



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze
Direttore Prof. Bernardo Cesare

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA
IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

ANALISI DI RISCHIO APPLICATA AD UN SITO CONTAMINATO DA GASOLIO. MONITORAGGIO DEL SOIL GAS PER LA VERIFICA DEL MODELLO DI VOLATILIZZAZIONE DA SUOLO E FALDA

Relatore: Chiarissimo Prof. Leonardo MASON
Correlatori: Dott. Dario BIAVATI
Dott. Federico FUIN

Laureanda:
Silvia CENTRONE

ANNO ACCADEMICO 2016 - 2017

Sommario

PREMESSA.....	5
CAPITOLO I.....	7
1. CARATTERISTICHE AMBIENTALI DEL SITO OGGETTO D' INDAGINE	8
1.1- Inquadramento catastale	8
1.2 - Perimetrazione del SIN.....	9
1.3 - Caratteristiche litostratigrafiche sito specifiche	10
1.4- Inquadramento geologico di Porto Marghera.....	11
1.5 - Inquadramento idrogeologico.....	14
1.5.1 - Corpi acquiferi nell' area del SIN e relativi parametri idrogeologici	14
CAPITOLO II.....	17
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO PER I SITI CONTAMINATI.....	18
2.1 - Articolo 240: definizioni	18
2.2 - Articolo 242: procedure operative e amministrative	20
2.3 - Articolo 249: Aree contaminate di ridotte dimensioni e procedura semplificata per le operazioni di bonifica.....	25
2.4 - Analisi di rischio.....	26
CAPITOLO III	31
3. I GAS INTERSTIZIALI	32
3.1 - Tecniche di rilevazione dei Composti Volatili	34
3.2 - Rischio di esposizione per inalazione di vapori	35
3.3 - Caratteristiche e installazione delle sonde permanenti.....	36
3.3.1 - Sonde installate all'interno di fori di sondaggio	37
3.3.2 - Sonde in fori creati con la tecnologia direct push	38
3.3.3 - Sonde infisse direttamente nel terreno	39
3.4 - Campionamento: verifiche preliminari.....	39
3.4.1 - Condizioni climatiche.....	40
3.4.2 - Condizioni geologiche e idrogeologiche	40
3.5 - Portata di spurgo e campionamento	41
3.6 - Metodi da campo	42
3.7 - Metodi di campionamento diretto	43
3.7.1 - Campionamento con canister	44
3.8 - Metodi di campionamento indiretto	45
CAPITOLO IV.....	46

4. DESCRIZIONE DEGLI EVENTI.....	47
4.1 - Ricostruzione eventi	47
4.2 - Caratteristiche della sostanza sversata.....	48
4.3 - Messa in sicurezza.....	49
4.3.1- Fase uno	50
4.3.2 - Fase due	51
4.3.3- Impianto di pump and stock	52
4.4 - Piano di caratterizzazione.....	53
4.5 - Risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di suolo	53
4.6 - Risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di acqua.....	55
4.7 - Installazione sonde soil gas	56
4.7.1 - Campionamento soil gas.....	59
4.8 - Risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di fluido interstiziale.....	61
CAPITOLO V	62_Toc498039401
5. ANALISI DI RISCHIO	63
5.1 - Definizione di rischio	63
5.2 - Modalità diretta e inversa nell'analisi di rischio	66
5.3 - Parametri ricercati	68
5.3 - Il modello concettuale del sito.....	69
5.4 - Sorgente di contaminazione	70
5.4.1 - Sorgente in zona insatura - Suolo superficiale	71
5.4.2 - Sorgente in zona insatura - Suolo profondo	75
5.4.3 - Sorgente in zona satura - Falda	78
5.4.4 - Altri parametri riguardanti la sorgente	81
5.5 - Vie di migrazione	82
5.6 - Bersagli.....	87
5.7 - Impiego del software per l'analisi di rischio sanitario	88
5.7.1 - Definizione parametri di input.....	91
5.7.2 - Analisi degli output	100
5.8 - Analisi di rischio sui soil gas.....	103
5.8.1 - Geometria della sorgente e caratteristiche del sito	103
5.8.2 - Definizione delle Concentrazioni Rappresentative alla Sorgente	107
5.8.3 - Calcolo del rischio.....	111
6. CONCLUSIONI	114

Bibliografia	118
--------------------	-----

PREMESSA

Nel Dicembre 2013, a Porto Marghera si è verificato uno sversamento di gasolio da combustione a seguito del deragliamento di una ferrocisterna. Ai sensi del D.Lgs. 152/06 è stato avviato immediatamente il procedimento di ripristino ambientale del sito considerato contaminato. Per valutare lo stato di contaminazione nell'immediato e poi gli effetti delle misure di sicurezza adottate, si sono effettuati sondaggi e installati piezometri. Molte delle sostanze riscontrate dalle analisi dei campioni prelevati sono riconducibili alla sostanza sversata e sono volatili. Sono state installate, dunque, delle sonde Nesty Probe per monitorare il fenomeno della volatilizzazione di soil gas.

Questo lavoro di tesi ha come scopo quello di elaborare per il sito in esame l'Analisi di Rischio Sanitario (AdR) da volatilizzazione di sostanze cancerogene e non, sulla base del superamento delle Concentrazioni soglia di contaminazione (CSC) delle sostanze volatili riscontrate e riconducibili all' evento dannoso avvenuto.

In termini estremamente tecnici, il Risk Assessment viene definito come “processo sistematico per la stima di tutti i fattori di rischio significativi che intervengono in uno scenario di esposizione causato dalla presenza di pericoli”.

La valutazione del rischio, o analisi di rischio, connessa ad un sito inquinato, è al momento una delle procedure più avanzate per la valutazione del grado di contaminazione di un'area e per la definizione delle priorità e modalità di intervento nel sito stesso.

Il processo di valutazione del rischio del sito fornirà il grado di importanza dei rischi potenziali esaminati per il caso specifico, da confrontare con una base di riferimento univoca; tale base di giudizio è il livello di accettabilità fissato in linee guida stabilite da parte di Enti ed Organismi di programmazione e salvaguardia ambientale nazionali e/o internazionali. Per le sostanze cancerogene tale limite (R) è fissato a 10^{-6} , per le sostanze tossiche (HI) a 1.

L'analisi verrà svolta tramite il software Risk net 2.1, che permette l'elaborazione di modelli di volatilizzazione dalle tre sorgenti secondarie: suolo superficiale, suolo profondo e falda; successivamente i risultati verranno confrontati con l' AdR effettuata direttamente sui gas interstiziali per avere un' idea di quanto i modelli si discostino dai risultati ottenuti tramite un approccio meno modellistico quale

quello dell'analisi soil gas. Così facendo si può dunque ridimensionare l'eventuale sovrastima del rischio ed evitare di prendere misure di sicurezza e/o adottare sistemi di bonifica inadatti alle reali condizioni del sito e dei bersagli al suo interno.

CAPITOLO I

CARATTERISTICHE AMBIENTALI DEL SITO
OGGETTO D' INDAGINE

1. CARATTERISTICHE AMBIENTALI DEL SITO OGGETTO D' INDAGINE

1.1- Inquadramento catastale

Il sito oggetto di studio è situato a Porto Marghera (VE), in un'area adiacente ai binari ferroviari del Parco Nuovo, limitrofi a Via Delle Macchine. L'area è di proprietà del Comune di Venezia ed è attualmente in concessione ad una società privata.

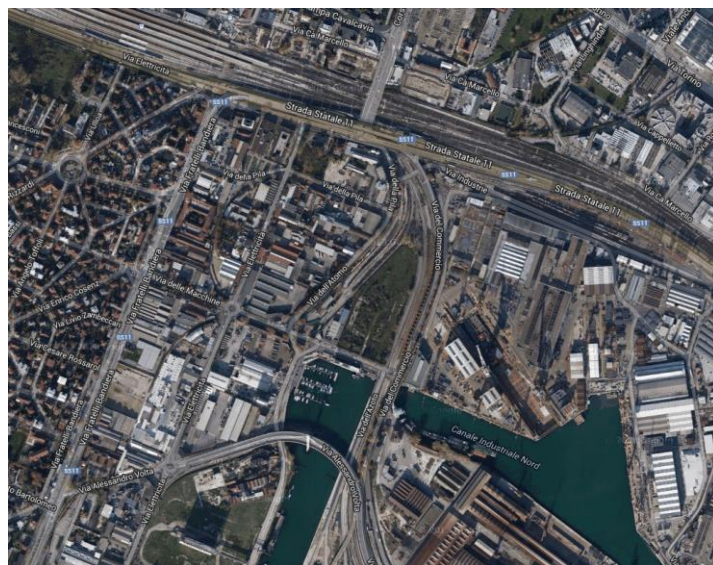


Fig. 1.1- Localizzazione dell'area oggetto d'indagine

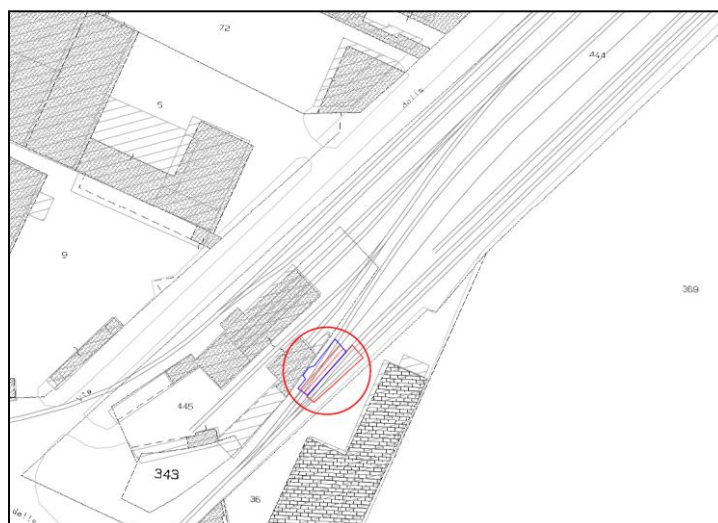


Fig. 1.2 - Localizzazione dell'area oggetto d'indagine (estratto catastale)

1.2 - Perimetrazione del SIN

Precedentemente l'area indagata risultava interna al perimetro del sito di interesse nazionale (SIN) così come definito:

1. dal D.M. 23 febbraio 2000, che stabilisce la perimetrazione delle aree da sottoporre ad interventi di caratterizzazione, messa in sicurezza, bonifica ecc. secondo quanto previsto all'art. 4 della legge 426 del 9 dicembre 1998" "Siti di interesse Nazionale";
2. dal Decreto Ministeriale n. 468 del 18/09/2001, Regolamento recante: "Programma nazionale di bonifica e ripristino ambientale". In particolare, sulla base del Master Plan (*Master Plan per la bonifica dei siti inquinati di Porto Marghera (Atto Integrativo dell'Accordo di Programma per la Chimica di Porto Marghera, approvato con D.P.C.M. del 15/11/01)* che individuava 9 macro-aree, il sito in esame ricadeva nella "Prima Zona" (area in giallo).

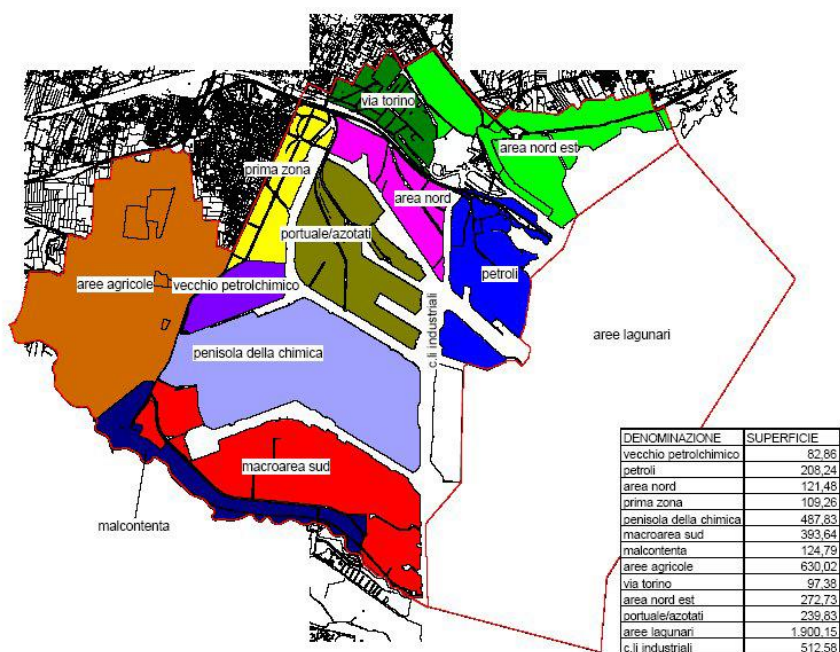


Fig. 1.3 - Delimitazione del Sito di Interesse Nazionale e delle macroaree individuate dal Master Plan

Con Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare n. 144 del 24/04/2013 è stato definito il nuovo perimetro del Sito ad Interesse Nazionale Venezia - Porto Marghera; a seguito della ripерimetrazione, l'area di indagine non risulta ricadere all'interno del SIN.

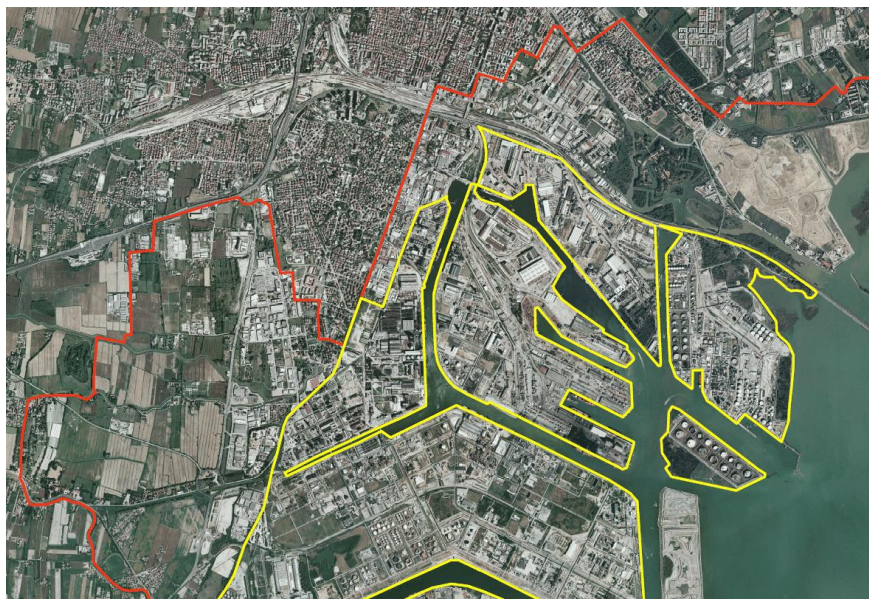


Fig. 1.4 – In giallo la ripерimetrazione del SIN da D.M.A. del 24/04/2013, in rosso il perimetro da Decreto 23/02/2000 ed in azzurro l'indicazione dell'area di indagine

1.3 - Caratteristiche litostratigrafiche sito specifiche

I sondaggi eseguiti sul sito nel Gennaio 2014 in fase di messa in sicurezza dalla ditta "SGM " di Ferrara, incaricata dello svolgimento dei lavori, hanno permesso la ricostruzione litostratigrafica dell'area oggetto d'indagine, fino alla profondità massima di c.a. -9,00 m dal piano campagna, e l'individuazione di 2 livelli di terreno omogenei.

Nel primo livello si è campionato materiale di riporto, costituito da sabbie limose marroni/limi sabbiosi nocciola/limi argillosi nocciola o grigio-verdi, presente fino ad una profondità variabile tra - 0,40 metri (S10) e -2,00 metri (Parete Est B- Parete Est C) da p.c.; nella porzione più superficiale è presente un livello di ballast ferroviario.

Il secondo livello si è riscontrato essere costituito da sabbie limose/limi sabbiosi color grigio-nocciola con spessore variabile tra 1,20 metri (S8) e 5,90 metri (S7) fino alla massima profondità indagata (-9,00 metri in corrispondenza di S7).

In corrispondenza di alcuni sondaggi (S6, S7, S8, S10, S11, Parete Est A e C) sono stati rilevati livelli non continui di limi argillosi color nocciola con concrezioni calcaree, talvolta con intercalazioni di sabbie fini limose, aventi spessori variabili tra 0,40 metri (Parete Est C) e 1,10 metri (S8).

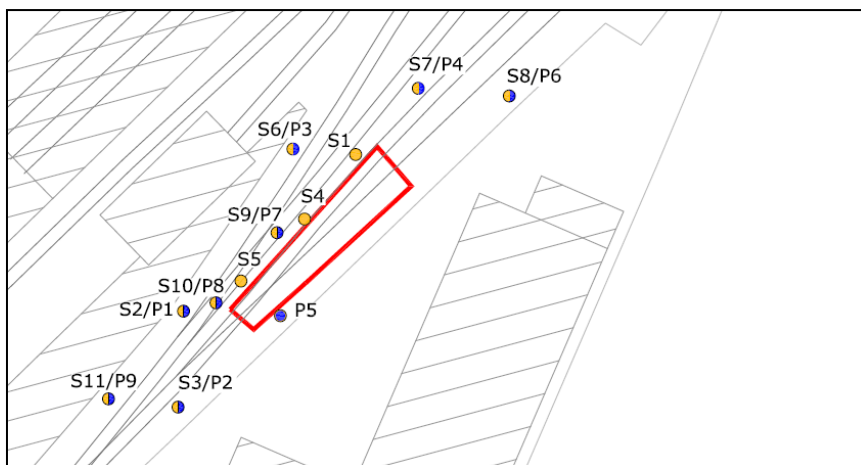


Fig. 1.5 - Sondaggi eseguiti e piezometri installati (Indagine conoscitiva)

L'area in esame presenta in linea generale le caratteristiche geologiche e idrogeologiche tipiche della propria macro- area, che verranno appunto descritte nei paragrafi successivi in maniera quanto più esaustiva in modo tale da inquadrare non solo l'area circoscritta all' indagine ma anche l'ambiente geologico nel quale è inserita.

1.4- Inquadramento geologico di Porto Marghera

Situata nella fascia costiera della pianura Padano-Veneta, Porto Marghera si identifica con la parte più meridionale della terraferma comunale veneziana che si affaccia alla laguna centrale di Venezia. Dal punto di vista morfologico, Porto Marghera è sita lungo la gronda lagunare; il territorio di gronda è uno degli elementi fondamentali dell'ecosistema lagunare nel quale uno dei fattori essenziali è il rapporto esistente fra l'idrologia superficiale, la falda freatica e le acque lagunari. L'ambiente lagunare, in cui si inserisce l'area di studio, deve la sua morfologia attuale ad una lunga e complessa serie di fenomeni sia naturali che antropici iniziati ventimila anni fa, in corrispondenza della massima estensione della glaciazione wurmiana.

La geologia dell'area è riconducibile ad un quadro complesso ad elevata variabilità laterale, dove l'elemento dominante è dato da una serie di corpi sabbiosi anastomizzati allungati in senso Ovest-Est, talora sovrapposti tra loro

fino a formare spessori di sabbie anche di una ventina di metri. Nelle parti dove i corpi sabbiosi sono assenti o tendono a chiudersi si ha una netta prevalenza di sedimenti fini (argille e limi) confermando un'elevata variabilità litologica laterale e verticale.

Altri elementi caratteristici del sistema geologico sono la presenza di un livello diffusamente presente (ma non continuo sull'intera area) di argille e limi sovraconsolidati, noto con il termine di "caranto", originatosi in coincidenza del limite Pleistocene-Olocene.

E' emersa inoltre la presenza di torbe in livelli che appaiono dotati di continuità laterale.

La serie stratigrafica tipo dei sedimenti che si sono depositati sulla zona negli ultimi 18.000 anni è stata bene sintetizzata nello schema proposto da Gatto e Previatello qui di seguito riportata:

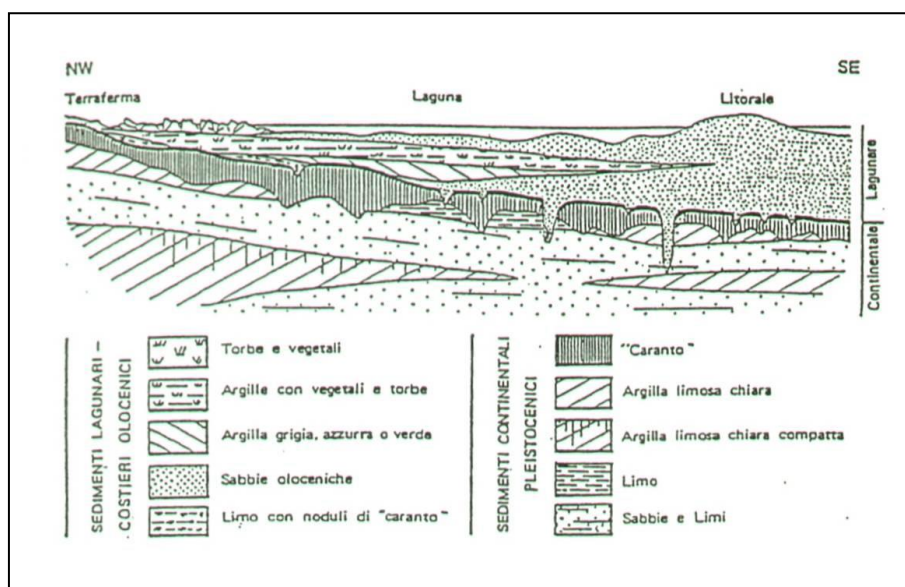


Fig. 1.6 - Serie stratigrafica tipo (da Gatto e Previatello, 1974)

In sintesi il quadro geologico di riferimento può essere così schematizzato:

- **Materiale di riporto:** utilizzato in passato per la bonifica per colmata dell'area perilagunare; presenta uno spessore che varia da 0 m, soprattutto nelle zone agricole occidentali, fino a oltre 6 m, nell'area industriale. Il riporto ospita localmente un acquifero;

- Caranto: si presenta come uno strato di spessore variabile mediamente tra 1 e 2 metri, costituito da limo argilloso o argilla sovraconsolidata, a causa della lunga pedogenesi, con colorazioni screziate dall'ocra al grigio, contenente comuni noduli carbonatici duri con diametro da pochi mm ad alcuni cm. ma non continuo; tale discontinuità è da associare all'erosione del paleosuolo da parte di corsi d'acqua successivi oppure ad un mancato verificarsi di condizioni pedogenetiche. La formazione del caranto avviene infatti per lisciviazione dei carbonati dalla superficie e successivo accumulo nel primo strato impermeabile sottostante, con contestuale consolidazione per espulsione d'acqua (disseccamento ed alterazione per esposizione subaerea) dei sedimenti alluvionali limoso-argillosi al tetto della serie continentale wurmiana.

- Livelli torbosi continui: Le torbe sono associate, nella quasi totalità dei casi, a sedimenti limoso-argillosi e sono composte di resti vegetali più o meno decomposti. La materia organica che le ha originate si è accumulata in un ambiente alluvionale, probabilmente un bacino interfluviale, in suoli più o meno saturi d'acqua caratterizzati da un'ampia variabilità sia orizzontale che verticale, dove si sono alternati e susseguite zone dinamiche (a deposizione più attiva quali i canali meandriiformi, con ambiti a diversa competenza di corrente e accompagnati da apparati arginali) e zone a deposizione più occasionale (rappresentate da piane d'erosione, morfologicamente più stabili per la crescita della vegetazione o meandri abbandonati). Nell'area di interesse le torbe si rinvenivano in forma di piccole lenti sparse o livelli continui, di spessore dai 2 ai 20 cm, raramente in consistenze maggiori nei primi venti metri dal piano campagna; il livello di torba è immediatamente sottostante all'inizio di una fase a deposizione più grossolana, spesso erosiva, sugli stessi limi-argillosi torbosi.

