'intervento inferiore.

1. INTRODUZIONE

La crescente necessità di bonificare gli ex siti industriali, anche al fine di un riutilizzo di aree urbane, pone numerose sfide riguardo la fattibilità tecnica ed economica. Tra le più impegnative vi è sicuramente la bonifica di contaminanti scarsamente miscibili in acqua, noti come NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids), il cui recupero con tecniche consolidate come il pump-and-treat risulta impossibile. Tra i NAPL più comunemente rinvenuti ci sono gli oli idraulici e lubrificanti utilizzati in diverse lavorazioni.

In questo capitolo, si introduce dapprima la disciplina nazionale sui siti contaminati, utile ad inquadrare gli obiettivi della bonifica ambientale. Di seguito si analizzano le principali tipologie di contaminanti, concentrandosi sui cosiddetti Light-NAPL (LNAPL) oggetto del lavoro di tesi. Viene quindi introdotto il caso di studio, un ex sito industriale in provincia di Torino nel quale le lavorazioni svolte hanno portato alla percolazione di oli lubrificanti molto viscosi. Il capitolo si conclude con una prima disamina delle tecniche di bonifica potenzialmente applicabili, alcune delle quali vengono esaminate nei capitoli successivi per studiarne la fattibilità tecnico-economica atta ad individuare la tecnologia più adatta nel caso di studio.

1.1 Concetti di base sulla bonifica di siti contaminati

Per bonifica di un sito si intende “l’insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento o a ridurre le concentrazioni delle sostanze inquinanti presenti nel suolo, nel sottosuolo, nelle acque superficiali o acque sotterranee, ad un livello uguale o inferiore ai valori della concentrazione soglia di rischio” [1].

La bonifica può essere (ma non è necessariamente) il risultato di un procedimento di bonifica, che viene attivato dall’autorità competente (la Provincia, la Regione o il Ministero dell’Ambiente, a seconda della scala del sito) su segnalazione del gestore del sito o di altri soggetti (proprietari di siti confinanti, cittadini, forze dell’ordine, ARPA...).

Inizialmente bisogna verificare che il sito in esame sia effettivamente potenzialmente contaminato, ovvero che anche uno solo dei valori di concentrazione di sostanze inquinanti, nel suolo, sottosuolo e acque sotterranee, risulti superiore alle CSC (Concentrazioni Soglia di Contaminazione stabiliti dal D. Lgs. 152/06). Se la concentrazione di sostanze inquinanti risulta inferiore ai limiti stabiliti dalla legge, la procedura si conclude con il ripristino della zona. In caso contrario, invece, ovvero se $C > CSC$, il sito viene definito potenzialmente

contaminato e si prevedono delle misure di prevenzione e di messa in sicurezza d'emergenza (MISE): interventi immediati e a breve termine atti a contenere la diffusione delle sorgenti primarie di contaminazione, impedirne il contatto con altre matrici presenti nel sito e a rimuoverle [2], in attesa della caratterizzazione del sito e degli eventuali ulteriori interventi di bonifica/messa in sicurezza.

Nel contempo si procede alla stesura del "Piano di Caratterizzazione", primo livello progettuale secondo la normativa italiana, suddiviso in due fasi:

- Site assessment: tutte le indagini ambientali necessarie per caratterizzare la sorgente inquinante e le matrici ambientali interessate (suolo, sottosuolo e acque sotterranee);
- Definizione del modello concettuale: individuazione dei soggetti potenzialmente esposti, delle vie di esposizione, delle vie di migrazione e dei contaminanti indice in base alle risultanze ottenute e alla storia del sito in esame.

Sulla base delle risultanze della caratterizzazione, al sito è applicata la procedura di analisi di rischio atta a constatare l'effettivo rischio per la salute umana e per l'ambiente legato alla contaminazione presente. In questa procedura si determina la concentrazione dei contaminanti indice nei punti di esposizione (punti in cui c'è contatto tra il soggetto recettore e la matrice ambientale interessata dalla contaminazione) cercando di simulare verosimilmente i percorsi di migrazione dalla sorgente di contaminazione al punto di esposizione [3]. Definiti poi il tasso di esposizione (la quantità media di ciascun mezzo ambientale, acqua aria e terreno, assunto per unità di peso corporeo e giorno di esposizione) e le caratteristiche tossicologiche dei contaminanti indice si determina il rischio tossico e cancerogeno presente. Successivamente, si valuta se il rischio è accettabile e si determinano le Concentrazioni soglia di Rischio CSR, ossia limiti sito-specifici calcolati sulla base dei parametri del sito in esame. Se in sito le concentrazioni dei contaminanti indice risultano superiori alle CSR, il sito viene definito contaminato e scatta l'obbligo di bonifica. In caso contrario, il sito viene definito non contaminato e si prevede una costante attività di monitoraggio del sito in modo da poter controllare il grado di contaminazione ed intervenire qualora necessario.

Il progetto di bonifica include tutti gli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre le concentrazioni delle stesse presenti nel sito contaminato ad un livello uguale o inferiore ai valori delle concentrazioni soglia di rischio (CSR). Questa breve descrizione della procedura da seguire è schematizzata in Figura 1.1.

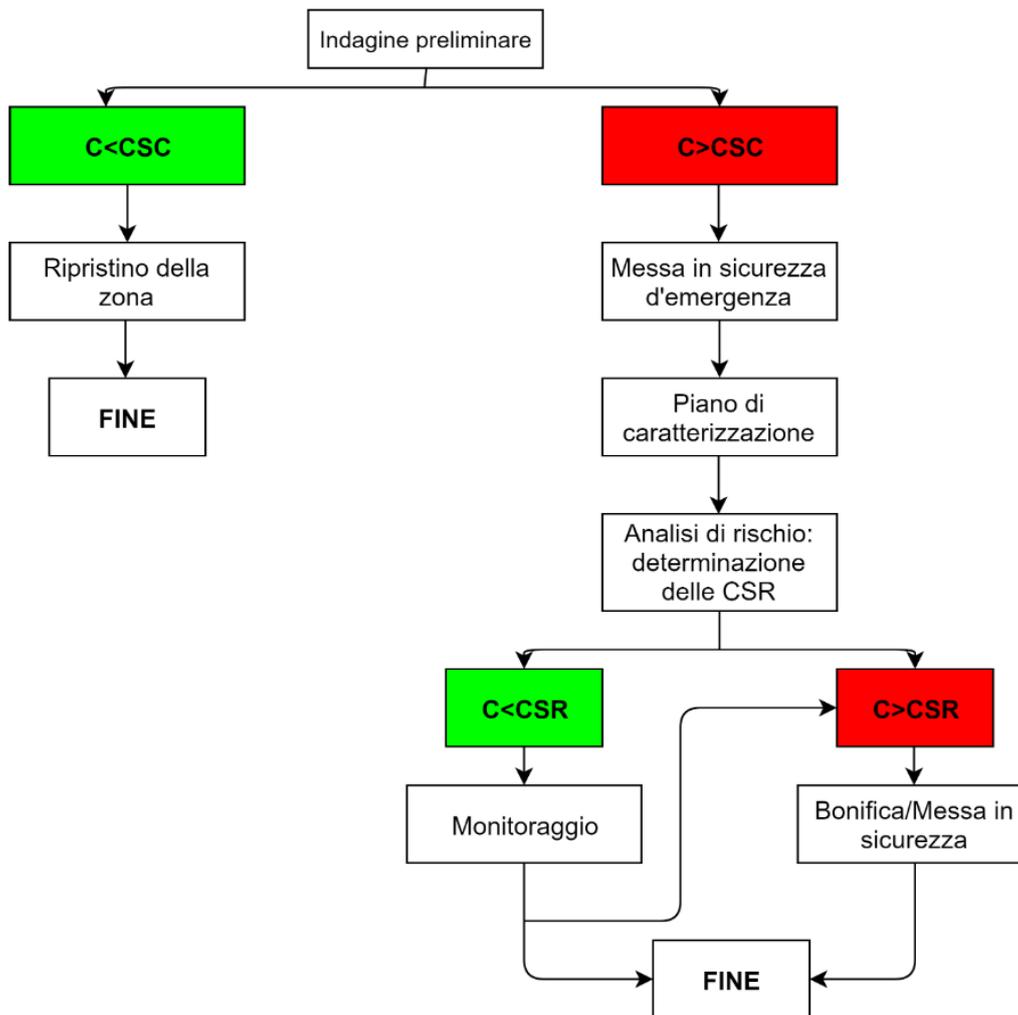


Figura 1.1 Iter da seguire nel caso di un sito contaminato secondo il quadro normativo del D. Lgs. 152/06 [4].

1.2 Caratteristiche dei contaminanti

Come descritto nel paragrafo precedente, la bonifica è un procedimento finalizzato alla riduzione delle concentrazioni di uno o più contaminanti al di sotto dei limiti di legge in un determinato punto di esposizione. Risulta quindi essenziale conoscere le caratteristiche dei contaminanti per comprendere come intervenire successivamente.

1.2.1 Classificazione dei contaminanti

Una classificazione dei contaminanti, funzionale alla determinazione dei processi di propagazione e degli effetti sulla salute umana, deve essere effettuata basandosi su criteri chimici, fisici e tossicologici (Tabella 1.1):

- Dal punto di vista chimico, si suddividono in composti organici (tutti i composti contenenti almeno un atomo di carbonio legato con legame covalente ad atomi di altri elementi) e composti inorganici (tutti gli altri composti come metalli, nitriti e nitrati). La contaminazione dai primi deriva perlopiù dall'utilizzo ampiamente diffuso di idrocarburi nella raffinazione del petrolio e nelle diverse attività industriali, di solventi clorurati come sgrassanti e di materiali grezzi nei processi manifatturieri [5]. La contaminazione dei secondi, invece, deriva dall'utilizzo di metalli pesanti nelle attività industriali e dalla produzione di percolato nelle discariche.
- Dal punto di vista fisico, invece si classificano in base a:
 - Stato fisico: liquido (la maggior parte di essi) o gassoso (es: metano, etano, etilene) in condizioni ambientali di pressione e temperatura;
 - Miscibilità: parametro fondamentale per analizzare il comportamento del contaminante nelle acque sotterranee. Un contaminante viene definito miscibile solo quando forma con l'acqua una fase unica. In caso contrario, si forma una fase liquida distinta e si parla genericamente di NAPL;
 - Densità $[ML^{-3}]$: definita come il rapporto tra massa e volume del composto, varia in funzione delle interazioni molecolari e della struttura chimica [5]. Nel flusso sotterraneo è fondamentale comprendere l'interazione del contaminante con l'acqua di falda e quindi la relativa differenza di densità in condizioni ambientali di temperatura e pressioni;
 - Solubilità $[ML^{-3}]$: la concentrazione massima di contaminante in soluzione acquosa quando questa si trova in equilibrio con il composto puro in determinate condizioni di temperatura e pressione. Da questo parametro si possono estrapolare informazioni circa la dissoluzione e trasporto in falda, l'adsorbimento in fase solida, la formazione di una fase libera e una fase vapore. In particolare, si distingue tra composti cosiddetti "solubili", cioè che presentano un'elevata solubilità (ad esempio, i metalli pesanti e altri contaminanti inorganici), e "non solubili" caratterizzati invece da una bassa solubilità come i NAPL (Non-Aqueous Phase Liquids) [3];
 - Volatilità: tendenza di un contaminante a passare alla sua fase aeriforme. Questo fenomeno viene descritto dalla pressione di vapore $P_v [L^{-1}MT^{-2}]$, parametro che definisce la velocità di volatizzazione di un composto. Ad esempio, composti volatili sono contraddistinti da alti valori di P_v e vengono

di fatti chiamati VOC (composti organici volatili);

- Dal punto di vista tossicologico, si classificano in base alla loro natura eventualmente tossica e/o cancerogena: i composti tossici non cancerogeni non hanno effetti sulla salute umana al di sotto di una certa dose, definita come la quantità media giornaliera di contaminante somministrata attraverso le differenti matrici ambientali per unità di peso corporeo; i composti cancerogeni, invece, lo sono in misura proporzionale alla loro concentrazione secondo una correlazione lineare. La distinzione, infatti, si basa su un diverso modello dose-risposta che ciascuna sostanza segue come mostrato in Figura 1.2:

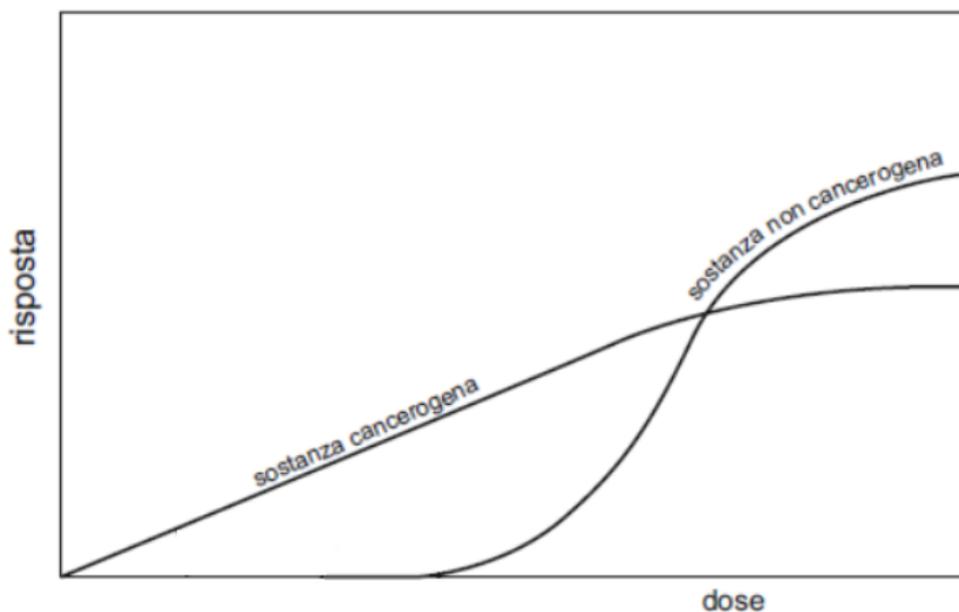


Figura 1.2 Curve dose-risposta di una sostanza tossica cancerogena e di una tossica non cancerogena [3].

Il limite cancerogeno viene dato sulla base di un rischio aggiuntivo di contrarre un tumore che viene ritenuto “accettabile” e che, secondo il D.Lgs. 152/06, è di 1 caso su 1 milione di persone per ciascun analita considerato e di 1 caso su 100 mila persone esposte alla sommatoria di tutti i contaminanti considerati. Questi valori stanno a dimostrare quanto sia bassa la soglia di accettabilità e quanta attenzione bisogna porre per rischi di questo genere.

Tabella 1.1 Principali criteri di classificazione dei contaminanti presenti negli acquiferi [3].

CRITERI DI CLASSIFICAZIONE	PROPRIETA'
Chimico	Composizione
Fisico	Stato Fisico
	Miscibilità
	Densità
	Solubilità
	Volatilità
Tossicologico	Tossicità
	Cancerogenicità

1.2.2 I NAPL e i loro meccanismi di propagazione

I NAPL, contaminanti sui quali si concentra il lavoro di questa tesi, sono composti che formano una fase immiscibile in acqua/aria. Ciò non significa che la solubilità di questi composti sia nulla ma che generalmente essi formano una fase libera quando sono presenti in falda in concentrazioni superiori rispetto alla loro solubilità [3].

Una prima classificazione dei NAPL può essere effettuata in funzione della densità: LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquids) per oli con densità inferiore all'acqua di falda che tendono a galleggiare sulla tavola d'acqua (vedi Figura 1.4) e DNAPL (Dense NAPL) per oli con densità maggiore rispetto all'acqua di falda che, invece, tendono a diffondersi in profondità nell'acquifero (vedi Figura 1.6). Per i primi, i composti più diffusi sono i BTEX (benzene, toluene, etilbenzene, xilene) e contaminazioni di questo tipo sono dovute perlopiù a perdite accidentali di oli minerali da vasche interraste, canalette e linee di trasporto oli. Per i secondi, invece, i composti più diffusi sono gli IPA (idrocarburi policiclici aromatici) originati da combustioni incomplete di combustili, idrocarburi alifatici clorurati (TCM, TCE, DCE, ect.) e pesticidi. Contaminazioni di questo tipo sono dovute ad un'ampia varietà di processi industriali ed agricoli.

Il LNAPL, in seguito allo sversamento in ambiente, si diffonde prevalentemente in profondità sotto l'azione della forza di gravità e in misura minore orizzontalmente. Si possono verificare due situazioni differenti in funzione dei volumi di LNAPL sversati:

- Esigui volumi rilasciati (volume non sufficiente a raggiungere la tavola d'acqua): il prodotto non si liscivia in falda, ma rimane nella zona vadosa. La frazione più leggera

volatilizza, una frazione rimane disciolta nell'acqua interstiziale, una frazione presente in fase libera e la restante intrappolata nel mezzo poroso come saturazione residua. Tuttavia, il contaminante può comunque raggiungere la zona satura tramite le infiltrazioni meteoriche che lo liscivierebbero in falda;

- Abbondanti volumi rilasciati (volume sufficiente a raggiungere la tavola d'acqua): il prodotto si diffonde nella zona vadosa e si liscivia in falda. Nel sottosuolo i meccanismi sono del tutto analoghi a quelli visti nel caso precedente, l'unica differenza sta nei volumi maggiori che permettono al LNAPL di raggiungere la tavola d'acqua. In falda una frazione è presente in fase libera (se $C_{FALDA} > \text{Solubilità}$), una frazione è disciolta in acqua e segue il suo flusso sotterraneo mentre la restante è intrappolata nel mezzo poroso come saturazione residua. La fase libera si presenta sulla tavola d'acqua con una tipica configurazione a "pancake" che costituisce così una potenziale sorgente di contaminazione a lungo termine, in grado di ricaricare la falda di frazioni solubili per tempi lunghissimi causando problemi rilevanti per il risanamento ambientale. Infatti, in presenza di contaminazioni di questo tipo il primo step della bonifica consiste necessariamente nella rimozione della sorgente e quindi del prodotto libero.

I due casi sono schematizzati in Figura 1.3, mentre in Figura 1.4 sono rappresentati i percorsi e i meccanismi di trasporto dei LNAPL.

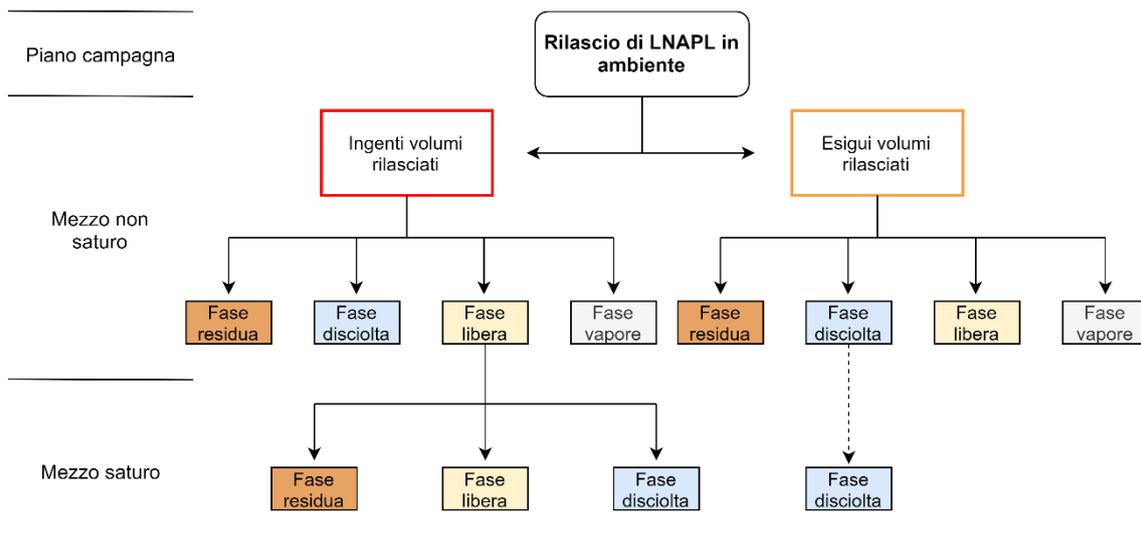


Figura 1.3 Schema della migrazione e ripartizione di un LNAPL in seguito allo sversamento in ambiente.

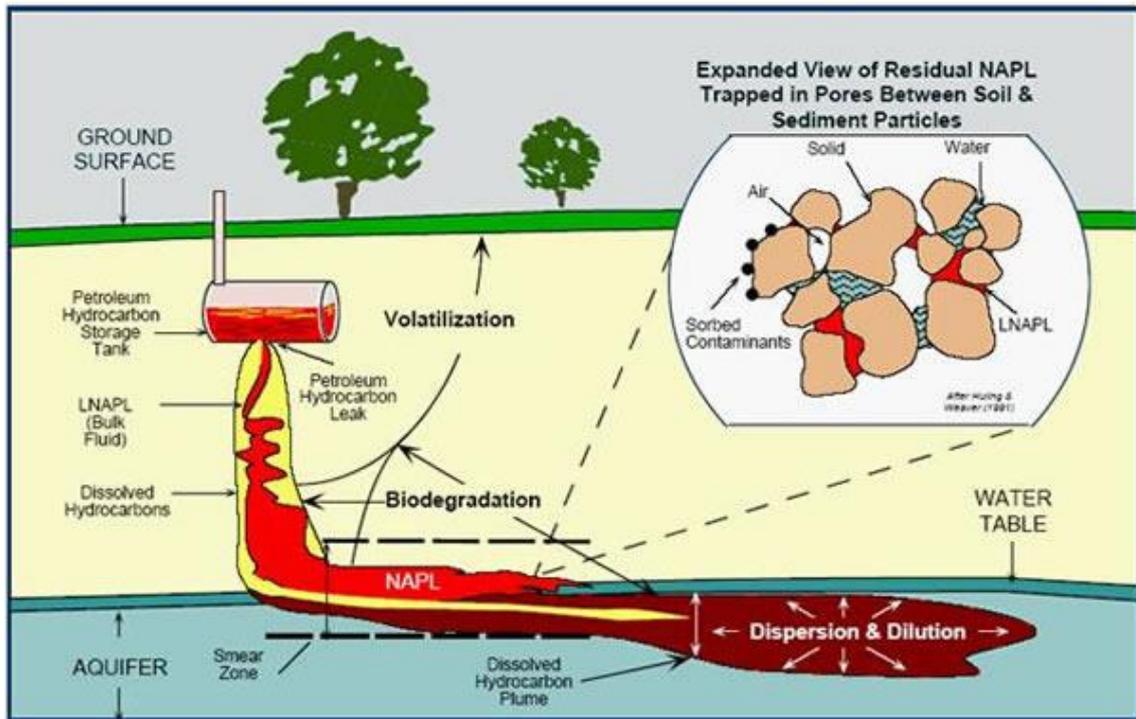


Figura 1.4 Migrazione di un LNAPL sversato nel sottosuolo [6].

I DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquids), in seguito allo sversamento in ambiente, per via della maggior densità tendono a distribuirsi nella zona vadosa prevalentemente sulla verticale con una dispersione orizzontale minima. Anche in questo caso, si possono verificare due situazioni differenti in funzione dei volumi di DNAPL sversati:

- Esigui volumi rilasciati (volume non sufficiente a raggiungere il bottom dell'acquifero): il prodotto si diffonde nel mezzo non saturo e si liscivia in falda. Nella zona vadosa la frazione più leggera volatilizza, una frazione è disciolta nell'acqua interstiziale, una frazione intrappolata nei pori come saturazione residua e la restante migra come prodotto libero in profondità. Quando il prodotto libero raggiunge la tavola d'acqua, non avendo volumi sufficienti a raggiungere il bottom dell'acquifero, si arresta ad una certa quota rimanendo intrappolato nel mezzo poroso come saturazione residua. Tuttavia, il contaminante è presente anche in fase disciolta e viene trasportato dal flusso di falda;
- Abbondanti volumi rilasciati (volume sufficiente a raggiungere il bottom dell'acquifero): il prodotto si diffonde nel mezzo non saturo, si liscivia in falda e raggiunge la base dell'acquifero. Nella zona vadosa i meccanismi sono del tutto analoghi a quelli visti nel caso precedente. Quando il prodotto libero raggiunge la

tavola d'acqua, avendo volumi sufficienti, raggiunge il bottom dell'acquifero accumulando saturazioni residue rilevanti lungo tutto lo spessore saturo. Anche in questo caso, si forma una fase disciolta che segue il flusso sotterraneo.

I due casi sono schematizzati in Figura 1.5 e descritti graficamente in Figura 1.6.

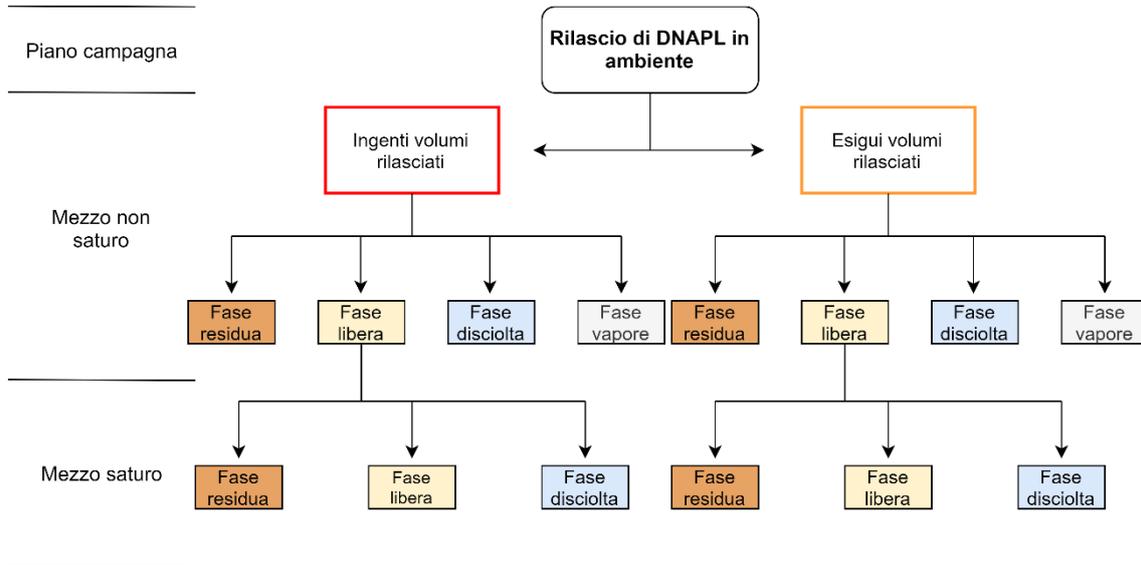


Figura 1.5 Schema della migrazione e ripartizione di un DNAPL in seguito allo sversamento in ambiente.

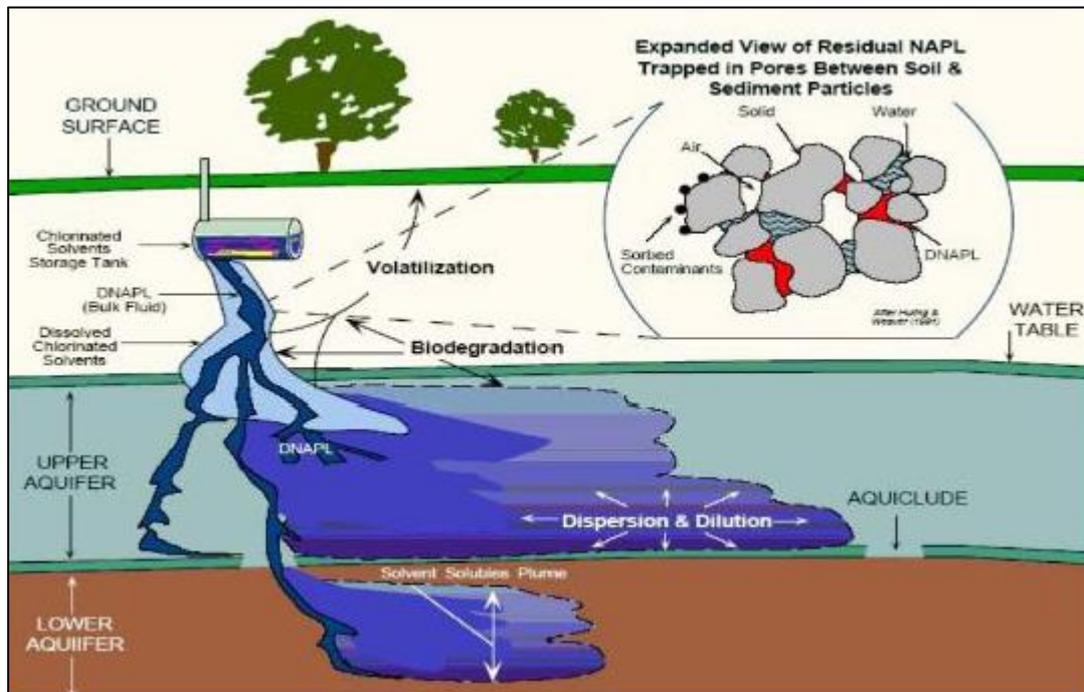


Figura 1.6 Migrazione di un DNAPL sversato nel sottosuolo [6].

La fase residua o anche detta saturazione residua, è una frazione del NAPL su cui bisogna porre maggior attenzione per una serie di ragioni che verranno spiegate di seguito.

La saturazione, già citata diverse volte in questo paragrafo, è la frazione relativa del volume dei pori che contiene un determinato fluido (nel caso di nostro interesse il NAPL) $V_{NAPL}[L^3]$ rispetto il volume totale dei pori V_v in un mezzo poroso $[L^3]$:

$$S_{NAPL} = \frac{V_{NAPL}}{V_v} \quad (1.1)$$

La mobilità del contaminante, fondamentale per poter pianificare accuratamente un intervento di bonifica, dipende dalla sua saturazione nel mezzo poroso. La saturazione viene definita residua S_R quando il NAPL è intrappolato e immobilizzato nei pori per mezzo delle forze capillari. Il parametro appena descritto dipende da molti fattori (distribuzione granulometrica, gradienti piezometrici, viscosità e densità dei fluidi, portate immesse) e pertanto è molto variabile ed eterogeneo nel mezzo poroso, cioè non è sempre possibile stimare la sua distribuzione nel dominio in esame. Perdipiù, rappresenta una frazione della contaminazione non rimuovibile con le tradizionali tecniche di bonifica.