- Quattro corpi sabbiosi: si allungano da Ovest verso Est, sono in parte idrogeologicamente connessi tra loro e caratterizzati da spessori continui, fino a oltre 10-20 metri, con collegamenti con strutture analoghe a monte. Nel dettaglio, da sud verso nord si incontrano:

- *corpo sabbioso di Fusina*: corpo per lo più tabulare con spessori massimi compresi fra -2 e -13 m. s.l.m. e larghezza incerta poiché il limite sud risulta non definito;

- *corpo sabbioso di Malcontenta*: successione di corpi sabbiosi sovrapposti, di larghezza totale attorno a 800 m, con una parte profonda compresa circa fra -10

e almeno -30 m. s.l.m. Essa è collegata ad una parte più superficiale, spostata di qualche centinaio di metri verso nord, di spessore analogo e tetto a circa -3 m. s.l.m. Spostandosi verso est, il corpo tende a dividersi in due distinti corpi sabbiosi separati da un livello di sedimenti fini;

➤ *corpo sabbioso dell'area portuale*: corpo sabbioso largo circa 400 m e di spessore compreso fra -3 e -18 m. s.l.m. che sembra impostato sulla direttrice che da Salzano attraversa Spinea e Chirignago fino al centro di Marghera;

➤ *corpo sabbioso di viale San Marco*: corpo sabbioso tabulare di larghezza imprecisata ma sicuramente superiore a 1200 m e spessore attorno a 8/9 metri; verso l'area dell'Osellino, a nord, presenta un approfondimento con le quote del letto attorno a 12/13 metri s.l.m.

➤ Il tetto degli acquiferi significativi contenuti nei suddetti corpi sabbiosi si trova a profondità comprese tra -10,8 e +1,8 m s.l.m. Considerato che le quote del piano campagna variano da +0,5 e +4,0 m s.l.m., il tetto del primo acquifero si trova tra 2 e 15 m circa dal piano campagna.

- Aree a sedimentazione fine: almeno fino a 10 – 15 m di profondità, principalmente nella parte mediana del SIN, tra il corpo sabbioso di Malcontenta e quello dell'area portuale.

1.5 - Inquadramento idrogeologico

1.5.1 - Corpi acquiferi nell'area del SIN e relativi parametri idrogeologici

Dal punto di vista idrogeologico il modello litostratigrafico del sottosuolo di Porto Marghera, strutturato in alternanze di orizzonti a bassissima e bassa permeabilità (acquiclude - acquitardo) ed orizzonti prevalentemente sabbiosi dotati di maggiore permeabilità (acquifero), si inquadra in quello che viene definito il sistema acquifero multifalda della bassa pianura veneta.

L'elevato grado di variabilità geologica dei primi metri di sottosuolo dell'area ha determinato un

assetto idrogeologico molto complesso, disomogeneo ed anisotropo, al quale va aggiunta l'interazione tra le acque sotterranee e superficiali dei canali di terraferma e lagunari, della laguna stessa, un sistema idraulico artificiale spesso

influenzato dalla presenza di diaframmi impermeabili e governato da impianti idrovori (nella parte a monte della zona industriale) ed emungimenti a fini ambientali che, in alcuni settori del territorio, determinano variazioni delle direzioni di deflusso “naturale” della falda.

Il quadro idrogeologico di riferimento del SIN è rappresentato da 4 corpi acquiferi: viale San Marco, area portuale, Malcontenta e Fusina. All'interno di essi si hanno i maggiori valori di trasmissività dovuti agli importanti spessori di materiali a sabbia medio- fine permeabili (da 6 m a 15 m), talvolta alternata a strati di sabbia-limosa.

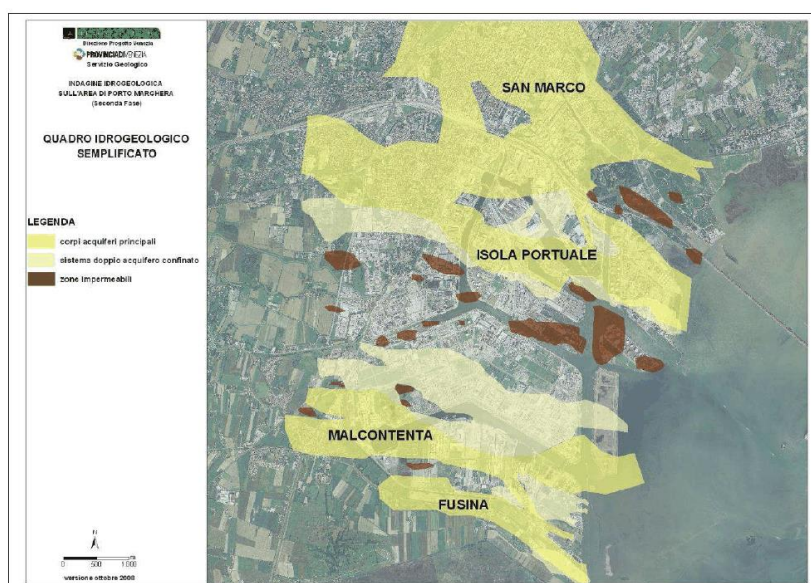


Fig 1.7 - Quadro idrogeologico semplificato dell'area S.I.N. In rosso l'area di indagine

I limiti di questi corpi non corrispondono ad una variazione laterale netta di granulometria, ma sono stati scelti “convenzionalmente” in relazione alla diminuzione di spessore degli strati sabbiosi.

Al di fuori di questi limiti il sottosuolo è costituito da alternanze di materiali impermeabili e permeabili in cui però non si evidenziano spessori significativi. Anche il sottosuolo che non ricade all'interno dei limiti dei corpi acquiferi tracciati può essere sede di una “falda”, ma in modo subordinato in termini di trasmissività rispetto ai corpi acquiferi. I principali corpi sedimentari sabbiosi possono avere infatti valori di trasmissività di 2-3 ordini di grandezza superiori rispetto a quelli a bassa trasmissività: si passa da trasmissività dell'ordine di $10^{-3}/10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ a valori $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Ciò significa che a parità di gradiente idraulico si

può teoricamente avere un flusso idrico sotterraneo con portate di 100-1000 volte superiori nei principali corpi sabbiosi rispetto ai corpi circostanti.

Riguardo la permeabilità, si è stimato che quella dei principali corpi acquiferi ha valori tipici (mediani) compresi tra $3 \cdot 10^{-5}$ e $1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Il regime piezometrico all'interno del SIN è influenzato principalmente dalle maree.

I gradienti idraulici risultano generalmente bassi o nulli ($<1\text{‰}$) e costanti nel tempo, se filtrati delle oscillazioni di marea e dei fattori antropici (emungimenti).

Le velocità ed i flussi idrici sotterranei tendono ad essere bassi/nulli anch'essi, in relazione al gradiente basso/nullo. Il flusso idrico sotterraneo per ciascuno dei corpi sabbiosi viene valutato dell'ordine di un litro al secondo nella direzione regionale (NW – SE), ovvero una quantità insignificante rispetto agli acquiferi presenti in altre parti del Veneto; tale flusso irrisorio risulta spesso condizionato e a volte invertito sia dalla marea che da fattori antropici.

CAPITOLO II

NORMATIVA DI RIFERIMENTO PER I SITI CONTAMINATI

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO PER I SITI CONTAMINATI

Nel presente capitolo si andrà ad illustrare cosa prevede la vigente normativa per i siti contaminati. Qualsiasi operazione effettuata sul sito oggetto di questa tesi, infatti, è stata progettata e portata a termine facendo rigoroso riferimento a quanto prescritto in materia dalla legge italiana.

Le principali norme tecniche per la bonifica ed il ripristino ambientale dei terreni e delle acque inquinate sono regolamentate dall'attuale normativa italiana Decreto Legislativo n.152 "*Norme in materia ambientale*", entrata in vigore il 29/04/2006; tale decreto definisce i livelli di approfondimenti tecnici in cui deve essere articolato un progetto di bonifica.

In particolare, la materia è disciplinata dagli Art. 239 – 253 e dagli allegati 1-5 del Titolo V "Bonifica di siti contaminati" della Parte Quarta "Norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati" del detto Decreto Legislativo.

2.1 - Articolo 240: definizioni

Prima di entrare nel merito della procedura operativa/amministrativa inerente alla bonifica di siti contaminati, si riportano qui di seguito alcune definizioni (quelle che più verranno impiegate nei capitoli successivi) estratte dall'art. 240 "*definizioni*":

- sito: l'area o porzione di territorio, geograficamente definita e determinata, intesa nelle diverse matrici ambientali (suolo, materiali da riporto, sottosuolo ed acque sotterranee) e comprensiva delle eventuali strutture edilizie e impiantistiche presenti (www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile2006,152).

- Concentrazioni soglia di contaminazione (CSC): i livelli di contaminazione delle matrici ambientali che costituiscono valori al di sopra dei quali è necessaria la caratterizzazione del sito e l'analisi di rischio sito specifica, come individuati nell'allegato 5 alla parte quarta del presente decreto. Nel caso in cui il sito potenzialmente contaminato sia ubicato in un'area interessata da fenomeni antropici o naturali che abbiano determinato il superamento di una o più concentrazioni soglia di contaminazione, queste ultime si assumono pari al valore

di fondo esistente per tutti i parametri superati ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).

- Concentrazioni soglia di rischio (CSR): i livelli di contaminazione delle matrici ambientali, da determinare caso per caso con l'applicazione della procedura di analisi di rischio sito specifica secondo i principi illustrati nell'allegato 1 alla parte quarta del presente decreto e sulla base dei risultati del piano di caratterizzazione, il cui superamento richiede la messa in sicurezza e la bonifica. I livelli di concentrazione così definiti costituiscono i livelli di accettabilità per il sito ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).

- Sito potenzialmente contaminato: un sito nel quale uno o più valori di concentrazione delle sostanze inquinanti rilevati nelle matrici ambientali risultino superiori ai valori di concentrazione soglia di contaminazione (CSC), in attesa di espletare le operazioni di caratterizzazione e di analisi di rischio sanitario e ambientale sito specifica, che ne permettano di determinare lo stato o meno di contaminazione sulla base delle concentrazioni soglia di rischio (CSR) ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).

- Sito contaminato: un sito nel quale i valori delle concentrazioni soglia di rischio (CSR), determinati con l'applicazione della procedura di analisi di rischio di cui all'allegato 1 alla parte quarta del presente decreto sulla base dei risultati del piano di caratterizzazione, risultano superati ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).

- Sito non contaminato: un sito nel quale la contaminazione rilevata nelle matrici ambientali risulti inferiore ai valori di concentrazione soglia di contaminazione (CSC) oppure, se superiore, risulti comunque inferiore ai valori di concentrazione soglia di rischio (CSR) determinate a seguito dell'analisi di rischio sanitario e ambientale sito specifica ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).

- Messa in sicurezza d'emergenza: ogni intervento immediato o a breve termine, da mettere in opera nelle condizioni di emergenza in caso di eventi di contaminazione repentini di qualsiasi natura, atto a contenere la diffusione delle sorgenti primarie di contaminazione, impedirne il contatto con altre matrici presenti nel sito e a rimuoverle, in attesa di eventuali ulteriori interventi di bonifica o di messa in sicurezza operativa o permanente ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).

- Messa in sicurezza operativa: l'insieme degli interventi eseguiti in un sito con attività in esercizio atti a garantire un adeguato livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente, in attesa di ulteriori interventi di messa in sicurezza permanente o bonifica da realizzarsi alla cessazione dell'attività. Essi comprendono altresì gli interventi di contenimento della contaminazione da mettere in atto in via transitoria fino all'esecuzione della bonifica o della messa in sicurezza permanente, al fine di evitare la diffusione della contaminazione all'interno della stessa matrice o tra matrici differenti. In tali casi devono essere predisposti idonei piani di monitoraggio e controllo che consentano di verificare l'efficacia delle soluzioni adottate ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).
- Messa in sicurezza permanente: l'insieme degli interventi atti a isolare in modo definitivo le fonti inquinanti rispetto alle matrici ambientali circostanti e a garantire un elevato e definitivo livello di sicurezza per le persone e per l'ambiente. In tali casi devono essere previsti piani di monitoraggio e controllo e limitazioni d'uso rispetto alle previsioni degli strumenti urbanistici ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).
- Bonifica: l'insieme degli interventi atti ad eliminare le fonti di inquinamento e le sostanze inquinanti o a ridurre le concentrazioni delle stesse presenti nel suolo, nel sottosuolo e nelle acque sotterranee ad un livello uguale o inferiore ai valori delle concentrazioni soglia di rischio (CSR) ([www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile 2006](http://www.reteambiente.it/normativa/2099/Dlgs3aprile%202006),152).

2.2 - Articolo 242: procedure operative e amministrative

Di seguito un sunto delle fasi principali, descritte più ampiamente dalla normativa, in materia operativa e amministrativa, per rendere quanto più chiari e semplici da comprendere gli interventi con cui si è deciso di approcciarsi al sito in esame, di cui si tratterà nei capitoli successivi. E' importante precisare come dal punto di vista operativo, per quanto concerne le fasi progettuali già esplicate, si sia fatto riferimento alle indicazioni dettagliatamente descritte negli allegati 1-5 al Titolo V della parte quarta, di cui nel presente capitolo si farà solo cenno.

Al verificarsi di un evento che sia potenzialmente in grado di contaminare il sito, il responsabile dell'inquinamento mette in opera entro ventiquattro ore le misure necessarie di prevenzione e ne dà immediata comunicazione ai sensi e con le modalità di cui all'articolo 304, comma 2. La medesima procedura si applica all'atto di individuazione di contaminazioni storiche che possano ancora comportare rischi di aggravamento della situazione di contaminazione (*Dlgs 152/2006, art 242, comma 1*).

Il responsabile dell'inquinamento, attuate le necessarie misure di prevenzione, svolge, nelle zone interessate dalla contaminazione, un'indagine preliminare sui parametri oggetto dell'inquinamento e, ove accerti che il livello delle concentrazioni soglia di contaminazione (CSC) non sia stato superato, provvede al ripristino della zona contaminata, dandone notizia, con apposita autocertificazione, al Comune ed alla Provincia competenti per territorio entro quarantotto ore dalla comunicazione. L'autocertificazione conclude il procedimento di notifica di cui al presente articolo, ferme restando le attività di verifica e di controllo da parte dell'autorità competente da effettuarsi nei successivi quindici giorni (*Dlgs 152/2006, art 242, comma 2*).

Qualora l'indagine preliminare accerti l'avvenuto superamento delle CSC anche per un solo parametro, il responsabile dell'inquinamento ne dà immediata notizia al Comune ed alle Province competenti per territorio con la descrizione delle misure di prevenzione e di messa in sicurezza di emergenza adottate. Nei successivi trenta giorni, presenta alle predette amministrazioni, nonché alla Regione territorialmente competente il piano di caratterizzazione. Entro i trenta giorni successivi la Regione, convocata la conferenza di servizi, autorizza il piano di caratterizzazione con eventuali prescrizioni integrative. L'autorizzazione regionale costituisce assenso per tutte le opere connesse alla caratterizzazione (*Dlgs 152/2006, art 242, comma 3*).

Sulla base delle risultanze della caratterizzazione, al sito è applicata la procedura di analisi del rischio sito specifica per la determinazione delle concentrazioni soglia di rischio (CSR). Entro sei mesi dall'approvazione del piano di caratterizzazione, il soggetto responsabile presenta alla Regione i risultati dell'analisi di rischio. La conferenza di servizi convocata dalla Regione, a seguito dell'istruttoria svolta in contraddittorio con il soggetto responsabile, cui è dato un

preavviso di almeno venti giorni, approva il documento di analisi di rischio entro i sessanta giorni dalla ricezione dello stesso (*Dlgs 152/2006, art 242, comma 4*).

Qualora gli esiti della procedura dell'analisi di rischio dimostrino che la concentrazione dei contaminanti presenti nel sito è inferiore alle concentrazioni soglia di rischio, la Conferenza dei servizi, con l'approvazione del documento dell'analisi del rischio, dichiara concluso positivamente il procedimento. In tal caso la Conferenza di servizi può prescrivere lo svolgimento di un programma di monitoraggio sul sito (*Dlgs 152/2006, art 242, comma 5*).

Qualora gli esiti della procedura dell'analisi di rischio dimostrino che la concentrazione dei contaminanti presenti nel sito è superiore ai valori di concentrazione soglia di rischio (CSR), il soggetto responsabile sottopone alla Regione, nei successivi sei mesi dall'approvazione del documento di analisi di rischio, il progetto operativo degli interventi di bonifica o di messa in sicurezza, operativa o permanente, e, ove necessario, le ulteriori misure di riparazione e di ripristino ambientale, al fine di minimizzare e ricondurre ad accettabilità il rischio derivante dallo stato di contaminazione presente nel sito. Per la selezione delle tecnologie di bonifica in situ più idonee, la Regione può autorizzare l'applicazione a scala pilota, in campo, di tecnologie di bonifica innovative, anche finalizzata all'individuazione dei parametri di progetto necessari per l'applicazione a piena scala, a condizione che tale applicazione avvenga in condizioni di sicurezza con riguardo ai rischi sanitari e ambientali. Con il provvedimento di approvazione del progetto sono stabiliti anche i tempi di esecuzione, indicando altresì le eventuali prescrizioni necessarie per l'esecuzione dei lavori ed è fissata l'entità delle garanzie finanziarie, in misura non superiore al cinquanta per cento del costo stimato dell'intervento, che devono essere prestate in favore della Regione per la corretta esecuzione ed il completamento degli interventi medesimi (*Dlgs 152/2006, art 242, comma 7*).

Le indagini ed attività istruttorie sono svolte dalla Provincia, che si avvale della competenza tecnica dell'Agenzia regionale per la protezione dell'ambiente e si coordina con le altre amministrazioni (*Dlgs 152/2006, art 242, comma 12*).

La procedura di approvazione della caratterizzazione e del progetto di bonifica si svolge in Conferenza di servizi convocata dalla Regione e costituita dalle amministrazioni ordinariamente competenti a rilasciare i permessi, autorizzazioni e concessioni per la realizzazione degli interventi compresi nel piano e nel

progetto. Compete alla Provincia rilasciare la certificazione di avvenuta bonifica. Qualora la Provincia non provveda a rilasciare tale certificazione entro trenta giorni dal ricevimento della delibera di adozione, al rilascio provvede la Regione (*Dlgs 152/2006, art 242, comma 13*).

Di seguito viene riportato un diagramma riassuntivo dell' iter appena descritto:

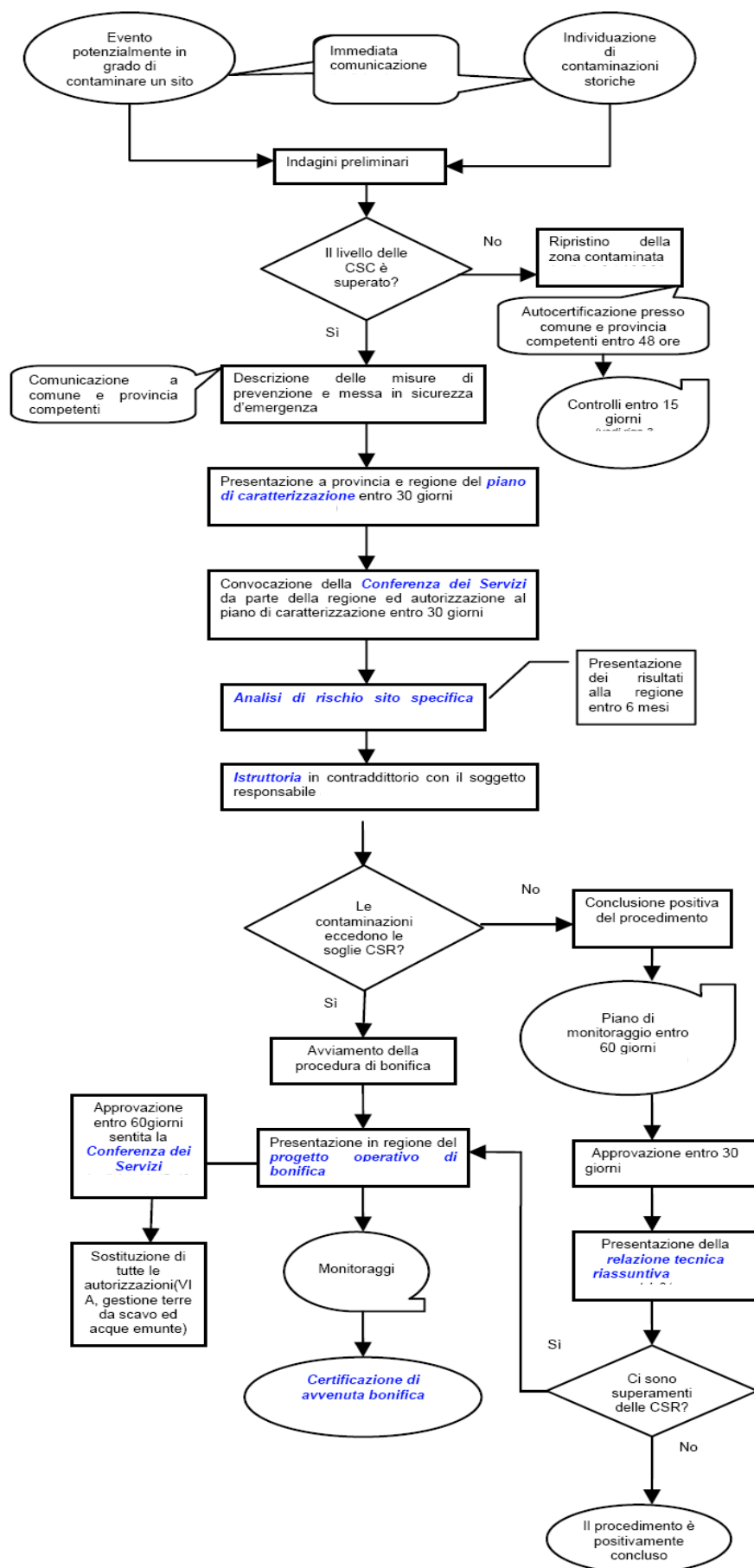


Fig. 2.1 – Schema di flusso della progettazione degli interventi di bonifica dei terreni

2.3 - Articolo 249: Aree contaminate di ridotte dimensioni e procedura semplificata per le operazioni di bonifica

Il D.Lgs. n. 152/06 prevede la possibilità di applicare un iter procedurale diverso da quanto definito dall'Art. 242 per i siti di ridotte dimensioni (quali, ad esempio, la rete di distribuzione carburanti) oppure per eventi accidentali che interessino aree circoscritte, anche nell'ambito di siti industriali, di superficie non superiore a 1000 metri quadri, come nel caso del sito in esame. Il principio che guida gli interventi si basa sulla semplificazione delle procedure amministrative da seguire nel caso di superamento delle CSC .

Qualora invece oltre agli interventi di messa in sicurezza d'emergenza siano necessari interventi di bonifica, il soggetto responsabile può scegliere una delle seguenti alternative:

- a) Bonifica riportando i valori di contaminazione del sito ai livelli di soglia di contaminazione Csc (senza effettuare l'analisi di rischio).
- b) Bonifica portando i valori di contaminazione del sito ai livelli di soglia di rischio CSR effettuando l'Analisi di Rischio.

In entrambi i casi verrà presentato alle Autorità competenti un unico progetto di bonifica che comprenderà:

1. la descrizione della situazione di contaminazione riscontrata a seguito delle attività di caratterizzazione eseguite,
2. gli eventuali interventi di messa in sicurezza d'emergenza adottati o in fase di esecuzione per assicurare la tutela della salute e dell'ambiente,
3. la descrizione degli interventi di bonifica da eseguire sulla base dei risultati della caratterizzazione per riportare la contaminazione ai valori di CSC oppure dell'analisi di rischio sito-specifica di cui all'allegato 1 per portare la contaminazione ai valori di CSR.

Tale progetto di bonifica dovrà essere approvato dalle autorità competenti, entro 60 giorni dalla presentazione dello stesso, prima dell'esecuzione degli interventi di bonifica. *(Dlgs 152/2006, art 249, Allegato 4 al Titolo V della Parte quarta).*

2.4 - Analisi di rischio

Il fine di questo lavoro, passando per la normativa citata nei paragrafi precedenti e tramite procedure che verranno trattate nei capitoli successivi, è proprio quello di sviluppare un'Analisi di Rischio. Nello specifico, questo tipo di analisi può essere mirata alla definizione degli obiettivi di bonifica da applicare al sito oggetto di contaminazione, o avere un carattere strettamente sanitario. La grandezza rischio, in tutte le sue diverse accezioni, è strettamente legata a componenti probabilistiche.

L'analisi di rischio si può applicare prima, durante e dopo le operazioni di bonifica o messa in sicurezza.

Nella sua applicazione per definire gli obiettivi di risanamento si deve tener conto che la probabilità non è legata all'evento di contaminazione già avvenuto, quanto alla natura probabilistica degli effetti nocivi che la contaminazione, o meglio l'esposizione ad un certo contaminante, può avere sui ricettori finali (*DLgs 152/2006, Allegato 1 al Titolo V della Parte quarta*).

Come riportato nella normativa, si fa riferimento a due criteri-soglia di intervento quando si ha a che fare con un sito contaminato: il primo (CSC, di cui è riportata la definizione al paragrafo 2.1) da considerarsi valore di attenzione, superato il quale occorre svolgere una caratterizzazione, ed il secondo (CSR, anche tale definizione al paragrafo 2.1) che identifica i livelli di contaminazione residua accettabili. Le CSR vengono calcolate mediante Analisi di Rischio e su di esse si impostano gli interventi di messa in sicurezza e/o di bonifica.

Secondo l'allegato 1 al Titolo V della Parte quarta del DLgs 152 del 2006 " *Sulla base della struttura del processo decisionale di "analisi di rischio", indipendentemente dal tipo di metodologia impiegata, dovranno essere parametrizzate le seguenti componenti: contaminanti indice, sorgenti, vie e modalità di esposizione, ricettori finali*".

Particolare attenzione, dunque, dovrà essere posta nella scelta delle sostanze di interesse (contaminanti indice) da sottoporre ai calcoli di analisi di rischio. Ai fini di una piena accettazione dei risultati dovrà essere svolta con cura la scelta dei parametri da utilizzare nei calcoli; tale scelta che dovrà rispondere sia a criteri di conservatività (il principio della cautela è intrinseco alla procedura di Analisi di

Rischio), che a quelli di sito-specificità ricavabili dalle indagini di caratterizzazione svolte.

La scelta dei contaminanti indice, desunti dai risultati della caratterizzazione, deve tener conto dei seguenti fattori:

- Superamento della o delle CSC, ovvero dei valori di fondo naturali.
- I livelli di tossicità relativi ad ogni contaminante.
- Il rispettivo grado di mobilità e persistenza nelle varie matrici ambientali.
- La correlabilità di queste sostanze ad/alle attività svolta/e nel sito.
- Frequenza dei valori superiori al CSC.

Inoltre fondamentale come presupposto all'Analisi di Rischio è l'elaborazione di un modello concettuale del sito.

Il Modello Concettuale costituisce la base per l'applicazione dell'Analisi e dovrà verificare gli scenari di esposizione in esso definiti.

Il Modello Concettuale Definitivo include:

- le caratteristiche specifiche del sito in termini di stato delle potenziali fonti della contaminazione (attive, non attive, in sicurezza, ecc.);
- grado ed estensione della contaminazione del suolo, del sottosuolo, delle acque superficiali e sotterranee del sito e dell'ambiente da questo influenzato; a tale fine dovranno essere individuati dei parametri specifici di rappresentazione (ad esempio; concentrazione media della sorgente secondaria di contaminazione);
- percorsi di migrazione dalle sorgenti di contaminazione ai bersagli individuati nello scenario attuale (siti in esercizio) o nello scenario futuro (in caso di riqualificazione dell'area). (*Dlgs 152/2006, Allegat1 al Titolo V della Parte quarta*).

In questo elaborato si vuole porre in luce l'eventuale rischio sanitario a cui potrebbero essere sottoposti gli addetti ai lavori nel sito in seguito ad inalazione indoor e outdoor di contaminanti volatili.

Come riportato nel documento "Linea guida operativa per il campionamento, il trasporto e l'analisi dei gas interstiziali nei siti contaminati", stilato da ARPA Emilia Romagna nel 2015, *"La problematica dell'intrusione di vapori risulta*

particolarmente significativa nel caso di siti contaminati, sia per i gravi rischi per la sicurezza (ad esempio esplosioni), sia per la salute (effetti acuti e cronici). Si deve tener presente che i rischi legati all'intrusione di vapori possono essere di diversi ordini di grandezza superiori rispetto a quelli connessi ad altri percorsi di esposizione, quali ad esempio l'ingestione ed il contatto dermico e, in ambienti chiusi, la presenza di Composti Volatili spesso può non essere avvertita, data l'assenza di tracce visive e/o olfattive."

Dunque, secondo quanto riportato dal manuale stilato dall' APAT nel 2008 (CAP 3, par 3) *"Si evidenzia che le equazioni per il calcolo dei fattori di volatilizzazione, in ambienti aperti (outdoor) e chiusi (indoor) rappresentano la capacità attuale di descrizione matematica dei fenomeni nell'ambito di applicazione di un Livello 2 di Analisi di Rischio. Laddove l'applicazione di tali equazioni determini un valore di rischio non accettabile per la via di esposizione inalazione di vapori outdoor e/o indoor, dovranno essere eventualmente previste campagne di indagini (misure di soil-gas, campionamenti dell'aria indoor e outdoor) allo scopo di verificare i risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello di analisi di rischio"*

Si sottolinea, tuttavia, che per tale tipo di indagini, pur in presenza di diversi riferimenti tecnici, tra cui si richiama il documento "Criteri e metodologie applicative per misura del soil gas", sviluppato nell'ambito del SIN di Porto Marghera ed approvato con la CdS del 12/03/2014, per il soil gas mancano i valori di Concentrazione Soglia – CSC - o comunque valori limite a cui fare riferimento, così come non vi sono metodi standardizzati per la misurazione e la gestione dei dati reali ottenuti.

Si intuisce, dunque, che l' intrusione di vapori rappresenta un percorso critico nell' applicazione dell' analisi di rischio sanitario-ambientale.

La prima guida tecnica che affronta specificamente tale problema è stata emanata nel 2002 dall' US EPA (Draft Guidance for Evaluating the Vapor Intrusion to Indoor Air Pathway from Groundwater and Soils, Subsurface Vapor Intrusion Guidance, USEPA 2002).

Dalla data di pubblicazione di tale guida, circa 30 stati U.S.A hanno sviluppato proprie guide tecniche sull'intrusione di vapori.

Allo scopo di migliorare e aggiornare i contenuti della propria guida tecnica, l'US EPA ha iniziato un lavoro di comparazione degli approcci utilizzati nei vari stati, le cui risultanze sono riassunte in [Weinberg et al., 2006].

Nel lavoro sopra citato sono posti a confronto gli approcci utilizzati da California, Colorado, Connecticut, New Jersey, New York e Pennsylvania nell'affrontare il problema del "vapor intrusion".

In linea generale, l'approccio usato nell'analisi di rischio trattata in questa tesi si rifà alle linee guida stilate in New Jersey nel 2005, in cui si suggerisce un approccio per fasi che inizia dalla raccolta dei dati esistenti e dal reperimento di nuovi dati, a partire dalle acque sotterranee per poi interessare suolo, sottosuolo, soil gas e aria indoor.

Il caso in esame si è verificato a Porto Marghera; si è ritenuto opportuno, dunque, analizzare e far capo alla letteratura italiana prodotta dai diversi enti nazionali e regionali, quali ISPRA-INAIL, APAT, ARPA Veneto, ARPA Emilia Romagna, ARPA Lombardia, Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, nonché le norme del decreto legislativo 152 del 2006.

Dopo un attento studio, lo schema che si intende seguire è quello riportato da ISPRA nel documento del 2010 " Protocollo ISPRA-INAIL per la valutazione del rischio associato all'inalazione di vapori e polveri, in ambienti aperti e confinati nei siti di bonifica ":

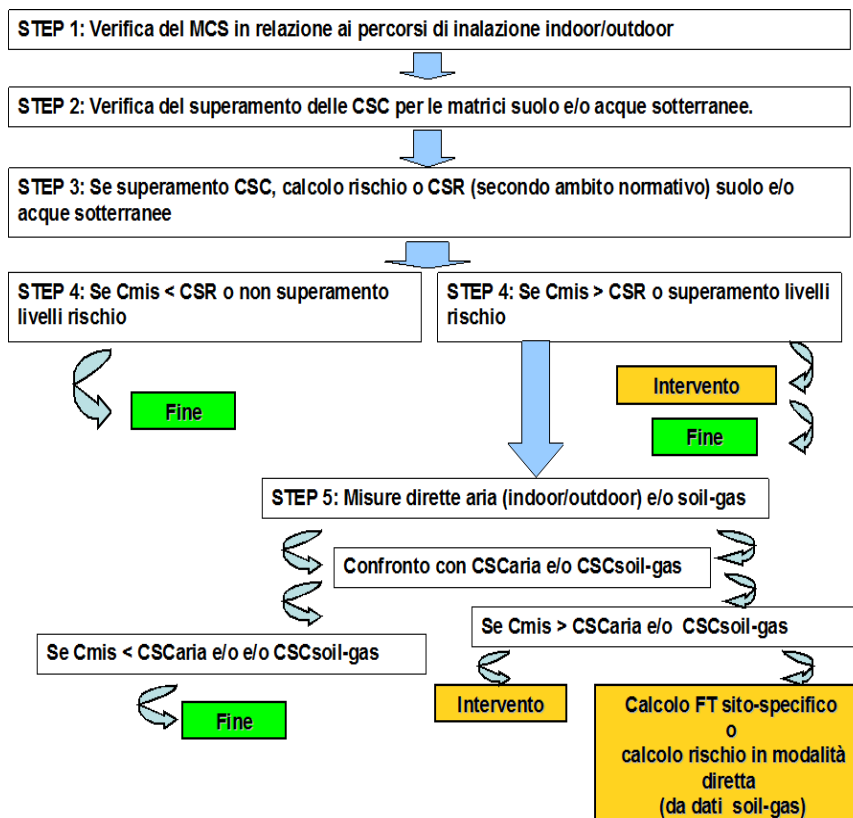


Fig. 2.2 - Diagramma di flusso generale della procedura

CAPITOLO III

I GAS INTERSTIZIALI

3. I GAS INTERSTIZIALI

Nel campo di applicazione della bonifica dei siti contaminati, disciplinato dal titolo V alla parte IV del D. Lgs. 152/2006, una conseguenza della contaminazione del terreno e/o delle acque sotterranee, è la migrazione di sostanze volatili pericolose, in genere di origine organica (COV, composti organici volatili), verso la superficie. Durante la migrazione le sostanze chimiche volatili presenti nel suolo superficiale, nel suolo profondo e/o nelle acque sotterranee, migrano attraverso il suolo insaturo, raggiungendo gli ambienti sovrastanti, ed alterano la qualità dell'aria indoor (vapor intrusion o intrusione di vapori) e/o outdoor, con conseguente rischio per la salute umana, per l'ambiente e per la sicurezza (Agenzia Regionale per la protezione Ambientale Emilia Romagna [ARPA ER], Rev 01,2015).

Come riportato nel capitolo 2, si evidenzia che per tale tipo di indagini, pur in presenza di diversi riferimenti tecnici, tra cui si richiama il documento "Criteri e metodologie applicative per misura del soil gas", sviluppato nell'ambito del SIN di Porto Marghera ed approvato con la CdS del 12/03/2014, oltre a mancare i valori di Concentrazione Soglia (CSC) o comunque valori limite a cui fare riferimento, non vi sono metodi standardizzati per la misurazione e la gestione dei dati reali ottenuti (ARPA ER, Rev 01,2015).

Gli enti delle varie regioni, dunque, negli anni hanno redatto diverse "linee guida" per definire correttamente un sistema controllato per la captazione del soil gas, definire le modalità di campionamento, trasporto e conservazione dei campioni, definire le metodiche analitiche e la strumentazione di laboratorio, validare i risultati analitici e proporre una metodologia di utilizzo dei risultati nei procedimenti di valutazione dei siti contaminati (ARPA ER, Rev 01,2015).

I composti organici volatili sono definiti all'interno della Parte Quinta del D.Lgs. 152/06, relativa alla materia di Tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni in atmosfera, e precisamente all'art. 268, lettera II, si indicano come *“qualsiasi composto organico che abbia alla temperatura di 293,15 K una pressione di vapore di 0,01 kPa (0,075 mm Hg) o superiore, oppure che abbia una volatilità corrispondente in condizioni particolari d'uso”*.

Tale definizione è estesa anche ai composti volatili inorganici.

Infatti, applicando quanto disciplinato dall'art. 268, Titolo I, Parte V del D.Lgs. 152/06, per i composti inorganici, si considerano volatili i Cianuri, i Fluoruri ed il Piombo tetraetile, ai quali corrisponde una pressione di vapore uguale o superiore a 0,01 kPa (= 0,075 mm Hg); si sottolinea che nel valutare il rischio da esposizione all'inalazione di vapori si deve sempre tener conto della possibile presenza di mercurio nelle matrici ambientali per via della sua tossicità e della sua volatilità.

Tenendo conto dello sversamento avvenuto in sito si sono esclusi dall'analisi tutti i parametri non correlabili alla sostanza riversatasi nell'area di interesse. Nell'Analisi di Rischio, dunque, si terrà conto solo di composti organici volatili.

Fra i composti organici sono considerati non volatili tutti gli IPA ad esclusione del Naftalene, i Nitrobenzeni ad esclusione del Nitrobenzene, alcuni tra le classi dei Clorobenzeni e dei Fenoli clorurati, gran parte delle Ammine Aromatiche, tutti i Fitofarmaci, Diossine, Furani e PCBs (gli Idrocarburi pesanti e l'Acrilammide).

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) classifica i composti organici [OMS, 1989] in quattro gruppi, considerando i punti di ebollizione come sotto riportato:

- Composti organici molto volatili (gassosi) VVOC da <0 a 50 °C-100 °C.
- Composti organici volatili VOC da 50°C -100 °C a 240°C -260°C .
- Composti organici semivolatili SVOC da 240°C -260°C a 380°C -400°C .
- Composti organici associati al particolato POM >380 °C.

In questa tesi è stata considerata la distribuzione della contaminazione da sostanze volatili in suolo e falda ricavata da dati già disponibili. Si è invece preso attivamente parte alla campagna di indagine del soil gas, seguendo le indicazioni delle varie linee guida regionali di cui si farà un sunto nei prossimi paragrafi.

3.1 - Tecniche di rilevazione dei Composti Volatili

Le tecniche di rilevazione dei Composti Volatili si possono differenziare in due categorie:

- metodi da campo, che possono fornire una misura in tempo reale dei Composti Volatili presenti;
- metodi a cattura, che intercettano i composti in appositi contenitori (campionamento diretto) o in un sistema ad- o as-sorbente (campionamento indiretto), con successiva analisi in laboratorio.

Nel caso di campionamento con metodi a cattura possiamo distinguere:

- a) il campionamento diretto effettuato con mezzi di campionamento in depressione (canister, etc) o con mezzi di campionamento dotati di apposita pompa (sacche tedlar/nalofan, etc);
- b) il campionamento indiretto, che verrà solo citato perché non impiegato nelle campagne di cui si tratta in questo lavoro.

Il campionamento diretto con mezzi in depressione, come le bottle vac usati nelle campagne a cui si è preso parte, necessita dell' installazione di sonde fisse, purché la loro installazione sia compatibile con le condizioni idrogeologiche locali (profondità della falda, porosità del terreno). Nel caso in cui si abbia a che fare con terreni con bassa permeabilità o falde che impediscano la corretta installazione delle sonde, si preferisce usare la Flux Chamber.

Il campionamento di soil gas dovrà essere effettuato suddividendo le superfici da indagare in aree omogenee per presunta contaminazione, geologia e idrogeologia.

I punti di campionamento, realizzati attraverso l'installazione di sonde permanenti o semipermanenti, andranno posizionati, per ciascuna area omogenea, secondo i seguenti criteri:

- nel caso di sorgenti di contaminazione note, l'ubicazione dei punti di campionamento dovrà essere effettuata secondo uno schema ragionato (poligoni di Thiessen);
- nel caso in cui non si conoscano le sorgenti di contaminazione, i punti di campionamento potranno essere ubicati in modo sistematico, sulla base di un criterio di tipo casuale o statistico, ad esempio sulla base di un griglia predefinita

o casuale delle dimensioni minime di 15x15 m e massime di 50x50 m. Le dimensioni della griglia andranno scelte in base all'estensione dell'area, alle caratteristiche geologiche e idrogeologiche, alla potenziale contaminazione della stessa, infittendo la rete di monitoraggio nelle aree più critiche.

Se lo scopo del monitoraggio dei gas interstiziali è verificare il rischio associato all'intrusione in ambiente indoor di vapori provenienti da una sorgente posta lateralmente ad un edificio, è opportuno posizionare le sonde di monitoraggio lungo un transetto che colleghi la sorgente con l'edificio stesso (Agenzia Regionale per la protezione Ambientale Veneto, [ARPAV],2011).

In ciascun sito potenzialmente contaminato, dovranno essere eseguiti almeno 3 punti di campionamento di soil gas ogni 2.500 mq.

3.2 - Rischio di esposizione per inalazione di vapori

Per soil gas si intende in generale gas interstiziali presenti nei pori del terreno, di origine naturale o presenti in seguito a contaminazione.

Lo studio della distribuzione delle sostanze contaminate nei gas interstiziali del terreno, e della loro variabilità temporale, può costituire un valido supporto alle attività di bonifica dei siti contaminati.

Le indagini mediante misure dirette di soil gas sono infatti utilizzabili dalla vigente normativa per assolvere a diversi obiettivi quali:

- valutare l'estensione di un sito potenzialmente contaminato in fase di caratterizzazione, quale indagine indiretta (D.Lgs. 152/2006, All.2 e All.4 al Titolo V, Parte IV), al fine di delimitare l'estensione della sorgente di contaminazione e individuare i punti di campionamento di terreni e delle acque sotterranee;
- verificare i risultati ottenuti dall'applicazione dell'analisi di rischio di un sito contaminato, per le vie di esposizione inalazione di vapori outdoor e/o indoor provenienti dal terreno o dalla falda (Istituto Superiore Per la Ricerca Ambientale [Ispra],2008, prf. 3.3 ; appendice S; appendice V);
- valutare l'efficacia di un'azione di bonifica (monitoraggio post bonifica).

I modelli che descrivono il meccanismo di trasporto di una specie chimica dal suolo o dalla falda in ambienti indoor, tra cui quello di Johnson & Ettinger, sono spesso molto conservativi. Quindi, laddove l'applicazione di tale procedura rilevi un rischio non accettabile per la via di esposizione "inalazione di vapori outdoor e/o indoor", si prevede la verifica dei risultati modellistici mediante campagne di indagini dirette, quali:

- misure di soil-gas, come quelle eseguite per questa tesi;
- campionamenti dell'aria indoor e outdoor.

3.3 - Caratteristiche e installazione delle sonde permanenti

Ai fini di un corretto campionamento, e per garantire un adeguato isolamento del sistema di misura soil gas dall'aria esterna, la sonda (soil gas probe) andrà posizionata nel terreno insaturo ad una profondità di almeno 1 m dal piano campagna, e preferibilmente ad una profondità di 1,5 m da p.c., al fine di ridurre la probabilità di ingressi di aria esterna durante le fasi di campionamento.

Per installazioni di sonde a profondità inferiori comunque non meno di 0,50 m dal p.c., dovrà essere fatta un'attenta verifica della sigillatura del sondaggio.

La profondità della sonda dovrà comunque essere tale da risultare sempre al di sopra della frangia capillare, facendo riferimento al massimo livello piezometrico rilevato durante la campagna di monitoraggio del soil gas.

Nel caso di installazione di sonde per il campionamento del soil gas (near slab probe) poste all'esterno di edifici ed in prossimità degli stessi, la valutazione della profondità dovrà tenere conto della presenza delle fondazioni per evitare interferenze nelle misure e, compatibilmente con l'idrogeologia locale, si dovranno posizionare a metà quota tra la base delle fondazioni ed il top della sorgente di contaminazione. Nei casi in cui il criterio su indicato non fosse perseguibile, si suggerisce di porle ad una profondità di almeno 1 m dal p.c. Nel caso di installazione di sonde fisse poste all'interno di edifici (sub slab probe), la profondità delle stesse dovrà essere di almeno 0,5-1 m al di sotto della soletta sondaggio (ARPA ER, Rev 01,2015).

Se lo scopo del monitoraggio dei gas interstiziali è verificare il rischio associato all'intrusione in ambiente indoor di vapori provenienti da una sorgente posta

lateralmente ad un edificio, è opportuno posizionare le sonde di monitoraggio lungo un transetto che colleghi la sorgente con l'edificio stesso (ARPAV,2011).

L'installazione delle sonde può avvenire secondo diverse modalità, come illustrato nei sottoparagrafi successivi.

3.3.1 - Sonde installate all'interno di fori di sondaggio

Le sonde permanenti o temporanee dovranno essere installate all'interno di fori di sondaggio realizzati con metodi di perforazione a rotazione (esclusi metodi a rotazione a fluido o ad aria) o percussione e utilizzando i medesimi accorgimenti presi per la realizzazione dei piezometri.

Le sonde devono essere realizzate con materiali inerti e non porosi: l'acciaio inossidabile è un materiale largamente utilizzato ma non adatto al campionamento di acido solfidrico; il PVC non è adatto in presenza di composti clorurati; il polietilene (LDPE-HDPE) è sconsigliato poiché permeabile ai gas (ARPA ER, Rev 01,2015).

Per le linee di campionamento potranno essere utilizzati i seguenti materiali: Teflon (materiale raccomandato), polieterechetone (PEEK), Nylaflo seppur tenendo conto della scarsa capacità di recupero di naftalene, Rilsan, rame. Silicone, tygon, neoprene, gomma, HDPE e LDPE sono sconsigliati per la loro permeabilità ai gas.