Si parla di tecniche collaudate come il Pump&Treat che prevede il pompaggio e quindi l'estrazione dell'acqua di falda contaminata. Questo metodo è molto efficace sulla contaminazione presente in fase disciolta ma non lo è sulla fase residua. Una volta che le concentrazioni in acquifero sono tornate nei limiti di legge, si arresta l'emungimento e si ritiene concluso l'intervento di bonifica. In questo momento temporale, però, si può verificare un incremento delle concentrazioni in falda (rebound) dovuto al desorbimento del contaminante dalla fase residua alla disciolta per via di fenomeni diffusivi. L'effetto del pompaggio sulla concentrazione del contaminante disciolto in falda in funzione del tempo viene mostrato in Figura 1.7.

Considerata questa possibile conseguenza, la fase residua del NAPL si definisce a tutti gli effetti una potenziale sorgente di contaminazione per l'acquifero.

La saturazione residua dei principali NAPL raggiunge nel mezzo non saturo valori tipici tra $0.1 \div 0.2$ e nel saturo valori tra $0.15 \div 0.50$. La Figura 1.8 mostra infatti come la S_R in frangia capillare è molto maggiore rispetto alla stessa in zona vadosa.

Da queste informazioni si deduce che in fase progettuale bisognerà porre maggior attenzione sulla fase residua nel mezzo saturo in quanto capace di immagazzinare un volume maggiore di contaminante e quindi, sarà molto probabilmente il punto chiave per il raggiungimento degli obiettivi di bonifica nei tempi stabiliti.

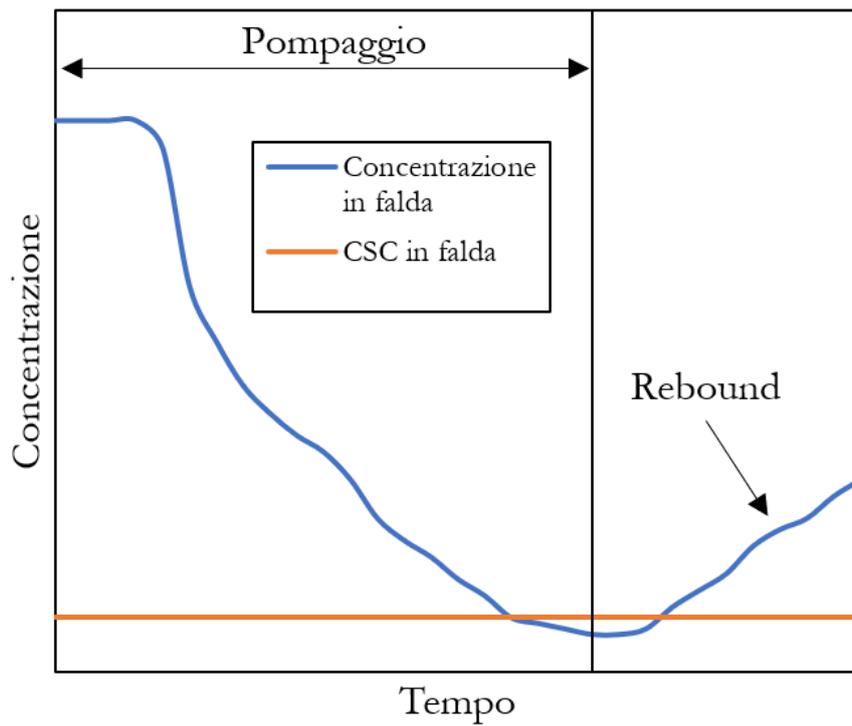


Figura 1.7 Concentrazioni in falda di un contaminante in funzione del tempo di pompaggio [3].

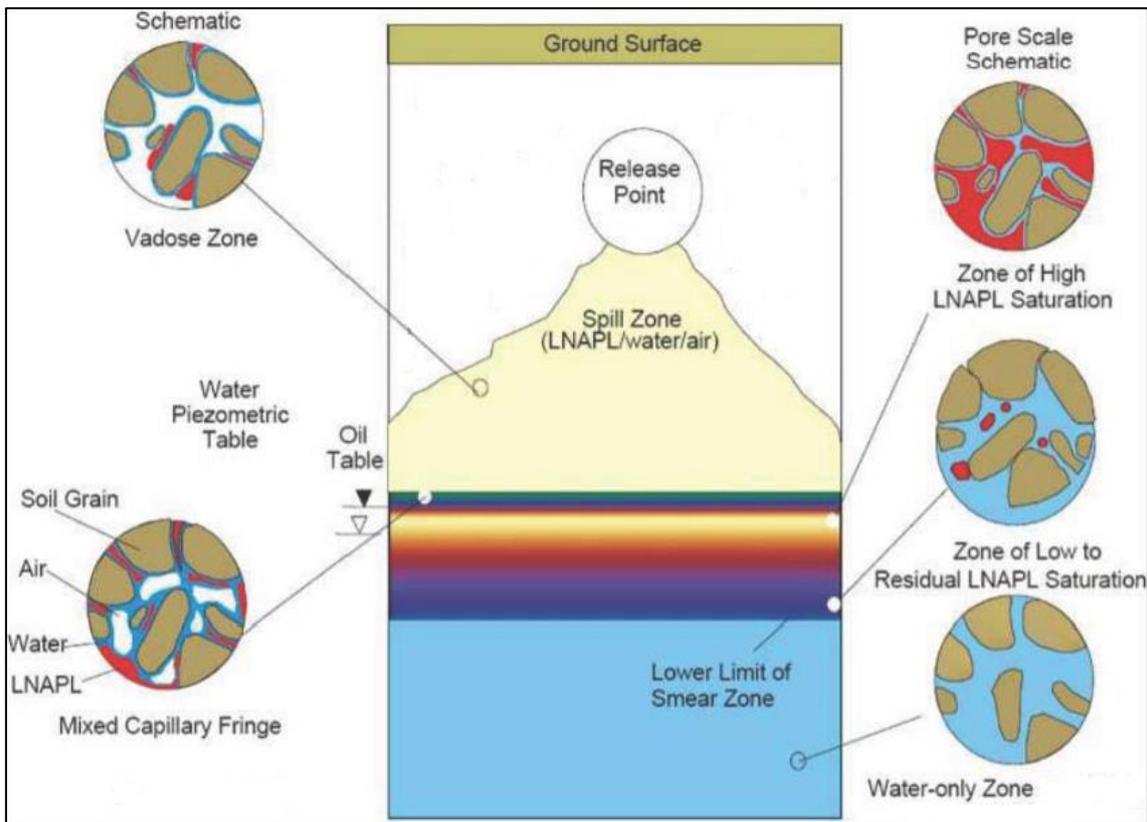


Figura 1.8 Saturazioni di LNAPL nella zona vadosa, nella frangia capillare e nella zona satura [7].

Un altro punto chiave è rappresentato da caratteristiche del fluido quali densità e viscosità e la loro dipendenza dalla temperatura.

La densità dei fluidi non è un parametro fisso, ma dipende dalla temperatura, in particolare diminuisce a temperature più alte (Figura 1.9A). Le variazioni di densità, tuttavia, sono meno importanti di quelle della viscosità, rappresentante la resistenza del fluido al flusso [8]. Quest'ultimo parametro infatti risulta determinante nella stima della conducibilità idraulica (K) del mezzo poroso, che è legata alla permeabilità k (proprietà intrinseca del mezzo poroso, indipendente dal fluido che l'attraversa) attraverso la relazione:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (1.2)$$

dove k è la permeabilità [L^2], ρ è la densità del fluido [M/L^3], g è l'accelerazione di gravità [L/T^2] e μ è la viscosità dinamica [$M/(L \cdot T)$].

Anche la viscosità diminuisce all'aumentare della temperatura, ma la variazione è molto maggiore rispetto a quella della densità (Figura 1.9B). Di conseguenza, all'aumentare della temperatura ci si può attendere un incremento notevole della conducibilità idraulica di un mezzo poroso rispetto ad un certo fluido. Nella figura seguente vengono riportati gli andamenti di viscosità e densità in funzione della temperatura per l'acqua ma il comportamento termico è simile per qualsiasi tipo di fluido.

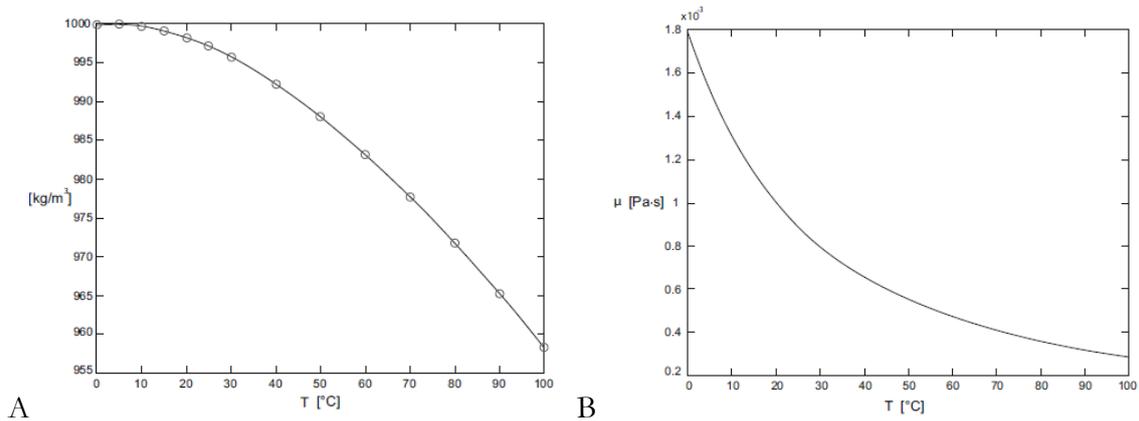


Figura 1.9 Variazione della densità (a sinistra) e della viscosità (a destra) dell'acqua con la temperatura [3].

1.3 Descrizione del caso di studio

Il sito in esame è un sito industriale attualmente dismesso ubicato in provincia di Torino, attivo fino a pochi decenni fa. Il complesso industriale è suddiviso in due macro-aree (settore 1 e settore 2) come mostrato in Figura 1.10.



Figura 1.10 Planimetria del sito e suddivisione dello stabilimento industriale.

Nel settore 1 sono condensate le principali attività produttive dello stabilimento che la rendono la zona più sensibile dal punto di vista ambientale. Quest'area è organizzata su due livelli (piano terra e interrato) separati da una soletta in calcestruzzo più o meno spessa a seconda della vecchia destinazione d'uso. Il piano terra è perlopiù coperto da capannoni industriali, mentre, il piano interrato è costituito da diversi locali dove erano collocate le macchine e le relative vasche di raccolta degli oli idraulici e lubrificanti. I locali interrati si trovano complessivamente a profondità comprese tra 3 e 8 m rispetto il piano calpestabile e molti di essi sono interconnessi tra di loro attraverso cunicoli di collegamento.

1.3.1 Inquadramento geologico ed idrogeologico

L'assetto geologico ed idrogeologico superficiale di dettaglio dell'area in esame può essere

definito sulla base delle diverse indagini geognostiche svolte.

La Figura 1.11 riporta l'ubicazione di tutti i sondaggi eseguiti sul sito e la traccia del profilo litostratigrafico A-A'.

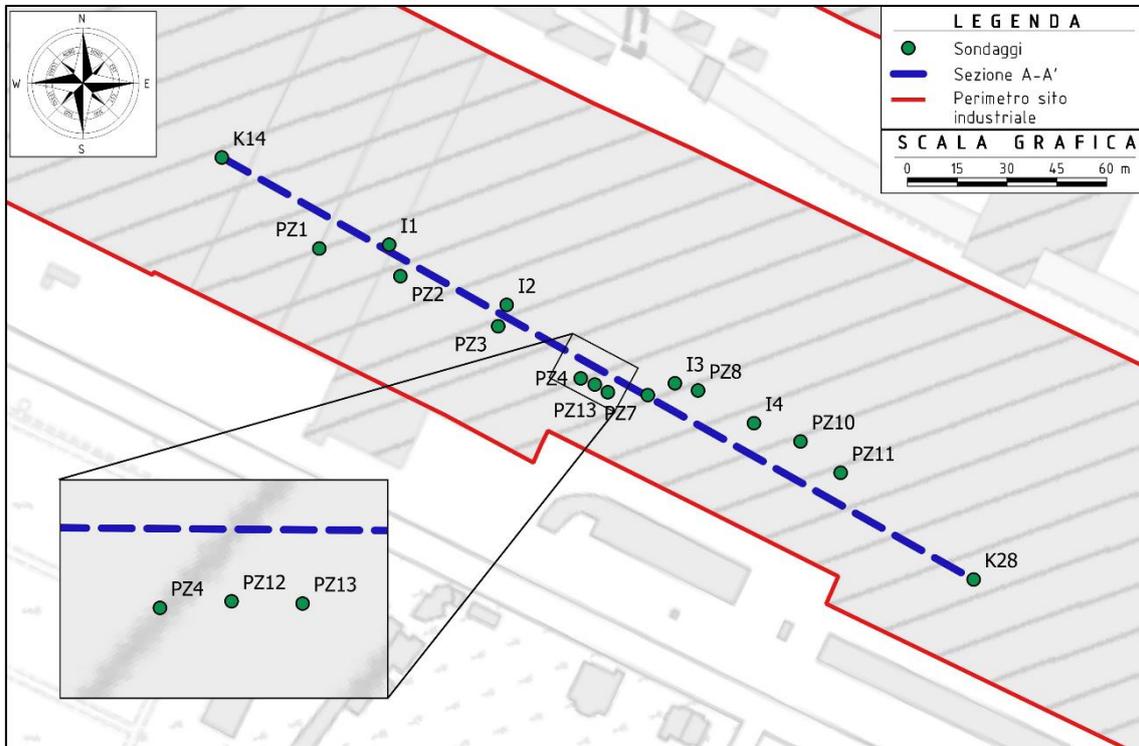


Figura 1.11 Ubicazione dei sondaggi geognostici e traccia del profilo litostratigrafico A-A'.

Il profilo litostratigrafico, ricostruito a partire dai dati dei sondaggi geognostici tramite un software che restituisce in output un dominio litologico tridimensionale, è riportato in Figura 1.12.

La successione lito-stratigrafica presente può essere sintetizzata come segue:

- da 0 a 0.1÷1.5 m da p.c: soletta in calcestruzzo;
- da 0.1÷1.5 a 14÷15 m da p.c: sabbia ghiaiosa, interrotta localmente e senza continuità areale su tutto il sito da:
 - livelli di limo sabbioso di spessore prevalentemente compreso tra 0.15 e 3.5 m;
 - livelli di sabbia limosa più in profondità rispetto al resto del sito rilevati nel settore in cui sono presenti gli interrati;
- a partire da 14÷16 m dal p.c: livello limoso, che costituisce verosimilmente una compartimentazione locale dell'acquifero.

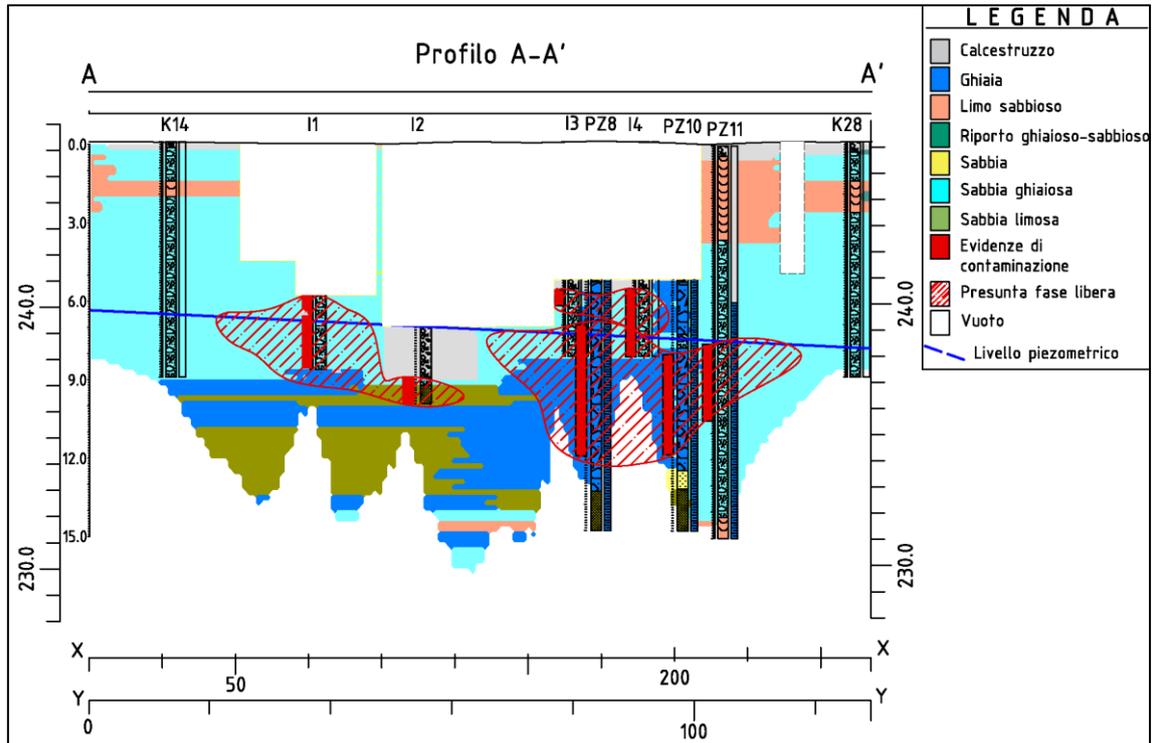


Figura 1.12 Sezione stratigrafica A-A' con evidenze di contaminazione e presunta fase libera.

In seguito al completamento a piezometro di alcuni dei sondaggi indicati in Figura 1.11, sono state realizzate diverse campagne di rilievo piezometrico. La campagna di maggio 2018 è stata utilizzata per ricostruire la piezometria dell'acquifero superficiale presente in Figura 1.13.

Avendo a disposizione uno storico significativo delle oscillazioni piezometriche (range temporale di 10 anni), è possibile stimare dei valori medi riscontrati nel sito in esame.

Infatti, la soggiacenza si trova mediamente a 7-8 m dal p.c. mentre la base dell'acquifero si rinviene ad una quota media compresa tra 215 e 220 m s.l.m., corrispondente ad una profondità tra 26 e 31 m da p.c.

La falda superficiale presenta una direzione media di deflusso da NO a SE e un gradiente piezometrico mediamente pari a 0.5%.

La piezometria appena descritta, per semplicità, sarà quella di riferimento per l'intero studio in esame.

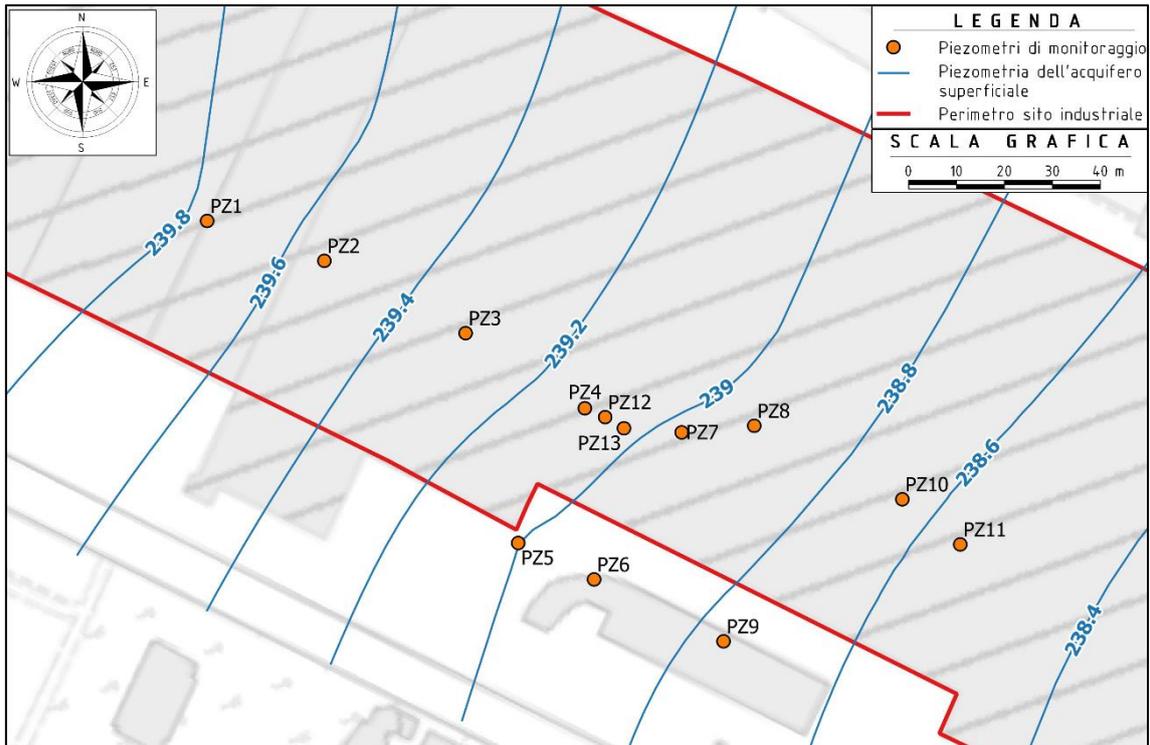


Figura 1.13 Ubicazione dei piezometri e piezometria dell'acquifero superficiale (maggio 2018).

1.3.2 Contaminanti rinvenuti

Le indagini di caratterizzazione hanno permesso di identificare il tipo di contaminazione presente nel sito in esame. I contaminanti con concentrazioni superiori alle CSC sono idrocarburi pesanti ($C > 12$), ferro e manganese.

La presenza di idrocarburi totali in alcuni piezometri si accompagna a lievi superamenti delle CSC per ferro e manganese perchè si tratta di un fenomeno di contaminazione secondaria, dovuto ai processi di degradazione anaerobica degli idrocarburi da parte dei microrganismi Fe-riduttori e Mn-riduttori presenti nell'acquifero.

In particolare, in alcuni punti di monitoraggio, gli idrocarburi sono presenti anche in fase libera come mostrato nella tabella seguente.

Tabella 1.2- Soggiacenza e spessore olio nei piezometri.

PIEZOMETRO	Situazione attuale (mag-18)		
	Soggiacenza		Spessore olio (m)
	Olio (m)	Acqua (m)	
PZ4	-	6.93	0.002
PZ7	6.95	6.99	0.04
PZ8	6.99	7.38	0.39
PZ10	7.24	7.6	0.36
PZ11	7.4	7.4	Velo d'olio

1.3.3 Proprietà reologiche del prodotto libero

Su un campione di olio surnatante prelevato dal piezometro PZ10 sono state eseguite specifiche analisi di laboratorio per la determinazione delle proprietà reologiche del prodotto, di seguito riportate:

- Densità 15°C: 0.88 g/cm³;
- Viscosità cinematica a 15° C: 257 cSt → Viscosità dinamica: 226.6 cP;
- Viscosità cinematica a 40° C: 77.5 cSt → Viscosità dinamica: 68.2 cP.

In Figura 1.14 è rappresentata la curva di variazione della viscosità dinamica con la temperatura ipotizzata per l'olio in esame sulla base dei dati ottenuti dalle analisi. Tale curva è stata confrontata con quelle di oli aventi proprietà reologiche simili, presenti nei database internazionali di riferimento (<https://www.slideshare.net/Fornid/eni-ote-46>): in particolare, è stata utilizzata come riferimento la curva di viscosità Vs. temperatura dell'olio idraulico ISO 68, che fra i diversi prodotti presenti nel database è risultato il più affine all'olio in esame.

Dal grafico si evince che la viscosità del prodotto decresce non linearmente con la temperatura: le variazioni maggiori si registrano nel range termico 15÷40° C, mentre a temperature maggiori la viscosità diminuisce più lentamente.

Vista la notevole velocità di decrescita della viscosità nel range 15÷40°, in fase progettuale sarà opportuno raggiungere almeno questa temperatura in quanto garantisce un sensibile miglioramento della mobilità. Spingendosi, invece, a T maggiori la velocità di decrescita si

riduce significativamente, la mobilità migliora debolmente rendendo così l'intervento solo molto più oneroso con vantaggi più limitati.

Ad ogni modo, in fase progettuale per stimare il comportamento reologico dell'olio verrà utilizzata la curva dell'olio surnatante (curva in arancio) visto che presenta valori leggermente superiori di viscosità a parità di temperatura in linea con un approccio conservativo che è stato seguito per la progettazione dell'intervento.

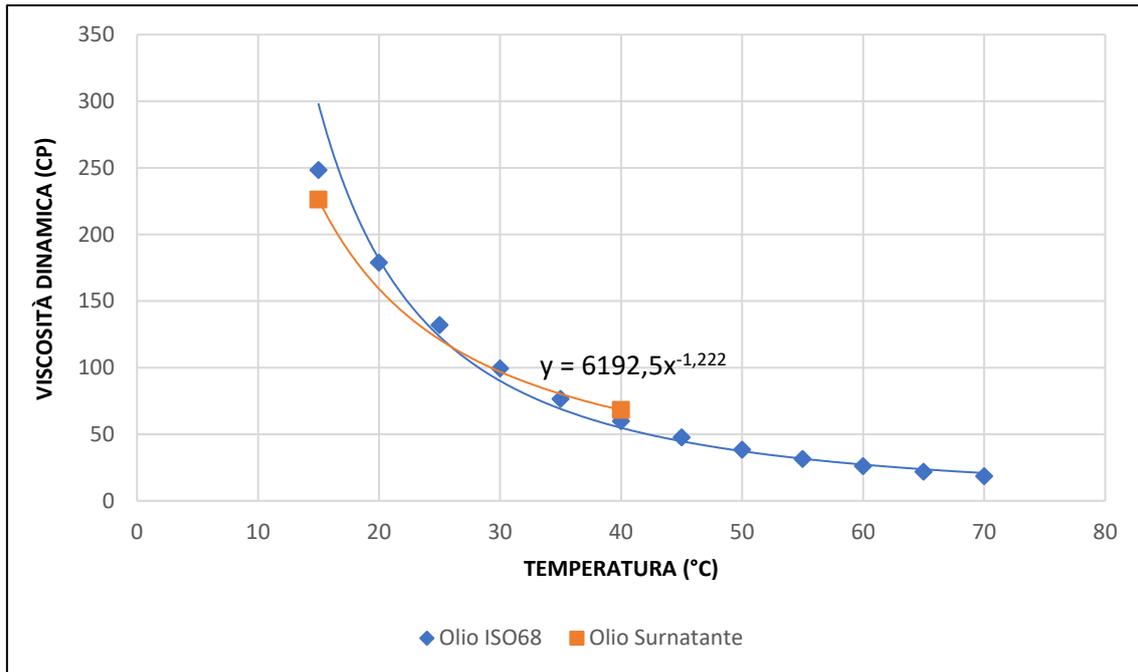


Figura 1.14. Curve di variazione viscosità vs T dell'olio di riferimento (olio ISO 68) e dell'olio in esame con la relativa equazione.

1.3.4 Spessore del LNAPL

Nelle diverse campagne di rilievo piezometrico, si è potuto notare in alcuni piezometri la presenza di un battente di olio surnatante contraddistinto da un certo spessore h_w . Questo spessore misurato in piezometro però non riproduce esattamente la distribuzione dell'olio nell'acquifero per via di una serie di fattori di seguito elencati:

- le forze capillari nella formazione geologica: il livello di falda in pozzo/piezometro si trova più in basso rispetto alla frangia capillare dove il LNAPL rimane intrappolato come saturazione residua. Di conseguenza, l'olio tende a migrare verso il pozzo per diffusione e per gravità aumentandone il battente h_w come mostrato in Figura 1.15.

L'altezza della frangia capillare è maggiore al decrescere della granulometria infatti, questo fenomeno è particolarmente importante nei terreni fini in quanto lo spessore su cui viene distribuito l'olio è maggiore e di conseguenza ci sarà un maggiore accumulo di LNAPL nel pozzo;

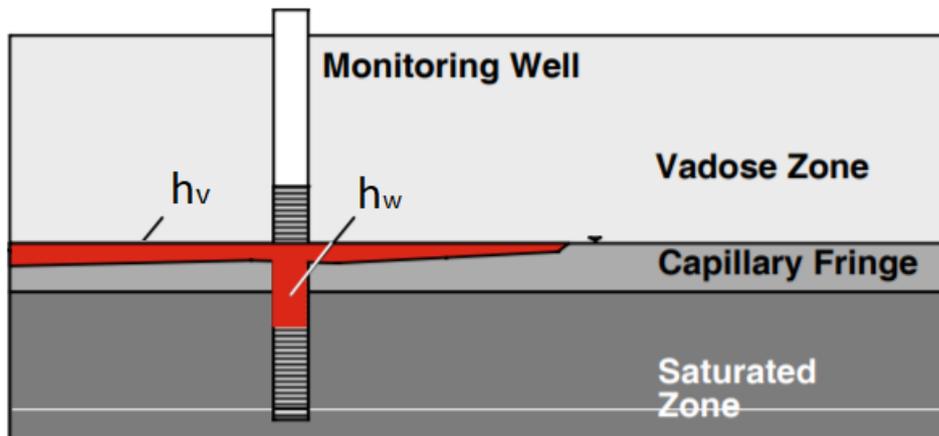


Figura 1.15 Spessore di olio surnatante in piezometro h_w e in acquifero h_v [9].