Il diametro del tubo-filtro utilizzato per il campionamento deve essere il più possibile ridotto al fine di limitare i volumi di spurgo. Secondo dati di letteratura viene consigliato l'utilizzo di sonde con diametro compreso tra 3 e 25 mm (ARPA V,2011). Il tratto filtrante deve avere uno spessore di alcune decine di centimetri e la lunghezza per sonde poste a 1,5m di profondità dal piano campagna è di 30 cm, ossia pari a 1/5 della lunghezza del sondaggio (ARPA ER, Rev 01,2015).

Nel caso dei campionamenti nel sito oggetto di studio, i fori di sondaggio per l'installazione delle sonde hanno una profondità di 1 metro; si è optato, seguendo anche quanto riportato dalle linee guida di ARPA Emilia Romagna, per una lunghezza del tratto drenante di 20 cm.

Il fondo foro viene isolato dal terreno sottostante con bentonite asciutta per qualche centimetro o, in alternativa si preferisce la posa di qualche centimetro di sabbia grossolana/ghiaia per drenare il fondo e non aspirare piccole particelle di particolato.

Il riempimento intercapedine foro – sonda va realizzato in maniera diversa a seconda che si sia nel tratto drenante o al di sopra di esso. Lo strato drenante è da realizzarsi con sabbia grossolana/ghiaia fine in corrispondenza del tratto filtrante della sonda, e per un'altezza pari al doppio del tratto fenestrato. Lo spessore del dreno dovrebbe essere maggiore dello spessore del filtro al fine di evitare che l'eventuale percolazione di materiale sovrastante possa ostruire il filtro (ARPA V,2011). Eventualmente si può impiegare una membrana in Teflon; va eseguita poi una gettata di bentonite non idrata per uno spessore pari alla lunghezza del tratto fenestrato della sonda (l); per colmare l'intercapedine fino al piano campagna, infine, si usa della bentonite idrata/miscela cementizia. La testa dei pozzetti deve essere sigillata con miscele bentonitiche/cementizie; la testa della sonda va chiusa con una valvola e va predisposta la linea di campionamento.

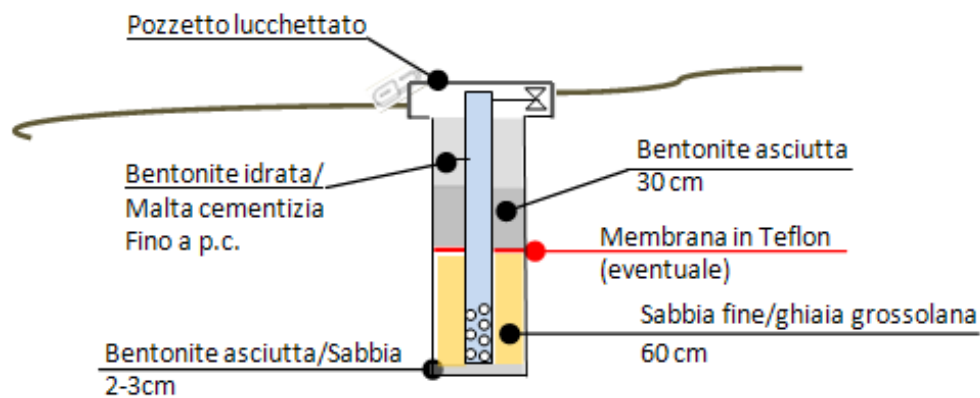


Fig 3.1 - Schema riempimento intercapedine foro-sonda

3.3.2 - Sonde in fori creati con la tecnologia direct push

Il sistema di perforazione del tipo "direct push" prevede che il foro sia realizzato mediante infissione nel terreno di un'asta cava; successivamente il tubo- filtro è inserito all'interno dell'asta ed agganciato alla punta. L'asta viene rimossa e l'intercapedine fra il foro e il tubo-filtro è riempita da un dreno costituito da materiali di granulometria sabbiosa e da un tappo di bentonite.

Le ridotte dimensioni del foro di sondaggio rendono tuttavia difficile sigillare correttamente l'intercapedine fra il foro ed il tubo, con il conseguente rischio di richiamare gas atmosferici durante il campionamento (ARPA V,2011).

3.3.3 - Sonde infisse direttamente nel terreno

Con questa tecnologia le sonde sono spinte fino alla profondità desiderata manualmente o utilizzando mezzi meccanici, come ad esempio quelli dotati di tecnologia "direct push". L'utilizzo di questa tecnologia di sonde è sconsigliato per tutte le applicazioni che richiedono una quantificazione precisa dei contaminanti presenti nei soil gas, quali ad esempio la verifica dell'intrusione di vapori nell'ambito di un'analisi di rischio o il monitoraggio dei risultati di un intervento di bonifica. Questo tipo di sonde può essere utilizzato per installazioni temporanee, in fase di indagine preliminare, al fine di delimitare l'estensione del plume di contaminazione (ARPA V,2011)

3.4 - Campionamento: verifiche preliminari

La letteratura prodotta in ambito soil gas fornisce importanti indicazioni di cui tener conto prima di effettuare campagne d'indagine. Fondamentali sono le condizioni climatiche e gli aspetti legati alla geologia e idrogeologia del sito.

In generale è necessario effettuare almeno 4 campagne di monitoraggio soil gas, una per stagione meteorologica, a meno di indicazioni diverse dettate dalla specificità del caso in esame.

Almeno una delle campagne dovrà effettuarsi nella stagione secca a distanza di almeno 2 giorni da una precipitazione significativa e preferibilmente seguendo le indicazioni descritte ai sottoparagrafi seguenti.

Il campionamento andrà effettuato a temperatura ambiente superiore a 0°C.

In condizioni meteorologiche particolari, che non consentono di rispettare le indicazioni su riportate, si potrà decidere di effettuare eccezionalmente solo 2 campagne di monitoraggio, di cui almeno una da effettuarsi nella stagione estiva (ARPA ER, Rev 01,2015).

3.4.1 - Condizioni climatiche

Le concentrazioni dei contaminanti nei gas interstiziali del terreno possono essere influenzate da variabili meteorologiche, quali piovosità, temperatura e pressione atmosferica.

A seguito di eventi meteorici significativi, ossia una precipitazione di intensità $i \geq 13\text{mm}$, a causa del riempimento dei pori del terreno con l'acqua, si verifica una riduzione della presenza di soil gas con conseguente spostamento dello stesso a maggiori profondità.

Pertanto dopo un evento del genere campionamenti andranno effettuati trascorso un tempo minimo di almeno 48 ore.

Con l'aumento della temperatura l'aria più calda accumula più umidità dal suolo, è meno densa e quindi meno pesante. Questa condizione favorisce l'estrazione di soil gas.

Il tenore di umidità riduce il numero dei pori a disposizione per il passaggio dei vapori ed influenza significativamente il campionamento del soil gas, per cui un suolo umido determinerà una bassa permeabilità del soil gas, a contrario un suolo secco ne determinerà una alta.

Dunque, è opportuno evitare di effettuare campionamenti nel corso di eventi meteorici, in presenza di pressione atmosferica che presenti una tendenza barometrica in aumento, in presenza di neve o subito dopo lo scioglimento, a temperature inferiori a 0°C , in giornate di vento forte (ARPA ER, Rev 01,2015).

3.4.2 - Condizioni geologiche e idrogeologiche

La litologia è un fattore importante di cui tener conto in fase di campionamento; infatti la presenza di terreni a bassa permeabilità può ostacolare il flusso del soil gas.

La presenza di falde superficiali, invece, può impedire la misura del soil gas con sistemi indiretti attivi.

In presenza di terreni a bassa permeabilità, tale da impedire la libera circolazione gassosa, oppure in presenza di falde con un livello piezometrico che impedisce la corretta installazione delle sonde fisse, le linee guida stilate dai vari enti regionali propongono di verificare la potenza dello strato a bassa permeabilità

e la posizione rispetto alla colonna stratigrafica valutando, in relazione alla contaminazione, la possibilità di installare in strati più permeabili sonde fisse multiple, a diverse profondità; verificare l'estensione dello strato geologico a bassa permeabilità e valutare la possibilità di spostare i punti di campionamento del soil gas in punti significativi non interessati da questa litologia; verificare, infine, l'andamento della falda e l'escursione piezometrica (ARPA ER, Rev 01,2015).

Elevate percentuali di argilla ed elevati tassi di umidità riducono il numero di pori interconnessi disponibili al trasferimento di vapori del terreno; la presenza di carbonio organico aumenta la capacità del terreno di trattenere i composti organici volatili; l'attività microbica, infine, può degradare i composti organici, modificando la composizione chimica del soil gas (ARPAV, 2011).

3.5 - Portata di spurgo e campionamento

Prima di procedere al campionamento bisognerà effettuare lo spurgo dell'aria stagnante presente nel sistema di campionamento costituito dalla sonda e dalla linea di campionamento.

Il volume di spurgo (VLC – volume della sonda e linea di campionamento) è calcolato come il volume morto del sistema, definito come la somma:

- del volume della sonda di campionamento;
- il volume interno dei tubi della linea di campionamento;
- il volume dei pori dello strato drenante posto nell'intercapedine foro-sonda;
- il volume dei pori della bentonite asciutta.

Da dati di letteratura è consigliato lo spurgo di 3 volumi di aria pari a 3 VLC.

Nella fase di spurgo (prima e dopo) si dovranno registrare le misure di O₂ e CO₂ ed è consigliabile registrare le misure di metano e dei Composti Volatili.

Lo spurgo dovrà essere eseguito preferibilmente con pompe a basso flusso, con portata variabile nel range 0,1-0,2 l/min ed applicando al sistema una depressione di 25 mbar; nel caso in cui lo spurgo venga effettuato con strumentazione da campo, tipo Gas Analyzer/PID, la portata di aspirazione risulterà maggiore e pari a 0,5÷0,6 l/s (ARPA ER, Rev 01,2015).

Uno spurgo eccessivo, infatti, aumenta il raggio di influenza del campionamento, incrementando il rischio di esaurire la riserva di contaminante nell' intorno del punto di misura .

3.6 - Metodi da campo

I metodi da campo, o di screening, prevedono l'uso di strumenti automatici da campo, in grado di fornire una quantificazione dei composti organici volatili in tempi rapidi, attraverso misure istantanee. Tali strumenti possono essere utilizzati per indagini preliminari, oppure nell'ambito di indagini più approfondite, fornendo in campo indicazioni utili a definire le modalità e i tempi di campionamento. Gli strumenti utilizzabili sono:

- PID – Detector a Fotoionizzazione: i composti organici sono ionizzati tramite la radiazione UV prodotta da una lampada;
- FID – Detector a ionizzazione di fiamma: una fiamma bruciando i composti presenti nell'aria sviluppa una corrente ionica, sono chiamati genericamente Analizzatori di Vapori Organici;
- Gas analyser: sistema dotato di analizzatore di gas a infrarossi, per la misura della variazione delle concentrazioni di volatili (generalmente utilizzato per la misura di CO₂, O₂, CH₄, H₂S);
- Fiale colorimetriche (Dräger): sono delle fiale trasparenti portatili e monouso che contengono all'interno delle sostanze chimiche reagenti e permettono di rilevare in loco la concentrazione di gas e vapori nell'ambiente, con volume noto compreso tra 50 e 100 ml (ARPA ER, Rev 01,2015).

L'analisi mediante strumenti analitici da campo non permette di ottenere la conferma definitiva della presenza di un composto, né è possibile garantire un controllo di qualità delle procedure seguite, di livello paragonabile a quello di un laboratorio di analisi (ARPAV, 2011).

Comunque prima del campionamento, è sempre opportuno effettuare uno test di campo del soil gas mediante PID (o altra strumentazione) al fine di misurare la

concentrazione totale dei Composti Volatili e stimare i tempi ed i volumi di campionamento.

L' utilizzo di strumentazione da campo è molto diffusa e utile anche per effettuare prove di tenuta delle sonde e della linea di campionamento. Prima e dopo il campionamento di soil gas, si dovrà procedere alla verifica della tenuta dell'intero sistema di campionamento costituito dalla sonda e dalle linee di campionamento. La verifica può essere eseguita utilizzando metodi diretti.

Questa metodologia consente di effettuare le verifiche di corto circuitazioni nel sistema di campionamento mediante la misura di O_2 e CO_2 (ed eventualmente CV) con strumentazione da campo. Tali misure devono essere fatte:

- prima dello spurgo;
- dopo lo spurgo;
- prima del campionamento;
- dopo il campionamento.

Il confronto tra le misure registrate di O_2 e CO_2 potrà evidenziare possibili ingressi di aria ambiente: una concentrazione di ossigeno prossima a quella atmosferica o incremento della concentrazione di O_2 con decremento della CO_2 possono costituire un indizio dell'avvenuta diluizione del campione con gas atmosferici.

Nel caso si dovessero rilevare valori anomali di O_2 e CO_2 , con concentrazioni di ossigeno prossime a quelle atmosferiche, sarà necessario invalidare il campione e si dovrà eseguire un test di tenuta con traccianti gassosi, utilizzando ad esempio l'elio (ARPA ER, Rev 01,2015).

3.7 - Metodi di campionamento diretto

Il campionamento diretto prevede che l'aria sia immagazzinata in contenitori, opportunamente predisposti, senza subire alcun trattamento. Tra i contenitori nei quali immagazzinare aria si possono citare: pipettoni in vetro a due vie, bottiglie in vetro, sacche in differenti materiali (tedlar, nalofan,etc.), canister.

3.7.1 - Campionamento con canister

Si approfondisce questo metodo di campionamento in quanto utilizzato per la campagna oggetto di questa tesi.

L'uso del canister non prevede l'uso di pompe in quanto lo strumento lavora in depressione. Prima del prelievo di soil gas deve essere verificata la depressione del canister certificata da laboratorio.

Il campionamento con il canister dovrà essere mediato nel tempo per garantire l'equilibrio tra il gas interstiziale nel suolo ed il gas presente nella sonda di prelievo, pertanto il canister dovrà essere dotato di restrittore. Il flusso di ingresso del soil gas nel canister è regolato con un riduttore di pressione, e verificato mediante flussimetro. Il flusso di campionamento consigliato è di 50 ml/min e comunque variabile nel range 0,5-80 ml/min (ARPA ER, Rev 01,2015).



Fig. 3.2 - Canister in acciaio inox collegato a flussimetro

3.8 - Metodi di campionamento indiretto

I metodi di campionamento indiretto prevedono la cattura delle sostanze volatili o semivolatili in un sistema adsorbente o assorbente. Esso può essere costituito da un supporto solido o liquido o da un supporto solido impregnato di reagente (ARPA ER, Rev 01,2015).

Non si approfondiranno questi metodi, in quanto, sebbene spesso preferiti a quelli diretti per praticità ed economicità, non sono stati impiegati nelle campagne di campionamento in esame.

.

CAPITOLO IV

DESCRIZIONE DEGLI EVENTI

4. DESCRIZIONE DEGLI EVENTI

Nel presente capitolo si riporta la ricostruzione temporale degli eventi riguardanti il sito oggetto di studio e, di seguito, un approfondimento sulle procedure attuate fino alla scrittura del presente lavoro di tesi, in linea con la normativa riportata nel capitolo due.

I risultati delle indagini di cui si andrà a trattare sono molto utili, in quanto, per elaborare un'Analisi di Rischio sanitario più completa, si è ritenuto opportuno partire dalle sorgenti suolo insaturo e falda per stimare il rischio da inalazione di composti organici volatili, per poi confrontare i risultati con quelli ottenuti successivamente con l'analisi sui soil gas.

In questo capitolo, dunque, ci si predispone a comprendere per sommi capi la distribuzione della contaminazione nei suoli e nelle acque sotterranee sulla base di quanto riportato nei documenti elaborati dalla S.G.M., tralasciando alcune delle sostanze rinvenute con le analisi chimiche e focalizzando l'attenzione su sostanze volatili quali: BTEX (benzene, etilbenzene, xileni, toluene), idrocarburi alifatici e aromatici leggeri ($C < 12$) e pesanti ($C > 12$), in quanto parametri strettamente correlati con lo sversamento di gasolio.

4.1 - Ricostruzione eventi

L'area, di proprietà del Comune di Venezia, è tutt'oggi in concessione a società privata. In data 13/12/2013 è avvenuto un deragliamento di una ferrocisterna contenente gasolio da riscaldamento, con conseguente fuoriuscita del liquido sulla massicciata ferroviaria. La Società ha immediatamente notificato agli Enti competenti il documento di attivazione della procedura prevista dagli artt. 242 e 304 comma 2 del D.Lgs. 152/2006 ed incaricato la Società S.G.M. Geologia e Ambiente S.r.l. di Ferrara di effettuare le necessarie attività di Messa in Sicurezza d'Emergenza.



Fig. 4.1 – Particolare del gasolio rilevato nell'area

A seguito dello sversamento sono stati allertati i Vigili del Fuoco che hanno provveduto alla Messa in Sicurezza della ferrocisterna, travasandone il rimanente contenuto e posizionando materiale oleoassorbente lungo la massicciata ferroviaria (*Relazione "operazione di messa in sicurezza d'emergenza", S.G.M. Geologia e ambiente Srl, 2014*)

4.2 - Caratteristiche della sostanza sversata

Secondo la scheda di sicurezza, il prodotto sversato viene identificato come gasolio da riscaldamento, utilizzabile anche come carburante per motori e per altri usi industriali.

La miscela contiene sostanza UVCB (sigla che sta per "sostanza dalla composizione non conosciuta e variabile") e biodiesel. Per quanto riguarda la prima, si tratta di gasolio prodotto per combinazione complessa di idrocarburi prodotta per distillazione di petrolio grezzo; gli idrocarburi appena citati hanno numero di atomi di carbonio prevalentemente nell' intervallo C9-C20, e punto di ebollizione nell' intervallo 163 °C - 357 °C.

Secondo le indicazioni riportate nella scheda tecnica della miscela, essa ha effetti irritanti sulla pelle, proprietà nocive per inalazione. A causa della bassa viscosità (1,5 - 7,4 mm²/s a 40 °C) il prodotto può essere aspirato nei polmoni o in maniera diretta in seguito ad ingestione e successivo vomito; in tale evenienza può insorgere polmonite chimica. Può provocare danni agli organi in caso di esposizione prolungata o ripetuta, sino a portare al cancro. Per quanto riguarda le

informazioni tossicocinetiche, metaboliche e di distribuzione si fa capo a sperimentazioni su animali; tali studi sperimentali hanno evidenziato un assorbimento attraverso i polmoni. Infatti, considerazioni sulle proprietà chimico fisiche suggeriscono che gli aerosol altamente respirabili di sostanze scarsamente solubili in acqua con un log Pow maggiore di zero, come la miscela in esame, sono assorbite in un certo grado dalle vie respiratorie. Si assume che il 50% della dose inalata di aerosol di gasoli sia assorbita dai polmoni negli animali e nell'uomo. Studi di tossicità ripetuta indicano anche un certo assorbimento attraverso la cute.

4.3 - Messa in sicurezza

Al fine del funzionamento di almeno una linea ferroviaria e di garantire il minimo esercizio dei trasporti verso la Zona Industriale di Porto Marghera, si è proceduto all'esecuzione delle attività in due fasi temporali (*Relazione "Piano di caratterizzazione area interessata dallo sversamento di gasolio avvenuto in data 13/12/2013", Cap. 4.1, S.G.M. Geologia e ambiente Srl, 2014*) e alla suddivisione dell'area interessata in 2 sotto aree su cui si è intervenuti in tempi diversi.

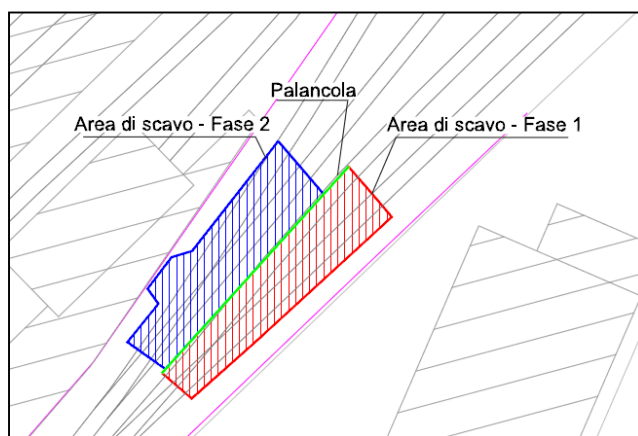


Fig. 4.2 - Suddivisione delle aree di scavo (Fase 1 e Fase 2)

4.3.1- Fase uno

Durante questa fase si è proceduto allo smontaggio dei binari ferroviari nell'area di intervento e alla perimetrazione della suddetta area, di dimensioni pari a circa 25 x 5 metri.

Al fine di garantire il sostegno delle pareti dello scavo e la stabilità dei binari in esercizio, si è proceduto all'infissione di palancole nell'area di intervento e successivamente alla messa in posto di un impianto di well point.



Fig. 4.3 - Infissione delle palancole

Si sono effettuate dunque le operazioni di scavo dell'area palancolata fino alla profondità di -4,00/-4,40 metri da p.c. mediante escavatore cingolato. Per verificare lo stato della contaminazione è stato effettuato un campionamento dei terreni di fondo scavo e, per i terreni delle pareti palancolate, si sono effettuati una serie di sondaggi a carotaggio continuo limitrofi all'area di scavo. L'area di scavo è stata poi ripristinata con la posa di inerte riciclato, materiale stabilizzato costituito da spaccato calcareo di cava, geotessuto e ballast fino al piano campagna.

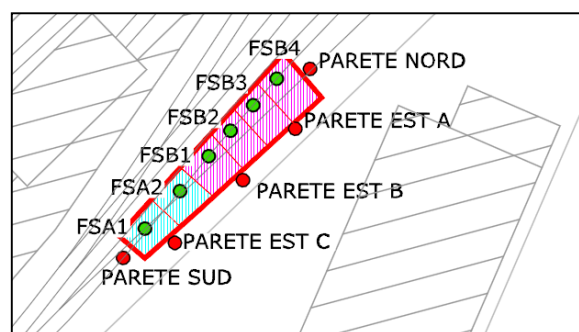


Fig. 4.4 – Campioni prelevati dallo scavo e sondaggi eseguiti – Fase 1

4.3.2 - Fase due

In questa fase, al fine di valutare l'estensione della contaminazione nella zona circostante l'area palancolata e delimitare l'area di scavo relativa alla Messa in Sicurezza, sono stati eseguiti undici sondaggi a carotaggio continuo, denominati S1÷S11, spinti alla profondità variabile tra -4,00/-9,00 metri da p.c. (*Relazione "Piano di caratterizzazione area interessata dallo sversamento di gasolio avvenuto in data 13/12/2013", Cap. 4.3, S.G.M. Geologia e ambiente Srl, 2014*) ; i campioni di terreno sono stati sottoposti ad analisi chimica e i fori da sondaggio attrezzati a piezometro al fine della ricostruzione dell'andamento di falda e per la misura degli spessori di prodotto surnatante .