- la densità dell'olio: aumentando la densità, aumenta nel pozzo la depressione dell'interfaccia olio-acqua in quanto il peso della colonna d'olio deprime la colonna d'acqua e di conseguenza aumenta il battente h_w ;
- il volume di LNAPL;
- eterogeneità nel sottosuolo: si creano vie preferenziali che non distribuiscono in modo omogeneo il prodotto libero;
- fluttuazioni della falda: un abbassamento della falda può portare ad un aumento del LNAPL mobile e dello spessore h_w per via del drenaggio dalla zona non satura; un innalzamento della falda, invece, può portare ad una riduzione del prodotto libero e dello spessore nel piezometro perché il LNAPL segue solo parzialmente la risalita della falda e quindi rimane intrappolato come saturazione residua sotto la tavola d'acqua, come mostrato in Figura 1.16. Queste variazioni, ad ogni modo, tendono a diffondere la contaminazione anche in zone precedentemente non contaminate [8]. Per questo motivo le tradizionali tecniche di pompaggio sono sconsigliate in quanto sono in grado soltanto di espandere la contaminazione, effetto sicuramente non favorevole al raggiungimento del risanamento del sito.

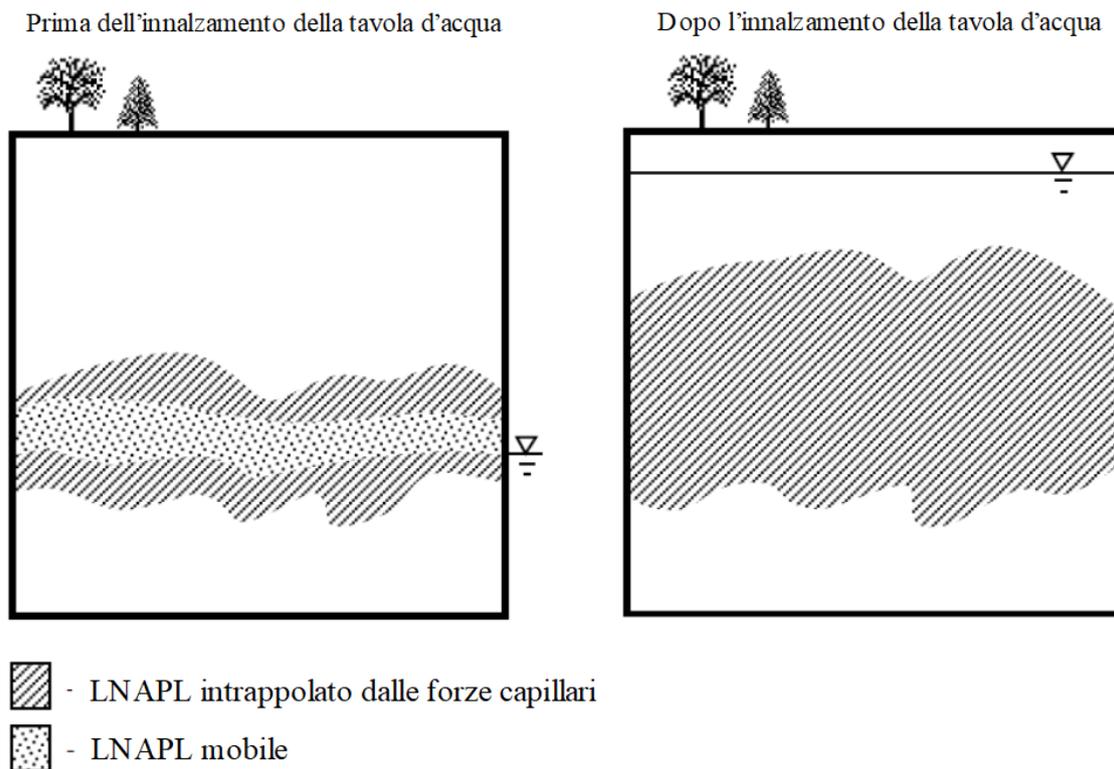


Figura 1.16 Effetto dell'innalzamento della tavola d'acqua sulla distribuzione di LNAPL nel mezzo poroso [8].

Per determinare lo spessore in acquifero h_v [L] a partire da quello in pozzo h_w [L], si utilizza la formula empirica di Hampton Miller:

$$h_v = h_w \frac{\rho_w - \rho_{LNAPL}}{\rho_{LNAPL}} \quad (1.3)$$

dove ρ_{LNAPL} è la densità del LNAPL [M/L^3] e ρ_w quella dell'acqua [M/L^3].

Hampton e Miller definirono questa formula empirica non sufficiente a ricavare l'effettiva distribuzione nell'acquifero in quanto esistono una serie di fattori che influenzano questo fenomeno, impossibili da racchiudere in un'unica formula. In altre parole, questa equazione fornisce semplicemente un valore indicativo.

In Figura 1.17 sono riportati in pianta gli spessori di olio surnatante rinvenuti nei piezometri nella campagna di rilievo piezometrico di maggio 2018.

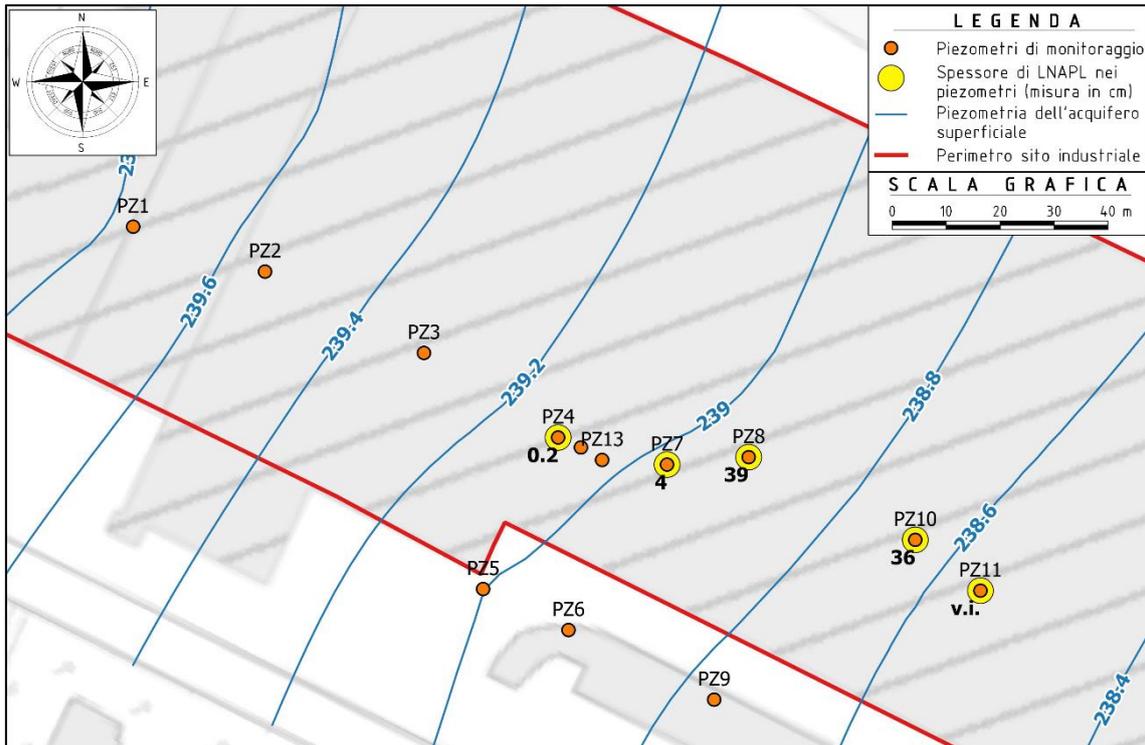


Figura 1.17 Spessore di LNAPL nei piezometri e piezometria dell'acquifero superficiale.

1.3.5 Obiettivi di bonifica

Considerando la presenza di idrocarburi in fase libera, ovvero di una sorgente primaria di contaminazione, il principale obiettivo della bonifica consiste nella completa rimozione del prodotto libero presente. Ferro e manganese, invece, essendo presenti in concentrazioni minori rispetto alle CSR non necessitano di un intervento.

Le CSR per le acque sotterranee sono state calcolate, facendo riferimento ad uno scenario commerciale/industriale per i bersagli on-site e ricreativo per i bersagli off-site, rispetto ai percorsi di inalazione di vapori in ambienti aperti e di inalazione di vapori in ambienti confinati. Nella stesura dell'analisi di rischio si sono considerati questi due scenari per considerare i possibili destini del sito in esame: vendita a terzi e riutilizzo come stabilimento industriale o riqualificazione dell'area (in quest'ultimo caso l'analisi di rischio dovrà essere aggiornata).

Ad ogni modo si ritiene che la rimozione del prodotto libero dall'acquifero permetta, oltre al rispetto delle CSR per gli idrocarburi disciolti in falda in tutto il sito, anche la riduzione delle concentrazioni di Fe e Mn costituenti di una contaminazione secondaria.

In Figura 1.18 è riportata la distribuzione areale della contaminazione da idrocarburi totali

all'interno del sito categorizzata a livello cromatico in base alle concentrazioni:

1. Area gialla: $CSC < Conc < CSR$
2. Area arancione: $Conc > CSR = 2000 \frac{\mu g}{l}$
3. Area rossa: $Conc > 5000 \frac{\mu g}{l}$

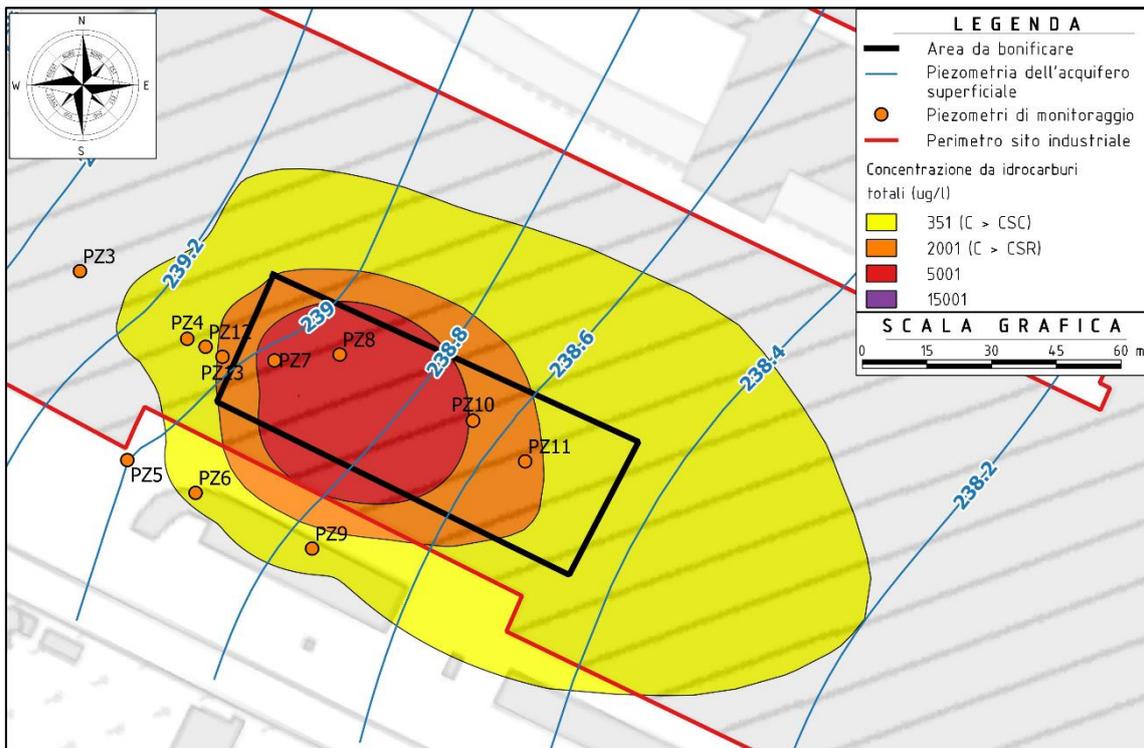


Figura 1.18 Distribuzione areale della contaminazione da idrocarburi totali.

In base a queste distribuzioni è stata definita l'area da bonificare di dimensioni 90x35 m (rettangolo nero in Figura 1.18), che include gran parte dell'area arancione e rossa (regioni effettivamente contaminate).

Essendo in una fase preliminare del progetto, l'area di intervento non deve essere necessariamente quella definitiva e pertanto potrebbe subire variazioni perimetrali nei successivi step progettuali.

1.4 Tecnologie di bonifica applicabili

Come già precedentemente riportato, si ritiene che il raggiungimento delle CSR per gli idrocarburi totali all'interno del sito potrà essere raggiunto mediante la completa rimozione

degli idrocarburi in fase libera, principale obiettivo di bonifica.

Per conseguire tale obiettivo, escludendo il P&T inadatto per il sito in esame, le tecnologie di bonifica potenzialmente applicabili sono:

1. Oil Skimming;
2. Dual Pump Recovery;
3. Multi-Phase Extraction (Bioslurping);
4. Groundwater heat recirculation cell;
5. Thermal Conductive Heating.

Le prime tre tecnologie (oil skimming, dual pump recovery, bioslurping) rappresentano tre diverse tecniche di estrazione del prodotto libero, eventualmente accoppiate all'emungimento di acque sotterranee o all'aspirazione dei vapori nel mezzo non saturo, per aumentare il richiamo del prodotto libero verso il pozzo/piezometro.

La quarta e la quinta tecnologia rappresentano, invece, trattamenti di tipo termico che prevedono di riscaldare il sottosuolo almeno fino alla T target definita nel paragrafo 1.3.3 al fine di diminuire la viscosità del prodotto, aumentarne la mobilità e favorirne quindi l'estrazione attraverso le tecniche di skimming.

Tenendo conto delle caratteristiche del sito e dei fattori economici del progetto, per il sito in esame si ritiene di poter escludere l'applicazione delle seguenti tecniche:

- **dual pump recovery**: questo metodo di recupero è basato sul richiamo di prodotto libero indotto dal pompaggio di acqua in corrispondenza del punto trattato. Per evitare la miscelazione delle due fasi vengono utilizzate due pompe: una pompa sommersa, posta più in profondità, per l'emungimento dell'acqua; e una pompa pneumatica (o skimmer attivo) posta all'altezza della tavola d'acqua, per il recupero della fase oleosa. Il sistema necessita di un impianto di trattamento delle acque estratte, che possono essere inviate allo scarico o restituite allo stesso acquifero. Per via dell'alta permeabilità dell'acquifero e della ridotta mobilità dell'olio surnatante, per indurre un cono di richiamo significativo sarebbe necessaria l'estrazione di volumi d'acqua di falda molto elevati per un considerevole periodo (almeno un paio d'anni). Questa soluzione, di conseguenza, porterebbe a costi elevati e alla realizzazione di un impianto di trattamento.

Risultano invece potenzialmente applicabili le seguenti tecnologie:

- **Oil skimming**, mediante l'impiego di disoleatori a nastro installati nei piezometri, cioè

di apparecchi in grado di recuperare solamente la fase oleosa che viene poi stoccata in appositi contenitori.

- ***multi-phase extraction (o bioslurping)***, mediante l'estrazione sotto vuoto di NAPL e di acqua dal sottosuolo per mezzo di un sistema di pompaggio a vuoto. L'aspirazione richiama, quindi, una fase liquida (LNAPL e acqua) ed una aeriforme; la separazione delle due fasi viene effettuata in un serbatoio dedicato.
- ***Groundwater heat recirculation cell***, mediante l'installazione di una batteria di pozzi a monte e a valle della zona contaminata in modo da isolare idraulicamente e termicamente il plume contaminato. Si preleva a valle acqua contaminata e si reinietta a monte acqua depurata attraverso un impianto di trattamento e riscaldata attraverso una caldaia. In questo modo si riscalda sia l'acqua che l'olio; la fase libera diventa meno viscosa, più mobile e, di conseguenza, più facilmente catturabile dagli skimmer a nastro che verranno applicati in contemporanea.
- ***thermal conductive heating TCH***, mediante l'impiego di piccole unità di bruciatori (heater) connesse con tubi d'acciaio, che fungono da elementi riscaldanti. All'interno dei tubi, posti in profondità nel terreno, circola aria calda che trasmette calore nel suolo e sottosuolo per conduzione. Scaldando il terreno, vaporizzano molti contaminanti e perciò, è necessario un pozzo poco distante dal bruciatore per la cattura dei vapori e il conseguente trattamento degli stessi on site. Oltre ad un impianto di trattamento vapori, è indispensabile impermeabilizzare il p.c. per evitare dispersioni indesiderate di vapori in atmosfera. I contaminanti che non vaporizzano, vengono comunque mobilizzati e resi più facilmente recuperabili dagli skimmer a nastro che verranno applicati in contemporanea alla TCH.

Nei capitoli seguenti, per le tecniche sopracitate sarà effettuata un'accurata analisi tecnico-economica, sulla base della stessa si deciderà quale intervento adottare sul sito in esame.

2. METODI

Dall'analisi del sito e delle caratteristiche dei contaminanti rinvenuti, nel capitolo precedente sono state analizzate le possibili tecniche di bonifica utilizzabili e, tra esse, sono state selezionate quelle a prima battuta applicabili che saranno oggetto di uno studio di fattibilità tecnico-economico.

In questo capitolo si descrivono dapprima i metodi utilizzati per questo studio, e in particolare i due software adottati (FEFLOW e LDRM). In seguito, si descrive come questi software, insieme ad altri modelli matematici, sono stati utilizzati per dimensionare e verificare gli interventi da attuare con ciascuna tecnica.

2.1 Software utilizzati

2.1.1 FEFLOW

Il funzionamento delle tecniche di bonifica che si basano sul calore (GHRC e TCW) o sulle variazioni di carico idraulico (MPE) è stato riprodotto con il software Feflow. Il programma risolve le equazioni differenziali alle derivate parziali del flusso e del trasporto di calore nei mezzi porosi con un approccio agli elementi finiti che garantisce elasticità nella discretizzazione spaziale del dominio (mesh): la mesh generata può essere, successivamente, rifinita in funzione dei nodi su cui si vuole ottenere una maggiore accuratezza (ad esempio pozzi, punti riscaldanti).

In questo paragrafo si descrive la formulazione del modello concettuale e le principali impostazioni modellistiche utilizzate comuni a tutte le tecniche simulate. Nei successivi paragrafi, invece, si esamineranno le varie tecniche e verranno descritte le impostazioni modellistiche specifiche per ognuna di esse.

Nelle simulazioni si è utilizzato un dominio di calcolo con un'estensione superficiale di 186'500 m² (approssimabile ad un rettangolo di dimensioni 786 x 220 m) e una profondità di 47.8 m. La regione selezionata, come mostrato in Figura 2.1, è allineata con la direzione di deflusso sotterraneo e presenta livelli piezometrici compresi tra 240.8 e 237.2 m s.l.m. Le dimensioni del dominio sono state scelte in modo che fossero molto superiori a quelle dell'area da bonificare per non influenzare i risultati modellistici. In particolare, si riescono a contenere ampiamente le variazioni idrauliche e termiche all'interno del dominio in esame evitando così di generare una simulazione condizionata dai "boundary effect".

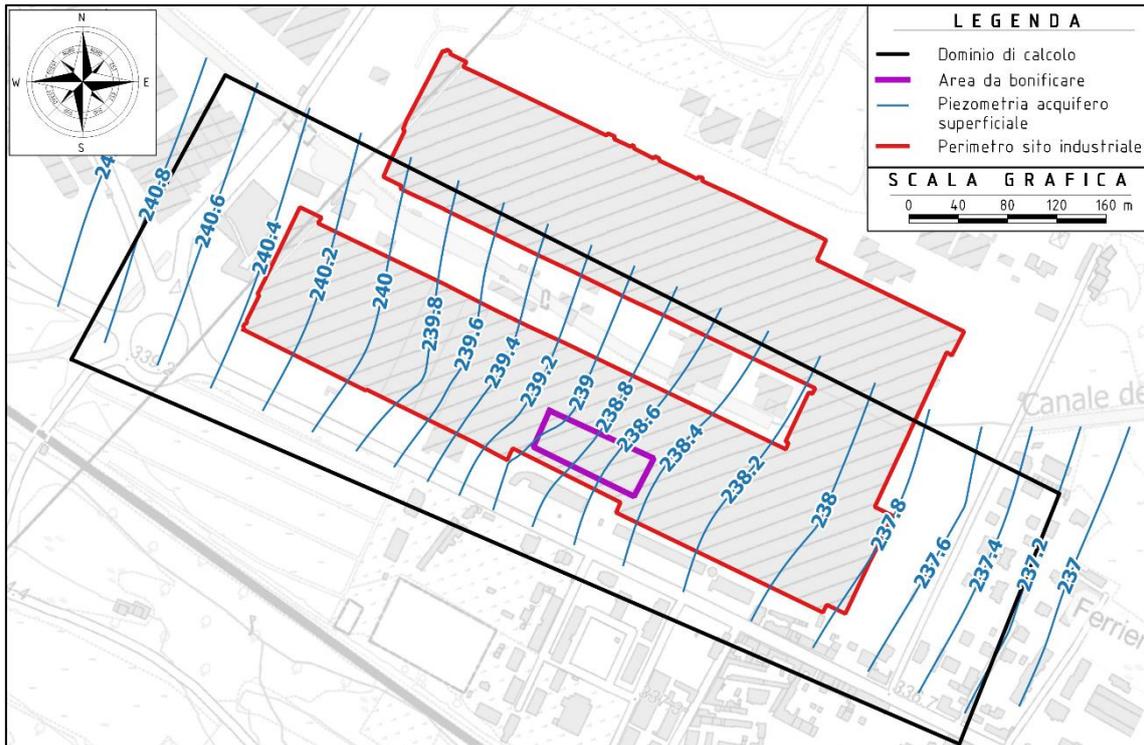


Figura 2.1 Dominio di calcolo e piezometria dell'acquifero superficiale utilizzati nelle simulazioni di Feflow.

Il dominio di calcolo è suddiviso verticalmente da 6 strati (layers) delimitati da 7 superfici di separazione (slices):

- Slice 1: piano campagna nell'area dell'intervento posto a 246 m s.l.m. (slice utilizzata per la tecnica TCH);
- Slice 2: 239.8 m s.l.m. (slice utilizzata per la tecnica MPE);
- Slice 3: 238.8 m s.l.m. (quota di falda media nell'area d'intervento, slice utilizzata per la tecnica GHRC);
- Slice 4: 237.8 m s.l.m. (slice utilizzata per la tecnica TCH);
- Slice 5: 236.8 m s.l.m. (slice utilizzata per la tecnica GHRC);
- Slice 6: 218.8 m s.l.m. base media dell'acquifero superficiale (slice utilizzata per la tecnica MPE);
- Slice 7: 198.2 m s.l.m. bottom del dominio di calcolo;

Ogni strato (layer) è delimitato da due slices. Quindi, lo strato 1 è delimitato dalla slice 1 superiormente e dalla slice 2 inferiormente. Si possono suddividere i layer in 3 macro-zone in funzione della litologia e della relativa saturazione:

- 1) Acquifero-zona vadosa: layer 1 e 2;

- 2) Acquifero-zona satura: layer 3, 4 e 5;
- 3) Acquicludo: layer 6.

Considerando che si effettueranno simulazioni di flusso e di trasporto di calore, bisogna imporre le condizioni al contorno nel dominio per entrambi i problemi.

Il flusso di falda è stato riprodotto imponendo le seguenti condizioni al contorno:

- Condizioni al contorno di carico idraulico sul limite superiore ed inferiore del dominio considerato: 240.8 m s.l.m. a monte e 237.2 m s.l.m. a valle in quanto rappresentano, come è visibile in Figura 2.1, le isopieze passanti per i due bordi. Le sfere azzurre presenti a monte e a valle in Figura 2.2 rappresentano le condizioni appena descritte.

Le condizioni iniziali di flusso, poi, sono state determinate a partire dalle condizioni al contorno di flusso imposte con un'interpolazione lineare di tipo Akima estesa a tutto il dominio. La superficie piezometrica ricostruita è quella riportata nella figura seguente:

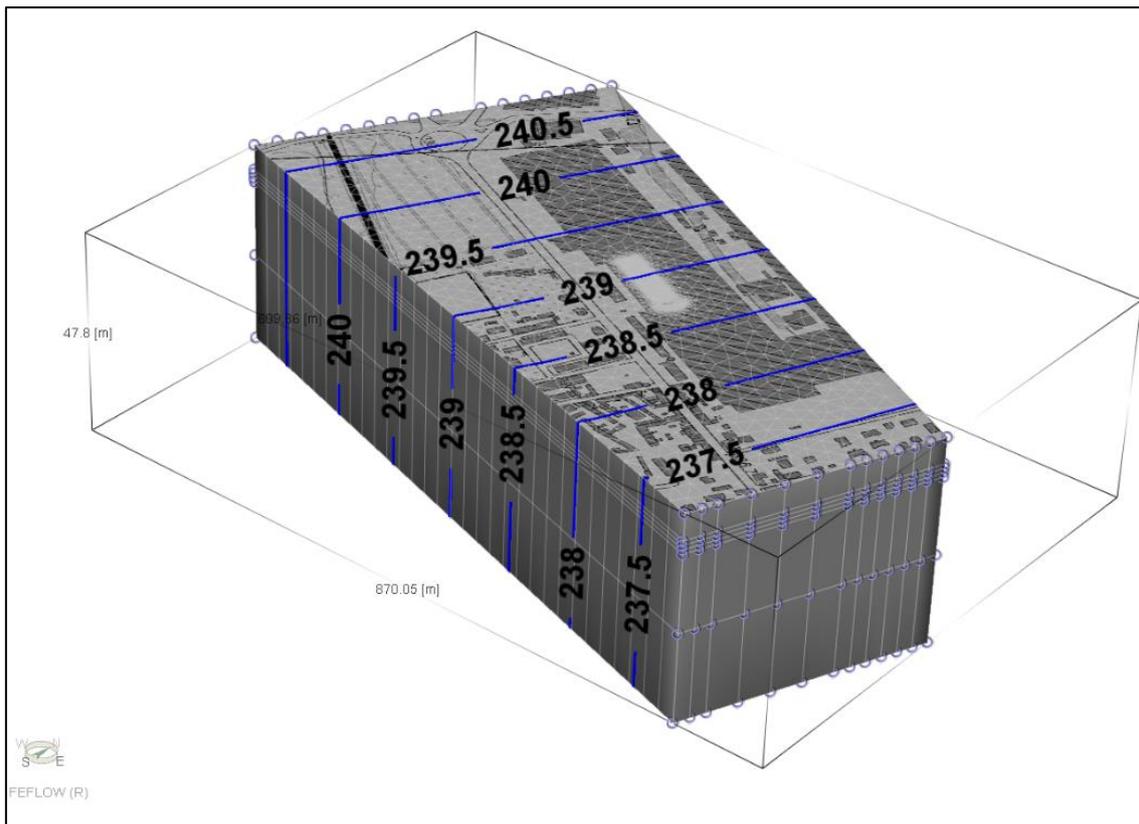


Figura 2.2 Condizioni al contorno ed iniziali di flusso applicate al dominio di calcolo.

Il trasporto di calore, invece, è stato riprodotto imponendo le seguenti condizioni al contorno

di trasporto di calore:

- Condizione al contorno di temperatura fissata di 15°C (rappresentante un valore termico medio indisturbato del sito in esame) sul bordo di monte del dominio. In questo modo a monte del dominio entra acqua di falda con una temperatura pari a quella indisturbata e si evitano così possibili “boundary effect”. Le sfere azzurre presenti a monte in Figura 2.3 rappresentano la condizione appena descritta.
- Condizione al contorno di flusso di calore sull’ultima slice. Si impone un valore pari a $0,06 \text{ W/m}^2$ rappresentante il flusso geotermico, costante e continuo, diretto verso l’alto. Le linee rosa presenti sul bottom del dominio in Figura 2.3 rappresentano la condizione appena descritta.

La distribuzione termica iniziale del dominio è uniforme e la si pone pari a 15°C , come mostrato nella seguente figura:

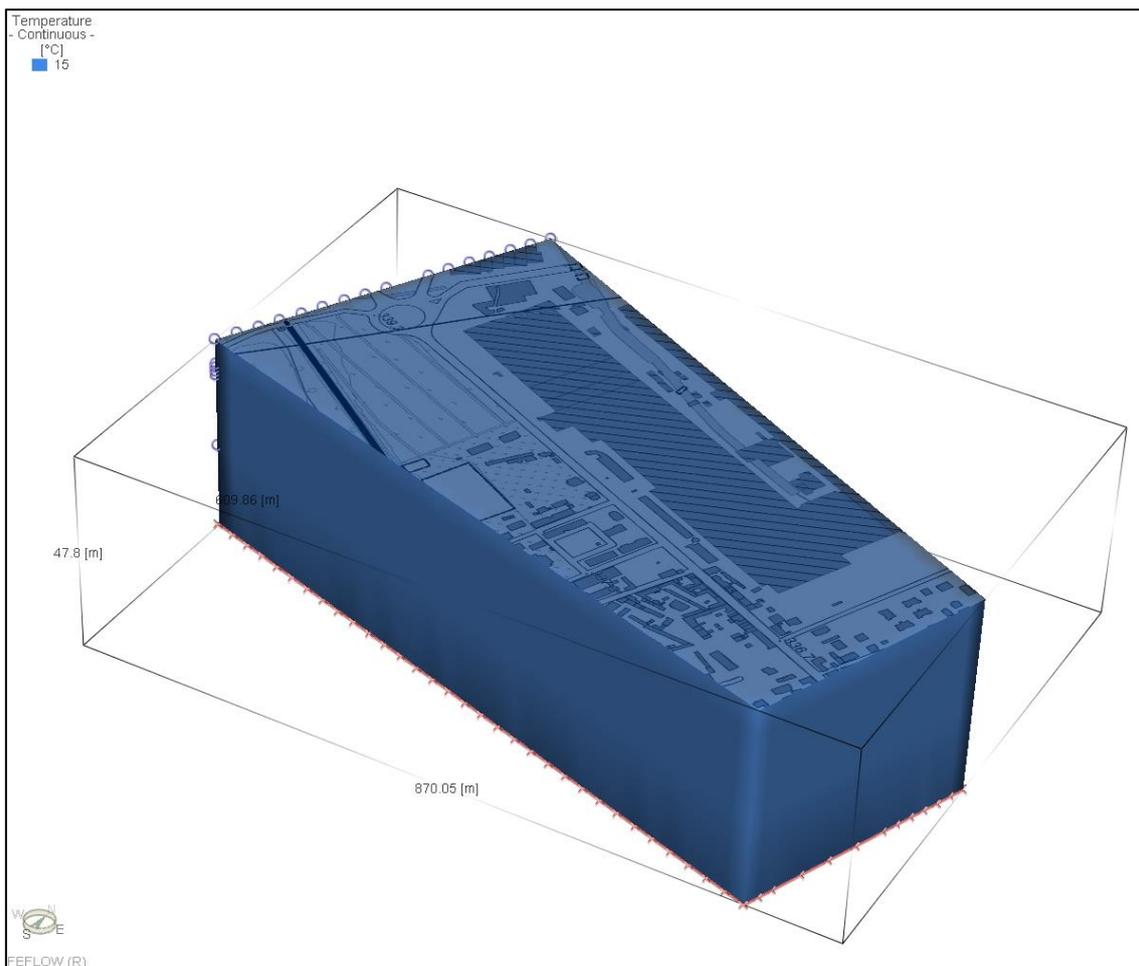


Figura 2.3 Condizioni al contorno ed iniziali di trasporto di calore applicate al dominio di calcolo.