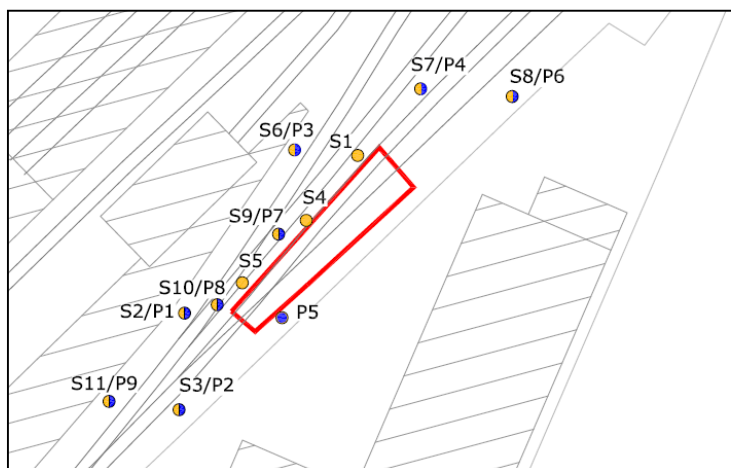


Fig. 4.5 – Sondaggi eseguiti e piezometri installati (Indagine conoscitiva – Fase 2)

Si è proceduto poi con la perimetrazione dell'area di intervento, lo smontaggio dei binari ferroviari e lo scavo mediante escavatore cingolato fino alla profondità massima di circa. -2,00 metri da p.c..

Si è effettuato un ulteriore campionamento dei terreni di fondo scavo e delle pareti in contraddittorio con i tecnici A.R.P.A.V.

È seguito il ripristino dell'area di scavo mediante la posa di inerte riciclato, materiale stabilizzato, geotessuto e ballast fino al piano campagna.

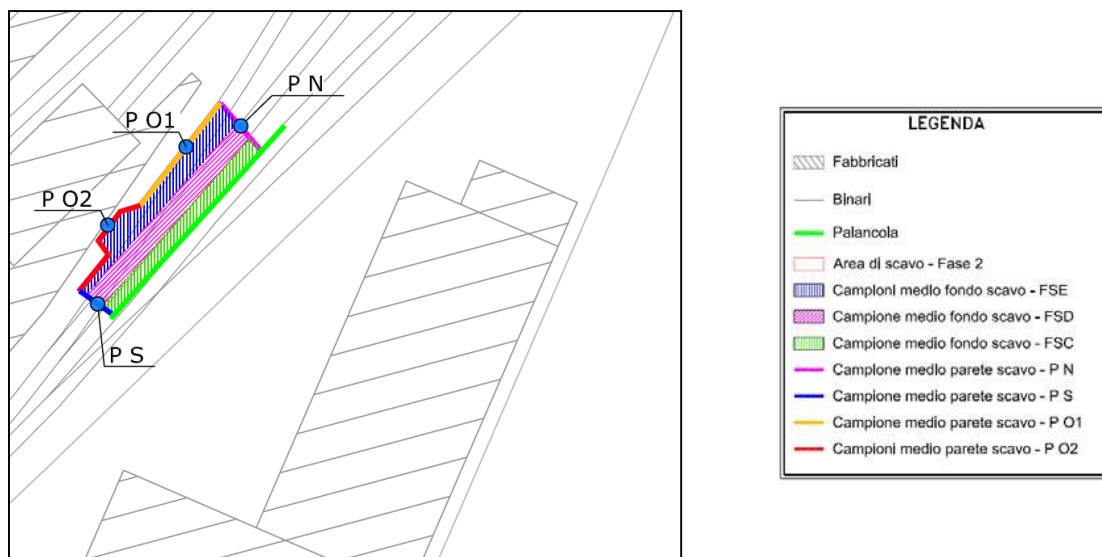


Fig. 4.6 – Campioni prelevati dallo scavo - Fase 2

4.3.3- Impianto di pump and stock

Come riportato nel sottoparagrafo 4.2.2 , i fori da sondaggio eseguiti in fase 2 sono stati attrezzati a piezometro; nel corso dei rilievi piezometrici eseguiti in Gennaio 2014 sono emerse evidenze visive relative alla presenza di gasolio in fase surnatante.

Si è proceduto, dunque, all'installazione di un impianto automatico di aspirazione della fase surnatante, costituito da un sistema di pompaggio temporizzato composto da pompe pneumatiche che convogliano i liquidi aspirati dai piezometri, con presenza di prodotto libero, in serbatoi aerei in attesa di successivo invio a smaltimento, previa analisi di classificazione.

Dai rilievi effettuati successivamente è stata registrata una netta diminuzione degli spessori di surnatante nei piezometri in pompaggio e la presenza (di spessore centimetrico) in altri piezometri; nel periodo Luglio 2014 sono stati installati altri cinque piezometri (P10÷P14) al fine di poter eventualmente implementare l'aspirazione della fase surnatante nelle aree che hanno evidenziato maggiori criticità.

4.4 - Piano di caratterizzazione

Ultimati i primi interventi di messa in sicurezza, nel Luglio 2014 è stato redatto il piano di caratterizzazione dell'area interessata dallo sversamento, in cui si è messo a punto il Modello Concettuale Preliminare e viene proposto il Piano di investigazione per il sito oggetto di studio. Il fine del Piano di Investigazione, e delle nuove indagini proposte è quello di definire il grado e l'estensione volumetrica dell'eventuale inquinamento, individuare le possibili vie di dispersione e migrazione degli inquinanti dalle fonti verso i potenziali recettori, ricostruire le caratteristiche geologiche dell'area al fine di sviluppare il modello concettuale definitivo del sito, individuare i possibili eventuali recettori (*Relazione "Piano di caratterizzazione area interessata dallo sversamento di gasolio avvenuto in data 13/12/2013", Cap. 6.1, S.G.M. Geologia e ambiente Srl, 2014*).

In sintesi le indagini previste consistono in: altri sondaggi, integrazione di piezometri, prelievo campioni di suolo e acqua per analisi chimiche e speciazione idrocarburica, stima di Ph, FOC e densità, analisi granulometriche su campioni rimaneggiati, slug test, misura in continuo di livello piezometrico e conducibilità, misure settimanali dei parametri chimico fisici nei piezometri.

4.5 - Risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di suolo

Di seguito si riportano i risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di suolo ricavati dai sondaggi e dagli scavi durante la fase di messa in sicurezza d'emergenza del 2013/2014. Quanto riportato in tabella è una minima parte della totalità delle analisi svolte e delle sostanze indagate; infatti si sono tralasciati tutti i composti inorganici e quelli poco volatili, col fine di focalizzare l'attenzione sulle sostanze interessate da volatilizzazione e che, dunque, figureranno nell'analisi di rischio.

		DATA PRELIEVO	AREA INDAGATA	NOME CAMPIONE	INTERVALLO DI PRELIEVO (m. da p.c.)	COMPOSTI AROMATICI (mg/kg s.s.)					IDROCARBURI (mg/kg s.s.)			MTBE				
						BENZENE	ETILBENZENE	STIRENE	TOLUENE	XILENE	IDROCARBURI LEGGERI C<12	IDROCARBURI PESANTI C>12						
						2	50	50	50	50	250	750	40					
F a s e 1	24/12/2013	Fondo scavo																
			FSA		<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10		<10	400	/					
			FSA1	/	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	0,03		<1		/					
			FSA2	/	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		<1		/					
			FSB	/								89	/					
			FSB1	/	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		<1		/					
			FSB2	/	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01		<1		/					
			FSB3	/	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01		<1		/					
	FSB4	/	<0,01	0,14	<0,01	<0,01	0,95		5,3		/							
	22/01/2014	Parete nord	C1	0,00-1,50	<0,1	<0,1	<0,1	0,200	0,43		426		346	/				
			C2	1,50-4,00	<0,1	0,51	<0,1	0,71	3,7		1100		104	/				
		Parete est	C1	0,00-1,50									1346	/				
			C2	2,00-3,00									225	/				
			C3	3,00-4,00									20,9	/				
		Parete est A	C1	0,80	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		66		/					
			C2	2,50	<0,1	0,190	<0,1	0,34	3,9		375		/					
		Parete est C	C3	3,50	<0,1	<0,1	<0,1	0,100	<0,1	33	<5		/					
			C1	0,80	0,46	5,6	0,39	6,8			6980		/					
			C2	2,50	<0,1	0,170	<0,1	0,34	1,16		627		/					
			C3	3,50	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		106		/					
		Parete sud	C1	0,00-1,50	<0,1	0,50	<0,1	0,61	3,8		888		1405	/				
C2			1,50-3,70	0,37	4,3	0,29	5,1	27,3		6458		/						
F a s e 2	18/02/2014	Fondo scavo	FSC	/	<0,1	0,114	<0,1	0,49	0,31		60		281	/				
			FSD	/	<0,1	0,231	<0,1	0,69	1,4		310		195	/				
			FSE	/	<0,1	0,283	<0,1	1,18	0,92		413		75	/				
		Parete nord	/	<0,1	0,51	<0,1	0,44	2,27		795		2210	/					
		Parete sud	/	0,107	1,31	<0,1	1,43	8,2		2543		440	/					
		Parete ovest 1	/	<0,1	0,138	<0,1	0,149	0,33		133		468	/					
		Parete ovest 2	/	/	0,251	4,4	0,29	4,8	27,3		7185		4170	/				

Tab. 4.1 - Risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di suolo ricavati dai sondaggi e dagli scavi durante la fase 1 e 2 di messa in sicurezza d'emergenza del 2013/2014. Le celle in giallo indicano i valori di COV che superano le CSC ammesse.

DATA PRELIEVO	SONDAGGIO	NOME CAMPIONE	INTERVALLO DI PRELIEVO (m. da p.c.)	COMPOSTI AROMATICI (mg/kg s.s.)					IDROCARBURI (mg/kg s.s.)			MTBE						
				BENZENE	ETILBENZENE	STIRENE	TOLUENE	XILENE	IDROCARBURI LEGGERI C<12	IDROCARBURI PESANTI C>12								
											2						50	50
21/01/2014	S1	C1	0,50-1,20	<0,1	0,265	<0,1	0,61	1,8		436	1385	/						
		C2	2,00-3,00	<0,1	0,54	<0,1	4,2	3,5		1219	765	/						
		C3	3,50-4,00	<0,1	0,162	<0,1	0,162	0,135		<5	13,5	/						
	S2	C1	0,50-2,00	0,216	2,5	0,158	2,63	13,9		4166	515	/						
		C2	2,60-3,00		0,29	<0,1	0,35	1,4		558	186	/						
	S3	C1	2,00-3,00	<0,1	0,77	<0,1	0,89	4,7		1513	446	/						
		C2	3,80-4,20	0,215	<0,1	<0,1	0,149	<0,1		153	13,7	/						
	S5	C1	1,50-2,50	0,162	2,05	0,132	2,226	12,7		3714	53	/						
		C2	4,00-4,20	<0,1	0,116	<0,1	<0,1	0,107		<5	5,7	/						
	S6	C1	2,00-3,00	<0,1	0,55	<0,1	0,45	3,2		1175	150	/						
		C2	4,00-4,20	<0,1	0,232	<0,1	<0,1	0,186		<5	5,4	/						
	22/01/2014	S8	C1	1,50-2,50	<0,1	0,3	<0,1	0,102	2,03		574	324	/					
C2			3,00-4,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<5	8,4	/						
S9		C1	0,50-1,50	<0,1	0,791	<0,1	0,77	4,9		1133	186	/						
23/01/2014		C2	1,50-2,50	<0,1	0,7	<0,1	0,53	3,3		997	319	/						
		C3	2,50-3,50	<0,1	0,28	<0,1	<0,1	0,212		42	56	/						
		C4	3,70-4,00	<0,1	0,22	<0,1	<0,1	0,165		<5	13,7	/						
		C1	0,50-1,50	<0,1	1,22	<0,1	1,09	6,7		1742	60	/						
		C2	1,50-2,50	<0,1	0,97	<0,1	1,01	5,9		1516	335	/						
		C3	2,50-3,50	<0,1	0,149	<0,1	<0,1	0,127		75	6,8	/						
		C4	3,70-4,00	<0,1	0,142	<0,1	<0,1	0,103		37	6,9	/						
		S11	C1	2,00-3,00	<0,1	0,52	<0,1	0,31	2,73		752	77	/					
	C2		3,50-4,00	<0,1	0,122	<0,1	<0,1	<0,1		55	5,3	/						
	01/07/2015	S21	C1	1,00-1,20	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<5	44,7	/					
		C2	1,30-2,30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		3652	5359	/					
		C3	2,30-3,30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		2527	185	/					
C4		3,30-4,30	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<5	5,5	/						
30/06/2015	S23	C5	4,30-5,00	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1		<5	<5	/						
		C2	1,40-2,00	/	/	/	/	/	/		507	591	/					

Tab. 4.2 - Risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di suolo ricavati dai sondaggi nel 2014/2015. Le celle in giallo indicano i valori di COV che superano le CSC ammesse.

4.6 - Risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di acqua

In questo paragrafo si riportano i risultati delle analisi svolte sui campioni di acqua prelevati dai piezometri in due differenti campagne, una del 2015 e una del 2016.

Come specificato nel paragrafo precedente, anche in questo caso si sono tralasciati tutti i composti inorganici e quelli poco volatili, riportando solo le concentrazioni di composti aromatici e idrocarburi.

Come si può notare mettendo a confronto le tabelle e partendo sempre dalla concentrazione limite indicata dalle CSC (Tab. 2 Col. B D.Lgs. 15/06), dalla prima alla seconda campagna c'è stata una netta diminuzione delle concentrazioni delle sostanze oggetto di studio; in alcuni piezometri inizialmente "sporchi" se ne è registrata la totale assenza nel 2016. I piezometri dove si registra ancora una concentrazione oltre i limiti imposti sono P6, P8. Inoltre va sottolineato che, dal momento che alcuni piezometri presentavano presenza di sostanza surnatante non si sono più campionati ma sono da considerarsi come quelli maggiormente contaminati. I piezometri in questione sono P4, P10 e P11.

Il fatto che le concentrazioni siano maggiori e appaiano quasi "isolate" in piezometri distanti quali P6 e P8 è attribuibile innanzitutto al buon funzionamento dell' impianto di pump and stock per la rimozione di gran parte dell'inquinante e al fatto che entrambi siano in emungimento; può essere dunque che ci sia un richiamo delle sostanze nel raggio di influenza dei suddetti piezometri che ne fa registrare una maggiore concentrazione. Tuttavia si evidenzia il fatto che nella seconda campagna alcuni piezometri non sono stati affatto indagati; questo fa sì che non ci sia un effettivo riscontro sulle variazioni delle concentrazioni in tutti i piezometri tra il 2015 e il 2016. Di questo si terrà conto nell'analisi di rischio.

DATA CAMPIONAMENTO	PIEZOMETRO	PIEZOMETRO IN EMUNGIMENTO	COMPOSTI AROMATICI (µg/L)					IDROCARBURI (µg/L)		Limiti di legge Tab. 2 Col. B D Lgs. 15/06		
			BENZENE	ETILBENZENE	STIRENE	TOLUENE	XILENE	IDROCARBURI TOTALI COME N-ESANO	MTBE			
			1	50	25	15	10	350	40			
15/07/2015	P1	SI	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	8960	26,4			
	P2	SI	<0,1	0,36	<0,1	<0,1	0,77	22501	12,5			
	P3	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	992	1,61			
	P5	SI	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,32	2176	1,59			
	P6	SI	4,1	11,6	<0,1	0,23	5	4541	118			
	P8	SI	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	13100	129			
	P9	SI	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	3175	2,04			
	P13	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	139	<0,1			
	P14	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	3863	22,9			
	P15	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	151	<0,1			
	P16	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	110	<0,1			
	P17	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	411	1,97			
	P18	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	748	<0,1			
	P19	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,32	1386	<0,1			
	P20	NO	0,03	0,09	<0,03	0,09	<0,1	262	22,7			
	P21	NO	3,6	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1485	26,3			
	P22	NO	1,89	<0,1	0,2	<0,1	3,2	1911	15,3			

Tab. 4.3 - Risultati delle analisi svolte sui campioni di acqua prelevati durante la prima campagna del 2015. Le celle in giallo indicano i valori di COV che superano le CSC ammesse.

DATA CAMPIONAMENTO	PIEZOMETRO	PIEZOMETRO IN EMUNGIMENTO	COMPOSTI AROMATICI (µg/L)					IDROCARBURI (µg/L)		Limiti di legge Tab. 2 Col. B D Lgs. 15/06		
			BENZENE	ETILBENZENE	STIRENE	TOLUENE	XILENE	IDROCARBURI TOTALI COME N-ESANO	MTBE			
			1	50	25	15	10	350	40			
03/06/2016	P3	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	<0,1			
	P6	SI	<0,1	<0,1	<0,1	12,9	0,9	6607	45			
	P8	SI	<0,1	<0,1	<0,1	7,8	<0,1	8301	38			
	P9	SI	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	<0,1			
	P13	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	<0,1			
	P15	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	<0,1			
	P16	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	<0,1			
	P17	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	<0,1			
	P18	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	<0,1			
	P19	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	0,74			
	P20	NO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	100	<0,1			
	P21	NO	0,72	<0,1	<0,1	0,15	<0,1	499	4,8			

Tab. 4.4 - Risultati delle analisi svolte sui campioni di acqua prelevati durante la seconda campagna del 2016. Le celle in giallo indicano i valori di COV che superano le CSC ammesse.

4.7 - Installazione sonde soil gas

Per approcciarsi al monitoraggio dei soil gas si è tenuto conto in primis delle procedure descritte nei documenti riguardanti il Sto di interesse nazionale (SIN) di Porto Marghera., data l'ubicazione dell'area interessata dallo sversamento. All'articolo 5, comma 1, lettera f) dell' Accordo di Programma per la bonifica e la riqualificazione ambientale del SIN di Venezia - Porto Marghera e aree limitrofe, sottoscritto il 16/04/2012, viene indicata come prioritaria per il miglioramento delle condizioni operative "la valutazione del rischio sanitario, basata su

misurazioni delle effettive emissioni in atmosfera di inquinanti presenti nei suoli e nelle acque di falda".

Per questo motivo a Settembre 2016, per verificare gli effetti della contaminazione anche dal punto di vista della volatilizzazione, sono state installate 5 sonde soil gas (SG1÷SG5) all'interno di fori di sondaggio, al fine di effettuare il monitoraggio della matrice soil gas.



Fig. 4.7 - Carta dell'ubicazione delle 5 sonde soil gas installate nel 2016

L'ubicazione dei punti di campionamento è stata stabilita dopo un attento studio dei superamenti rilevati nei terreni e nelle acque di falda, riportati nelle tabelle 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 dei paragrafi precedenti e considerando l'ubicazione dei locali presidiati.

Per stimare la profondità a cui si sarebbero posizionate le sonde si è tenuto conto del fatto che la falda nell'area oggetto di studio ha una profondità variabile (valori si soggiacenza misurata che variano da 1,4 m a 2,2m) . Per evitare fenomeni di richiamo di acqua che sarebbero andati ad inficiare i campionamenti, si è optato per spingere i sondaggi fino alla profondità di -1,00 m dal piano campagna.

I fori di sondaggio sono stati eseguiti con la tecnica di perforazione a distruzione di nucleo; per la loro realizzazione è stata utilizzata la sonda Fraste Multidrill Hyndaga. Il diametro di perforazione è di 101 mm.

Dovendo scegliere la tipologia di sonde da installare, si è tenuto conto della discreta permeabilità del sottosuolo del sito; dunque è parso opportuno, in base alle linee guida riportate nel capitolo 2, optare per sonde fisse.

Ciascuna delle verticali di indagine, dunque, è stata attrezzata con una sonda permanente Nesty Probe in acciaio inox con tubo esterno e interno in teflon (materiale idoneo per la sua impermeabilità ai gas). Le sonde sono state posate alla massima profondità raggiunta. Le caratteristiche della sonda sono riportate di seguito:

- Diametro 1/2"
- Acciaio inox AISI 304
- Slot 1mm
- Lunghezza 20 cm
- Attacco per tubo in teflon interno 8mm
- Attacco per tubo in teflon esterno 10mm.



Fig. 4.8 - Immagine rappresentativa della sonda impiegata, in cui si nota il tubo in teflon e il corpo della sonda in acciaio inox

In corrispondenza delle sonde fessurate è stato realizzato un dreno mediante ghiaietto per uno spessore complessivo di 20 cm, in seguito alla scarsa profondità di installazione delle sonde. In corrispondenza del tratto cieco sovrastante è stata eseguita la sigillatura del foro mediante 20 cm di bentonite asciutta. per evitare

eventuali fenomeni di occlusione del dreno dovuti al percolamento del materiale posto a sigillatura del foro. Presa questa accortezza, si sono potuti posare in sicurezza 50 cm di malta cementizia/bentonite idrata al fine di minimizzare il rischio di richiamare gas atmosferici attraverso la superficie del terreno durante il campionamento.

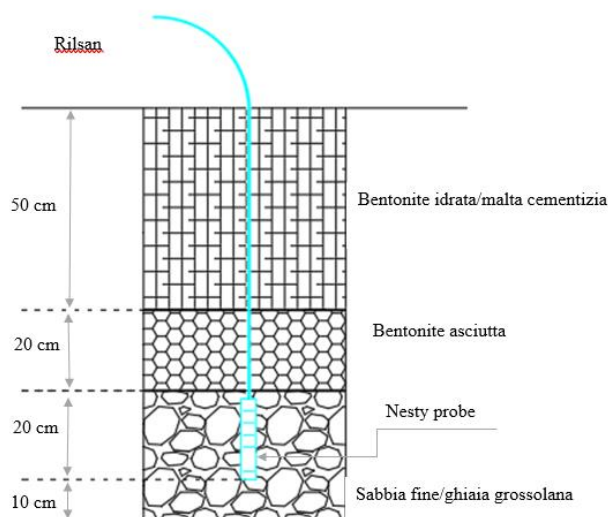


Fig. 4.9 -Caratteristiche costruttive delle sonde Nesty Probe

Le sonde Nesty sono collegate alla superficie con tubazione in Rilsan del diametro di 1 cm e protette mediante pozzetto carrabile cementato al fondo. La lunghezza del tubo di campionamento Rilsan è di 1,20 m, di cui 40 cm esterni, a cui in fase di campionamento in depressione sono state collegate le bottle vac.

Tra il 2016 e il 2017 sono state svolte tre campagne per il prelievo di campioni per analizzare la porzione volatile di contaminante, al fine di delimitare l'estensione della sorgente di contaminazione, verificare il rischio potenziale associato all'inalazione di vapori, valutare l'efficacia delle tecnologie di bonifica (*Campionamento dei soil gas con l'uso di cannister e bottle-vac nell'ambito della caratterizzazione e bonifica di siti contaminati ai sensi del D. Lgs 152/2006 e s.m.i.*, ARPA Veneto, 2014).

4.7.1 - Campionamento soil gas

I campionamenti sono stati eseguiti, in base alle linee guida riportate nel capitolo 3, secondo la seguente procedura: per ogni piezometro si è effettuato uno spurgo

di circa 2 volumi tramite PID - Detector a fotoionizzazione: i composti organici vengono ionizzati tramite la radiazione UV prodotta da una lampada. Si è preso nota delle concentrazioni rilevate ogni 30 secondi, per 3 minuti circa. Si è impiegato poi il Gas Analyzer, un rilevatore di gas ad infrarossi, per la misura della variazione delle concentrazioni di volatili quali O, H₂S, CH₄, CO₂.



Fig 4.10- Operazione di spurgo pre campionamento con ausilio di Pid e Gas Analyzer



Fig. 4.11 - Canister in vetro usato per il campionamento dei soil gas, collegato a vacuometro.