Infine, si definiscono i valori sito-specifici dei parametri idrodinamici e termici assegnati ai vari layer del modello. I layer vengono suddivisi per macro-zone, come già accennato in precedenza, cioè gruppi di layer aventi le stesse proprietà. Con questa classificazione, si riesce ad ottenere una tabella descrittiva (vedi Tabella 2.1) più chiara e di immediata comprensione. Relativamente alla conducibilità idraulica, si è assunto il mezzo isotropo ed omogeneo per semplicità e sono stati assegnati valori determinati da prove di pompaggio effettuate in precedenza.

Relativamente alla conducibilità termica del terreno (la capacità del terreno di condurre calore), si sono assunti dei valori di letteratura in funzione della litologia e della saturazione del terreno.

Tabella 2.1 Parametri idrodinamici e termici sito-specifici assegnati nelle diverse macro-zone.

Parametro	Simboli e unità di misura	Acquifero-zona vadosa	Acquifero-zona satura	Acquicludo
Conducibilità idraulica	$K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} \left(\frac{m}{d}\right)$	97.232	97.232	0.001
Conducibilità termica dei terreni	$\lambda_{cond} \left(\frac{W}{mK}\right)$	0.6	3	1.7

Tutti i parametri non presenti in tabella, non sono stati modificati rispetto ai valori di default suggeriti dal software.

2.1.2 LDRM (LNAPL Distribution and Recovery Model)

Il recupero del prodotto libero è stato simulato, per tutte le tecniche analizzate, attraverso il software LDRM (LNAPL Distribution and Recovery Model). Questo software, ideato da API (American Petroleum Institute), richiede in input i seguenti parametri:

- Maximum Monitoring Well LNAPL Thickness [L]: spessore massimo di surnatante evidenziato nei piezometri. Dalla Tabella 1.2 si estrapola questo valore pari a 0.39 m, che per semplicità è stato posto uguale a 0.40 m;
- Ground surface elevation [L]: quota media del piano campagna nell'area di bonifica;
- Water table elevation [L]: quota del livello piezometrico. Viene presa come

riferimento l'isopieza che attraversa centralmente l'area, come è visibile in Figura 1.13, in modo da considerare un valore medio del parametro;

- Elevation of soil faces interface [L]: quota dell'interfaccia tra due litologie differenti;
- Water vertical gradient [-]: gradiente piezometrico, negativo se il deflusso è diretto verso valle;
- LNAPL density [M/L³]: densità dell'olio surnatante a T ambiente (15°C);
- LNAPL viscosity [ML⁻¹T⁻¹]: viscosità dinamica dell'olio surnatante a T ambiente (15°C) presa dalla Figura 1.14;
- Air/Water surface tension [MT⁻²]: tensione superficiale aria/acqua dove è stato preso un valore di letteratura [3];
- Air/LNAPL surface tension [MT⁻²]: tensione superficiale aria/olio. In questo caso è stato preso dal database degli oli fornito da API (American Petroleum Institute) il valore relativo ad un olio con proprietà reologiche simili a quello in esame vista l'assenza di questo valore specifico;
- LNAPL/Water interfacial tension [MT⁻²]: tensione interfacciale acqua/olio. Come nel caso precedente, è stato assegnato il valore relativo allo stesso olio di riferimento preso dal database;
- Soil 1 (strato litologico rappresentante le macro-zone "acquifero-zona vadosa" e "acquifero-zona satura" descritti nel paragrafo 2.1.1):
 - Porosity [-]: porosità totale del primo strato litologico;
 - Hydraulic conductivity [L/T]: conducibilità idraulica del primo strato litologico. Si assume lo stesso valore imposto in Feflow per la zona vadosa e la zona satura;
 - Van Genuchten "N" and "a" [-]: sono parametri che definiscono le caratteristiche della pressione capillare del terreno; sono stati presi dal database dei terreni fornito da API i valori relativi ad un terreno con proprietà granulometriche simili a quello in esame vista l'assenza di questi due dati;
 - Irreducible water saturation [-]: saturazione irriducibile in acqua, la quantità minima di acqua interstiziale adesa ai grani. E' stato preso un valore di letteratura in linea col tipo di terreno presente;
 - Residual LNAPL saturation [-]: saturazione residua dell'olio

surnatante, non recuperabile con tecniche basate sull'estrazione di fasi fluide presenti in acquifero (MPE, skimmer). Anche in questo caso è stato preso un valore di letteratura in linea col tipo di terreno presente. Si utilizza il modello di saturazione residua costante per cui il LNAPL residuo è costante su tutta l'altezza di frangia capillare impregnata di idrocarburi;

- Residual LNAPL f-factor [-]: definisce la frazione della saturazione iniziale del LNAPL che diventa, successivamente e in funzione di un fattore di riduzione, residua. In questo caso è stato scelto un modello di saturazione residua differente e pertanto questo parametro non viene utilizzato;
- Soil 2 (strato litologico sottostante al "Soil 1" rappresentante la zona "acquicludo" nel paragrafo 2.1.1): sono stati inseriti una serie di parametri sito-specifici non influenti nella simulazione del recupero, sono necessari soltanto per definire il modello litologico in esame.

I parametri sopra descritti sono riportati nella figura seguente:

Thickness, Elevations, Vertical gradient		Soil 1	
Maximum Monitoring Well LNAPL Thickness [m] =	0.400	Porosity =	0.345
Ground Surface Elevation [m] =	247.000	Hydraulic conductivity [m/d] =	97.232
Water Table Elevation [m] =	238.800	Van Genuchten "N" =	4.000
Elevation of Soil Faces Interface [m] =	220.000	van Genuchten "a" [m ⁻¹] =	4.000
Water Vertical gradient (+ for upward) = [Layer 1 Only]	-0.005	Irreducible water saturation =	0.100
		Residual LNAPL saturation =	0.100
		Residual LNAPL f-factor =	None
Fluid Characteristics		Soil 2	
LNAPL density [gm/cc] =	0.880	Porosity =	0.439
LNAPL viscosity [cp] =	226.600	Hydraulic conductivity [m/d] =	0.001
Air/Water surface tension [dyne/cm] =	72.600	Van Genuchten "N" =	1.663
Air/LNAPL surface tension [dyne/cm] =	31.600	van Genuchten "a" [m ⁻¹] =	0.269
LNAPL/Water interfacial tension [dyne/cm] =	15.300	Irreducible water saturation =	0.065
		Residual LNAPL saturation =	0.000
		Residual LNAPL f-factor =	None
Relative Permeability Model (Burdine is default)			
Use Mualem Model for Layer	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 1		
	<input checked="" type="checkbox"/> Layer 2		

Figura 2.4 Dati sito-specifici richiesti in input dal software LDRM.

In base alla tecnica scelta e la relativa configurazione, in output vengono restituiti i seguenti dati:

- LNAPL thickness [L]: spessore residuo di LNAPL in piezometro dopo l'intervento;
- Total LNAPL [L]: spessore residuo di LNAPL in acquifero dopo l'intervento;
- Percent Recovery (Total)[-]: volume d'olio recuperato rispetto a quello presente nel dominio cilindrico definito dal raggio di cattura (vedi paragrafo 2.2.2);
- Percent Recovery (Recoverable)[-]: volume d'olio recuperato rispetto a quello recuperabile presente nel dominio cilindrico definito dal raggio di cattura. Il recuperabile differisce dal totale per la frazione residua che, appunto, non è recuperabile con le consuete tecniche basate sull'estrazione della fasi fluide dall'acquifero (skimmer, bioslurping) e rimane, pertanto, intrappolata nei pori del mezzo.

2.2 Oil skimming

2.2.1 Descrizione della tipologia di intervento

Questa tecnica si basa sull'installazione nei piezometri di dispositivi chiamati skimmer a nastro, costituiti da un nastro assorbente in materiale lipofilo di larghezza variabile (nel caso in esame si usa quello da 2") su cui aderisce l'olio surnatante, come mostrato in Figura 2.5.

In particolare, la puleggia inferiore del nastro deve essere totalmente immersa nel liquido in modo da poter investire totalmente il "pancake". Il nastro attraversa la tavola d'acqua due volte, in fase discendente ed ascendente, in modo da poter assorbire una maggiore quantità di l'olio. Una volta risalito in superficie, il nastro viene raschiato su entrambi i lati con apposite lame (come è riportato in Figura 2.6) per raccogliere l'olio adeso in opportuni serbatoi così da rendere il nastro pronto e pulito per un nuovo ciclo.

L'olio recuperato viene caricato su delle autocisterne e, successivamente, scaricato in idonei impianti di smaltimento.

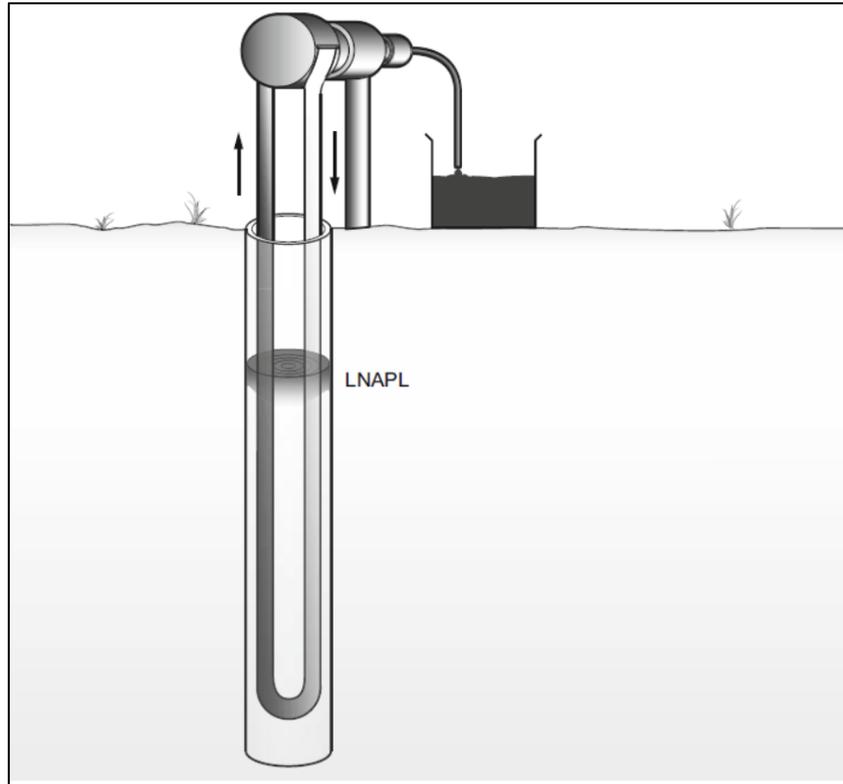


Figura 2.5 Skimmer a nastro calato all'interno di un piezometro [3].

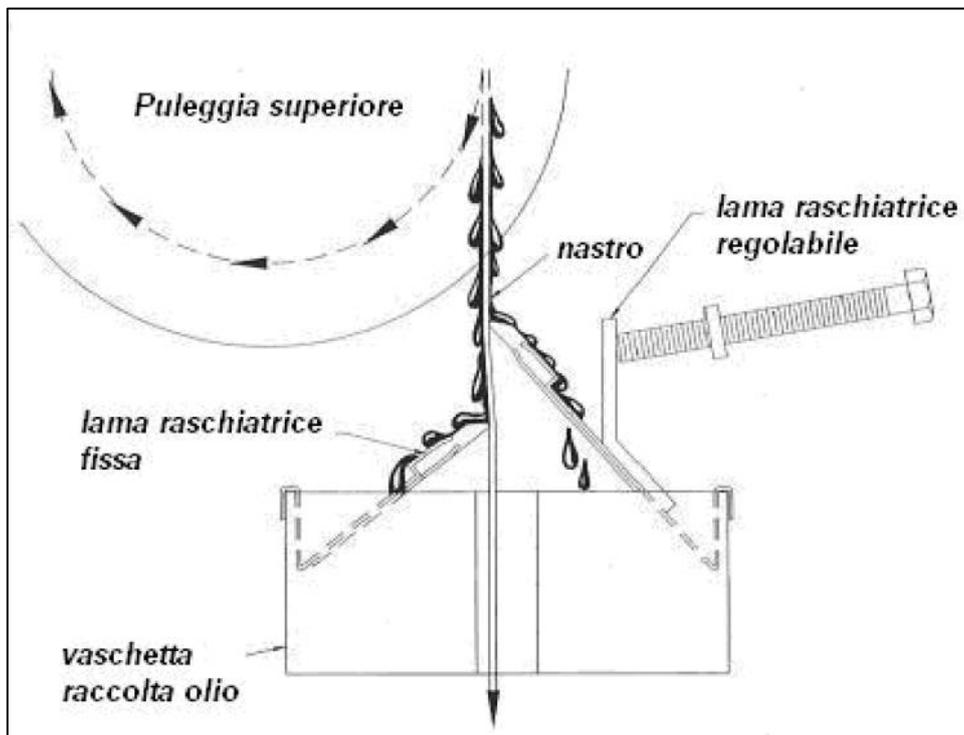


Figura 2.6 Lame raschiatrici nello skimmer a nastro.

2.2.2 Recupero della fase surnatante

Il recupero è previsto mediante l'installazione di questa tipologia di skimmer su tutta l'area contaminata. Il software LDRM richiede in input i seguenti parametri di progetto (riportati in Figura 2.8):

- Tempo di recupero (recovery time) [T]: periodo accettabile per concludere un intervento di bonifica. Si prende, quindi, questo come periodo di riferimento per confrontare le varie tecniche in esame;
- Raggio del pozzo (radius of well) [L]: è stato ipotizzato con un diametro caratteristico di 4'';
- Raggio di cattura (radius of capture) [L]: definisce la regione di cattura di uno skimmer, l'estensione areale dal quale il LNAPL viene recuperato per mezzo dell'attività del singolo dispositivo di recupero. Gli skimmer con le rispettive aree di cattura devono disporsi all'interno dell'area contaminata in modo da occupare tutta la superficie d'interesse attraverso una opportuna sovrapposizione. A titolo esplicativo in Figura 2.7 è mostrata la geometria di un sistema di recupero: i cerchi blu rappresentano i raggi di cattura dei relativi skimmer mentre le gradazioni cromatiche di grigio sullo sfondo indicano il grado di contaminazione del sito.

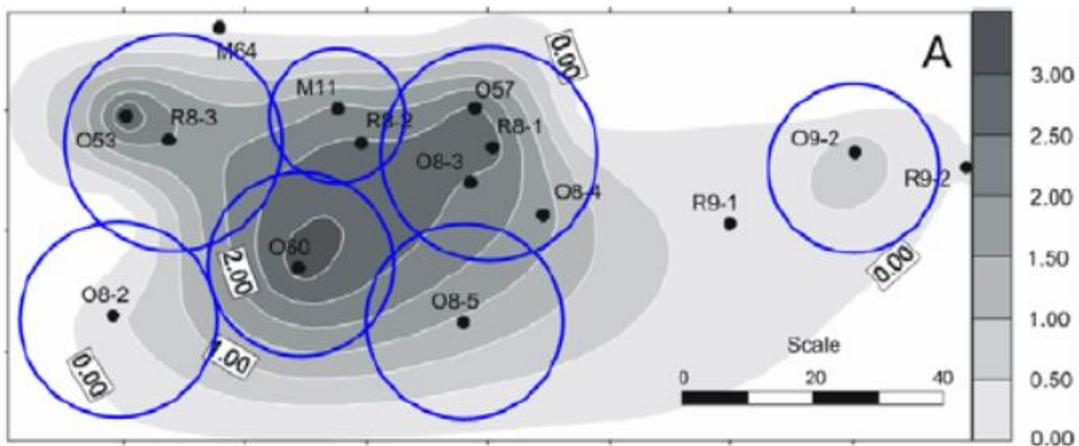


Figura 2.7 Geometria di un sistema di recupero attraverso l'applicazione di skimmer [10].

Ad ogni modo, il raggio di cattura dipende da:

- Caratteristiche dell'olio surnatante: varia in funzione della viscosità e della mobilità del prodotto libero. In presenza di un prodotto molto

viscoso, il recupero risulta più difficoltoso e per questo si avrà bisogno di una maglia di skimmer più fitta e quindi con un minor raggio di cattura;

- Caratteristiche dell'acquifero: varia in funzione della conducibilità idraulica, ovvero l'attitudine dell'acquifero a consentire la circolazione dell'acqua e dell'olio che vi galleggia al di sopra, per effetto di un gradiente idraulico [3]. Infatti, in un terreno sabbioso il recupero sarà facilitato rispetto ad un terreno limoso e per questo, si avrà bisogno di una maglia di skimmer non esageratamente fitta e quindi con un minor raggio di cattura.

Nelle varie tecniche, questo parametro varierà siccome cambieranno le proprietà reologiche dell'olio (riduzioni di viscosità) e le proprietà idrodinamiche dell'acquifero (emungimenti di acqua di falda).

Ad ogni tecnica viene assegnato un determinato raggio di cattura che, secondo i risultati delle simulazioni effettuate, garantisce un recupero di olio surnatante pari al 75-80% rispetto all'olio recuperabile presente in sito. Questo quantitativo rappresenta il target minimo da soddisfare per poter considerare valida una configurazione di progetto.

<input checked="" type="radio"/> Unconfined	<input type="radio"/> Confined	<input type="radio"/> Perched
<input type="text" value="3.000"/>	Recovery Time [yr]	
<input type="text" value="0.05"/>	Radius of well [m]	
<input type="text" value="2.000"/>	Radius of capture [m]	

Figura 2.8 Parametri progettuali richiesti dal software LDRM.

Il numero N degli skimmer necessari, in funzione del raggio di cattura, è stimato con la seguente formula:

$$N = \frac{SF * A_{contaminata}}{\pi R^2} = \frac{1.3 * (90 * 35)}{\pi * 2^2} \approx 320 \quad (2.1)$$

Dove SF è un fattore di sicurezza [-], $A_{contaminata}$ è l'area da bonificare [m²] e R è il raggio di cattura [m].

Il fattore di sicurezza presente considera la necessità di sovrapporre le zone di influenza dei singoli pozzi e la possibilità che i pozzi periferici influenzino anche aree limitrofe non contaminate.

In Figura 2.9 è mostrata l'ubicazione degli skimmer a nastro previsti per l'intervento in esame:

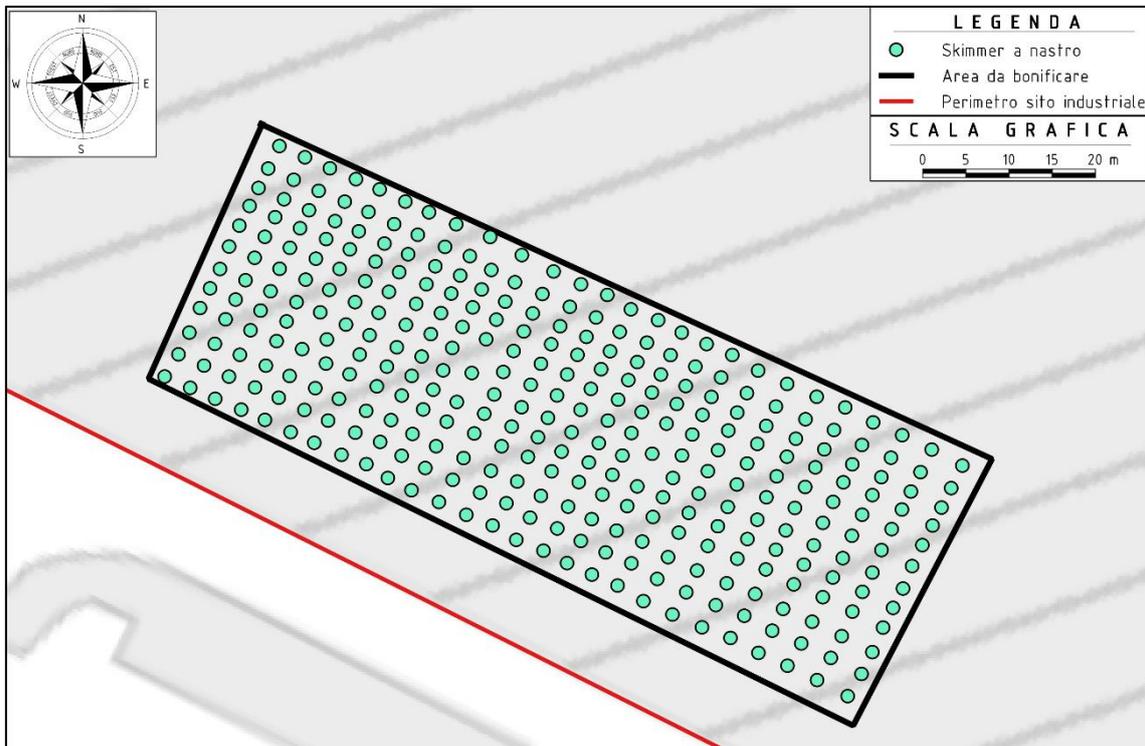


Figura 2.9 Ubicazione degli skimmer a nastro nell'area da bonificare.

Nella figura sovrastante non sono stati tracciati i raggi di cattura dei singoli skimmer perché avrebbero reso la figura confusionaria, cioè non sarebbe stata chiara la loro sovrapposizione nell'area di interesse.

2.3 Multi phase extraction/bioslurping

2.3.1 Descrizione della tipologia di intervento

Il sistema è composto da una serie di piezometri, all'interno dei quali viene calato un tubo, fino al di sotto dell'interfaccia LNAPL-acqua, a cui viene applicata una pressione negativa mediante una pompa a vuoto. L'aspirazione richiama quindi una fase liquida (LNAPL e acqua) ed una aeriforme; la separazione delle due fasi viene effettuata in un serbatoio

dedicato, come è possibile notare in Figura 2.10. I vapori e i liquidi vengono quindi trattati separatamente in due impianti on-site che prevedono lo scarico dei reflui depurati in atmosfera per i primi e in un corpo recettore per i secondi.

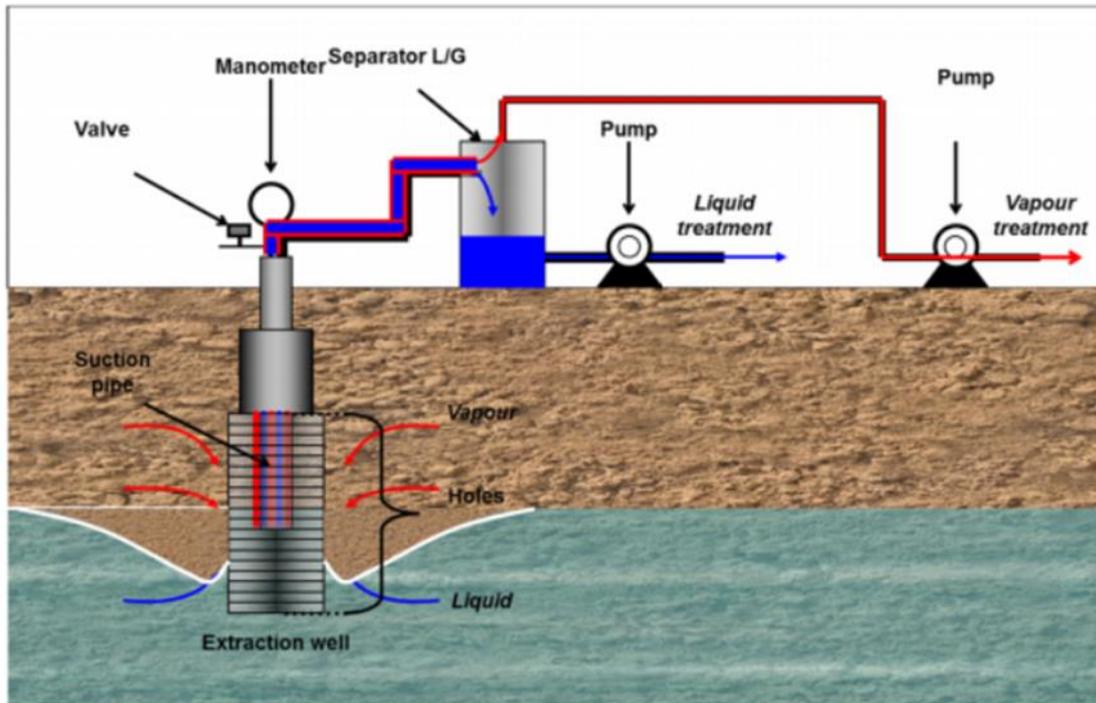


Figura 2.10 Pozzo MPE con impianto di trattamento liquido/vapore on-site.

L'aspirazione applicata determina il richiamo di volumi notevoli di aria dal mezzo non saturo, contribuendo all'apporto di ossigeno all'acquifero contaminato e, in tal modo, facilitando l'instaurarsi di fenomeni di biodegradazione aerobica dei contaminanti sia nel mezzo saturo che nel non saturo. Affinchè si verifichi ciò, è necessario finestrare i pozzi anche nel non saturo e per questo motivo le finestrature saranno presenti da 1 m sopra la tavola d'acqua sino alla base dell'acquifero superficiale.

Visto che si deve instaurare un cono di drenaggio di ampie dimensioni, la tecnica può applicarsi solo in acquiferi permeabili come quello in esame. In caso contrario, il cono di drenaggio non sarebbe significativo e l'intervento non applicabile.

D'altra parte, essendo una tecnica basata sull'estrazione delle fasi fluide in acquifero si interviene sulla fase disciolta e libera ma non su quella residua. Questo limite può portare, in seguito all'arresto dell'emungimento, a fenomeni di incremento delle concentrazioni (rebound) secondo le dinamiche già descritte nel paragrafo 1.2.2.

Inizialmente si era pensato di utilizzare questa tecnica in coppia con una tecnologia termica (vedi “groundwater heat recirculation cell” e “thermal conductive heating”). Quest’ultima, riscaldando il terreno, riduce la viscosità dell’olio e lo rende più facilmente catturabile dai pozzi MPE che nel frattempo sono in emungimento.

Le simulazioni hanno evidenziato però che la MPE, viste le ingenti portate prelevate, estraeva il calore generato e impediva la propagazione del calore nell’area trattata vanificando l’intervento. Per via di questa considerazione, si è deciso di valutare l’efficacia della sola multi-phase extraction.

2.3.2 Recupero della fase surnatante

Il recupero è previsto mediante l’installazione di una serie di pozzi “multi-phase extraction” su tutta l’area da bonificare. Il software LDRM richiede in input i seguenti parametri progettuali:

- Tempo di recupero (recovery time) [T]: intervallo temporale in linea con le altre tecniche analizzate;
- Raggio del pozzo (radius of pumping well) [L]: è stato ipotizzato un diametro caratteristico di 40 cm;
- Raggio di recupero (radius of recovery) [L]: definisce la regione di cattura di un pozzo, l’estensione areale dal quale il LNAPL può essere potenzialmente recuperato per mezzo del singolo dispositivo MPE. Rappresenta l’equivalente del raggio di cattura per gli skimmer: i pozzi con le rispettive regioni di cattura devono disporsi all’interno dell’area contaminata in modo da investire geometricamente tutta la superficie d’interesse attraverso una opportuna sovrapposizione (vedi Figura 2.12). Questo parametro viene definito in funzione del recupero dell’olio surnatante previsto. In particolare si imposta il valore che garantisce, secondo i risultati delle simulazioni, un soddisfacente recupero (pari almeno al 75-80% rispetto all’olio recuperabile);
- Raggio di influenza (radius of influence) [L]: distanza radiale dal pozzo in emungimento, in condizioni stazionarie, a cui le variazioni piezometriche si annullano. Secondo le direttive API, questa misura deve essere sempre maggiore o al più uguale al raggio di cattura. Questo parametro viene determinato prima, calcolando l’abbassamento nel pozzo s_w dovuto ad una

certa portata estratta Q [L^3/T] secondo la formula valida per acquiferi non confinati $s_w = Q/T$, dove T è la trasmissività dell'acquifero in esame [L^2/T]. Noto l'abbassamento, si può determinare il raggio di influenza R applicando la seguente formula:

$$R = r_w e^{\left(\frac{2\pi s_w T}{Q}\right)} \quad (2.2)$$

Il raggio di influenza, così determinato, dipende soltanto dal raggio del pozzo, ma questa stima risulta sufficiente visto che questo parametro non è influente nella simulazione. Viene utilizzato, infatti, per definire il dominio entro cui determinare gli abbassamenti e i gradienti piezometrici dovuti all'emungimento/aspirazione prevista in pozzo;

- Portata d'acqua emunta (water production rate) [L^3/T]: trattandosi di una tecnica in aspirazione si pone questo parametro nullo;
- Spessore saturo (water saturated thickness) [L]: spessore saturo dell'acquifero superficiale. Si assegna un valore medio rappresentativo;
- Pressione di aspirazione (suction pressure) [$ML^{-1}T^{-2}$]: pressione negativa applicata al pozzo. Si utilizza questo valore perché garantisce un recupero soddisfacente (pari almeno al 75-80% rispetto all'olio recuperabile). Il recupero effettivo viene, poi, descritto nel paragrafo 3.1.2;
- Finestratura (screen length) [L]: finestratura del pozzo nel non saturo a partire dalla tavola d'acqua, il valore selezionato garantisce un buon recupero d'aria dalla zona vadosa;
- Raggio di cattura dell'aria (air radius of capture) [L]: definisce la regione di cattura dell'aria di un pozzo, il dominio spaziale su cui il singolo dispositivo MPE agisce aspirando aria dalla zona vadosa. Se non si prevede anche l'emungimento d'acqua, come in questo caso, si pone questo parametro pari al raggio di recupero.