Terminate queste operazioni di verifica della tenuta del sistema e di spurgo, si è passati al campionamento vero e proprio. Tramite degli appositi raccordi si è collegato il vacuometro al tubo di collegamento Rilsan che fuoriesce dal piezometro; al vacuometro è stato a sua volta collegato il canister in vetro dotato

di restrittore che permette un campionamento mediato nel tempo per garantire l'equilibrio tra il gas interstiziale nel suolo ed il gas presente nella sonda di prelievo. La depressione dei 5 canister usati è stata preliminarmente verificata e certificata da laboratorio. Il tempo di attesa affinché ogni canister si riempisse è stato di circa 20 minuti e l'effettivo riempimento è stato verificato constatando che il vacuometro segnasse la pressione atmosferica. Al termine del campionamento si sono svolte nuovamente le operazioni iniziali di screening con PID e Gas analyzer, in modo tale da poterle confrontare con quelle pre-campionamento. La strumentazione in dotazione e i canister sono poi stati portati in laboratorio per le analisi richieste.

4.8 - Risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni di fluido interstiziale

Si riporta di seguito il report riguardante i risultati delle analisi chimiche effettuate sui campioni prelevati durante le 3 campagne condotte fin ora.

Nome Punto			SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	RPAN	SG4	SG5	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5
Nome Laboratorio Analisi			ECOCHEN S.r.l.					RPAN	ECOCHEN S.r.l.					ECOCHEN S.r.l.						
Data Campionamento			07/03/2016					RPAN	14/02/2017					09/08/2017						
Rapporto Di Prova			16-003448/01	16-003448/02	16-003448/03	16-003448/04	16-003448/05	520002 rev.0	520003 rev.0	17-000515/01 Rev.2	17-000515/02 Rev.2	17-000515/03 Rev.2	17-000515/04 Rev.2	17-000515/05 Rev.2	17-002125/06	17-002125/07	17-002125/08	17-002125/09	17-002125/10	
Idrocarburi policiclici aromatici	Acenafilene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Antracene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Benzo[a]antracene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Benzo[a]pirene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Benzo[b]fluorantene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Benzo[k]fluorantene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Benzo[e]fluorantene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Benzo[a]fluorantene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Crisene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Dibenz[a,h]antracene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Fenantrene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Fluorantene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Fluorene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Naftalene	µg/m³	<1	<1	<1	10	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
	Pirene	µg/m³	<1	<1	<1	<1	<1			<1	<1	<1	<1	<1						
IDTEX	Benzene	µg/m³	24	30	13	3	<1	µg/m³	6.4	3.5	49	570	<1	2	<1	5	8	25	3	4
	Etilbenzene	µg/m³	8	7	8	4	<1	µg/m³	21.6	5.3	8	12	8	4	<1	9	9	13	16	5
	m-p-Xilene	µg/m³	44	50	53	26	<1	µg/m³	53.7	12.3	45	160	77	60	26	63	63	88	97	32
	o-Xilene	µg/m³	8	11	11	6	<1	µg/m³	21.1	5.3	12	25	13	6	4	15	16	14	24	9
	Toluene	µg/m³	58	80	51	35	<1	µg/m³	92.7	22.8	37	300	39	35	7	33	26	43	42	11
		µg/m³																		
Idrocarburi alifatici	Idrocarburi alifatici (C5-C8)	mg/m³	46	1.1	4	<0.001	<0.001	µg/m³	46	<23	1.5	0.8	0.5	0.6	0.9	21.05	0.777	1.067	2.47	1.525
	Idrocarburi alifatici (C9-C12)	mg/m³	14	3	9	<0.001	<0.001	µg/m³	161	43	0.18	0.7	0.37	0.29	0.2	6.512	0.899	0.407	1.858	2.01
	Idrocarburi alifatici (C13-C18)	mg/m³	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001			0.3	0.2	0.4	0.3	0.2						
	Idrocarburi alifatici (C19-C38)	mg/m³	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001			0.03	0.03	0.1	<0.02	<0.02						
Idrocarburi aromatici	Idrocarburi aromatici (C9-C10)	mg/m³	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	µg/m³	46	<15	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Idrocarburi aromatici (C11-C12)	mg/m³													<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Idrocarburi aromatici (C11-C22)	mg/m³	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001			<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001						
altri idrocarburi	MTBE	µg/m³						µg/m³	<3.7	<3.7										
	1,3-Butadiene	µg/m³						µg/m³	<2.2	<2.2										

Tab. 4.5 - Risultati delle analisi svolte sui campioni di gas interstiziali durante le tre campagne dell'anno corrente.

CAPITOLO V

ANALISI DI RISCHIO

5. ANALISI DI RISCHIO

Come indicato nei precedenti capitoli, il presente lavoro di tesi si propone di valutare il rischio associato all'intrusione in ambienti aperti e confinati in analogia a quanto delineato dal D. lgs. 152 del 2006 per il suolo e per le acque sotterranee, sino a fare una stima finale per la matrice soil gas. Si tratterà prima il rischio da inalazione di vapori indoor e outdoor da suolo insaturo e falda. Indipendentemente dai risultati si è optato per eseguire un'analisi anche sui gas interstiziali per molteplici ragioni: innanzitutto il rischio da inalazione considerato su falda e suolo è spesso sovrastimato e un'analisi diretta sui gas permette di ottenere risultati più realistici e affidabili; in secondo luogo un'analisi di rischio sui soil gas rappresenta un ottimo approccio intermedio fra la stessa applicata a suolo e falda, che ha carattere prettamente modellistico, e il monitoraggio diretto dell'aria in cui non c'è una modellizzazione da applicare non esistendo vie di migrazione di cui tener conto.

Quello che si andrà a fare, dunque, è un confronto fra il rischio da inalazione calcolato da suolo o falda tramite modello e quello calcolato direttamente a partire dai dati rilevati nei gas interstiziali.

Tale valutazione di rischio si effettua, in genere, su siti che rappresentano un pericolo cronico per l'uomo e/o l'ambiente; si è concordato, dunque, in sede di tirocinio presso la sede di Ferrara, che un'analisi del genere fosse necessaria dopo la messa in sicurezza d'emergenza e la redazione del piano di caratterizzazione, in termini di verifica delle possibili conseguenze legate alla situazione qualitativa/sanitaria dei lavoratori presso la stazione ferroviaria e, eventualmente, di definizione degli obiettivi di risanamento del sito.

5.1 - Definizione di rischio

Il Rischio (R), come definizione derivata originariamente dalle procedure di sicurezza industriale, è inteso come la concomitanza della probabilità di accadimento di un evento dannoso (P) e dell'entità del danno provocato dall'evento stesso (D):

$$R = P \times D$$

Il danno conseguente all' evento incidentale (D), a sua volta, può essere dato dal prodotto tra un fattore di pericolosità (Fp), dipendente dall' entità del possibile danno, e un fattore di contatto (Fe), funzione della durata di esposizione:

$$D = F_p \times F_e$$

Nel caso di siti inquinati, la probabilità (P) di accadimento dell' evento è conclamata (P=1), il fattore di pericolosità è dato dalla tossicità dell' inquinante (T [mg/kg d]⁻¹) ed il fattore di contatto è espresso in funzione della portata effettiva di esposizione (E [mg/kg d]).

Per cui, in generale, il rischio (R) derivante da un sito contaminato è dato dalla seguente espressione:

$$R = E \times T$$

Dove E ([mg/kg d]) rappresenta l' assunzione cronica giornaliera del contaminante e T ([mg/kg d]⁻¹) la tossicità dello stesso.

Il fattore E è dato dal prodotto tra la concentrazione, calcolata in corrispondenza del punto di esposizione Cpoe [mg/m³], e la portata effettiva di esposizione EM[m³ /kg d], che può rappresentare la quantità di aria inalata al giorno per unità di peso corporeo:

$$E = C_{poe} \times EM$$

A sua volta, la concentrazione nel punto di esposizione Cpoe è data da:

$$C_{poe} = F_T \times C_s$$

dove Cs rappresenta la concentrazione in corrispondenza della sorgente di contaminazione e FT è il fattore di trasporto, che tiene conto dei fenomeni di attenuazione che intervengono durante la migrazione dei contaminanti attraverso i vari comparti ambientali.

Il risultato R, viene poi confrontato con i criteri di accettabilità individuali (rischio dovuto ad un singolo contaminante per una o più vie d'esposizione) e cumulativi (rischio dovuto alla cumolazione degli effetti di più sostanze per una o più vie d'esposizione) del rischio sanitario, per decidere se esistono o meno condizioni in grado di causare effetti sanitari nocivi.

Il calcolo del rischio si differenzia a seconda che l'inquinante sia cancerogeno oppure non-cancerogeno.

Per le sostanze cancerogene:

$$R = E \times SF$$

Dove R (Rischio [adim]) rappresenta la probabilità di casi incrementali di tumore nel corso della vita, causati dall' esposizione alla sostanza, rispetto alle condizioni di vita usuali; SF (Slope Factor [mg/kg d]⁻¹) indica la probabilità di casi incrementali di tumore nella vita per unità di dose.

Per le sostanze non cancerogene:

$$HQ = E / RfD$$

Dove HQ (Hazard Quotient [adim]) è un " Indice di Pericolo" che esprime di quanto l'esposizione alla sostanza supera la dose tollerabile o di riferimento; RfD (Reference Dose [mg/kg d]) rappresenta la stima dell'esposizione media giornaliera che non produce effetti avversi apprezzabili sull' organismo umano durante il corso della vita.

Gli istituti scientifici nazionali APAT, ISS, ISPESL che svolgono la propria attività di supporto al Ministero dell' Ambiente hanno elaborato delle note sui livelli di rischio tollerabile per l'uomo da adottare nell' applicazione dell' analisi assoluta di rischio per i siti contaminati. I riferimenti alle note sono i seguenti: APAT del 29/12/05 (Prot. APAT 47009), ISS del 11/01/06 (Prot. ISS 0000181 AMPP/IA), ISPESL del 19/01/06 (Prot. ISPESL DIPIA/00000236).

Tali note indicano, su proposta dell'ISS, in **10⁻⁶ valore di rischio cancerogeno incrementale tollerabile per la singola sostanza (rischio individuale)** e in 10⁻⁵

il valore di rischio cancerogeno incrementale tollerabile per la sommatoria di più sostanze (rischio cumulativo).

Per il **rischio derivante da sostanze non cancerogene il valore di riferimento e**

1. Tale posizione degli istituti scientifici nazionali è conforme a quanto riportato nel DLgs 04/08, correttivo del DLgs 152/06.

5.2 - Modalità diretta e inversa nell'analisi di rischio

La procedura di analisi assoluta di rischio può avere un duplice obiettivo finale: stimare quantitativamente il rischio per la salute umana connesso a una situazione di inquinamento, ed individuare dei valori di concentrazione accettabili nel suolo e nella falda vincolati alle condizioni specifiche del singolo sito che costituiscono gli obiettivi di bonifica sito specifici (Concentrazioni Soglia di Rischio, CSR).

In entrambi i casi si può procedere secondo due modalità:

- Modalità diretta (**forward mode**): permette il calcolo del rischio associato al recettore esposto, derivante da una sorgente di contaminazione di concentrazione nota. Nota la concentrazione rappresentativa della sorgente, si stima l'esposizione da parte del recettore, tenendo conto dell'attenuazione dovuta ai fattori di trasporto. Si considera la tossicità delle sostanze mediante i parametri RfD (Reference Dose) e SF (Slope Factor) ed infine si calcola il rischio.

Questa è la modalità impiegata nell'analisi svolta in questa tesi.

- Modalità inversa (**backward mode**): permette il calcolo della massima concentrazione ammissibile in sorgente compatibile con il livello di rischio ritenuto accettabile per il recettore esposto. Tale concentrazione rappresenta proprio l'obiettivo di bonifica specifico per il sito in esame.

Si ottiene una concentrazione accettabile nel punto di esposizione ed infine, per mezzo dei fattori di trasporto, si arriva a stimare la concentrazione accettabile in sorgente.

La valutazione del rischio, inoltre, una volta scelta una delle due modalità sopracitate, si può dividere in livelli di analisi diversi:

- Livello 1: si fa riferimento a condizioni sito-generiche e rappresenta quindi una valutazione di screening. Prende in considerazione percorsi di esposizione diretti o indiretti, fattori di esposizione conservativi ed equazioni di trasporto di tipo prettamente analitico.

- Livello 2: si fa riferimento a condizioni sito-specifiche ed e quindi una valutazione di maggiore dettaglio. Prevede l'utilizzo di modelli analitici per la stima della concentrazione al punto di esposizione considerando un mezzo omogeneo e isotropo.

Applicando tale livello di analisi ("tier 2") si derivano i Site Specific Target Levels (SSTL), valori di concentrazione nelle matrici ambientali suolo insaturo e saturo che possono essere considerati quali obiettivi di bonifica.

Un' analisi a tale livello, come quella che si sta conducendo sul sito coinvolto nello sversamento di gasolio, necessita di una quantità maggiore di dati rispetto all'analisi di livello 1. Vengono considerati, inoltre, più scenari e parametri di esposizione sito-specifici. Gran parte del lavoro per l'Analisi di Rischio trattata in questo elaborato, infatti, ha riguardato il reperimento di tutti i dati sito specifici necessari di cui si tratterà in maniera approfondita nei paragrafi successivi.

- Livello 3: utilizza modelli numerici e analisi probabilistiche che consentono di poter considerare l'eterogeneità del sistema e di generalizzare la geometria della sorgente inquinante e delle condizioni al contorno. La sua applicazione richiede però una maggior conoscenza del sistema fisico e, conseguentemente, una fase di "site assessment" più approfondita con una maggior quantità di dati.

Per l'analisi di rischio qui trattata si sono analizzati i pro e i contro dei tre livelli; si è inoltre tenuto conto del fatto che fosse necessario elaborare una semplificazione della geometria del sito, ipotizzare i mezzi omogenei, elaborare una rappresentazione semplificata di meccanismi di trasporto e dispersione.

Si è optato per un livello 2 di analisi ritenendo che, essendo intermedio tra i tre proposti dalla RBCA, possa rappresentare un buon compromesso. Un presupposto fondamentale per l'applicazione di un livello 2 di analisi è quello di utilizzare modelli analitici per la stima dei fattori di trasporto delle specie chimiche contaminanti attraverso i diversi comparti ambientali. Nella scelta si è tenuto

anche conto, dunque, dei vantaggi dell' utilizzo di modelli analitici quali la semplicità di implementazione e di applicazione, la necessità di inserire in input un numero limitato di parametri, la loro stabilità numerica e la conservatività degli output.

5.3 - Parametri ricercati

Data la natura della sostanza sversata (cap. 4, par. 4.2), si è ritenuto idoneo considerare i documenti riguardanti l'inquinamento in aree carburante per stilare una short list dei parametri da ricercare fra la totalità di sostanze riscontrate nel sito. Tali sostanze sono per la maggior parte volatili; è indubbio dunque come l'analisi sulla volatilità in falda, in suolo e conseguentemente anche sui gas interstiziali sia necessaria per avere un quadro del rischio cancerogeno e di tossicità completo ed esaustivo.

Secondo quanto riportato dal Ministero dell'Ambiente nel Decreto del 12 Febbraio 2015, numero 31, tramite la gazzetta ufficiale della Repubblica Italiana, le sostanze soggette a volatilizzazione, che potrebbero essere tossiche e/o cancerogene sono: Idrocarburi C<12, C>12 per la sorgente suolo, Totali come n-esano per la sorgente falda, Benzene, Toluene, Etilbenzene, Stirene, Xileni, IPA, MTBE, ETBE, Piombo (solo per il suolo), Piombo Tetraetile.

Quelli indagati, ossia quelli più volatili , nel sito di interesse sono i seguenti, con le relative CSC, colonna B Tab. 1 del D.Lgs 152/06 per suolo e Tab.2 per la falda:

COMPOSTI VOLATILI	CSC Suolo (mg/kg)	CSC Acque sotterranee (µg/L)
Benzene	2	1
Etilbenzene	50	50
Stirene	50	25
Toluene	50	15
Xileni	50	10
MTBE	250	40
Idrocarburi aromatici	750	/
Idrocarburi alifatici	250	
Idrocarburi totali come n- esano	/	350

Tab. 5.1 - Lista delle sostanze indagate nel sito, con le relative CSC per suolo e falda

5.3 - Il modello concettuale del sito

Il primo step per approcciarsi all'analisi di rischio sanitaria del sito è stato quello di costruire il modello concettuale del sito per poter avere tutti i dati di input necessari.

Un modello concettuale si ottiene tramite la modellizzazione del mondo reale, dei suoi elementi e delle interazioni tra essi tramite strumenti matematici.

Dunque l'elaborazione di un Modello Concettuale Definitivo del sito è mirata alla rappresentazione dell'interazione tra lo stato di contaminazione del sottosuolo e l'ambiente naturale e/o costruito. Il Modello Concettuale costituisce pertanto la base per l'applicazione dell'Analisi di Rischio che dovrà verificare gli scenari di esposizione in esso definiti.

(Decreto Ministeriale del 12 Febbraio 2015, n. 31, " *Regolamento recante criteri semplificati per la caratterizzazione, messa in sicurezza e bonifica dei punti vendita carburanti, ai sensi dell'articolo 252, comma 4, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152*).

Il Modello Concettuale Definitivo include:

- le caratteristiche specifiche del sito in termini di stato delle potenziali fonti della contaminazione (attive, non attive, in sicurezza, ecc.);
- grado ed estensione della contaminazione del suolo, del sottosuolo, delle acque superficiali e sotterranee del sito e dell'ambiente da questo influenzato;
- percorsi di migrazione dalle sorgenti di contaminazione ai bersagli individuati nello scenario attuale (siti in esercizio) o nello scenario futuro (in caso di riqualificazione dell'area) (Decreto Ministeriale del 12 Febbraio 2015, n. 31, " *Regolamento recante criteri semplificati per la caratterizzazione, messa in sicurezza e bonifica dei punti vendita carburanti, ai sensi dell'articolo 252, comma 4, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152*).

Per l'elaborazione del modello concettuale dell' area in esame, si sono svolte indagini di caratterizzazione del sito sino alla ricostruzione dei caratteri delle tre componenti principali per un' AdR:

- sorgente;
- trasporto con relative vie di migrazione;
- bersagli.

5.4 - Sorgente di contaminazione

Come detto in precedenza, per applicare la procedura di AdR è necessario eseguire una schematizzazione concettuale e fisica di elementi del mondo reale tra i quali, principalmente, la geometria del sito e della sorgente di contaminazione.

In particolare, la sorgente di contaminazione si differenzia in sorgente primaria e sorgente secondaria [ASTM E-1739-95]. La sorgente primaria è rappresentata dall'elemento che è causa di inquinamento (es. il gasolio sversato dalla cisterna che si è ribaltata); quella secondaria è identificata con il comparto ambientale oggetto di contaminazione (suolo, acqua, aria). L'oggetto dell' analisi di rischio è la sorgente secondaria. Essa può trovarsi in due comparti ambientali, ovvero:

- **zona insatura**, a sua volta classificabile come suolo superficiale (SS), compreso tra 0 ed 1 m di profondità dal piano campagna e suolo profondo (SP), con profondità maggiore di 1 m dal piano campagna;

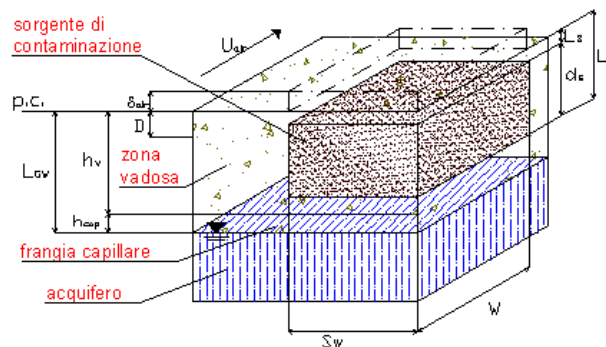


Fig. 5.1 - Geometria del sito e della sorgente di contaminazione in zona insatura.

- **zona satura**, o acqua sotterranea (GW).

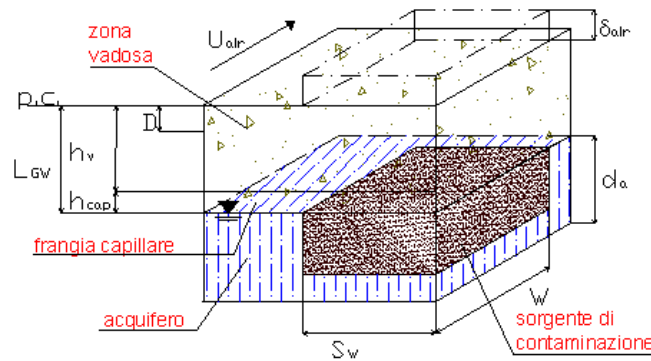


Figura 5.2 - Geometria del sito e della sorgente di contaminazione in zona satura (falda).

5.4.1 - Sorgente in zona insatura - Suolo superficiale

Le caratteristiche della sorgente in suolo superficiale si sono stimate tramite diverse vie.

Per prima cosa si è fatto capo alle analisi svolte durante la messa in sicurezza e a quelle richieste dal piano di caratterizzazione per ricostruire il grado di inquinamento della porzione di suolo interessata, ossia da 0 a 1 m dal p.c. Essendo le analisi relative a carotaggi eseguiti a diverse profondità, per prima cosa si sono divisi i dati in suolo superficiale e suolo profondo, utilizzando così due volte lo stesso dato, per entrambe le porzioni di suolo, se esso risultava relativo a profondità intermedie (es. concentrazione di inquinante X stimata da 0,50 m a 1,30 m).

Una volta applicata questa suddivisione, si è passati a verificare se per il suolo superficiale le concentrazioni degli inquinanti indagati superassero le CSC tabellate nel D.DLgs52/06 per siti ad uso commerciale e industriale.

Si sono evidenziati in carta dei punti con concentrazioni superiori a quelle normate.

Tramite questi punti, corrispondenti ai punti dei sondaggi eseguiti nel corso degli anni, e punti circostanti definiti "puliti" si è potuta stimare l'area di suolo superficiale interessata dalla potenziale contaminazione. Nello specifico, il metodo utilizzato per la determinazione dell'area ha previsto l'elaborazione dei poligoni di Thiessen. Si è scelto per convenzione il verde per indicare i poligoni

non interessati da contaminazione, il rosso per mettere in evidenza i poligoni considerati contaminati.

La procedura per la delimitazione di una o più sorgenti all'interno di un sito contaminato, è stata ricavata dall' interpretazione dell' Appendice D del documento Risk Assessment Guidance for Superfunds (US EPA, 2001); tale procedura prevede la suddivisione in poligoni di influenza dell'area oggetto d'indagine, secondo due possibili strategie:

- Campionamento ragionato (secondo i poligoni di Thiessen);
- Campionamento sistematico (celle a maglia regolare).