Recovery time [yr] =		3.000
Radius of pumping well [m] =		0.200
Radius of recovery [m] =		17.000
Radius of influence [m] =		107.090

Water Enhanced system	
Water production rate [l/min] =	0.000
Water saturated thickness [m] =	20.000
Air Enhanced system	
(-)Suction Pressure [atm] =	0.250
Screen length [m] =	2.000
Air radius of capture [m] =	17.000

Figura 2.11 Parametri progettuali richiesti dal software LDRM.

Il numero dei pozzi necessari, calcolato come per il caso precedente con l'equazione 2.1, risulta pari a 5. In Figura 2.12 viene riportata l'ubicazione dei pozzi con le rispettive aree di cattura.

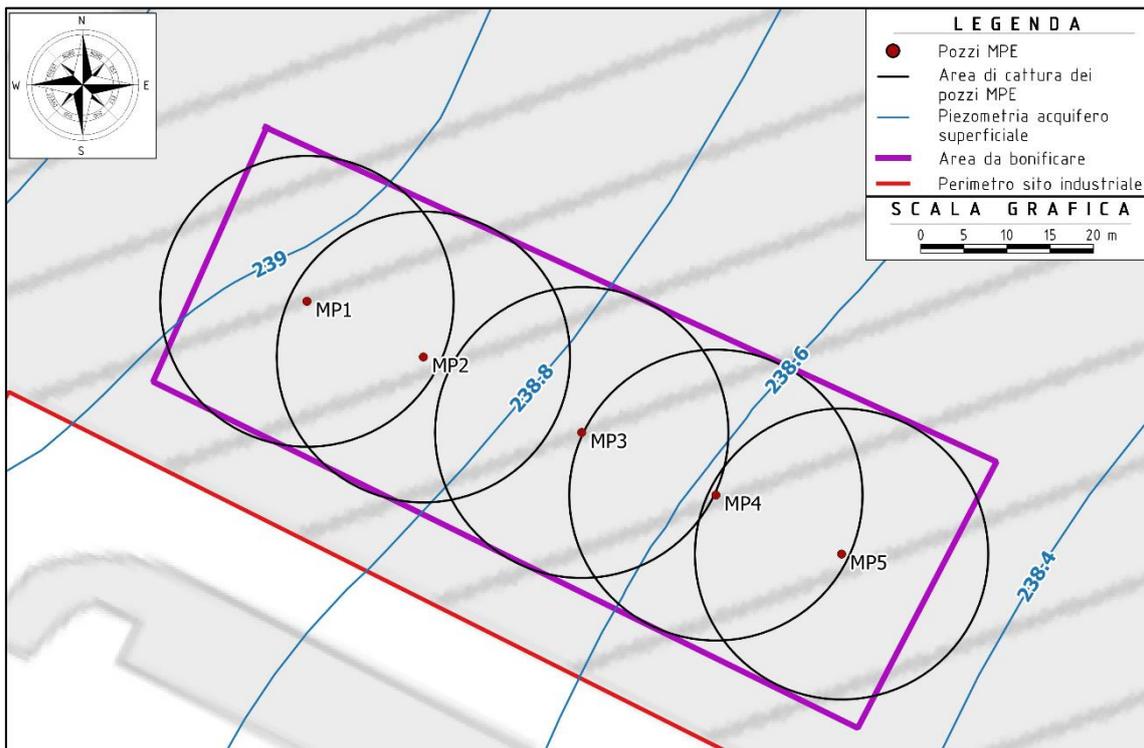


Figura 2.12 Ubicazione dei pozzi MPE con le rispettive aree di cattura.

Dalla figura soprastante si nota come le regioni di cattura siano ben sovrapposte e investano gran parte dell'area da bonificare.

2.3.3 Simulazione di flusso con Feflow

Nella configurazione di progetto, come è possibile notare dalla Figura 2.12, i pozzi sono disposti lungo la direzione di deflusso sotterraneo ed equidistanti tra di loro.

I pozzi MPE sono stati inseriti in Feflow con l'opzione "multilayer well" e finestrati tra la slice 2 e 6.

Il dimensionamento è stato realizzato con i parametri progettuali già definiti in precedenza. Per imporre la pressione negativa nei singoli pozzi MPE, si è assegnato un abbassamento del carico idraulico in ciascun pozzo, calcolato utilizzando la seguente formula:

$$h = \frac{P}{\gamma} \approx \frac{0.25 \text{ atm}}{10000 \frac{N}{m^3}} \approx 2.5 \text{ m} \quad (2.3)$$

Quindi, i parametri di input sono:

- Durata della simulazione: 3 anni;
- Abbassamento fissato nei pozzi MPE.

Come previsto dalla configurazione di progetto, si tengono in pompaggio i 5 pozzi MPE che generano un cono di drenaggio notevole (vedi Figura 2.13) su una superficie molto più ampia dell'area da bonificare.

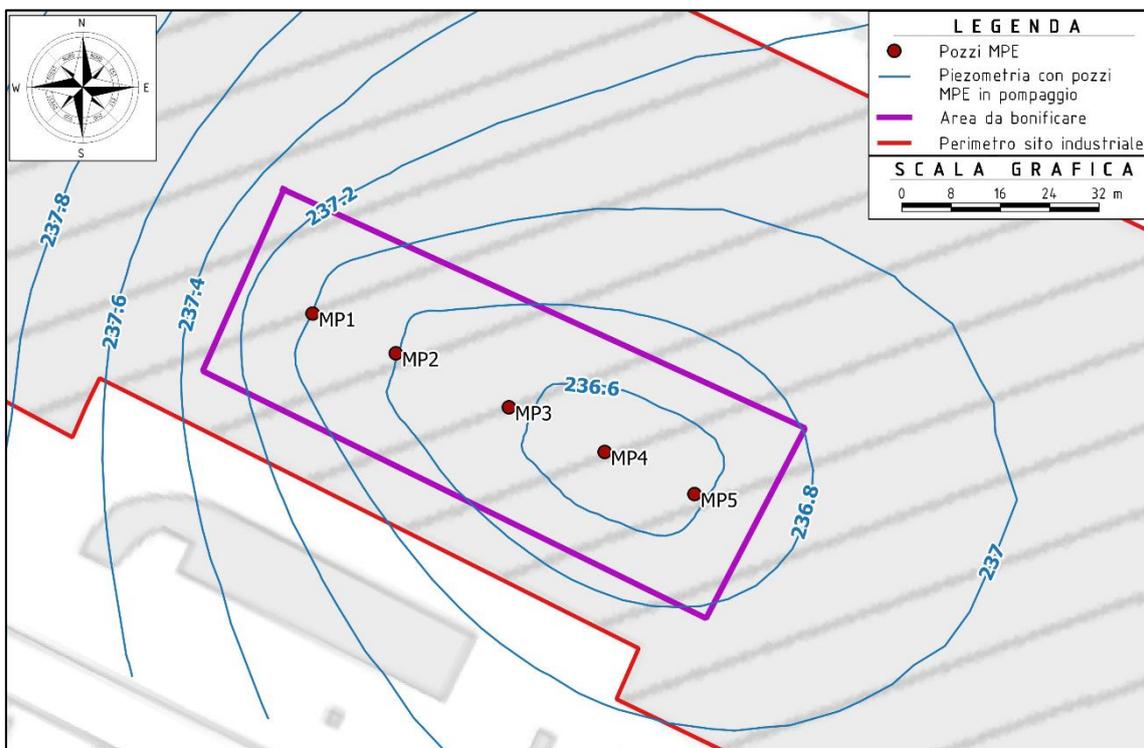


Figura 2.13 Carico idraulico in condizioni stazionarie con pozzi MPE in emungimento.

Dai risultati della simulazione è stato inoltre possibile ricavare la portata estratta per mantenere gli abbassamenti in pozzi, che risulta pari a 5831 m³/d.

La simulazione del trasporto di calore, non è invece prevista visto che la tecnica suddetta interessa esclusivamente il flusso di falda e di aria.

2.4 Groundwater heat recirculation cell

Uno dei fattori limitanti più forti per l'estrazione dell'olio è rappresentato dalla sua viscosità. Per abbassarla si potrebbe incrementare la temperatura in una "cella" dell'acquifero re-iniettando acqua di falda riscaldata. In questo modo si forma una "groundwater heat recirculation cell".

2.4.1 Descrizione della tipologia di intervento

Il sistema consiste in una serie di pozzi a monte e valle dell'area da bonificare in modo da confinare idraulicamente e termicamente la cella dell'acquifero. In particolare in questo sito si prevede l'installazione di 5 pozzi a valle che prelevano acqua di falda e 5 pozzi a monte che la re-iniettano previa depurazione e riscaldamento a 50 °C mediante una caldaia a metano. Si ipotizza una re-iniezione completa dell'acqua estratta trascurando i volumi persi per la rimozione dell'olio surnatante con disoleatore.

Ciascun pozzo a valle è dotato di uno skimmer a nastro per il recupero della fase oleosa e una pompa sommersa nel mezzo saturo per il recupero della fase acquosa, come mostrato in Figura 2.14.

Come è possibile notare in Figura 2.15, l'impianto di trattamento dell'acqua di falda estratta consta di un disoleatore con filtro a coalescenza che separa la fase oleosa da quella acquosa e un successivo filtro a carboni attivi che elimina la contaminazione residua presente in fase disciolta.

Con l'iniezione in acquifero, si riscalda sia l'acqua di falda presente nell'area sia l'olio surnatante che vi galleggia al di sopra. Aumentando la temperatura, si riduce la viscosità dell'olio incrementandone la mobilità e facilitando il suo recupero con le tecniche di skimming.

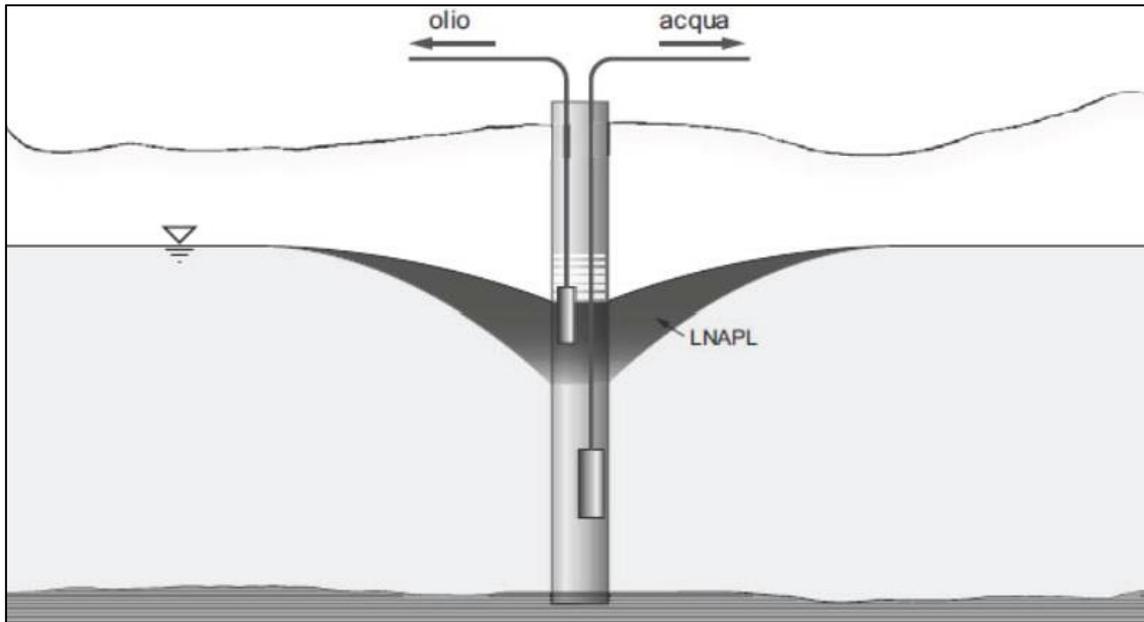


Figura 2.14 Pozzo di prelievo dotato di uno skimmer a nastro posto in prossimità del pancake di LNAPL e di una pompa sommersa nel mezzo saturo [3].

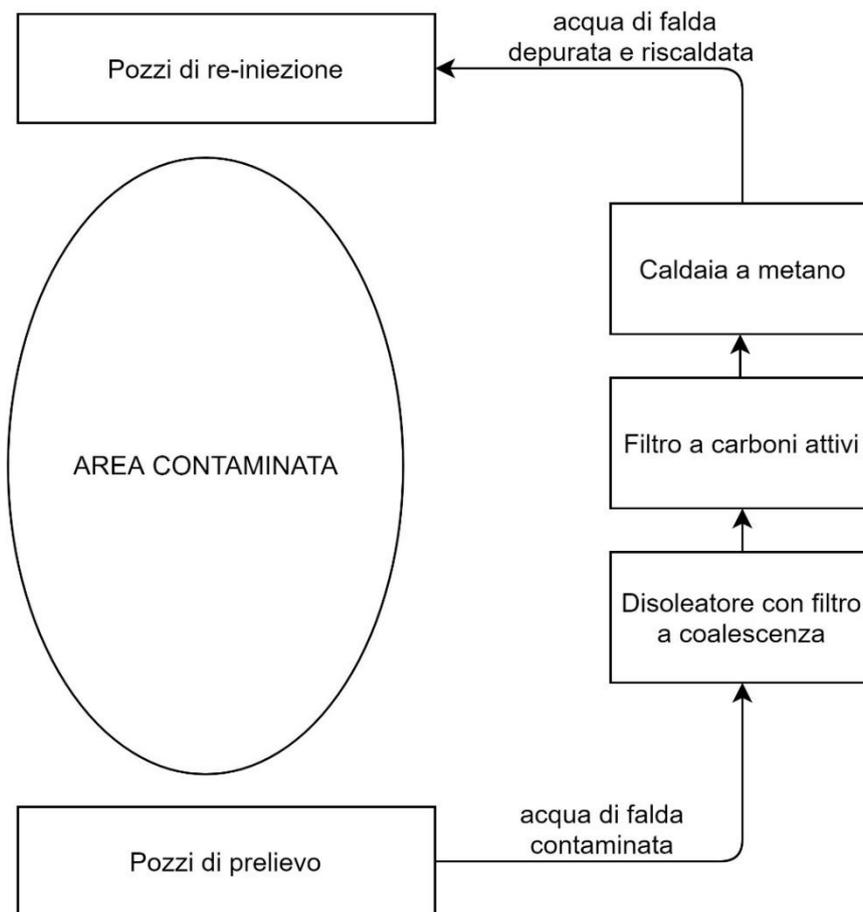


Figura 2.15 Layout della Groundwater heat recirculation cell.

Per il recupero si prevede l'installazione di skimmer a nastro che intervengono in modo selettivo su tutta l'area. Per ottimizzare il confinamento del plume termico nella zona di falda contaminata da LNAPL, i pozzi di prelievo e di re-iniezione sono finestrati nella parte superiore dell'acquifero, in particolare da 7 m da p.c. (livello piezometrico misurato nel periodo di massimo innalzamento su un range temporale di 10 anni) a 9 m dal p.c.: in caso la tavola d'acqua si trovi ad una quota inferiore alle finestrate, l'acqua verrebbe re-iniettata nella frangia capillare andando così sia a desorbire termicamente il LNAPL in fase residua sia a drenare poi in falda. In definitiva, il sistema funziona efficacemente con qualsiasi livello piezometrico presente.

2.4.2 Simulazione di flusso e trasporto di calore con Feflow

Nella configurazione di progetto i pozzi di re-iniezione e di prelievo vengono disposti ad arco in modo da ottimizzare il confinamento del plume termico (vedi Figura 2.16).

In base alle caratteristiche sito-specifiche, il calore si diffonde in falda con una velocità v_c pari a:

$$v_c = \frac{v_e}{R} = \frac{\frac{k * i}{n_e}}{\frac{\rho c}{\rho_w c_w n_e}} = 0,97 \text{ m/d} \quad (2.4)$$

Dove v_e è la velocità efficace dell'acquifero [m/s], R è il ritardo termico [-], k è la conducibilità idraulica dell'acquifero [m/s], i è il gradiente idraulico medio [-], n_e è la porosità efficace del mezzo poroso [-], ρc è la capacità termica di un mezzo poroso sabbioso [J/(m³K)] e $\rho_w c_w$ è la capacità termica dell'acqua [J/(m³K)].

Il plume termico si propaga quindi ad una velocità inferiore rispetto al flusso di falda. Ciò implica che la propagazione a valle del plume termico proveniente dai pozzi posizionati a monte sia piuttosto lenta.

Per questo motivo, si prevede un sistema prelievo-reiniezione con riscaldamento per due anni mentre, per l'anno successivo si prevede un ricircolo a caldaia spenta, in cui si sfrutta soltanto il calore residuo del terreno.

In fase preliminare, si è provato ad innalzare la T di progetto dell'acqua di falda re-iniettata, ma risultava difficoltoso il controllo della propagazione termica: i pozzi barriera a valle non

riuscivano a trattenere la bolla termica in modo efficace. Pertanto, si è definita una temperatura di re-iniezione di 50°C che garantisce, invece, il confinamento termico.

I parametri di input sono:

- Durata della simulazione: 3 anni
- Portate prelevate/portate re-iniettate= 1 l/s per pozzo. Nel modello sono stati inseriti i pozzi come “multilayer well” e finestrati dalla slice 3 alla 5.
- Nei pozzi di re-iniezione viene immessa acqua a $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ per due anni (imposta nel modello come condizione al contorno di temperatura fissata), per il terzo anno, invece, si impone la T di prelievo dell’acqua di falda dai pozzi a valle (il procedimento seguito verrà spiegato in seguito).

Vista la disomogeneità termica dell’area durante la simulazione, si è ritenuto opportuno dividere l’area di interesse in 3 settori. In ciascuno di essi, sono stati collocati 4 punti di osservazione distribuiti omogeneamente sulla superficie, come è possibile notare in Figura 2.16, in modo da poter determinare verosimilmente il profilo termico durante tutto l’arco temporale della bonifica.

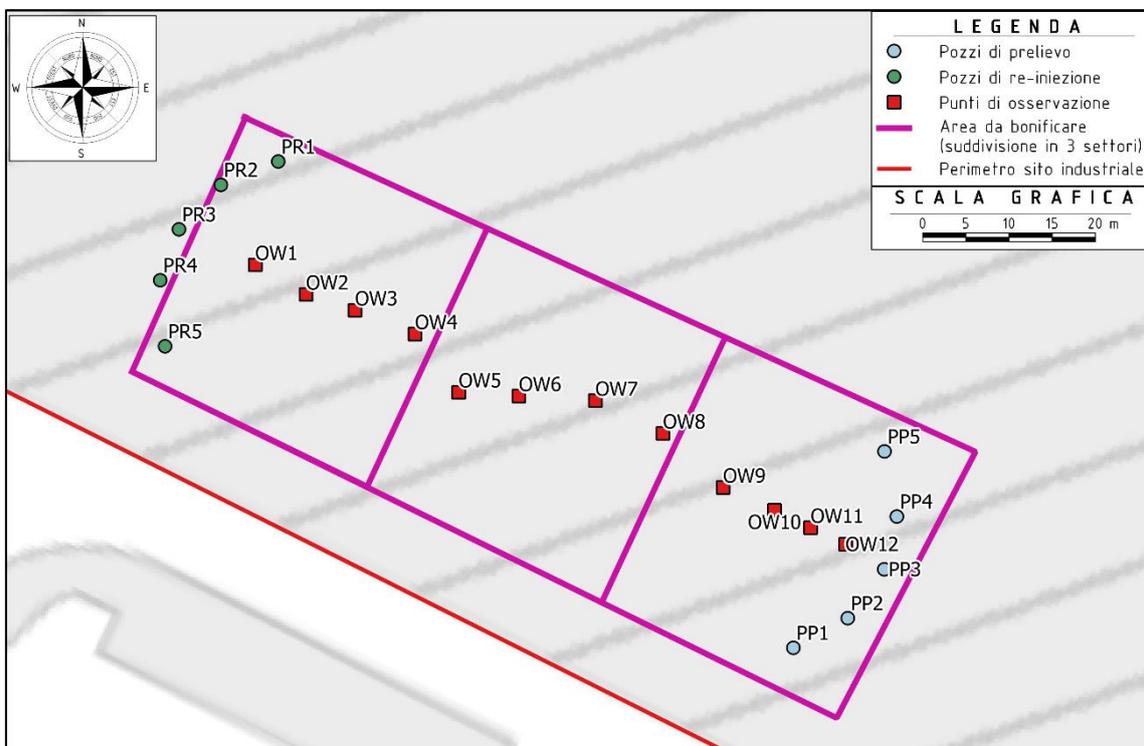


Figura 2.16- Suddivisione dell’area e ubicazione dei punti di osservazione.

In Figura 2.17 si riporta la distribuzione planimetrica delle temperature sulla tavola d'acqua dopo due anni dall'inizio dell'intervento.

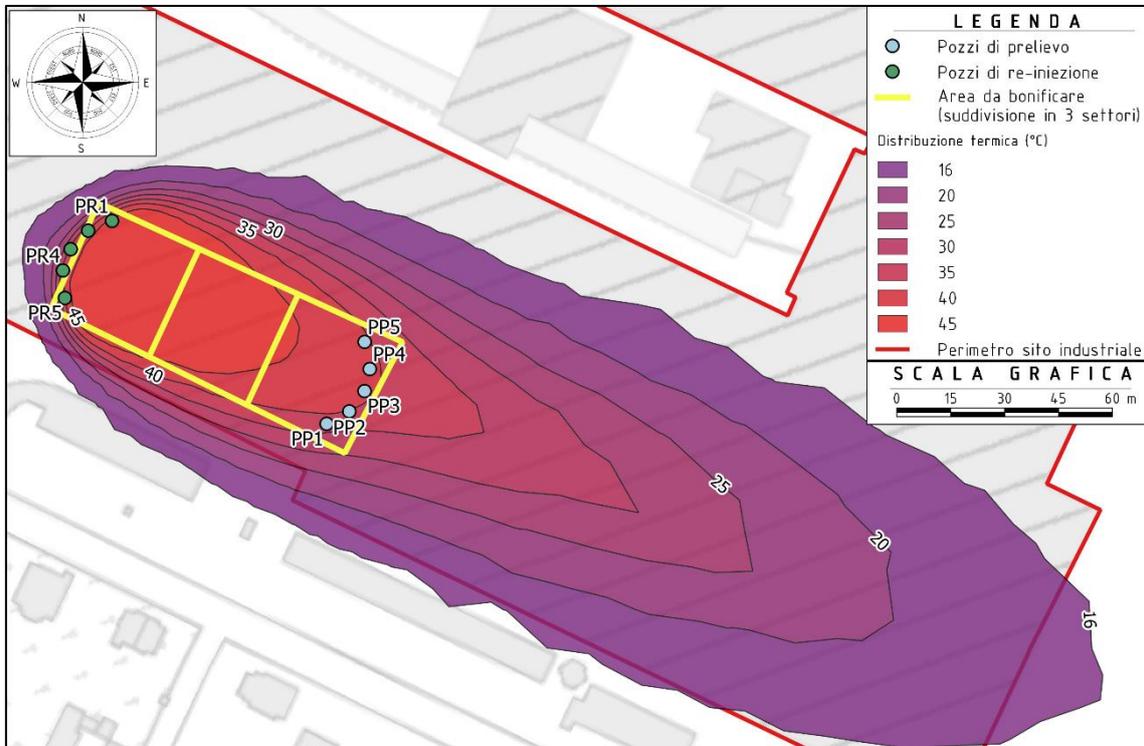


Figura 2.17- Distribuzione termica dopo 730 giorni di intervento

Si nota come il plume termico si espande significativamente nella direzione di deflusso senza però creare rilevanti disturbi termici all'esterno del sito. Lateralmente, invece, il plume si espande molto meno.

L'obiettivo di raggiungere una temperatura pari a 40° C all'interno dell'area contaminata da LNAPL è stato conseguito interamente.

Di seguito viene riportata anche la distribuzione delle temperature in sezione trasversale lungo il campo pozzi dopo 730 giorni di intervento:

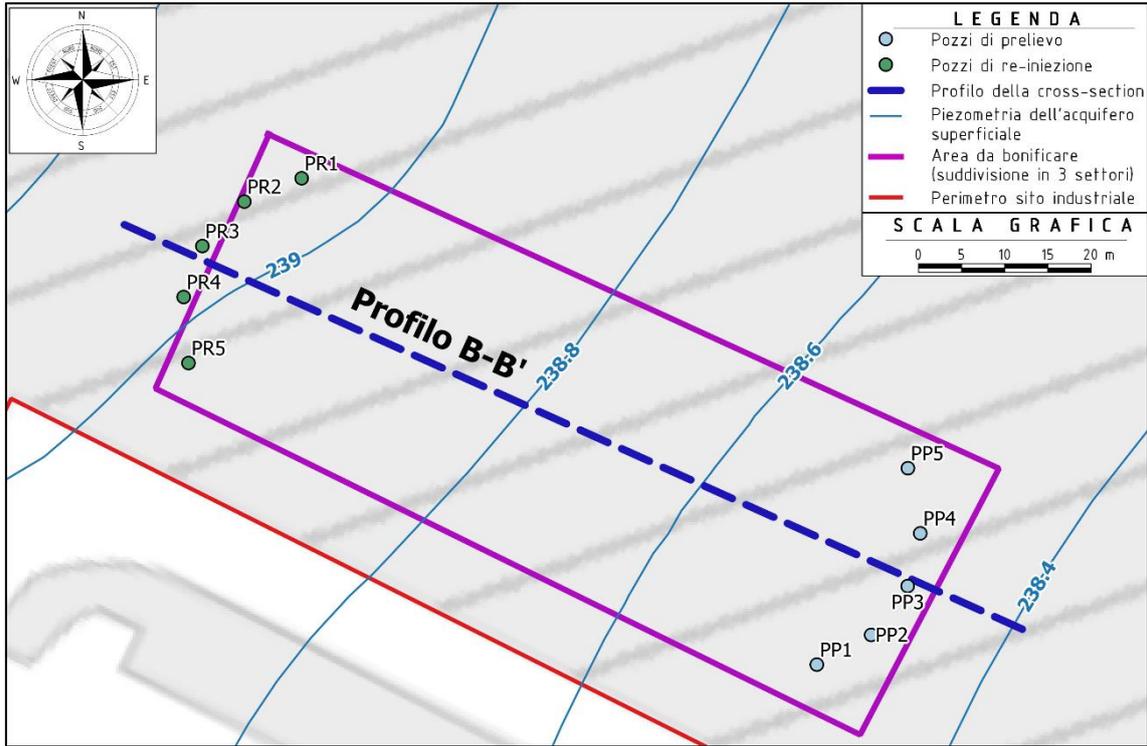


Figura 2.18 Ubicazione in planimetria della cross-section.

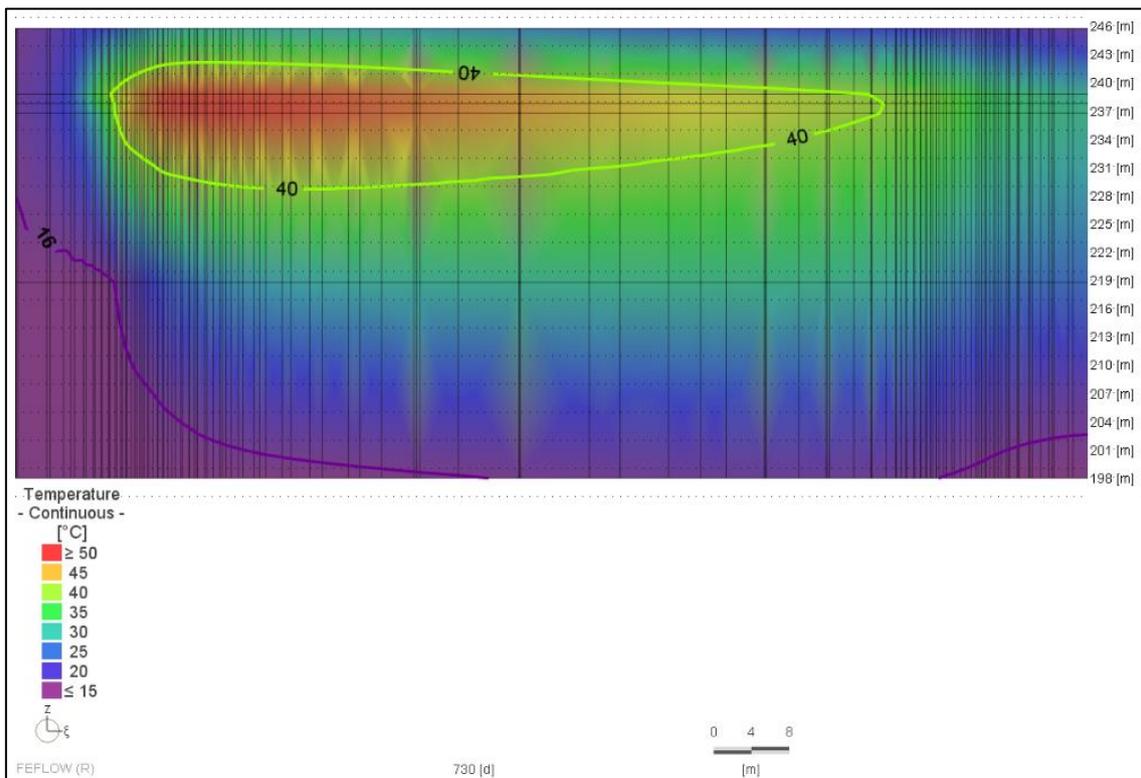


Figura 2.19 Distribuzione termica in sezione con l'evidenza delle isoterme a 16 e 40°C.