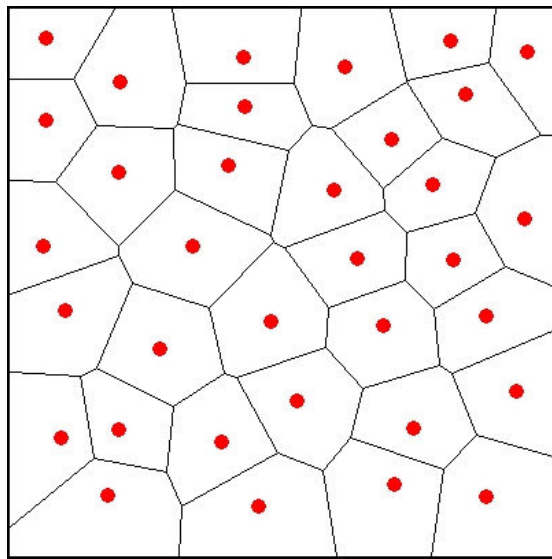


Figura 5.3 - Esempio di campionamento ragionato (Poligoni di Thiessen)

Dalla suddetta elaborazione con i Poligoni di Thiessen si è quindi ricavata l'area sorgente riportata in fig. 5.4, che presenta un'estensione di 1476,74 m²



Fig. 5.4 - Delimitazione della sorgente suolo superficiale con poligoni di Thiessen; scala 1:500

La costruzione geometrica che si ricava dalla poligonizzazione a volte assume forme poco realistiche in quanto influenzata dalla distribuzione dei punti considerati.

Per rendere l'area quanto più vicina all'idea di "plume di contaminazione", lavorando in Autocad si sono esclusi i poligoni in verde (non interessati da superamento delle CSC) e si è tenuto conto della sola area costituita dai poligoni rossi (in cui c'è superamento delle CSC); si sono smussati gli angoli e arrotondati gli spigoli, rendendo, così, più morbido il perimetro di tale area e mettendo in evidenza la sola sorgente interessata da contaminazione, come mostrato in figura 5.5:



Fig. 5.5 - Area stimata della sorgente di contaminazione in suolo superficiale; scala 1:500

Una precisazione va fatta anche per quanto riguarda il punto Parete Est A: seppure il terreno campionato in questo punto non risulti interessato da superamento di CSC per le sostanze volatili indagate, si è incluso come poligono contaminato, seguendo quanto riportato nei criteri metodologici del manuale APAT: " I poligoni/celle che non presentano superamento delle CSC, possono concorrere alla delimitazione della sorgente e al calcolo della concentrazione rappresentativa. Si ritiene opportuno che un poligono/cella venga incluso nella sorgente se:

- 1) il poligono/cella è completamente circoscritto da altri poligoni/celle in cui $C > CSC$;
- 2) l'analisi del vicinato indica che la maggior parte dei poligoni/celle adiacenti supera le CSC" (come nel caso del punto Parete Est A).

La delimitazione di un' area interessata dalla contaminazione è stata importata non solo per stabilire la geometria della sorgente, ma anche per ricavare altri parametri sito specifici richiesti dall'analisi di rischio, ossia:

- L'estensione massima della sorgente in direzione parallela alla direzione del flusso di falda (W);
- L'estensione massima della sorgente in direzione perpendicolare alla direzione del flusso di falda (Sw);

- L'estensione massima della sorgente in direzione parallela alla direzione prevalente del vento (W');
- L'estensione massima della sorgente in direzione perpendicolare alla direzione prevalente del vento (Sw');

La direzione del flusso di falda, in seguito a diverse campagne freaticometriche, si è stimata essere NW.

Per la direzione prevalente del vento che spira su Porto Marghera si è fatto capo ai dati messi a disposizione dal portale ARPAV, in cui sono riportate tutte le informazioni registrate da diverse stazioni meteorologiche del Veneto.

Le località delle stazioni di cui si sono consultati i dati sono Cavallino Treporti, Mogliano Veneto e Venezia. L'analisi è stata effettuata su misurazioni svolte negli ultimi 10 anni.

La direzione prevalente del vento che spira sul sito è dunque risultata essere NE.

Le estensioni richieste dal manuale APAT calcolate sono le seguenti:

- W: 27,67 m;
- Sw : 53,37 m;
- W' : 53,37 m;
- Sw' : 27,67 m.

5.4.2 - Sorgente in zona insatura - Suolo profondo

Per la determinazione della sorgente "suolo profondo" si è usata la stessa metodologia di cui si è trattato al paragrafo precedente, ossia individuazione dei punti contaminati e suddivisione in poligoni di Thiessen. L'area della sorgente "suolo profondo" è risultata essere estesa per 2964,76 m².



La perimetrazione della sola area interessata da contaminazione è stata effettuata seguendo lo stesso procedimento spiegato per il passaggio da Fig. 5.3 a Fig. 5.4. Si ottiene così il plume mostrato in figura 5.7:

La porzione di suolo insaturo interessata va da 1 metro al di sotto del piano campagna fino alla profondità a cui si è stimata essere la sorgente falda.

Per stimare il parametro "soggiacenza" (L_{gw}) relativo al suolo insaturo si sono analizzati i dati relativi alla falda ricavati da due differenti campagne in cui in tutti i piezometri installati si è andata a misurare la soggiacenza.

La prima campagna piezometrica è stata effettuata nel 2015 e ha portato i seguenti risultati:

Rilievo Freatimetrico del 15/07/2015	
PIEZOMETRO	SOGGIACENZA (m)
P1	2,254
P2	1,790
P3	1,759
P4	1,407
P5	1,703
P6	2,109
P8	1,814
P9	1,893
P10	1,461
P11	1,662
P13	1,691
P14	1,583
P15	1,958
P16	2,074
P17	2,124
P18	2,078
P19	1,969
P20	1,908
P21	2,149
P22	2,028
P23	1,952

Tab. 5.2 - Risultati del rilievo freaticometrico del 2015

La seconda campagna è stata condotta un anno dopo:

Rilievo Freatimetrico del 03/06/2016	
PIEZOMETRO	SOGGIACENZA (m)
P3	1,689
P9	1,463
P13	1,611
P15	1,898
P16	1,684
P17	1,874
P18	1,978
P19	1,749
P20	1,628
P21	2,049
P6	1,839
P8	1,794

Tab. 5.3 - Risultati del rilievo freaticometrico del 2016

Avendo a che fare con la porzione di suolo insaturo è stato opportuno stimare quale potesse essere il valore più cautelativo in termini di rischio per tale sorgente. Spessori maggiori di suolo interessati da volatilizzazione comportano maggior rischio sanitario; dunque fra le due campagne inizialmente si sono confrontati i dati relativi allo stesso piezometro per capire in quale si fossero registrate le soggiacenze maggiori.

Come si può facilmente stimare dalle tabelle, i dati in cui la falda è risultata essere a profondità maggiori sono quelli della prima campagna.

Fra questi dati è stato poi necessario ricavarne uno unico, tenendo conto che il valore più conservativo sarebbe stato quello massimo. Per farlo, essendo i dati in numero maggiore di 10, si è optato per l' UCL (Upper Confidential Limit) al 95% della media.

L'UCL è stato ricavato tramite il software Pro UCL 5.1; il valore finale considerato il valore più conservativo della soggiacenza per la sorgente " suolo insaturo" è 1,962 metri.

Con questo valore e considerando che il tetto della porzione di suolo superficiale interessata si trova a - 1m dal piano campagna, si è facilmente ricavato lo spessore di questa zona, ossia 0,962 metri.

Anche per questa sorgente, una volta stimata l'estensione dell'area, si sono calcolate le estensioni in direzione parallela e perpendicolare al flusso di falda e alla direzione prevalente del vento:

- W: 35,32 m;
- Sw: 83,94 m;
- W' : 83,94 m;
- Sw' : 35,32 m.

5.4.3 - Sorgente in zona satura - Falda

Per quanto concerne l'individuazione dell' area della zona satura interessata da contaminazione, si è proceduto nello stesso modo della zona insatura. La costruzione dei poligoni di Thiessen si è fatta tenendo conto dei risultati delle ultime due campagne di indagine svolte in anni diversi sugli stessi piezometri.

Dal momento che nella campagna più recente non tutti i piezometri sono stati interessati da campionamento, se ne sono analizzate le ragioni e si è deciso di considerare come poligoni contaminati anche quelli in cui ricadono tali piezometri. P 11, P 10 e P 4, infatti, non sono stati campionati nell' ultima campagna perché nella prima vi era stata riscontrata presenza di sostanza surnatante; dovendo optare sempre per la soluzione più cautelativa si è deciso di includerli nell' area come punti ad oggi ancora contaminati.



Fig. 5.8 - Delimitazione della sorgente falda con poligoni di Thiessen; scala 1:500

Anche in questo caso, quanto mostrato in Fig. 5.9 è frutto dell' arrotondamento di spigoli e angoli del perimetro della sola area in rosso di Fig. 5.8.

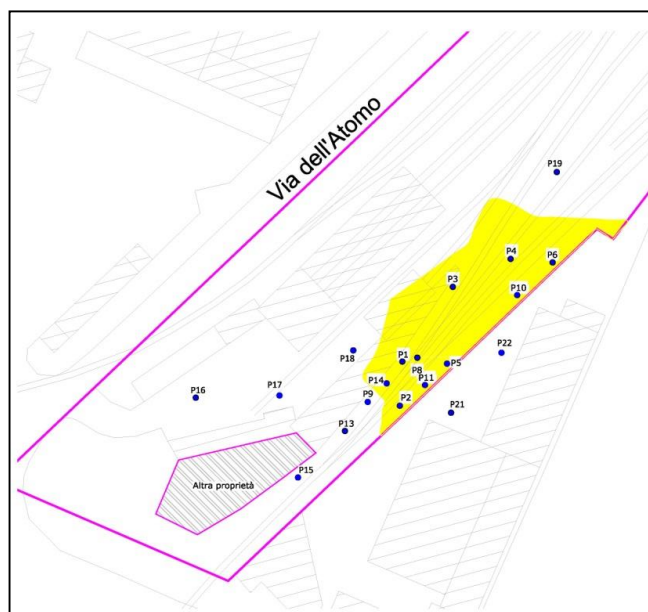


Fig. 5.9 - Area stimata della sorgente di contaminazione in falda; scala 1:500

Una precisazione va fatta anche per quanto riguarda il punto P3: seppure le acque in questo punto non risultino interessate da superamento di CSC per le sostanze volatili indagate, si è incluso come poligono interessato da contaminazione, secondo i criteri già spiegati al paragrafo 5.4.1

L'area risultante della zona satura è $1885,37 \text{ m}^2$.

La soggiacenza nel caso della matrice falda è pari a 1,685 m ed è stata stimata tenendo conto dei dati riportati nelle tabelle del paragrafo 5.4.3, scegliendo questa volta quelli più bassi, ossia indicanti una soggiacenza minore, fra le due campagne e applicando il LCL (Lower Confidential Limit) al 95 % per stimare il valore più conservativo, ossia il minimo in questo caso.

Anche le estensioni in direzione parallela e perpendicolare al flusso di falda e alla direzione prevalente del vento sono state stimate esser pari a:

- W: 24,61 m;
- Sw: 76,61 m;
- W' :76,61 m;
- Sw': 24,61 m.

5.4.4 - Altri parametri riguardanti la sorgente

Di fondamentale importanza per fare un'Analisi di Rischio corretta è stata la ricerca di altri parametri riportati nel manuale ISPRA "Criteri metodologici per l'applicazione dell' analisi assoluta di rischio ai siti contaminati" inerenti alla geometria delle sorgenti. Alcuni di questi parametri derivano da calcoli matematici basati sul rapporto dei parametri trattati nei paragrafi precedenti e vengono elaborati direttamente dal software impiegato per l'Analisi di Rischio.

Si riportano con le relative definizioni:

- h_{cap} (spessore della frangia capillare): La frangia capillare rappresenta la zona posta subito al di sopra della superficie piezometrica cui è idraulicamente legata. La stima è stata fatta in maniera indiretta, facendo riferimento agli studi di Lohman (1972) e Fetter (1994) [EQM, 2003] i quali stimarono la risalita dell'acqua nella zona della frangia capillare in base alla granulometria.

Tessitura de suolo	h capillare (cm) secondo Fetter (1994)
Sand	10
Loamy Sand	18.8
Sandy Loam	25
Sandy Clay Loam	25.9
Loam	37.5
Silt Loam	68.2
Clay Loam	46.9
Silty Clay Loam	133.9
Silty Clay	192
Silt	163
Sandy Clay	30
Clay	81.5

Tab. 5.4 - Valori dell' h capillare secondo Fetter (1994) in base alla granulometria

- h_v (spessore della zona insatura): Tale parametro rappresenta la distanza tra il piano campagna (p.c.) e la frangia capillare. Si ricava attraverso la seguente relazione: $h_v = L_{gw} - h_{cap}$.

- L_s (profondità del top della sorgente rispetto al p.c.): Il top della sorgente di contaminazione coincide con la minima profondità rispetto al p.c., alla quale è stata riscontrata concentrazione di almeno un contaminante superiore ai valori di riferimento indicati dalla normativa vigente.

Per il suolo superficiale il valore minimo di L_s è 0 m, mentre per il suolo profondo il valore minimo di L_s è 1 m.

- L_f (profondità della base della sorgente rispetto al piano campagna): la base della sorgente di contaminazione coincide con la massima profondità rispetto al p.c. alla quale è stata riscontrata concentrazione di almeno un contaminante superiore ai valori di riferimento indicati dalla normativa vigente. Per il suolo superficiale il valore massimo di L_f è 1 m, mentre per il suolo profondo il valore massimo è L_{gw} .

- d_s (spessore della sorgente nel suolo profondo insaturo): Lo spessore della sorgente di contaminazione in suolo profondo insaturo è dato dalla seguente relazione: $d_s = L_f - L_s$.

- d (spessore della sorgente nel suolo superficiale insaturo): lo spessore della sorgente di contaminazione in suolo superficiale insaturo è dato dalla seguente relazione: $d = L_f - L_s$.

- L_f (Soggiacenza dell'acquifero rispetto al top della sorgente): La soggiacenza dell'acquifero rispetto al top della sorgente si può ricavare dalla seguente relazione: $L_F = L_{GW} - L_s$.

5.5 - Vie di migrazione

Note le caratteristiche della sorgente, è stato indispensabile determinare le caratteristiche fisiche dei comparti ambientali coinvolti: suolo insaturo (superficiale e profondo), suolo saturo, aria outdoor e aria indoor.

Come già evidenziato quando si è trattato della definizione di rischio, assegnata la concentrazione della sorgente, si calcola la concentrazione al punto di esposizione attraverso la seguente relazione:

$$C_{poe} = FT \cdot C_s$$

dove con FT viene indicato il fattore di trasporto, che tiene conto dei fenomeni di attenuazione che intervengono durante la migrazione dei contaminanti. I fattori di trasporto a cui si fa riferimento in questa tesi sono i Fattori di Volatilizzazione outdoor e indoor.

Il fenomeno di volatilizzazione di vapori da suolo superficiale (SS) e da suolo profondo (SP) in ambienti aperti (outdoor) è un processo secondo il quale i flussi di vapore organici presenti nella porzione superficiale e/o profonda di terreno migrano verso l'aria al di sopra della superficie del terreno stesso per il primo, e si rimescolano con l'aria della zona posta al di sopra della sorgente contaminante per il secondo.

Il fenomeno di volatilizzazione di vapori da falda (GW) in ambienti aperti è un processo secondo il quale le specie chimiche volatili, presenti in soluzione nelle acque di falda, migrano, sotto forma di vapori, verso la superficie del terreno, dove si mescolano con l'aria della zona sovrastante la sorgente contaminata.

Il fattore di volatilizzazione in aria outdoor da SS, SP e GW si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria) e quella in corrispondenza della sorgente:

$$VF = \frac{C_{POE}}{C} \left[\frac{\frac{\text{mg}}{\text{m}^3\text{-aria}}}{\frac{\text{mg}}{\text{Kg-suolo}}} \right]$$

Quando si parla di volatilizzazione indoor, invece, si fa riferimento all'eventualità che in corrispondenza della zona di contaminazione, vi sia un edificio nel quale, a causa di eventuali fessurazioni nelle fondazioni o nei muri perimetrali dei locali interrati, si verifichi l'infiltrazione della fase volatile dei contaminanti.

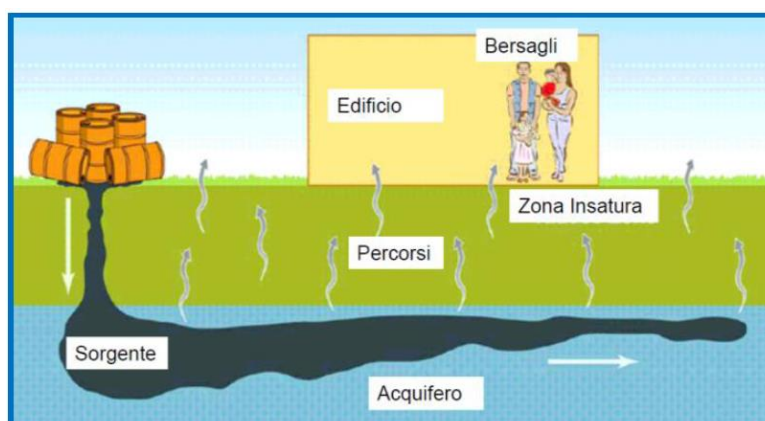


Fig. 5.10 - Esempio di volatilizzazione indoor e outdoor

In questa parte dell' analisi, dunque, si è focalizzata l'attenzione principalmente sulle caratteristiche delle matrici coinvolte quali granulometria, Ph, Frazione di carbonio organico, conducibilità idraulica.

Inoltre, prima di procedere, si sono fatte le seguenti assunzioni: la concentrazione degli inquinanti si è considerata uniformemente distribuita, il terreno è stato considerato omogeneo, isotropo e incoerente e si è esclusa la possibilità che avvengano meccanismi di degradazione/trasformazione delle sostanze inquinanti nel suolo, in soluzione o in fase vapore.

La granulometria del terreno non entra direttamente nelle equazioni utili per il calcolo dei fattori di trasporto. Nonostante ciò, la sua determinazione risulta utile, per stimare i valori di molte delle proprietà fisiche del suolo saturo e insaturo come per esempio l' h_{cap} si cui si è parlato precedentemente.

Quello che si è fatto è stabilire una granulometria per ogni sorgente presa in considerazione. Per fare ciò ci si è basati sulle analisi granulometriche eseguite sui campioni di terreno prelevati durante le operazioni di messa in sicurezza del sito e quelle poi richieste in fase di caratterizzazione. Calcolata la massa delle particelle costituenti le diverse classi granulometriche, espresse in percento della massa totale della terra fine, queste ultime sono state ridotte nelle tre classi principali: sabbia, limo e argilla. Si ricorda che si identificano con il nome di ghiaia le particelle con diametro $\Phi > 2,0$ mm, con sabbia quelle con diametro $0,06$ mm $< \Phi < 2,0$ mm, con limo quelle con diametro $0,002$ mm $< \Phi < 0,06$ mm, con argilla quelle con diametro $\Phi < 0,002$ mm.

Nota la percentuale di ognuna di esse, si classifica il terreno attraverso il diagramma triangolare riportato in figura:

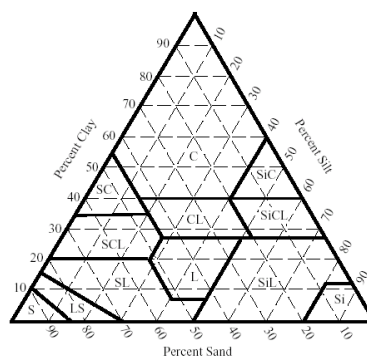


Fig. 5.11 - Diagramma triangolare per la determinazione granulometrica

La granulometria relativa al suolo profondo è risultata essere medio-limosa (Sil), quella del suolo superficiale sabbiosa-limosa (LS) e infine quella della falda medio- limosa anch'essa (Sil).

Altri parametri presi in considerazione perché disponibili come dati sito specifici, sono Foc e Ph.

La frazione di carbonio organico è stata stimata solo per il suolo insaturo, su un numero inferiore di campioni rispetto alla totalità dei sondaggi eseguiti. Essendo i dati inferiori a 10 è bastato dividerli in dati relativi al suolo superficiale e dati riferiti al suolo profondo; si è preso poi in considerazione il valore minimo di carbonio organico riscontrato. Il valore più cautelativo in questo caso è infatti il minore, in quanto il carbonio organico, avendo la capacità di trattenere inquinante, è considerato un'agente naturale positivo per la bonifica.

Il valore di Foc riguardante il suolo profondo è 0.0003 g-C/g suolo; quello relativo al suolo superficiale è 0.0002 g-C/g suolo. Per la falda non è stato necessario fornire tale parametro, così come anche quello relativo alla conducibilità idraulica K, in quanto si sta tenendo in considerazione il fenomeno della volatilizzazione e gli inquinanti dal piano di falda si muovono verso l'alto, non attraversandola.

Per quanto riguarda il Ph, si è optato per mantenere in tutte le sorgenti considerate il valore di default in quanto ininfluente come fattore nel fenomeno della volatilizzazione.

Parametro fondamentale per il rischio da volatilizzazione e trasporto di sostanze nocive è la velocità e la direzione del vento. Come già detto per la direzione prevalente del vento (che ricordiamo essere NE su Porto Marghera), i dati relativi a questo parametro sono stati presi dai database on line dell'ARPAV, considerando le rilevazioni degli ultimi 10 anni presso le stazioni meteorologiche più vicine al sito in esame: Venezia, Cavallino Treporti, Mogliano Veneto.

La direzione e la velocità del vento vengono di solito considerati costanti sull'area di interesse (dalla sorgente al bersaglio sia on-site che off-site) e pari al valor medio annuo nella medesima area. [UNICHIM, 2002].

In primis, dunque, si è fatta una media dei 10 valori medi annui sopra citati, ottenendo una velocità del vento pari a 1,6 m/s. La problematica riscontrata è stata dovuta al fatto che tale velocità fosse stata rilevata a 10 metri e che l'analisi di rischio preveda, invece, una zona di miscelazione a 2 m dal piano campagna. Per

stimare l'influenza del vento a 2 m si è impiegata la seguente formula riportata nel manuale APAT-ISPRA:

$$\frac{U_{air}(z_1)}{U_{air}(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^p$$

Con z_2 l'altezza alla quale sono stati rilevati i dati (10 m), z_1 l'altezza a cui i dati si vogliono portare (2m) e p funzione della classe di stabilità atmosferica e della rugosità del suolo.

Per stimare "p" si è fatto capo a quanto riportato nel manuale: " *La stabilità è un indicatore della turbolenza atmosferica e quindi della capacità di un contaminante di disperdersi nel mezzo. Questa dipende principalmente dalla velocità del vento, dalla turbolenza meccanica e convettiva (termica). Per stimare la stabilità atmosferica è possibile utilizzare il criterio di classificazione di Pasquill-Gifford che esprime la classe di stabilità in funzione della velocità del vento, della radiazione solare totale e della copertura nuvolosa.*"

Di seguito viene riportata la tabella citata:

Velocità del vento a 10 m dal p.c.(m/s)	Radiazione solare incidente (GIORNO)			Copertura nuvolosa (NOTTE)	
	Forte	Moderata	Debole	> 50%	< 50%
< 2	A	A - B	B	E	F
2 3	A - B	B	C	E	F
5 6	B	B - C	C	D	E
5 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Tab. 5.5 - Classi di stabilità atmosferica di Pasquill- Gifford

Secondo quanto stabilito dalle autorità di competenza, Porto Marghera ricade nella classe atmosferica E. Elaborando una corrispondenza tra la classe di stabilità e il parametro "p", esso per il suolo urbano assume un valore di 0,40.

La velocità del vento a 2 m calcolata dal software è dunque di 0,8405 m/s.

Si citano di seguito altri parametri riguardanti le vie di migrazione richiesti dal software per cui si è fatto capo a valori di default o di letteratura:

- densità del suolo (ρ_s): per la stima indiretta di ρ_s si assume un valore pari a 1,7 g/cm³ indipendentemente dal tipo di suolo in esame, che rappresenta la media del suo possibile range di valori (1,6 - 1,75 g/cm³) [Connor et al., 1996].