Si nota come, nonostante i pozzi siano finestrati solo nei primi due m del mezzo saturo, il plume termico si diffonde quasi su tutto lo spessore saturo, andando così a disperdere calore. Questo fenomeno è stato già ampiamente limitato finestrando opportunamente i pozzi.

Per quanto riguarda la configurazione di progetto, al termine dei due anni la caldaia viene spenta e si simula il trasporto di calore per ulteriori 365 giorni ipotizzando una temperatura di reiniezione pari a quella di prelievo. Feflow rilascia in output anche il trend termico dei pozzi presenti ed in particolare, si prendono in considerazione i profili termici dei pozzi a valle nel terzo anno di bonifica e si segue questo procedimento:

- Suddivisione dell'anno solare in 4 intervalli temporali Δt ;
- Per ciascun intervallo temporale Δt si determina la T media presente nei pozzi di valle, cioè si stabiliscono dei gradini termici di prelievo (vedi Tabella 2.2);
- Per ogni Δt si impone nei pozzi di re-iniezione il gradino termico di prelievo (impostata come condizione al contorno di temperatura fissata).

Tabella 2.2 Gradini termici utilizzati per il 3° anno di intervento.

Giorni trascorsi dall'inizio dell'intervento	Δt (giorni)	Temperatura (°C)
730	70	41
800	100	42
900	100	42
1000	95	41.5
1095	-	40

Il procedimento è iterativo, in quanto re-iniettando ad una T , maggiore di quella ambiente, nell'anno solare aumenteranno anche le T di prelievo a valle. Quindi, bisogna riprodurre un'altra simulazione con le nuove T nei pozzi di prelievo e così via in modo iterativo. Ad ogni modo, utilizzando i primi gradini termici calcolati si è certi di considerare la situazione più conservativa per la riuscita della bonifica, cioè con la temperatura più bassa in falda.

Di seguito, viene riportata la distribuzione planimetrica della temperatura sulla tavola d'acqua dell'area dopo 1095 giorni d'intervento:

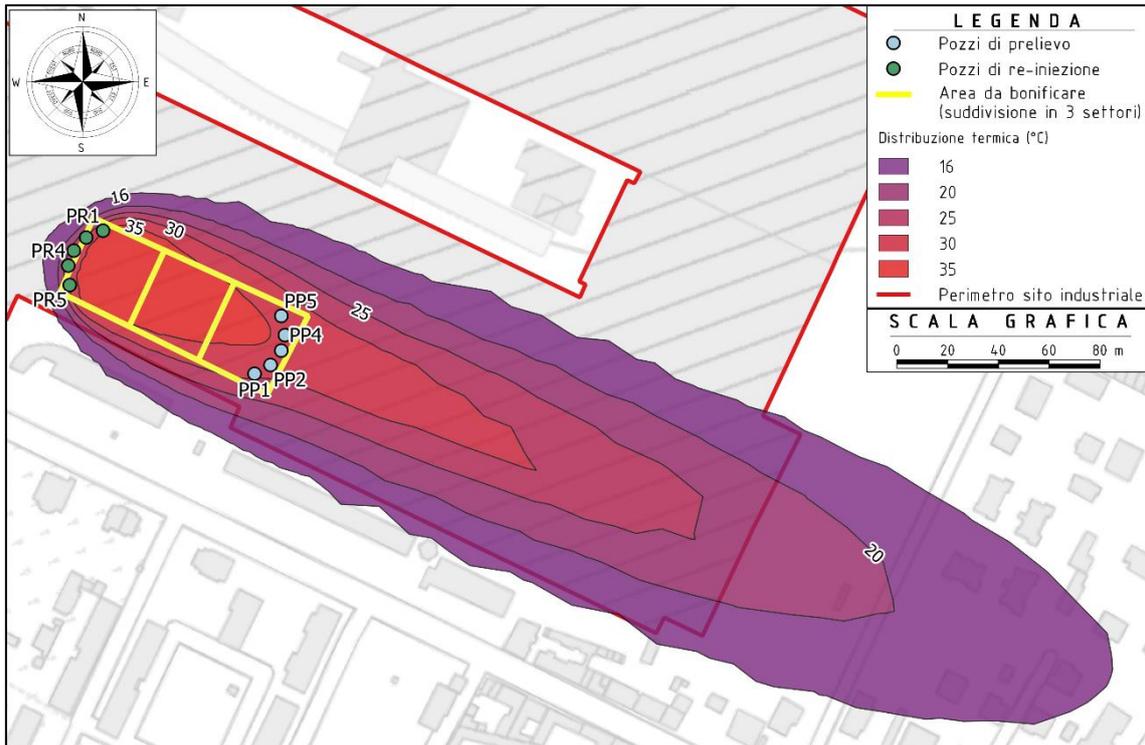


Figura 2.20 Distribuzione termica dopo 1095 giorni.

Dalla figura si nota che il calore si disperde lentamente e, all'interno dell'area da bonificare la temperatura della falda si mantiene intorno ai 30-35°. Essendo poi i punti di conformità molto distanti dall'area contaminata, idealmente ubicati sul perimetro di valle del sito, non si ha disturbo termico significativo.

Delineata la configurazione di progetto per questa tecnica, si definiscono ora le dimensioni del disoleatore previste nell'impianto di trattamento. Seguendo le direttive della UNI-EN 858-1 il disoleatore statico viene dimensionato, utilizzando la seguente formula:

$$NS = q_{in} * f_d = 5 * 1.5 = 7.5 \text{ l/s} \quad (2.5)$$

Dove NS è la dimensione nominale del disoleatore [l/s], q_{in} è la portata in ingresso al disoleatore [l/s] e f_d è un fattore che dipende dalla densità dell'olio e dal tipo di disoleatore [-]. Per un disoleatore con filtro a coalescenza e per una densità dell'olio pari a 0,88 g/cm³, come quella dell'olio in questione, si ha un fattore f_d pari a 1.5.

In ultimo, bisogna stimare il consumo energetico richiesto nel periodo d'intervento in modo da predisporre un impianto di riscaldamento idoneo. La portata di progetto da riscaldare è

pari alla portata estratta dai pozzi di prelievo. Invece, il ΔT che deve fornire la caldaia per raggiungere la temperatura di 50° è stato stimato utilizzando la curva, restituita in output dal software, dei profili termici dei pozzi di valle nel periodo di accensione della caldaia (730 giorni). Da questo grafico si calcola poi la media integrale e si definisce il ΔT medio che la caldaia deve sostenere. La potenza necessaria viene stimata con la seguente formula:

$$P = Q * \Delta T * \rho_w c_w \approx 500 \text{ kW} \quad (2.6)$$

Dove P è la potenza termica necessaria [kW], Q è la portata d'acqua da riscaldare [$\frac{m^3}{s}$], ΔT è la variazione di temperatura dell'acqua in ingresso all'impianto di riscaldamento rispetto a quella che si deve ottenere in uscita [K] e $\rho_w c_w$ è la capacità termica dell'acqua che risulta pari a $4.2 * 10^6 \frac{J}{m^3 K}$.

2.4.3 Recupero della fase surnatante

Come già visto in precedenza, si suddivide l'area in 3 settori su cui si stima la T media per ciascun anno di bonifica in modo che la simulazione sia più realistica.

Il recupero è previsto mediante l'installazione di una serie di skimmer a nastro su tutta l'area.

Il software LDRM richiede in input i seguenti parametri progettuali:

<input checked="" type="radio"/> Unconfined	<input type="radio"/> Confined	<input type="radio"/> Perched
<input type="text" value="3.000"/>	Recovery Time [yr]	
<input type="text" value="0.050"/>	Radius of well [m]	
<input type="text" value="4.000"/>	Radius of capture [m]	

Figura 2.21 Parametri progettuali richiesti dal software LDRM.

- Tempo di recupero (recovery time) [T]: in linea con gli altri interventi;
- Raggio del pozzo (radius of well) [L]: è stato ipotizzato con un diametro caratteristico di 4";
- Raggio di cattura (radius of capture) [L]: configurazione che garantisce un soddisfacente recupero del prodotto libero. Il numero N degli skimmer necessari, sono stati stimati come fatto in precedenza con l'equazione 2.1, e

risulta pari a 60. In questo caso però, si è trascurato il fattore di sicurezza SF perchè non è necessario che le zone di influenza degli skimmer coprano totalmente l'area: l'eventuale olio disciolto e non recuperato all'interno dell'area viene catturato, poi, dai pozzi barriera a valle.

2.5 Thermal conductive heating TCH

In questo caso per abbassare la viscosità dell'olio si potrebbe incrementare la temperatura in prossimità del pancake di LNAPL, cioè sulla frangia capillare attraverso una maglia regolare di tubi riscaldanti.

2.5.1 Descrizione della tipologia di intervento

Il Sistema TCH è costituito da piccole unità di bruciatori chiamati "heater" connessi con tubi d'acciaio che vengono infissi nel terreno a profondità variabili in funzione dell'ubicazione della contaminazione. Questi tubi sono formati al loro interno da due camere interconnesse nelle quali circola il vapore (gas contenente CO₂, H₂O, N₂ e O₂), riscaldato dai bruciatori, attraverso un percorso ben definito che termina con lo scarico in atmosfera del vapore esausto (gas contenente CO₂ e H₂O). L'energia necessaria viene fornita da una caldaia a metano che alimenta i bruciatori stessi.

I tubi essendo chiusi trasmettono calore al suolo per conduzione: la distribuzione termica nell'intorno del punto riscaldante è abbastanza omogenea in quanto regolata soltanto dal gradiente termico. Il calore generato determina:

- l'evaporazione dei contaminanti più prossimi all'unità riscaldante;
- la mobilizzazione dei contaminanti presenti nell'area interessata dall'intervento (area di bonifica);
- il desorbimento termico, almeno parziale, della contaminazione presente in fase residua nella zona vadosa e nella frangia capillare.

Attraverso la modellazione numerica si stima l'interasse tra i punti riscaldanti che garantisce un significativo innalzamento della temperatura di falda e una conseguente mobilizzazione della contaminazione.

Visto che nell'intorno dell'unità si volatilizza gran parte della contaminazione, risulta necessario un pozzo aspirante poco distante dal primo per la cattura dei vapori e il

trattamento degli stessi on site. Questo sistema di cattura deve essere accompagnato dalla posa sul p.c. di un telo in HDPE per l'impermeabilizzazione della superficie, così si evitano dispersioni indesiderate di contaminanti in atmosfera. Nel caso in esame l'impermeabilizzazione non è necessaria visto che la superficie è interamente pavimentata. La configurazione del singolo punto riscaldante finora descritto è rappresentata nella figura seguente:

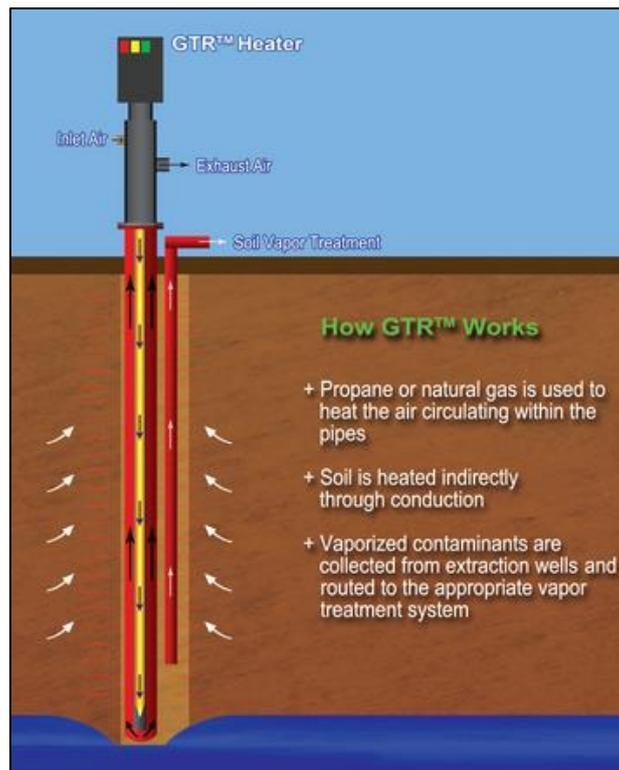


Figura 2.22 Unità riscaldante di Thermal Conductive Heating [11].

L'olio surnatante reso più fluido ma non vaporizzato, invece, viene recuperato mediante skimmer a nastro attivi per tutto il periodo d'intervento. L'olio recuperato tramite i dispositivi di recupero appena descritti, viene poi smaltito in impianti di recupero/smaltimento.

A valle dell'area vengono comunque installati 5 pozzi che fungono da barriera idraulica e termica che limitano l'espansione della bolla termica e la dispersione degli eventuali contaminanti mobilizzati ma non catturati dagli skimmer. Ciascun pozzo è dotato di uno skimmer a nastro per il recupero della fase oleosa e una pompa sommersa nel mezzo saturo per il recupero della fase acquosa (la configurazione è quella rappresentata in Figura 2.14).

La finestratura dei pozzi interessa tutto lo spessore saturo e si arresta a 2 m al di sopra del

livello piezometrico in modo da poter intercettare interamente l'eventuale contaminazione disciolta.

La frazione acquosa prelevata dai pozzi a valle viene poi mandata in un impianto di trattamento realizzato on-site che consta, come nella tecnica precedente, di:

- un disoleatore con filtro a coalescenza;
- un filtro a carboni attivi.

L'acqua trattata viene successivamente scaricata in corpo recettore previa caratterizzazione e conformità allo scarico.

2.5.2 Simulazione di flusso e trasporto di calore con Feflow

Nella configurazione di progetto le singole unità riscaldanti vengono infisse nel terreno fino ad una profondità di 8 m dal p.c., in modo da poter aggredire interamente la contaminazione presente (vedi Tabella 1.2).

Dallo storico delle oscillazioni piezometriche si evince che il livello preso in esame è il massimo del range temporale considerato. In linea con questo metodo si evita il caso più sfavorevole poiché con un livello piezometrico maggiore rispetto a quello di riferimento le unità riscaldanti sarebbero immerse nel mezzo saturo e riscalderebbero zone non coinvolte dalla contaminazione.

Nel caso statisticamente più probabile, cioè livello piezometrico più in basso rispetto a quello di riferimento, si andrebbe a riscaldare il prodotto libero o al massimo la frangia capillare satura di prodotto libero.

A differenza della tecnica descritta nel paragrafo 2.4, in questo caso il calore si diffonde per conduzione e non per advezione e quindi, installando unità in modo selettivo su tutta l'area contaminata, il plume termico si espande abbastanza rapidamente ed in maniera omogenea. Inizialmente, l'obiettivo preposto era rappresentato dalla totale rimozione della contaminazione per evaporazione. Questo scopo si è, poi, rilevato troppo ambizioso vista la necessità di installare una maglia troppo fitta di unità riscaldanti con interassi di circa 1-2 m e di conseguenza, costi complessivi impossibili da sostenere.

Pertanto, si sono ridimensionate le idee progettuali iniziali: maglia con interasse maggiore che garantisce la volatilizzazione della contaminazione presente in prossimità dei dispositivi riscaldanti e la mobilitazione di quella più distante. L'obiettivo principale consiste nel raggiungimento di una temperatura almeno pari a 40°C su tutta l'area in modo da poter

mobilitare significativamente l'olio surnatante.

Nella configurazione di progetto si prevede l'utilizzo dei dispositivi riscaldanti per due anni e, lo sfruttamento del calore residuo del terreno per l'anno successivo; si segue lo stesso approccio utilizzato nella tecnica precedente. Gli skimmer, come già anticipato, continueranno a funzionare fino al termine dell'intervento.

Di seguito vengono riportati i parametri in input imposti sul modello 3D:

- Durata della simulazione: 3 anni;
- Portate prelevate=1 l/s per pozzo. Nel modello sono stati inseriti i pozzi come "multilayer well";
- Carico termico applicato: 3.6 kW per dispositivo riscaldante. Nel modello sono stati inseriti i punti riscaldanti come "heat nodal sink" cioè sorgenti di calore dalla slice 1 alla 4.

Si sono consultate diverse aziende del settore per stimare un valore realistico della potenza termica necessaria da installare. In particolare, valori tipici sono pari a 800-1000 W/m nel mezzo saturo e 400-800 W/m di lunghezza nel non saturo. Essendo tubi lunghi 8 m, sviluppati per 7 m nella zona vadosa e per 1 m nella zona satura, necessitano di carico termico pari a:

$$\text{Carico termico} = q_{NS} * h_{NS} + q_S * h_S = 3.6 \text{ kW} \quad (2.7)$$

Dove q_{NS} è il carico termico lineare nel mezzo non saturo [W/m di profondità], h_{NS} è la profondità del mezzo non saturo [m], q_S è il carico termico lineare nel mezzo saturo [W/m di profondità] e h_S è lo spessore saturo in cui l'unità riscaldante è immersa.

Con la simulazione di diverse configurazioni si è definita quella di progetto, che garantisce una buona distribuzione del plume termico attraverso l'utilizzo di maglie triangolari con interasse longitudinale (direzione di deflusso) di 6 m e trasversale (perpendicolare al deflusso) di 8 m.

Ogni singola unità ha un plume termico significativo (isoterma a 40°C) che si estende fino a 5-6 m nella direzione di deflusso a valle del punto e per circa 1 m a monte di esso. Considerato l'obiettivo principale di mantenere la temperatura di falda a 40°C nell'area di bonifica, si è utilizzata questa distanza come interasse longitudinale e pertanto, si è definito il numero di "heater" longitudinali necessari che risulta pari a 15 su una distanza di 90 m nella direzione di deflusso.

Trasversalmente, invece, avendo una distanza da ricoprire di 35 m si è pensato di installare 3 file di dispositivi per ottimizzarne la distribuzione nell'area: rappresenta il numero minimo di file che soddisfano i requisiti preposti. L'interasse trasversale risulta, quindi, di circa 8 m. Per generare una bolla termica significativa già nel limite superiore dell'area contaminata i punti riscaldanti vengono installati anche a monte dell'area da bonificare. Le 15 file di "heaters" terminano, invece, circa 20 m a monte del perimetro di valle del sito visto che il moto advettivo permette comunque l'espansione termica sulla superficie rimanente. La configurazione appena descritta è rappresentata in Figura 2.23. Per ciascun punto riscaldante raffigurato è previsto un tubo aspirante nel suo intorno.

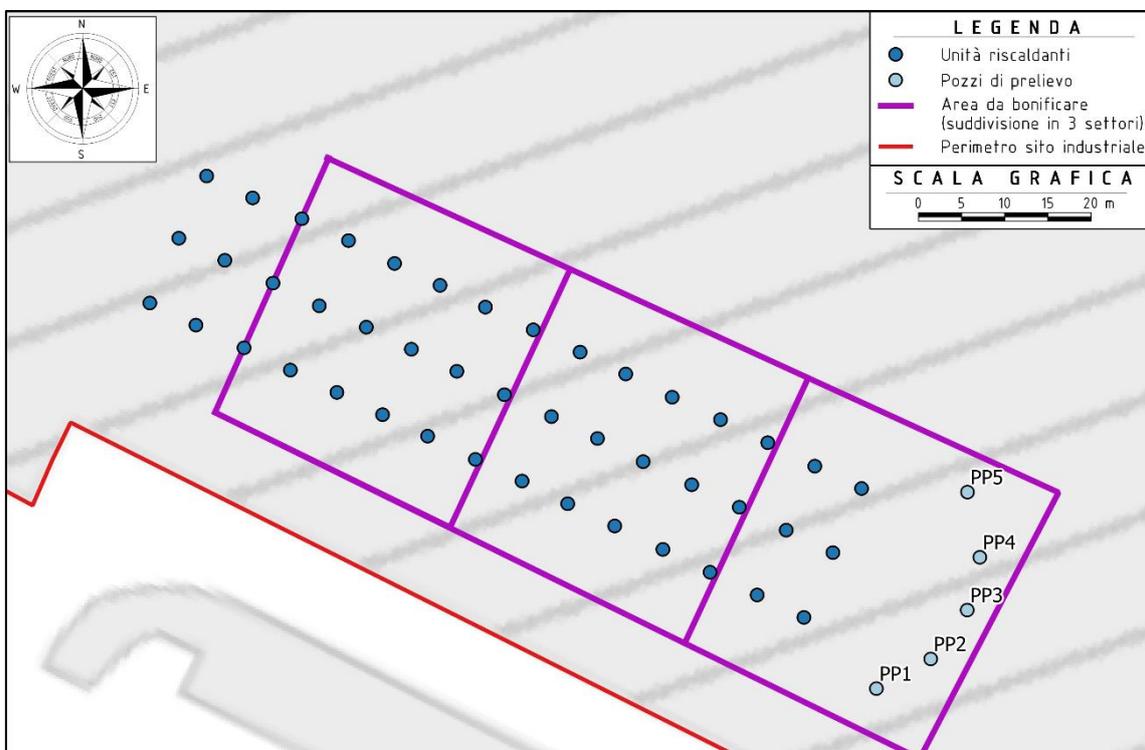


Figura 2.23 Ubicazione delle unità riscaldanti e dei pozzi di prelievo.

Questa configurazione viene utilizzata esclusivamente ai fini di una preliminare valutazione tecnico-economica. Eventuali ottimizzazioni verranno effettuate nelle successive fasi progettuali.

Vista la disomogeneità termica dell'area, si è ritenuto opportuno dividere l'area di interesse in 3 settori affinché la simulazione dell'intervento di bonifica sia più realistica. La metodologia seguita è la medesima utilizzata per la Groundwater heat recirculation cell, l'unica differenza sta nell'ubicazione dei punti di osservazione, come si nota in Figura 2.24.

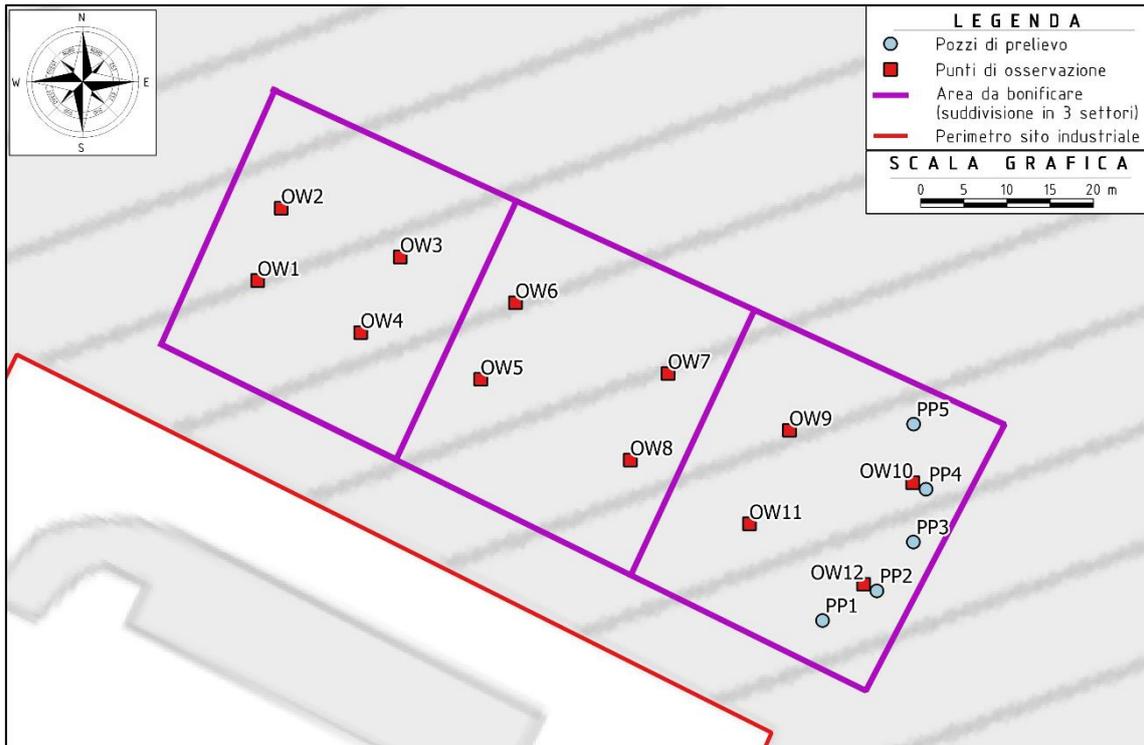


Figura 2.24 Suddivisione dell'area e ubicazione dei punti di osservazione.

Questa serie di punti di osservazione riesce a descrivere più realisticamente il comportamento termico nei vari settori vista la differente propagazione del calore che questa tecnica ha in confronto alla GHRC.

Definiti i punti di osservazione e i parametri di input, si realizza la simulazione riportata in Figura 2.25 che rappresenta la distribuzione planimetrica della temperatura della tavola d'acqua nell'area da bonificare dopo due anni dall'inizio dell'intervento.

Si nota che in prossimità delle unità riscaldanti si raggiungono temperature anche superiori ai 200 °C, cioè la temperatura di evaporazione dei contaminanti presenti in falda. Pertanto, parte della contaminazione effettivamente volatilizza.

Si segnala inoltre l'espansione dell'isoterma a 40 °C quasi su tutta l'area da bonificare, che rappresenta una buona mobilizzazione dell'olio surnatante presente.

A valle dell'area, invece, il calore si disperde velocemente non creando così disturbi termici in punti di conformità, ubicati idealmente sul perimetro di valle del sito.

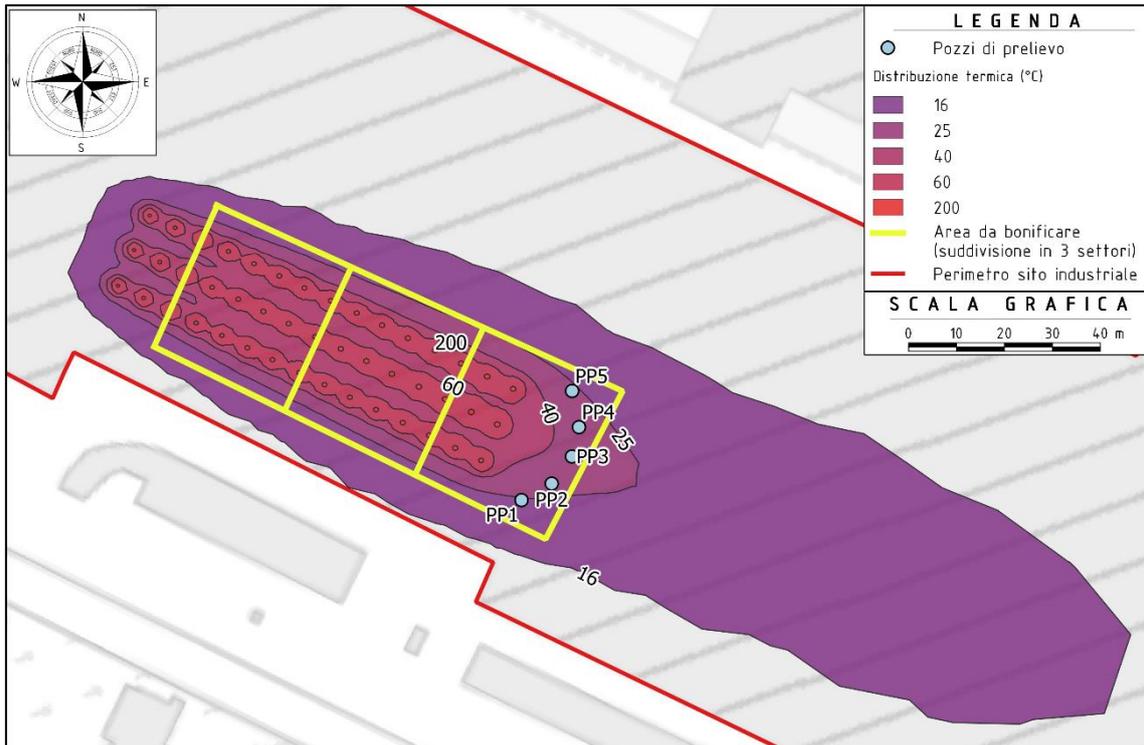


Figura 2.25 Distribuzione termica dell'area dopo 730 giorni di intervento.

Dopo aver brevemente descritto la distribuzione termica in pianta, si analizza per completezza la distribuzione termica in sezione dopo 730 giorni di intervento.

In Figura 2.26 è rappresentata la traccia litostratigrafica C-C' che viene riportata in sezione nella Figura 2.27.

In quest'ultima si nota come il plume termico si estende solo nella parte più superficiale dello spessore saturo. A differenza della GHRC, il calore fornito è concentrato maggiormente nella zona interessata dalla contaminazione.

Le zone rosse presenti in prossimità della frangia capillare rappresentano le singole unità riscaldanti che in questa sezione sono appunto 15.

Relativamente alla dispersione del calore, a valle si disperde facilmente e non si creano in questo modo disturbi termici a zone sensibili fuori dal sito.

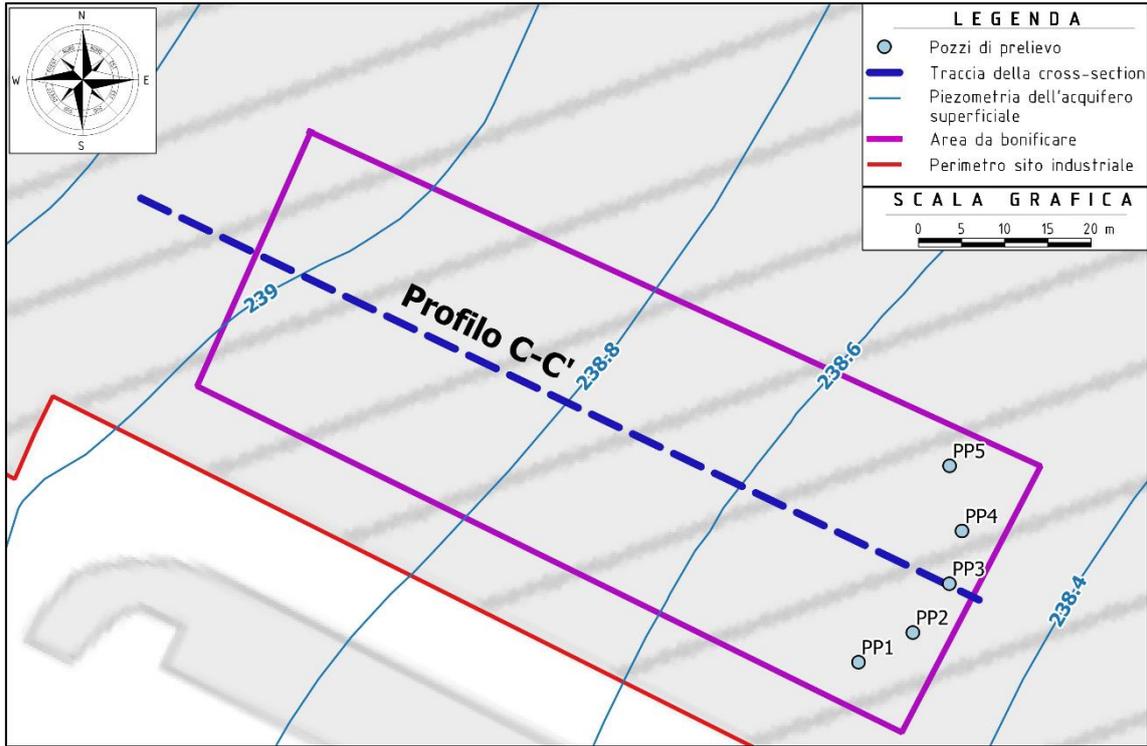


Figura 2.26 Ubicazione in planimetria della cross-section.

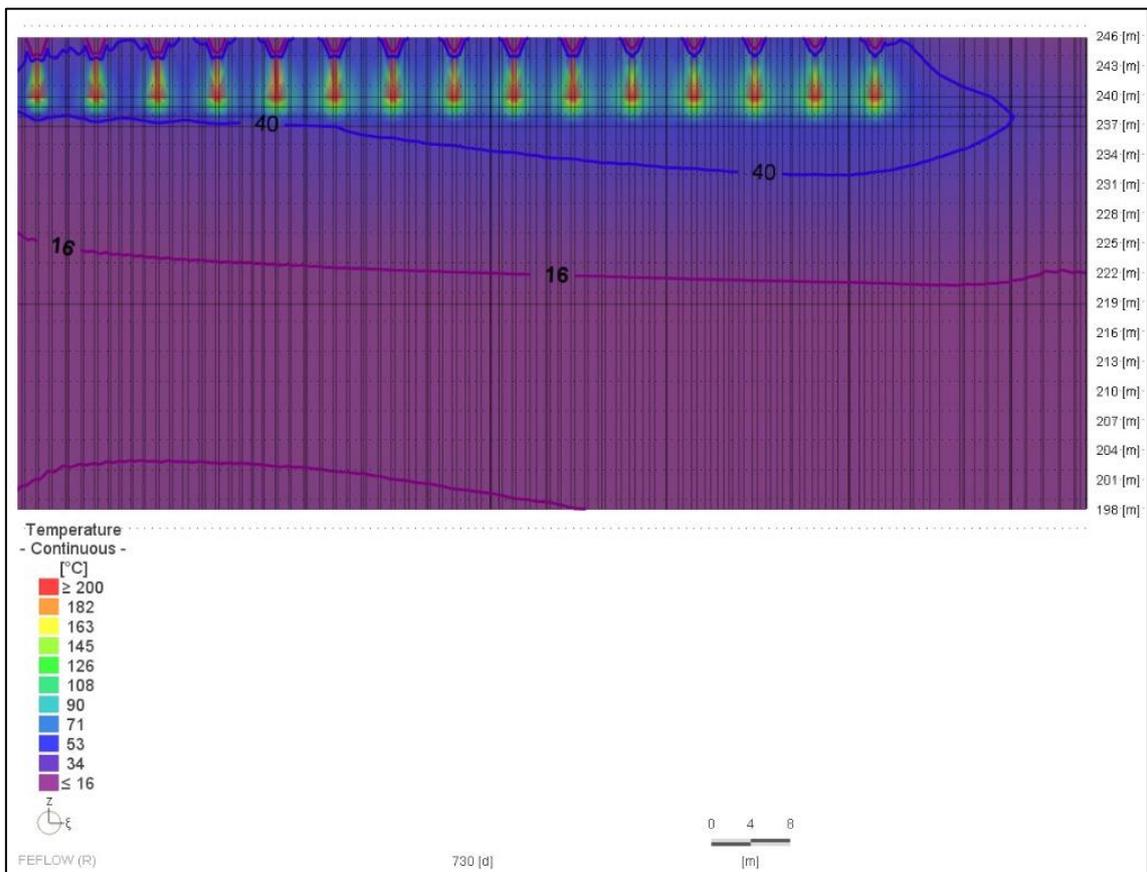


Figura 2.27 Distribuzione termica in sezione con l'evidenza delle isoterme a 16 e 40°C.

Di seguito, viene riportato la distribuzione planimetrica della temperatura della tavola d'acqua dell'area da bonificare dopo 1095 giorni d'intervento:

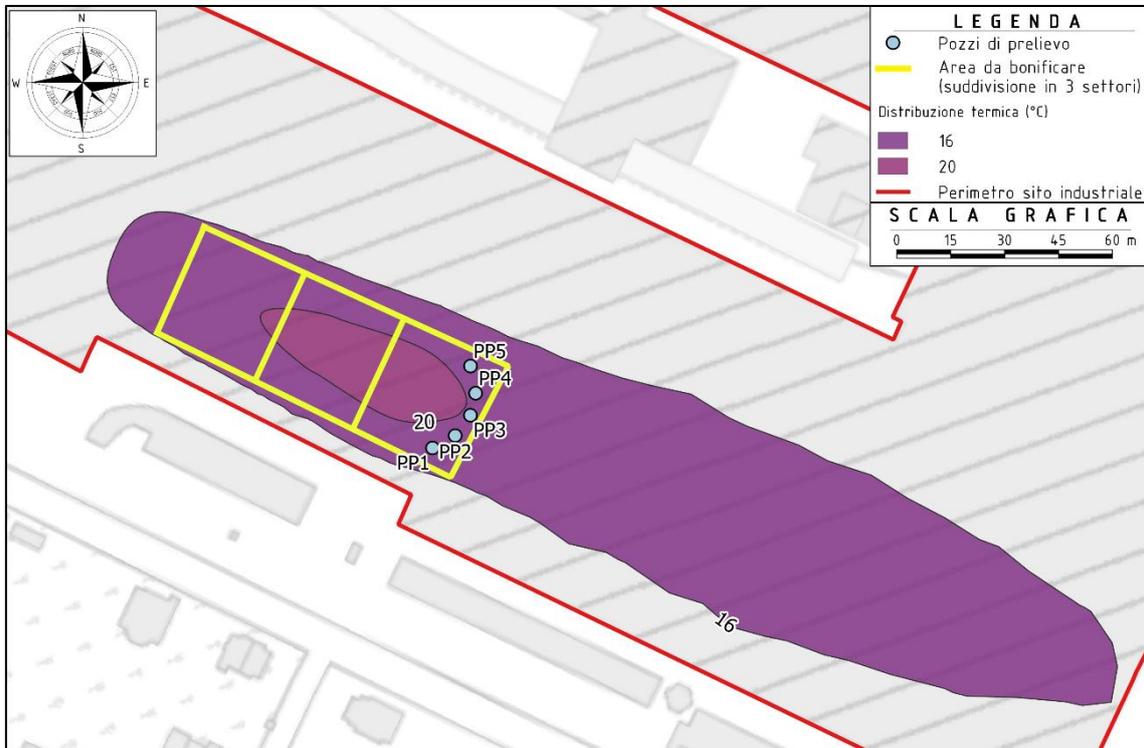


Figura 2.28 Distribuzione termica dell'area dopo 1095 giorni di intervento.

Dalla Figura 2.28 si nota che il calore si disperde facilmente al punto che l'unica isoterma significativa ancora presente è quella a 20°C.

Al cessare dell'input termico quindi, la temperatura iniziale della falda viene ripristinata in tempi piuttosto rapidi.

Delineata la configurazione di progetto anche per questa tecnica, si definiscono ora le dimensioni del disoleatore previste nell'impianto di trattamento. Considerato che la portata in ingresso all'impianto è la stessa della tecnica precedente come lo sono le caratteristiche del disoleatore, la dimensione nominale NS del disoleatore è la stessa della GHRC e risulta pari a 7.5 NS.

In ultimo, bisogna stimare il consumo energetico richiesto nel periodo d'intervento in modo da predisporre un impianto di riscaldamento idoneo. In questo caso, dovendo fornire energia a 45 unità riscaldanti ciascuno di potenza pari a 3.6 kW la potenza totale da fornire sarà pari a 162 kW per un arco temporale di 730 giorni.

2.5.3 Recupero della fase surnatante

Come nel caso precedente, si suddivide l'area in 3 settori su cui si stima la T media per ciascun anno di bonifica in modo da poter rendere la simulazione più realistica.

In questa sezione, si simula soltanto il recupero del prodotto libero mobilizzato ma non evaporato. Quest'ultimo contributo è difficile da stimare in questa fase progettuale; si ipotizza che la contaminazione racchiusa all'interno delle isoterme a 200 °C (temperatura di evaporazione dell'olio) sia completamente rimossa dall'aspirazione dei tubi.

Ad ogni modo per il recupero della fase libera mobilizzata ma non evaporata, il software LDRM richiede in input i seguenti parametri progettuali:

<input checked="" type="radio"/> Unconfined	<input type="radio"/> Confined	<input type="radio"/> Perched
<input type="text" value="3.000"/>	Recovery Time [yr]	
<input type="text" value="0.050"/>	Radius of well [m]	
<input type="text" value="4.000"/>	Radius of capture [m]	

Figura 2.29 Parametri progettuali richiesti dal software LDRM.

- Tempo di recupero (recovery time) [T]: in linea con gli altri interventi;
- Raggio del pozzo (radius of well) [L]: è stato ipotizzato con un diametro caratteristico di 4";
- Raggio di cattura (radius of capture) [L]: configurazione che garantisce un soddisfacente recupero del prodotto libero. Il numero N degli skimmer necessari, sono stati stimati come fatto in precedenza con l'equazione 2.1, e risulta pari a 60. Anche in questo caso, si è trascurato il fattore di sicurezza SF perchè non è necessario che le zone di influenza degli skimmer coprano totalmente l'area: l'eventuale olio disciolto e non recuperato all'interno dell'area viene catturato, poi, dai pozzi barriera a valle.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Dimensionamento e prestazioni

Le tecniche descritte nel capitolo precedente vengono analizzate e confrontate in base al dimensionamento e alle prestazioni risultanti dalle elaborazioni con il software LDRM. Per ciascuna tecnica vengono definite le configurazioni di progetto che, in base ai risultati delle simulazioni, garantiscono un recupero dell'olio recuperabile almeno pari al 75-80% che dovrebbe rappresentare la rimozione di gran parte del prodotto libero.

Lo spessore di LNAPL in piezometro invece, nonostante sia presente in tabella, non viene considerato un parametro target in quanto, come spiegato nel paragrafo 1.3.4, dipende da molti fattori non facilmente controllabili e quindi di difficile interpretazione.

La soglia di recupero imposta potrebbe non bastare per il raggiungimento delle CSR ma, essendo in una preliminare valutazione tecnico-economica, sarà sufficiente per identificare la tecnica più adatta.

3.1.1 Oil skimming

I parametri che descrivono l'intervento di recupero simulato con il software LDRM su un arco temporale di 3 anni, sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 3.1 Recupero complessivo tramite Oil skimming.

Spessore LNAPL in piezometro (m)	0.25
Spessore LNAPL in acquifero (m)	0.02
% di recupero sull'olio totale presente (-)	40.1
% di recupero sull'olio recuperabile (-)	80.1
N° di skimmer da installare	320

3.1.2 Multi phase extraction/bioslurping

I parametri che descrivono l'intervento di recupero simulato con il software LDRM su un arco temporale di 3 anni, sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 3.2 Recupero complessivo tramite Multi phase extraction.

Spessore LNAPL in piezometro (m)	0.25
Spessore LNAPL in acquifero (m)	0.02
% di recupero sull'olio totale presente (-)	38.6
% di recupero sull'olio recuperabile (-)	78.1
N° di pozzi MPE da installare	5

3.1.3 Groundwater heat recirculation cell

La simulazione del recupero del prodotto libero in questo caso è effettuata distintamente per ciascun settore (secondo la suddivisione dell'area di bonifica riportata in Figura 2.16) per ogni anno di intervento in modo da rendere la simulazione più rappresentativa della situazione reale.

Per ciascun settore, determinata la T_{MEDIA} annuale (stimata in base ai profili termici dei punti di osservazione descritti nel paragrafo 2.4.2) e la relativa viscosità dinamica dell'olio surnatante, si calcola il recupero sul recuperabile e lo spessore b_n residuo in piezometro per il primo anno di intervento. Per il secondo anno, si impone in input lo spessore residuo del primo anno di intervento e la viscosità dinamica raggiunta in base alla T_{MEDIA} del secondo anno e si calcola il recupero. La procedura sarà analoga anche per l'anno successivo. Al termine del terzo anno, cioè dopo 1095 giorni di intervento, si definiscono i recuperi complessivi per ogni settore che vengono successivamente mediati per ottenere un valore medio di recupero nell'area confrontabile con i risultati ottenuti nelle altre simulazioni. Nella tabella seguente sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate nei diversi settori per ciascun anno di intervento:

Tabella 3.3 Recupero di olio surnatante con gli skimmer durante il periodo di intervento.

	0-365d			365-730d			730-1095d			Recupero complessivo	
	T (°C)	recupero/recuperabile	b_n residuo(m)	T (°C)	recupero/recuperabile	b_n residuo(m)	T (°C)	recupero/recuperabile	b_n residuo(m)	recupero/recuperabile tot	LNAPL totale (m)
Settore 1	45	0,606	0,31	50	0,457	0,26	40	0,172	0,24	0,82	0,02
Settore 2	40	0,457	0,33	46	0,468	0,28	42	0,235	0,26	0,78	0,02
Settore 3	26	0,357	0,35	43	0,415	0,3	40	0,253	0,27	0,72	0,02

I parametri di output forniti dal software LDRM sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 3.4 Recupero complessivo tramite GHRC.

Spessore LNAPL in piezometro (m)	0.26
Spessore LNAPL in acquifero (m)	0.02
% di recupero sull'olio totale presente (-)	39.8
% di recupero sull'olio recuperabile (-)	77.3
N° di skimmer da installare	60

3.1.4 Thermal conductive heating

La simulazione del recupero del prodotto libero viene effettuata seguendo lo stesso procedimento utilizzato nella GHRC. Nella tabella seguente sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate nei diversi settori per ciascun anno di intervento:

Tabella 3.5 Recupero di olio surnatante con gli skimmer durante il periodo di intervento.

	0-365d			365-730d			730-1095d			Recupero complessivo	
	T (°C)	recupero/recuperabile	b _n residuo(m)	T (°C)	recupero/recuperabile	b _n residuo(m)	T (°C)	recupero/recuperabile	b _n residuo(m)	recupero/recuperabile tot	LNAPL totale (m)
Settore 1	35	0,447	0,33	46	0,47	0,28	28	0,162	0,26	0,75	0,02
Settore 2	43	0,585	0,31	58	0,53	0,26	34	0,162	0,25	0,84	0,01
Settore 3	44	0,596	0,31	60	0,547	0,25	37	0,158	0,24	0,85	0,01

Nella situazione in esame visto che si verifica anche una parziale evaporazione della contaminazione, bisogna a rigor di logica sommare questo contributo a quello relativo al recupero con gli skimmer.

Per stimare la quantità di contaminante evaporato, si prendono come riferimento le isoterme a 200°C presenti in Figura 2.25 che definiscono l'estensione superficiale su cui la contaminazione volatilizza completamente. L'area racchiusa dalle isoterme di 200°C è di circa 32 m², inferiore di due ordini di grandezza rispetto all'area complessiva da bonificare. Vista l'estensione ridotta ed in linea con un approccio più conservativo per il completamento della

bonifica, si trascura tale contributo nel calcolo finale.

Infine vengono riportati nella tabella seguente i parametri di output forniti dal software LDRM:

Tabella 3.6 Recupero complessivo tramite TCH.

Spessore LNAPL in piezometro (m)	0.25
Spessore LNAPL in acquifero (m)	0.01
% di recupero sull'olio totale presente (-)	41.8
% di recupero sull'olio recuperabile (-)	81.9
N° di skimmer da installare	60

3.2 Vantaggi e svantaggi delle tecniche analizzate

In questo paragrafo vengono brevemente analizzati i risultati delle varie tecniche individuando, poi, quelle tecnicamente realizzabili che saranno successivamente sottoposte ad un'analisi economica atta ad identificare la tecnologia più adatta al sito. Di seguito, si esaminano una per una tutte le tecnologie fin ora descritte.

3.2.1 Oil skimming

La tecnica in esame è nota per via dei suoi costi di installazione ed esercizio contenuti poiché, catturando solo l'olio surnatante, non prevede impianti di trattamento per l'acqua e l'aria riducendo in questo modo il costo dell'intervento di diversi ordini di grandezza.

I raggi di cattura degli skimmer sono però molto ridotti, sia perché il prodotto libero ha una viscosità molto elevata, sia perché non si genera un cono di drenaggio che attiri il pancake verso i dispositivi di recupero. Raggi di cattura limitati rendono necessaria l'installazione di un gran numero di skimmer a nastro (ben 320) all'interno dell'area contaminata per garantire un buon recupero di olio surnatante. Inoltre, la completa rimozione della contaminazione richiede una lunga durata dell'intervento che non risulta compatibile con il destino del sito (riqualificazione dell'area o vendita a terzi). In aggiunta, questa tecnologia tratta la fase libera ma non quella residua, e quindi si possono verificare incrementi di concentrazione dopo l'intervento (rebound) che impediscono appunto di completare in tempi brevi il procedimento di bonifica.

Sulla base di questi elementi, si giunge alla conclusione che questo intervento nel caso in

esame non è realizzabile e pertanto, verrà scartato per la successiva analisi economica.

Tabella 3.7 Fattori preferenziali, penalizzanti ed escludenti della tecnica "Oil Skimming".

PREFERENZIALI	PENALIZZANTI	ESCLUDENTI
Buon recupero del prodotto libero.	Raggio di cattura molto limitato data la scarsa mobilità della fase surnatante.	Durata dell'intervento non compatibile con il destino del sito.
Cattura solo olio surnatante.	Installazione nell'area di 320 piezometri su cui calare gli skimmer a nastro.	Impossibile gestione in fase di esercizio.
Semplicità d'installazione.		Fase residua non trattata, possibili fenomeni di rebound.

3.2.2 Multi phase extraction

La tecnica in esame garantisce senza dubbio un recupero più efficace rispetto all'oil skimming per via del richiamo indotto verso il dispositivo di recupero dalla depressione. Ciò implica dei raggi di cattura maggiori e un quantitativo inferiore di dispositivi di recupero. Inoltre i pozzi essendo finestrati anche al di sopra della tavola d'acqua, attraverso la depressione richiamano aria dal non saturo stimolando la biodegradazione aerobica nel non saturo ed in parte nel saturo e LNAPL presente in fase residua nella zona vadosa.

D'altro canto la mobilità dell'olio in esame, essendo molto viscoso, è molto bassa e quindi l'efficacia del richiamo indotto dall'aspirazione è molto inferiore rispetto a quella prevista per altri tipi di idrocarburi. In fase progettuale, è difficile stimare il cono di drenaggio necessario per mobilizzare il contaminante all'interno di una determinata porzione di terreno e per questo motivo i risultati della simulazione effettuata sono da considerare con estrema cautela. Fenomeni che possono ridurre l'efficienza sono ad esempio quelli dovuti al biofouling nelle finestrate per via dell'aerazione forzata.

Inoltre, per mantenere nel pozzo l'abbassamento fissato bisogna estrarre portate considerevoli che, per il sito in esame, sono comparabili a quelle di un impianto di depurazione per reflui civili con potenzialità di 30'000 abitanti equivalenti AE (si considera

un consumo medio pro-capite di $200 \frac{\text{litri}}{\text{AE} \cdot \text{giorno}}$. Un impianto di trattamento di tali dimensioni è molto difficile e costoso da realizzare e gestire all'interno di un sito contaminato. Sarebbe inoltre necessario anche un impianto per il trattamento dei vapori che renderebbe la realizzazione dell'intervento molto complessa a livello logistico. In ultimo, la fase residua nel saturo non viene trattata e da ciò si possono verificare incrementi di concentrazione nella fase post-operam, che allungano la durata complessiva della bonifica. Detto ciò, si giunge alla conclusione che questo intervento nel caso in esame non è realizzabile e pertanto, verrà scartato per la successiva analisi economica.

Tabella 3.8 Fattori preferenziali, penalizzanti ed escludenti della tecnica "Multi phase extraction".

PREFERENZIALI	PENALIZZANTI	ESCLUDENTI
Recupero più efficace dell'Oil Skimming.	Necessari impianti di trattamento acqua e vapori.	Fase residua nel mezzo saturo non trattata, possibili fenomeni di rebound.
Richiamo del LNAPL in fase residua nel non saturo.	Possibili problemi di biofouling delle finestrate.	Durata dell'intervento non compatibile con il destino del sito.
Raggio di cattura maggiore rispetto a "Oil skimming".	Richiamo indotto dall'aspirazione meno efficace rispetto ad altri tipi di idrocarburi.	Impianto di trattamento acque di difficile realizzazione e gestione.
Stimola la biodegradazione aerobica dei contaminanti.	Difficoltà nella stima della mobilità del pancake.	

3.2.3 Groundwater heat recirculation cell

La tecnica in esame garantisce un recupero più efficace rispetto all'Oil skimming poiché aggredisce termicamente la contaminazione riducendone la viscosità e quindi rendendola più catturabile. In questo modo si avrà bisogno di una maglia di skimmer meno fitta grazie ad un maggior raggio di cattura.

Re-iniettando acqua di falda "riscaldata" si riesce inoltre a desorbire termicamente parte del

NAPL presente in fase residua nel mezzo saturo, un quantitativo non trascurabile e che potrebbe rappresentare una sorgente di contaminazione nei periodi successivi all'intervento. D'altro canto, la fase residua di NAPL nel mezzo non saturo non viene trattata e di conseguenza in fase realizzativa bisognerà porre una maggior attenzione nel periodo post-intervento prevedendo monitoraggi mirati ed eventuali interventi compensativi.

Dalle simulazioni si è notato come il calore si espanda lentamente nel dominio in esame, ciò comporta l'attesa di tempi rilevanti prima di riscontrare importanti variazioni termiche. Dall'altra parte, visto che il calore si espande lentamente allo stesso modo si dissiperà lentamente, permettendo di sfruttare il calore residuo del terreno per almeno un anno dopo lo spegnimento della caldaia.

Essendo una tecnica che prevede il prelievo di acqua e la re-iniezione a monte tramite pozzi, nonostante opportuni accorgimenti (finestrature dei pozzi, ad esempio), il plume termico non è ben confinato lungo la verticale e ciò porta ad una dispersione del calore fornito.

Dal punto di vista impiantistico, è necessario:

- Impianto di trattamento acque per portate in ingresso pari a 432 m³/d. Si tratterebbe di un impianto paragonabile a quello di depurazione per reflui civili con potenzialità di 2000 AE. Un impianto di tali dimensioni è sicuramente realizzabile e gestibile all'interno del sito in esame.
- Impianto di riscaldamento delle portate prelevate tramite caldaia a metano. Bisogna portare l'acqua di falda prelevata alla temperatura di progetto, ciò comporta dei costi energetici che non sono mai comparsi nelle precedenti tecniche e che quindi devono essere considerati, in quanto rappresentano una voce non trascurabile.

In definitiva, da una prima analisi tecnica non si sono riscontrati fattori escludenti e pertanto, questa tipologia verrà valutata anche dal punto di vista economico per delineare l'effettiva applicabilità al sito in questione.

Tabella 3.9 Fattori preferenziali, penalizzanti ed escludenti della tecnica "GHRC".

PREFERENZIALI	PENALIZZANTI	ESCLUDENTI
Recupero più efficace dell'Oil skimming.	Fase residua nel non saturo non trattata, possibili fenomeni di rebound.	
Raggio di cattura maggiore rispetto a "Oil Skimming".	Difficoltà nel confinamento termico sulla verticale.	
Desorbimento termico del LNAPL in fase residua nel mezzo saturo.	Necessaria la realizzazione di un impianto di trattamento acque e una caldaia a metano.	
Lenta dispersione del calore.	Costi di riscaldamento.	
Volumi d'acqua da trattare molto contenuti.		

3.2.4 Thermal conductive heating

La tecnica in esame, come visto per la GHRC, aggreddendo termicamente la contaminazione riesce a garantire un recupero più efficace rispetto all'oil skimming e necessita di una maglia di skimmer meno fitta.

Dal punto di vista termico, i punti riscaldanti trasmettono calore su tutto il loro spessore, riscaldando quindi anche il mezzo non saturo e la porzione di mezzo saturo interessata dalla contaminazione. Questo tipo di riscaldamento permette senz'altro un buon desorbimento termico della fase residua nel mezzo non saturo e nella zona satura interessata dalla contaminazione. A differenza della tecnica precedentemente analizzata, in questo caso si riesce a confinare sulla verticale il plume termico; infatti le variazioni termiche rispetto alla temperatura indisturbata si arrestano già lungo lo spessore saturo dell'acquifero a conferma di un ottimale distribuzione del calore fornito.

A valle dell'area vengono installati dei pozzi-barriera che estraggono acqua di falda e olio in continuo. Le fasi liquide dovranno essere separate e successivamente trattate nel caso dell'acqua e smaltite nel caso dell'olio.

Dal punto di vista impiantistico, è necessario un:

- Impianto di trattamento acque per portate in ingresso pari a 432 m³/d. Le

considerazioni sono le stesse che sono state descritte per la tecnica precedentemente analizzata.

- Impianto di trattamento vapori in quanto parte della contaminazione volatilizza e pertanto, deve essere catturata da opportuni pozzi di estrazione trattata e scaricata in atmosfera.
- Impianto di riscaldamento tramite caldaia a metano per immettere nei punti riscaldanti il vapore ad alta temperatura. Ciò comporta dei costi energetici non trascurabili.

In definitiva, da una prima analisi tecnica non si sono riscontrati fattori escludenti e pertanto, questa tipologia verrà valutata anche dal punto di vista economico per delineare l'effettiva applicabilità al sito in questione.

Tabella 3.10 Fattori preferenziali, penalizzanti ed escludenti della tecnica "GHRC".

PREFERENZIALI	PENALIZZANTI	ESCLUDENTI
Recupero più efficace dell'Oil skimming.	Scambio di calore lungo tutto lo spessore del mezzo non saturo	
Raggio di cattura maggiore rispetto a "Oil Skimming".	Necessaria la realizzazione di un impianto di trattamento acque, vapori e una caldaia a metano	
Desorbimento termico del LNAPL in fase residua nel mezzo saturo e non saturo.	Difficoltà di gestione dell'intervento	
Volumi d'acqua da trattare molto contenuti.	Costi di riscaldamento	
Buon confinamento termico sulla verticale		

3.3 Analisi economica

Sebbene non sia stata descritta finora, la tecnica più affidabile ed efficace per la bonifica del sito in esame sarebbe lo scavo e smaltimento in discarica del terreno contaminato. Interventi del genere erano molto diffusi negli anni passati perché da una parte il completamento della

bonifica e il raggiungimento degli obiettivi preposti erano facilmente ottenibili e dall'altra non esistevano adempimenti normativi molto restrittivi a riguardo. Per di più, i costi di smaltimento erano molto più bassi rispetto a quelli presenti attualmente sul mercato.

Negli ultimi anni, però, sia per lo sviluppo di tecniche di bonifiche più all'avanguardia in grado di aggredire selettivamente la contaminazione, sia per prescrizioni normative sempre più limitanti e per i maggiori costi di smaltimento si preferisce trattare la contaminazione in situ ed evitare movimenti di terreni contaminati. In aggiunta, i costi di smaltimento variano con una certa frequenza temporale rendendo difficile anche la pianificazione di un intervento del genere: i costi previsti per lo smaltimento ad inizio anno possono essere molto differenti rispetto a quelli necessari per lo stesso smaltimento al termine dello stesso anno, ad esempio. Ad ogni modo, si può stimare in maniera del tutto indicativa il costo relativo allo scavo e smaltimento del terreno contaminato in modo da poterlo confrontare successivamente con i costi delle tecniche finora analizzate.

L'area da bonificare ha un'estensione superficiale di 90x35 m; lungo la verticale, invece, la contaminazione si estende fino a 8 m di profondità dal p.c. Il volume di scavo è quindi di 25200 m³. Il costo complessivo, come riportato in Tabella 3.11, è dovuto alla somma di due contributi: scavo/rinterro e il conseguente smaltimento dei terreni in opportuna discarica. Non è stata inserita volutamente la voce relativa ai costi di smaltimento della frazione oleosa in quanto non si ha una vera e propria separazione del fluido dallo scavo e quindi ogni stima potrebbe essere poco rappresentativa. Inoltre non si è tenuto conto che su tutta la superficie è presente una soletta in calcestruzzo che rende più difficoltosa e più onerosa la rimozione. Al netto di queste due ulteriori componenti di costo, l'importo dell'intervento supera i 4 milioni di euro come evidenziato nella tabella seguente

Tabella 3.11 costi "scavo e smaltimento dei terreni".

Voce	Quantità	Costo (€)
Scavo e rinterro (m ³)	25'200	62'000
Smaltimento dei terreni (t)	42'840	4'284'000
Costo complessivo (€)		4'346'000

Al costo esorbitante dello smaltimento del terreno si aggiunge la notevole difficoltà logistica nell'individuare una discarica disponibile ad accettare il conferimento di una quantità di terreno così grande.

Questa stima economica e le altre, riportate nei paragrafi successivi, sono state elaborate prendendo come riferimento il “Prezzario della regione Piemonte” del 2018 e dove non possibile, offerte economiche fornite da aziende leader nel settore in campo nazionale ed internazionale. Inoltre, da quest’analisi economica saranno esclusi i costi di progettazione, degli oneri per la sicurezza e l’IVA. Questa scelta è motivata dal fatto che, in uno studio preliminare di fattibilità come questo, l’unico obiettivo consiste nell’individuazione della tecnica più idonea al sito in esame tralasciando a fasi progettuali successive una valutazione economica di dettaglio e onnicomprensiva; infatti in questa valutazione sono considerate solo le voci più rappresentative degli interventi in progetto.

Dall’impossibilità di realizzare un intervento di “scavo e smaltimento” nasce l’esigenza di individuare una tecnica che aggredisca efficacemente la contaminazione in situ con costi d’intervento più contenuti. Per questo motivo si analizzano diverse tecnologie dal punto di vista tecnico-economico al fine di individuare quella più idonea al sito in esame.

3.3.1 Groundwater heat recirculation cell

La stima economica della tecnica in esame secondo la configurazione definita nel paragrafo 2.4 viene suddivisa per semplicità di analisi e confronto nelle seguenti voci:

- 1) Perforazioni e completamento piezometri: questa voce comprende l’installazione dell’attrezzatura nei punti di indagine, le perforazioni degli stessi, il completamento dei piezometri, lo spurgo dei piezometri, lo smaltimento delle acque di spurgo e dei detriti di perforazione (terreni o calcestruzzo nel caso si è in presenza di superfici pavimentate). A seconda della tecnica di bonifica considerata, i pozzi realizzati hanno diverse quantità, profondità di completamento e quote delle finestrate, come riportato nella tabella seguente.

Tabella 3.12 Completamento, finestrate e numero dei pozzi in funzione del loro utilizzo.

Utilizzo dei pozzi	Quantità	Profondità di completamento	Finestrate
Pozzi barriera	10	15 m da p.c.	7-9 m da p.c.
Skimmer a nastro	60	12 m da p.c.	6-10 m da p.c.

- 2) Impianto di trattamento acque: questa voce comprende la fornitura e la posa in opera di un disoleatore statico con filtro a coalescenza, fornitura e posa in opera del filtro a carbone attivo e fornitura a piè d'opera di carbone attivo granulare.
- 3) Recupero olio surnatante: questa voce comprende la fornitura, posa in opera nei piezometri degli skimmer a nastro, la fornitura e posa in opera dei serbatoi annessi per lo stoccaggio dell'olio recuperato e lo smaltimento di quest'ultimo.
- 4) Impianto di riscaldamento: questa voce comprende la fornitura e posa in opera di una caldaia a metano che soddisfi il fabbisogno energetico richiesto ed il consumo energetico previsto per il periodo d'intervento.

Tabella 3.13 Costi relativi alle singole voci.

Voce	Costo (€)
Perforazioni e completamento piezometri	125'000
Impianto di trattamento acque	30'000
Recupero olio surnatante	260'000
Impianto di riscaldamento	475'000
Costo complessivo	890'000

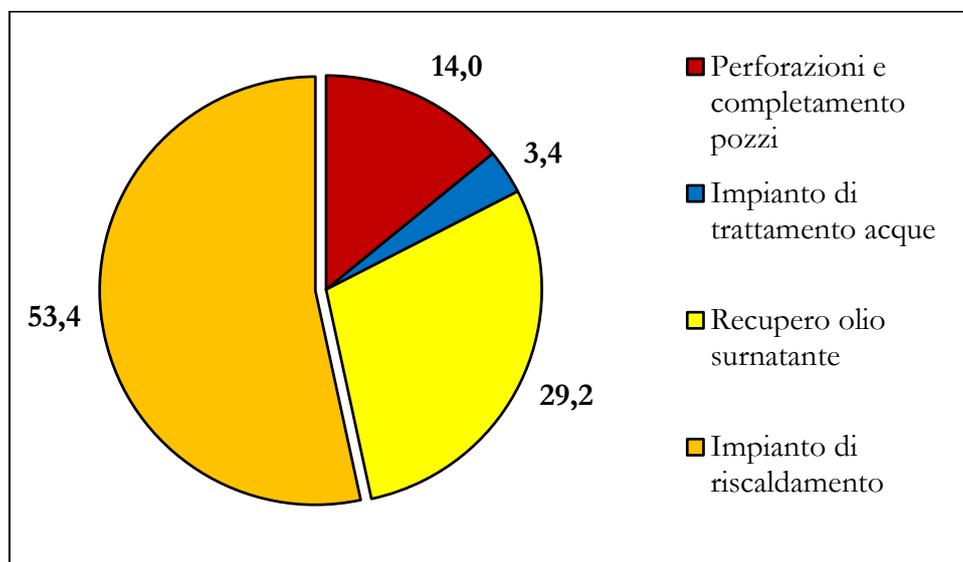


Figura 3.1 Costi delle singole voci (in percentuale) rappresentati su un diagramma a torta.

3.3.2 Thermal conductive heating

La stima economica della tecnica in esame secondo la configurazione identificata nel paragrafo 2.5 viene suddivisa per semplicità di analisi e confronto nelle seguenti voci:

- 1) Perforazioni e completamento piezometri: questa voce comprende l'installazione dell'attrezzatura nei punti di indagine, le perforazioni degli stessi, il completamento dei piezometri e dei tubi chiusi al cui interno vengono posti gli elementi riscaldanti, lo spurgo dei piezometri, lo smaltimento delle acque di spurgo e dei detriti di perforazione (terreni o calcestruzzo nel caso si è in presenza di superfici pavimentate). A seconda della tecnica di bonifica considerata, i pozzi realizzati hanno diverse quantità, profondità di completamento e quote delle finestrate, come riportato nella tabella seguente:

Tabella 3.14 Completamento, finestrate e numero dei pozzi in funzione del loro utilizzo.

Utilizzo dei pozzi	Quantità	Profondità di completamento	Finestrate
Pozzi barriera	5	15 m da p.c.	7-9 m da p.c.
Skimmer a nastro	60	12 m da p.c.	6-10 m da p.c.
Elementi riscaldanti	45	8 m da p.c.	-
Pozzi di estrazione vapori	45	4 m da p.c.	3-4 m da p.c.

- 2) Impianto di trattamento acque: questa voce comprende la fornitura e la posa in opera di un disoleatore statico con filtro a coalescenza, fornitura e posa in opera del filtro a carboni attivi, fornitura a piè d'opera di carbone attivo granulare e la caratterizzazione chimico-fisica delle acque trattate con cadenza mensile per tutta la durata dell'intervento.
- 3) Recupero olio surnatante: questa voce comprende la fornitura, posa in opera nei piezometri degli skimmer a nastro, la fornitura dei serbatoi annessi per lo stoccaggio dell'olio recuperato e lo smaltimento di quest'ultimo.
- 4) Impianto di riscaldamento: questa voce comprende la fornitura e posa in opera di una caldaia a metano che soddisfi il fabbisogno energetico richiesto, la fornitura e posa in opera degli elementi riscaldanti ed il consumo energetico previsto per il periodo d'intervento.

- 5) Impianto di trattamento vapori: questa voce comprende la fornitura posa in opera e gestione di un impianto di estrazione vapori, la fornitura dei serbatoi per lo stoccaggio delle acque di condensa, lo smaltimento di quest'ultime, la fornitura e posa in opera del filtro a carboni attivi, la fornitura a piè d'opera di carbone attivo granulare ed il consumo energetico previsto per l'intera durata dell'intervento.

Tabella 3.15 Costi relativi alle singole voci.

Voce	Costo (€)
Perforazioni e completamento pozzi	190'000
Impianto di trattamento acque	35'000
Recupero olio surnatante	260'000
Impianto di riscaldamento	190'000
Impianto di trattamento vapori	130'000
Costo complessivo	805'000

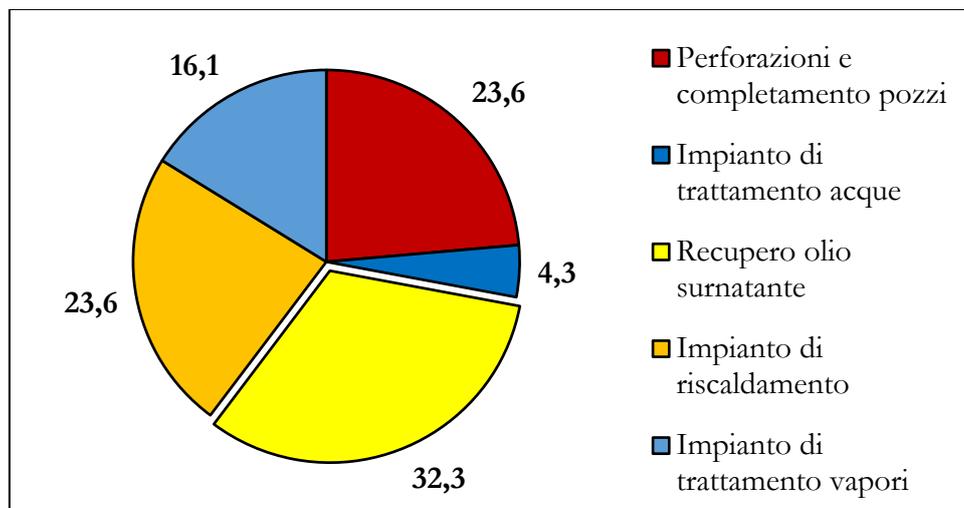


Figura 3.2 Costi delle singole voci (in percentuale) rappresentati su un diagramma a torta.

3.4 Scelta della tecnica di bonifica

Definiti i costi d'intervento delle due tecniche in esame, si confrontano ora i risultati sia tecnici che economici ottenuti e da essi si identifica la tecnica che risulta più adatta a conseguire gli obiettivi di bonifica nel sito in esame.

Le stime economiche descritte nel paragrafo precedente sono state suddivise per semplicità in voci, ovvero in gruppi che comprendono lavorazioni comuni.

In Figura 3.3 sono riportati i costi in migliaia di € delle singole voci per le due tecniche in esame in modo da poter avere un quadro economico di sintesi più chiaro.

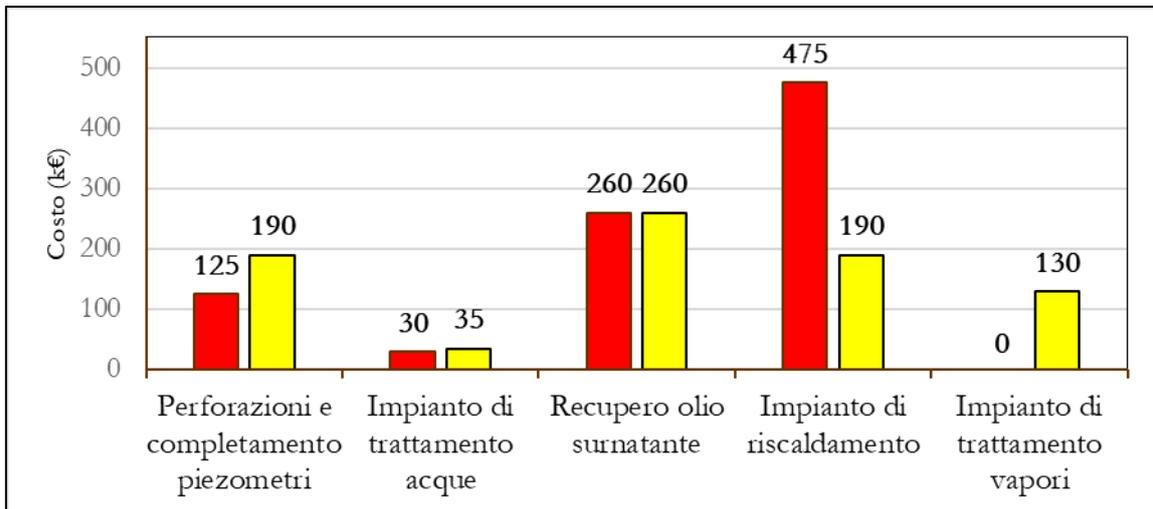


Figura 3.3 Costi delle singole voci per la GHRC (barre in rosso) e per la TCH (barre in giallo).

Analizzando il grafico sovrastante, si possono fare alcune considerazioni sulle singole voci:

- “Perforazioni e completamento piezometri”: nella TCH si ha un costo maggiore per via del quantitativo significativamente maggiore di perfori da realizzare e di piezometri/tubi da completare;
- “Impianto di trattamento acque”: voce meno rappresentativa dal punto di vista economico. C’è una leggera differenza di costo dovuta alla caratterizzazione chimico-fisica delle acque trattate necessaria per la TCH e non prevista invece per la GHRC;
- Recupero olio surnatante: il costo di questa voce è lo stesso per entrambe le tecnologie visto che è prevista l’installazione dello stesso numero di skimmer ed il recupero di un quantitativo d’olio paragonabile;
- Impianto di riscaldamento: nella GHRC si ha un costo superiore di più del doppio rispetto alla TCH. Questa differenza sostanziale è dovuta alla differente tecnica di riscaldamento. La trasmissione di calore per advezione, sfruttata nella prima tecnica, è molto più onerosa rispetto alla trasmissione di calore per conduzione;

- Impianto di trattamento vapori: voce presente solo nella TCH visto che nell'altra tecnica non è prevista l'installazione di un tale impianto.

Se da una parte il confronto economico è abbastanza immediato e di facile interpretazione, dall'altra parte non si può fare un discorso analogo per l'ambito tecnico.

Nei capitoli precedenti sono state pianificate delle configurazioni di progetto che dovrebbero garantire, secondo i risultati delle simulazioni svolte, il soddisfacimento degli obiettivi preposti ed il completamento della bonifica.

Le simulazioni sono effettuate con lo scopo di riprodurre verosimilmente ciò che accadrà nel caso reale imponendo determinati interventi. Tuttavia, il modello riprodotto può divergere abbastanza dal caso reale per via di una serie di parametri non sito-specifici immessi in input (saturazione residua di LNAPL, saturazione irriducibile dell'acqua, tensioni superficiali aria-LNAPL, etc.) o variabili in modo non prevedibile nell'arco della simulazione (eterogeneità del terreno, variazioni piezometriche della falda, etc.). La ricostruzione di un modello che non rappresenta perfettamente il caso reale delinea una configurazione di progetto non ideale che comporta dei possibili costi aggiuntivi per raggiungere gli obiettivi preposti.

Per di più, durante l'intervento vi possono essere problemi relativi alla gestione dell'intervento visto e considerato che si devono coordinare in contemporanea impianti di recupero, di riscaldamento e di trattamento. Vi possono essere quindi imprevisti logistici che possono provocare dei ritardi e quindi dei costi aggiuntivi.

In ultimo come già accennato nei paragrafi precedenti, vi sono diversi problemi connessi al completamento della bonifica nei tempi stabiliti per via della possibilità di riscontrare incrementi di concentrazioni (rebound) al termine dell'intervento, rendendo necessario il trattamento per tempi più lunghi e quindi dei costi aggiuntivi. Un fenomeno di questo tipo si presenta nel caso in cui l'olio presente in fase residua, sia nella zona vadosa che nella zona satura, non viene trattato opportunamente durante la bonifica.

Infatti, per rendere il confronto tra le tecniche il più oggettivo possibile si è cercato di convertire tutte le criticità, i possibili problemi di natura tecnica in costi aggiuntivi appunto "tecnici" rispetto al costo della bonifica stimato nei paragrafi precedenti. In altre parole, si tratta di un approccio che permette di racchiudere in una cifra l'insieme delle voci relative sia alla realizzazione dell'intervento sia ai problemi tecnici che si possono verificare per via di una simulazione in fase di progettazione non affidabile, una gestione della bonifica più complessa del previsto o per il verificarsi di ulteriori fenomeni di contaminazione.

Di conseguenza, sono state definite tre voci che esprimono le possibili criticità in ambito tecnico: affidabilità delle simulazioni, gestione dell'intervento e completamento della bonifica.

Ad ogni voce si assegna un valore che va da 0 a 10 per esprimere indicativamente la percentuale di costo aggiuntivo rispetto al costo iniziale della bonifica che sarà necessaria per risolvere gli eventuali imprevisti.

Questo valore tiene conto sia della probabilità di accadimento di un determinato imprevisto, sia del costo effettivo necessario per risanare una determinata criticità.

Ad ogni modo, per la stima del costo tecnico-economico di ciascuna tecnologia si segue questa procedura:

- Si assegna un valore opportuno per ciascuna voce;
- Si determina il rapporto della somma dei valori delle singole voci rispetto la somma dei valori massimi;
- Il rapporto ottenuto viene moltiplicato per il costo dell'intervento e sommato allo stesso. In altre parole, il rapporto ottenuto rappresenta un indice di affidabilità del progetto pianificato. Ad esempio, se il rapporto risulta pari ad 1 vuol dire che si avranno dei costi d'intervento pari al doppio rispetto a quelli previsti che stanno a dimostrare una qualità di progettazione molto bassa.

Una volta definito l'approccio utilizzato, si determinano i valori delle singole voci sia per la GHRC che per la TCH giustificando opportunamente le scelte effettuate.

Relativamente alla prima tecnica, si possono verificare imprevisti dovuti a:

- Affidabilità delle simulazioni: le eterogeneità del terreno, le variazioni piezometriche non considerate nelle simulazioni e l'utilizzo di alcuni parametri non sito-specifici possono alterare l'effetto termico e la riuscita della tecnica. Si tratta di criticità tangibili ma non quantificabili in questo livello di progettazione: per questo motivo si assegna un valore pari a 2, un valore diverso da zero in quanto la criticità esiste ma non troppo alto per evitare sovrastime eccessive.
- Gestione dell'intervento: la configurazione di progetto prevede la gestione degli skimmer installati nell'area di bonifica, dell'impianto di trattamento acque e dell'impianto di riscaldamento. La gestione in contemporanea di queste unità può portare alla richiesta di personale aggiuntivo ed a diversi tipi di imprevisti (rottura di unità degli impianti ad esempio). Per questi motivi si

assegna un valore pari a 2.

- Completamento della bonifica: la configurazione di progetto agisce selettivamente sulla fase libera e parzialmente sulla fase residua di LNAPL nel mezzo saturo. D'altra parte è inefficace sulla fase residua presente nella zona vadosa. Questa inefficacia provoca probabilmente in fase post-intervento ad incrementi delle concentrazioni. Essendo una criticità concreta e con una probabilità di accadimento abbastanza alta, si assegna un valore di 4.

Nella tabella seguente sono riassunti i valori delle varie voci sopra definiti:

Tabella 3.16 Valori delle voci per la GHRC.

GHRC	
Affidabilità delle simulazioni	2
Gestione dell'intervento	2
Completamento della bonifica	4

Il costo tecnico-economico dell'intervento, determinato dalla somma del costo della bonifica CB stimato nel paragrafo 3.3.1 e dei costi tecnici aggiuntivi CTA, è pari a:

$$Costo = CB + CTA = 890'000 + \left(\frac{2 + 2 + 4}{30}\right) * 890'000 = 1'127'000 \text{ €}$$

Determinati i valori e il costo tecnico-economico per la GHRC, si procede in modo analogo con la TCH. Con questa tecnica si possono verificare imprevisti dovuti a:

- Affidabilità delle simulazioni: rispetto alla tecnica precedente le eterogeneità del terreno e le variazioni piezometriche non considerate nelle simulazioni influenzano di meno la distribuzione termica e la riuscita della tecnica. Infatti il calore viene trasmesso per conduzione, cioè la sua propagazione dipende solo dal gradiente termico. Risulta infatti indipendente dalle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero in esame e per questo motivo si assegna un valore pari a 1.
- Gestione dell'intervento: la configurazione di progetto prevede la gestione degli skimmer installati nell'area di bonifica, dell'impianto di trattamento acque, impianto di trattamento vapori e dell'impianto di riscaldamento. La gestione in contemporanea

di queste unità può portare alla richiesta di personale aggiuntivo ed a diversi tipi di imprevisti (rottura di unità degli impianti ad esempio). Vista la presenza di diversi impianti da dover gestire e far funzionare in contemporanea, la probabilità che si verifichino degli imprevisti è maggiore e per questo motivo si assegna un valore pari a 4.

- Completamento della bonifica: la configurazione di progetto agisce selettivamente sulla fase libera e sulla fase residua di LNAPL nel mezzo non saturo e nel mezzo saturo interessato dalla contaminazione (frangia capillare). A meno di bruschi abbassamenti di falda e conseguente diffusione della contaminazione in zone prima non contaminate, la tecnica dovrebbe essere efficace e sufficiente a soddisfare gli obiettivi preposti. Gli eventuali incrementi di concentrazioni post-intervento possono comunque verificarsi ma con una probabilità inferiore a quella della tecnica precedente. Per questo motivo si assegna un valore pari a 1.

Nella tabella seguente sono riassunti i valori delle varie voci sopra definiti:

Tabella 3.17 Valori delle voci per la TCH.

TCH	
Affidabilità delle simulazioni	1
Gestione dell'intervento	4
Completamento della bonifica	1

Come per la tecnica precedente, il costo tecnico-economico risulta pari a:

$$Costo = CB + CTA = 805'000 + \frac{6}{30} * 805'000 = 966'000 \text{ €}$$

Dai risultati ottenuti e dalla Figura 3.4 si nota come la TCH presenta sia costi di bonifica CB che costi tecnici aggiuntivi CTA inferiori a testimonianza, considerando il livello di dettaglio di questo estratto, di una maggior affidabilità progettuale e di un intervento più mirato che necessita di un capitale inferiore.

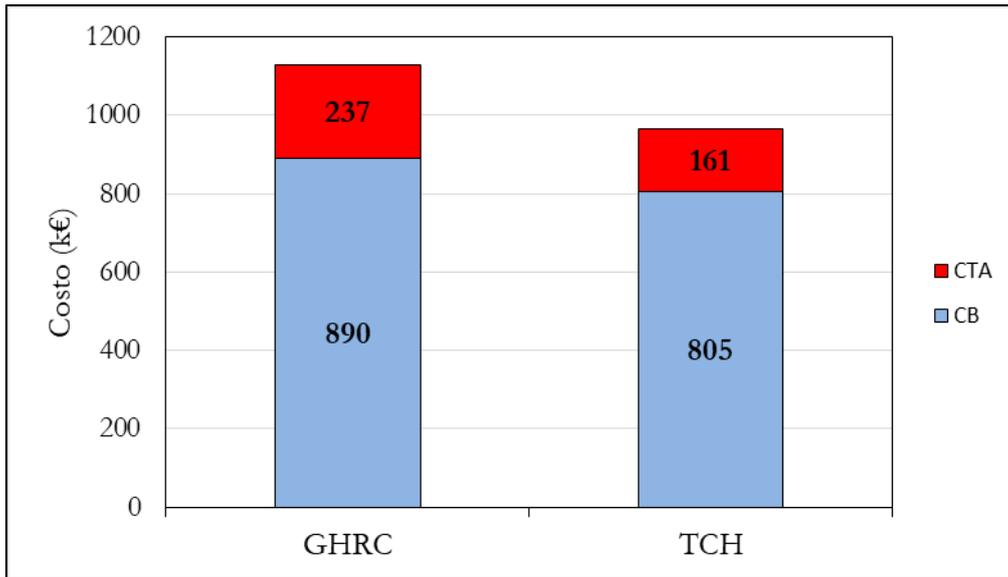


Figura 3.4 Costi tecnico-economici per le due tecniche in esame.

4. CONCLUSIONE

Questo studio ha cercato di individuare la tecnica più idonea per la bonifica di un sito industriale dismesso, contaminato da LNAPL ad elevata viscosità. La peculiarità di questa contaminazione è rappresentata dalla ripartizione dell'olio surnatante in diverse fasi (vapore, disciolta, residua, libera) nelle diverse matrici ambientali (suolo, sottosuolo e acque sotterranee). In particolare, si è concentrata l'attenzione sul LNAPL in fase libera, caratterizzato da una viscosità molto elevata che lo rende di fatto poco mobile, e su quello in fase residua nel mezzo saturo e non saturo, che rappresenta una potenziale sorgente di contaminazione per l'acquifero nel periodo post-intervento.

Queste criticità rendono di fatto inapplicabili tecniche di bonifiche collaudate come il Pump&Treat e richiedono di conseguenza uno studio progettuale molto accurato.

Tenendo presente la necessità di completare la bonifica in tempi quanto più possibile brevi per via del destino del sito (vendita o riqualificazione), si è presa in considerazione inizialmente la tecnica che permetteva il recupero più rapido dell'area, ovvero lo scavo del terreno contaminato e lo smaltimento in discarica. I costi stimati in oltre 4 milioni di euro rendono però questa soluzione impraticabile.

Da questa considerazione è nata l'esigenza di individuare una tecnica più sostenibile economicamente e mirata ad aggredire esclusivamente le zone interessate dalla contaminazione presente in fase libera e residua, in quanto rappresentano le principali criticità del sito in esame.

Oltre alle tradizionali tecniche di recupero di olio surnatante (Oil skimming) si sono analizzate in questo studio di fattibilità tecnico-economico altre tecnologie, atte ad aggredire la contaminazione termicamente (Groundwater heat recirculation cell e thermal conductive heating) o mediante l'aspirazione sottovuoto (Multi phase extraction) per la cattura in contemporanea di aria, olio e acqua di falda. La groundwater heat recirculation cell consiste nella creazione di una "cella di flusso" nell'acquifero, tramite pozzi di presa a valle e di reiniezione a monte, riscaldando l'acqua prelevata con una caldaia a metano. Il thermal conductive heating (TCH) consiste nell'iniezione di aria ad alta temperatura all'interno di tubi chiusi infissi nel terreno in profondità che trasmettono calore per conduzione. Entrambe le tecniche mirano a ridurre la viscosità del LNAPL per favorirne il recupero con oil skimming; il TCH permette inoltre di strappare parte della fase libera e, per questo, richiede il recupero e il trattamento dei vapori. Il Multi Phase Extraction (MPE) consiste nel pompaggio da un

pozzo finestrato in parte nella zona satura e in parte nella zona non satura.

Dal punto di vista tecnico per ciascuna tecnologia in esame è stata definita una configurazione di progetto che, secondo i risultati delle simulazioni svolte, garantisce il soddisfacimento degli obiettivi di bonifica preposti nei tempi prefissati. Da questo primo approfondimento, vengono scartate le tecniche la cui realizzazione e gestione risulta troppo complessa: l'utilizzo dei soli skimmer, che richiederebbe l'installazione di un numero esorbitante di dispositivi di recupero, e la MPE, che nel sito in esame comporta l'estrazione e il trattamento di una portata troppo elevata e insostenibile sia dal punto di vista economico che da quello logistico.

Per le due tecniche selezionate – groundwater heat recirculation cell e TCH – sono stati stimati i costi di bonifica in condizioni ordinarie e i costi da sostenere in caso di imprevisti (ad esempio problemi di gestione dell'impianto o tempi di trattamento più lunghi del previsto), stimati in modo approssimativo in funzione della loro probabilità di accadimento e del costo effettivo necessario per risanare una determinata criticità. I costi delle due tecniche in condizioni ordinarie sono molto simili - 890 k€ per la GHRC e 805 k€ per la TCH – e pertanto la stima dei costi imprevisti è stata utile per dirigere la scelta sulla tecnica del TCH, che ha meno costi imprevisti (161 k€ contro i 237 k€ del GHRC). In aggiunta, la TCH ha il vantaggio di aggredire esclusivamente le zone interessate dalla contaminazione, evitando incrementi di concentrazione nel periodo post-intervento.

Il lavoro svolto evidenzia quali sono le difficoltà nella bonifica dei LNAPL ad elevata viscosità e la necessità di ricercare soluzioni alternative al pump and treat; gli interventi che aggrediscono termicamente la contaminazione con meccanismi advettivi o conduttivi possono rappresentare un'alternativa interessante, e la modellazione numerica di flusso e trasporto di calore nel sottosuolo rappresenta un utile supporto alla progettazione di questi interventi.

5. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] ARPAL, FAQ_Bonifiche, [Online].
- [2] ARPAT, Bonifica siti contaminati, [Online].
- [3] A.Di Molfetta-R.Sethi, *Ingegneria degli acquiferi*, Torino: Springer, 2012.
- [4] ISPRA, Quadro normativo e indicazioni per la bonifica dei siti contaminati.
- [5] Suthan S. Suthersan et al., *Remediation Engineering- Design Concepts*, 2017.
- [6] E. R. L. V. Giampaolo, *Cherts for monitoring hydrocarbon contamination*, 2017.
- [7] COLUMBIA Technologies, Building your casefor NAPL, Mobility, and recovery using a High Resolution Approach, 2014.
- [8] D. e. a. J.Newell, Light Nonaqueous Phase Liquids, *Ground Water Issue*, 2015.
- [9] University of idaho, Introduction to NAPLs. What are NAPLs.
- [10] American Petroleum Institute, «LDRM, User and parameter selection guide,» 2007.
- [11] M. McGee, Rapid remediation by in situ gas thermal remediation at dry cleaner contaminated sites.
- [12] C.Mariotti-P.Lecomte, Diagnostic procedures for petroleum-contaminated sites, WILEY, 1997.
- [13] A. Faisal, Influence of Clay Lens on Migration of Light NonAqueous Phase Liquid in Unsaturated Zone, *ResearchGate*, 2010.
- [14] The Los Angeles LNAPL Working Group, Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPL)- Literature Review, Los Angeles, 2011.