- Porosità totale (θ_T , adim.) ed effettiva (θ_e , adim.) del terreno: la porosità totale è espressa come rapporto tra il volume dei vuoti ed il volume totale di suolo. Indirettamente i parametri θ_T e θ_e sono stati stimati dal software tramite la scelta della tessitura.
- Contenuto volumetrico di acqua (θ_w , adim.): il contenuto volumetrico di acqua di un terreno è dato dal rapporto tra il volume dell'acqua contenuta nel suolo e il volume totale di suolo. Il contenuto volumetrico di aria θ_a può essere calcolato indirettamente come differenza tra la porosità totale (assunta coincidente con la porosità effettiva) ed il contenuto volumetrico di acqua.
- Profondità fondazioni da p.c. (Z_{crack}): Default
- Spessore delle fondazioni/muri (L_{crack}): Default
- Frazione areale di fratture indoor (η): Default
- Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione (L_b): Default
- Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture (θ_{wcrack}): Default
- Contenuto volumetrico di aria nelle fratture (θ_{acrack}): Default
- Tasso di ricambio di aria indoor (ER): Default
- Tempo medio di durata del flusso di vapore (τ_{indoor}): Default

I valori citati come di default verranno successivamente riportati in una tabella riassuntiva.

5.6 - Bersagli

Per quanto riguarda i bersagli della contaminazione, ai fini dell'esecuzione di un'Analisi di Rischio sanitaria, questi sono esclusivamente umani. Tali ricettori sono differenziati in funzione:

- della loro localizzazione: infatti si devono prendere in considerazione nella analisi tutti i recettori umani compresi nell'area logica di influenza del sito potenzialmente contaminato. Nell'ambito del sito in esame si prendono in considerazione recettori umani adulti identificati come bersagli on-site, ossia posti in corrispondenza della sorgente di contaminazione; si definiscono invece, per completezza, bersagli off-site quelli posti ad una certa distanza da questa.
- della destinazione d'uso del suolo; le tipologie di uso del suolo sono differenziate in: residenziale, a cui corrispondono bersagli umani sia adulti che

bambini (età compresa fra 0-6 anni); ricreativo, a cui corrispondono bersagli umani sia adulti che bambini; industriale/commerciale, considerato nell'analisi trattata, a cui corrispondono bersagli esclusivamente adulti.

Le persone esposte al maggior rischio di contaminazione nel sito in cui è avvenuto lo sversamento sono i lavoratori della ditta coinvolta, i quali sono esposti alla contaminazione con frequenza praticamente giornaliera.

5.7 - Impiego del software per l'analisi di rischio sanitario

Per elaborare l'analisi di rischio sito specifica ci si è avvalsi del software Risk net vers. 2.1.

Risk-net è un software che permette di applicare la procedura di Analisi di Rischio sanitaria ai siti contaminati in accordo con quanto previsto dalle linee guida APAT-ISPRA (2008) e dalla normativa italiana (D.Lgs. 152/06 e D.Lgs. 04/08).

Il software permette di calcolare sia il rischio in modo diretto ("Forward"), associato alla concentrazione rilevata in sorgente, che gli obiettivi di bonifica (CSR, concentrazioni soglia di rischio) in maniera indiretta ("Backward"), definendo i limiti di accettabilità del rischio e dell'indice di pericolo.

Il vantaggio di questo software è che permette di utilizzare i dati di soil-gas sia per il calcolo del rischio di inalazione outdoor e indoor che per l'aggiornamento delle CSR per inalazione.

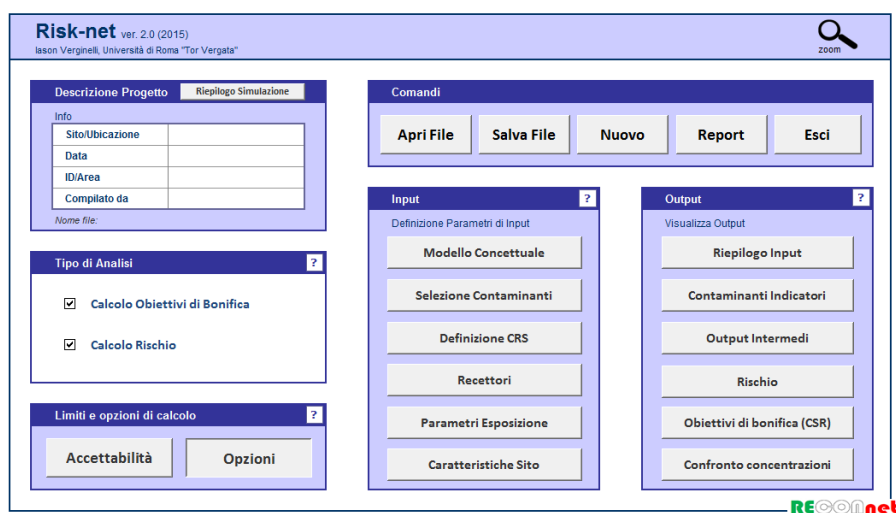


Fig. 5.12 - Schermata home del software Risk net 2.1

In primo luogo si sono effettuate le analisi per le matrici suolo superficiale, suolo profondo e falda; successivamente, sulla base delle analisi di questi risultati si è effettuata quella sui soil gas.

Di base, seppur le analisi sono indipendenti l'una dall'altra per una maggior precisione, si sono impostati dei parametri comuni nel software.

Si è definito il livello di accettabilità di rischio "R" per le sostanze cancerogene e l'indice di pericolo "HI" per le sostanze non cancerogene. Nel software sono impostati come default i valori limite definiti dalla normativa vigente (D.Lgs 152/06 e D.Lgs 04/08) pari a $R=10^{-6}$ e $HI=1$ per la singola sostanza e $R=10^{-5}$ e $HI=1$ per gli effetti cumulati legati alla presenza di più sostanze.

	Individuale	Cumulativo
Rischio	10^{-6}	10^{-5}
Indice di Pericolo	1	1

	Individuale	Cumulativo
Rischio	10^{-5}	10^{-5}
Indice di Pericolo	1	1

	Individuale	Cumulativo
Rischio	1.0E-06	1.0E-05
Indice di Pericolo	1.0	1.0

Fig. 5.13 - Scelta dei parametri di accettabilità del Rischio e Indice di Pericolo

Si è inoltre disattivata l'opzione che tiene conto delle concentrazioni di saturazione (C_{sat}). Concentrazioni in sorgente maggiori di C_{sat} indicano che la concentrazione di acqua e aria dei pori hanno raggiunto il loro massimo valore, ovvero contengono una concentrazione di contaminante rispettivamente pari alla solubilità e alla tensione di vapore.

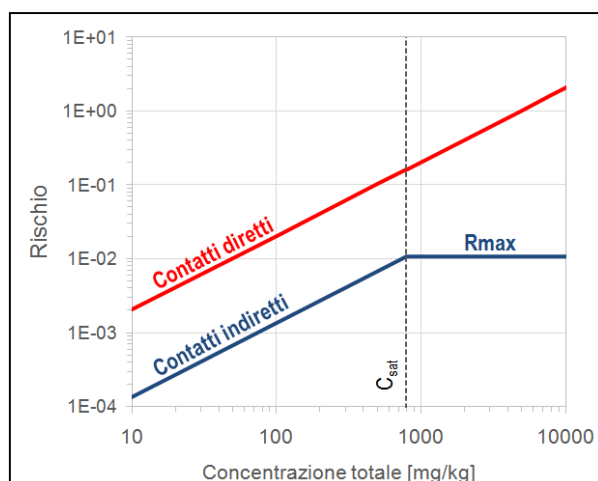


Fig. 5.14 - Andamento del rischio in funzione della concentrazione di saturazione

Secondo quanto riportato dalle linee guida MATTM sull' AdR, del 2014, " Tra i limiti dei modelli di analisi di rischio con livello 2, in caso di superamento della concentrazione di saturazione della sostanza, vi è l'impossibilità di calcolare una CSR in quanto, in linea teorica, l'inquinante viene ritenuto immobile. In questi casi si ha una situazione in cui di fatto il modello individua come accettabile una concentrazione che spesso risulta superiore anche di diversi ordini di grandezza alla concentrazione di saturazione"

Ottenere una $CSR > C_{sat}$ vuol dire, quindi, che in campo le concentrazioni massime che si misureranno nel soil-gas o nell'eluato saranno sempre inferiori ai valori che possono comportare un rischio per quel percorso di esposizione.

Disattivando questa opzione nel caso di condizioni di saturazione ($CRS > C_{sat}$) per i contatti non diretti (volatilizzazione e lisciviazione) le CRS (Concentrazioni Rappresentative alla sorgente) non vengono sostituite con la Concentrazione di Saturazione (C_{sat}).

Non tener conto della saturazione con $C_{max} > C_{sat}$ equivale ad assumere che la concentrazione in fase disciolta sia superiore alla solubilità teorica e la concentrazione in fase vapore sia superiore alla tensione di vapore; questa opzione va contro le leggi della fisica ma a livello pratico è un approccio che permette di definire un numero nel caso in cui la $CRS > C_{sat}$.

È stata disattivata, inoltre, l'opzione per il calcolo degli obiettivi di bonifica, lasciando attiva solo l'opzione del calcolo del rischio.

outdoor" e " inalazione di vapori indoor"; come bersaglio, per ogni via di esposizione, si è optato per l'on-site.

Per ciascuna matrice di contaminazione si è provveduto poi a inserire i contaminanti rilevati con le relative concentrazioni nella sezione " Definizione CRS (Concentrazioni Rappresentative alla Sorgente)". Nelle seguenti tabelle si riportano in giallo le concentrazioni delle sostanze volatili che in ogni matrice del sito interessato superano le CSC dettate dal decreto legge 152 :

AREA INDAGATA	Sostanze inquinanti suolo superficiale	
	IDROCARBURI LEGGERI C<12 (mg/kg)	IDROCARBURI PESANTI C>12 (mg/kg)
	limite di legge: 250	limite di legge: 750
Parete nord	424	346
Parete est	/	1346
Parete est C	6980	/
		/
		/
Parete sud	888	1405
Parete nord	795	2210
Parete sud	2543	440
Fondo scavo	413	75
S1	436	1385
S2	4166	515
S10	1742	60

Tab. 5.6 - Tabella delle sostanze inquinanti relative al suolo superficiale. Le celle in giallo rappresentano i superamenti delle CSC

Come si evince dalla tabella, per il suolo profondo le sole sostanze tra quelle ricercate per cui c'è superamento delle CSC sono gli idrocarburi.

Il software permette di calcolare il rischio per gli alifatici e gli aromatici ma di inserire un singolo valore di concentrazione per ogni contaminante. In questo caso, per scegliere il valore più conservativo, si è optato per il maggiore fra gli idrocarburi pesanti e il maggiore fra quelli leggeri, essendo i dati fra cui scegliere in numero minore di 10.

Risk net permette inoltre di attribuire un valore ad ogni classe di idrocarburi aromatici e ogni classe di alifatici. Non avendo però a disposizione la speciazione idrocarbureica nelle analisi chimiche, si è optato per attribuire la massima concentrazione scelta fra quelle degli idrocarburi pesanti e leggeri della Tab.5.5

alle classi di idrocarburi più volatili fra gli aromatici leggeri e pesanti e gli alifatici leggeri e pesanti.

Le speciazioni idrocarburiche disponibili, inoltre, sono due, una MADEP e l'altra TPH WG. Per elaborare un'analisi quanto più dettagliata, si è preferito attribuire le concentrazioni scelte a entrambe le speciazioni e valutare in seguito quale delle due offrisse i risultati più cautelativi.

Dunque le concentrazioni attribuite alle relative categorie di idrocarburi sono le seguenti:

Suolo Superficiale	Prof. soil-gas da p.c. (m) 0.5	
Contaminanti	CRS [mg/kg s.s.]	CRS soil-gas [mg/m³]
Alifatici C5-C8	6.98E+03	
Alifatici C9-C18	2.21E+03	
Aromatici C9-C10	6.98E+03	
Aromatici C11-C22	2.21E+03	
Alifatici C5-C6 (n-esano < 53%)	6.98E+03	
Alifatici C >12-16	2.21E+03	
Aromatici C > 7-8	6.98E+03	
Aromatici C >12-16	2.21E+03	

Tab. 5.7 - Concentrazioni alla sorgente per i contaminanti considerati nel suolo superficiale

Per le CRS del suolo profondo si sono scelte le concentrazioni rappresentative tra i seguenti superamenti della rispettiva CSC riscontrati sul sito in oggetto:

AREA INDAGATA	Sostanze inquinanti suolo profondo	
	IDROCARBURI LEGGERI C<12(mg/kg)	IDROCARBURI PESANTI C>12(mg/kg)
	limite di legge: 250	limite di legge:750
Parete nord	424	346
	1100	104
Parete est	/	1346
Parete est C P5	6980	/
		/
		/
Parete sud	888	1405
	6458	71
Fondo scavo	310	195
Parete nord	795	2210
Parete sud	2543	440
S1	436	1385
S2	4166	515
S5	3714	53
S8	574	324
S9	1133	324
	997	186
S10	1742	319
	1516	60
S21	3652	5359
S23	507	591

Tab. 5.8 - Tabella delle sostanze inquinanti relative al suolo profondo. Le celle in giallo rappresentano i superamenti delle CSC

Il criterio di attribuzione delle concentrazioni alle classi idrocarburiche è lo stesso applicato all'analisi del suolo profondo; l'unica differenza sta nel fatto che, essendo i dati relativi agli idrocarburi leggeri maggiori di 10, per scegliere la concentrazione più rappresentativa e cautelativa si è applicato l' UCL al 95%. Per gli idrocarburi pesanti si è semplicemente scelta la concentrazione più alta. Dunque le concentrazioni rappresentative alla sorgente attribuite alle relative categorie di idrocarburi sono le seguenti:

Suolo Profondo	Prof. soil-gas da p.c. (m) 1	
Contaminanti	CRS [mg/kg s.s.]	CRS soil-gas [mg/m³]
Aromatici C9-C10	3.32E+03	
Aromatici C11-C22	5.36E+03	
Alifatici C5-C8	3.32E+03	
Alifatici C9-C18	5.36E+03	
Alifatici C5-C6 (n-esano < 53%)	3.32E+03	
Alifatici C >12-16	5.36E+03	
Aromatici C > 7-8	3.32E+03	
Aromatici C >12-16	5.36E+03	

Tab. 5.9 - Concentrazioni alla sorgente per i contaminanti considerati nel suolo profondo

Per la falda le sostanze per cui c'è superamento delle CSC sono, oltre agli idrocarburi, anche il benzene e l'MTBE:

PIEZOMETRO	Sostanze inquinanti falda		
	COMPOSTI AROMATICI (µg/L)		
	BENZENE	IDROCARBURI TOTALI COME N-ESANO	MTBE
	Limiti di legge (µg/L): 1	350	40
P1	/	8960	/
P2	/	22501	/
P5	/	2176	/
P6	< 0,1	6607	45
P8	< 0,1	8301	38
P14	/	3863	/
P21	0,72	499	4,8
P22	1,89	1911	/

Tab. 5.10 - Tabella delle sostanze inquinanti relative alla falda. Le celle in giallo rappresentano i superamenti delle CSC

Anche in questo caso, essendo le concentrazioni di tutti gli inquinanti interessati in numero minore di 10 si è scelta l'unica concentrazione per benzene e MTBE e il dato con concentrazione maggiore per gli idrocarburi.

Prima di inserire i dati nel software si è effettuata la conversione da microgrammi/litro a milligrammi/litro.

Le concentrazioni rappresentative alla sorgente attribuite sono le seguenti:

Falda	Prof. soil-gas da p.c. (m) 1	
Contaminanti	CRS [mg/L]	CRS soil-gas [mg/m³]
Benzene	1.89E-03	
Aromatici C9-C10	2.25E+01	
Aromatici C11-C22	2.25E+01	
Alifatici C5-C8	2.25E+01	
Alifatici C9-C18	2.25E+01	
Alifatici C5-C6 (n-esano < 53%)	2.25E+01	
Alifatici C >12-16	2.25E+01	
Aromatici C > 7-8	2.25E+01	
Aromatici C >12-16	2.25E+01	
MTBE	4.50E-02	

Tab. 5.11 - Concentrazioni alla sorgente per i contaminanti considerati in falda

Definite le CRS, per ogni sorgente si sono indicati come recettori (bersagli) on-site in un sito ad uso commerciale/industriale uomini adulti.

Per quanto riguarda i parametri di esposizione si è ritenuto ottimale affidarsi ai parametri di default suggeriti dal software.

Parametri di esposizione			Residenziale (o Ricreativo)		Industriale
Simbolo	Unità di misura	Adulto	Bambino	Adulto	
Parametri Generali			On-Site		
Peso corporeo	BW	kg	70	15	70
Durata di esposizione sostanze cancerogene	ATc	anni	70		
Durata di esposizione sostanze non cancerogene	ED	anni	24	6	25
Frequenza di esposizione	EF	giorni/anno	350	350	250
Ingestione di suolo					
Frazione di suolo ingerita	FI	adim	1.0	1.0	1.0
Tasso di ingestione di suolo	IR	mg/giorno	100.0	200.0	50.0
Contatto dermico con suolo					
Superficie di pelle esposta	SA	cm²	5700.0	2800.0	3300.0
Fattore di aderenza dermica del suolo	AF	mg/cm²/giorno	0.07	0.20	0.20
Inalazione di aria outdoor					
Frequenza giornaliera di esposizione (c)	EFgo	ore/giorno	24	24	8
Inalazione outdoor (a);(b)	Bo	m³/ora	0.9	0.7	2.5
Frazione di particelle di suolo nella polvere	Fsd	adim	1.0		
Inalazione di aria indoor					
Frequenza giornaliera di esposizione	EFgi	ore/giorno	24	24	8
Inalazione indoor (b)	Bi	m³/ora	0.9	0.7	0.9
Frazione indoor di polvere all'aperto	Fi	adim	1.0		
Ingestione di acqua potabile					
Tasso di ingestione di acqua	IRw	L/giorno	2.0	1.0	1.0

Tab. 5.12 - Tabella riassuntiva dei parametri di esposizione

Il software come ultimi dati di input richiede le caratteristiche del sito. Tutti i parametri inseriti in questa sezione sono stati precedentemente calcolati e illustrati nei paragrafi 5.3 e 5.4. Quelli di cui non si è trattato nello specifico sono stati calcolati indirettamente o si sono usati i valori di default proposti.

Di seguito un riassunto sintetico delle caratteristiche del sito per ogni sorgente secondaria presa in considerazione:

- Caratteristiche sito per suolo superficiale:

Simbolo	Parametro	Unità di misura	Valore
Zona Insatura			
L_s (SS)	Profondità del top della sorgente nel suolo superficiale rispetto al p.c.	m	0
L_s (SP)	Profondità del top della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c.	m	NA
d	Spessore della sorgente nel suolo superficiale (insaturo)	m	1
d_s	Spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)	m	NA
L_{GW}	Profondità del piano di falda	m	NA
h_v	Spessore della zona insatura	m	NA
$f_{oc, SS}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo superficiale	g-C/g-suolo	0.0002
$f_{oc, SP}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo profondo	g-C/g-suolo	NA
t_{LF}	Tempo medio di durata del lisciviato	anni	NA
pH	pH	adim.	6.8
ρ_s	Densità del suolo	g/cm ³	1.7
θ_e	Porosità efficace del terreno in zona insatura	adim.	0.353
θ_w	Contenuto volumetrico di acqua	adim.	0.103
θ_a	Contenuto volumetrico di aria	adim.	0.25
θ_{wcap}	Contenuto volumetrico di acqua nelle frangia capillare	adim.	NA
θ_{acap}	Contenuto volumetrico di aria nelle frangia capillare	adim.	NA
h_{cap}	Spessore frangia capillare	m	NA
I_{ef}	Infiltrazione efficace	cm/anno	NA
P	Piovosità	cm/anno	NA
$\eta_{outdoor}$	Frazione areale di fratture outdoor	adim.	NA

Ambiente Outdoor			
δ_{air}	Altezza della zona di miscelazione	m	2
W'	Estensione della sorgente nella direzione principale del vento	m	53.37
S_w'	Estensione della sorgente nella direzione ortogonale a quella del vento	m	NA
U_{air}	Velocità del vento	m/s	8.40E-01
P_e	Portata di particolato per unità di superficie	g/(cm·s ²)	NA
$T_{outdoor}$	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anni	25
POC ADF	Distanza recettore off site (ADF)	m	NA
σ_y	Coefficiente di dispersione trasversale	m	NA
σ_z	Coefficiente di dispersione verticale	m	NA

Ambiente Indoor			
Edificio On-Site			
Z_{crack}	Profondità fondazioni da p.c.	m	0.15
L_{crack}	Spessore delle fondazioni/muri	m	0.15
η	Frazione areale di fratture indoor	adim.	0.01
L_b	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione	m	3
θ_{wcrack}	Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture	adim.	0.12
θ_{acrack}	Contenuto volumetrico di aria nelle fratture	adim.	0.26
ER	Tasso di ricambio di aria indoor	1/s	0.00023
T_{indoor}	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anni	25
Δp	Differenza di pressione tra indoor e outdoor	g/(cm·s ²)	NA
K_v	Permeabilità del suolo al flusso di vapore	m ²	NA
A_b	Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	m ²	NA
X_{crack}	Perimetro delle fondazioni/muri	m	NA
μ_{air}	Viscosità del vapore	g/(cm·s)	NA

Tab. 5.13 - Tabella riassuntiva delle caratteristiche del sito per il suolo superficiale

- Caratteristiche sito per suolo profondo:

Simbolo	Parametro	Unità di misura	Valore
Zona Insatura			
L_s (SS)	Profondità del top della sorgente nel suolo superficiale rispetto al p.c.	m	NA
L_s (SP)	Profondità del top della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c.	m	1
d	Spessore della sorgente nel suolo superficiale (insaturo)	m	NA
d_s	Spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)	m	0.962
L_{GW}	Profondità del piano di falda	m	NA
h_v	Spessore della zona insatura	m	NA
$f_{oc, SS}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo superficiale	g-C/g-suolo	NA
$f_{oc, SP}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo profondo	g-C/g-suolo	0.0003
t_{LF}	Tempo medio di durata del lisciviato	anni	NA
pH	pH	adim.	6.8
ρ_s	Densità del suolo	g/cm ³	1.7
θ_e	Porosità efficace del terreno in zona insatura	adim.	0.383
θ_w	Contenuto volumetrico di acqua	adim.	0.255
θ_a	Contenuto volumetrico di aria	adim.	0.128
θ_{wcap}	Contenuto volumetrico di acqua nelle frangia capillare	adim.	NA
θ_{acap}	Contenuto volumetrico di aria nelle frangia capillare	adim.	NA
h_{cap}	Spessore frangia capillare	m	NA
I_{ef}	Infiltrazione efficace	cm/anno	NA
P	Piovosità	cm/anno	NA
$\eta_{outdoor}$	Frazione areale di fratture outdoor	adim.	NA

Ambiente Outdoor			
δ_{air}	Altezza della zona di miscelazione	m	2
W'	Estensione della sorgente nella direzione principale del vento	m	83.94
S_w'	Estensione della sorgente nella direzione ortogonale a quella del vento	m	NA
U_{air}	Velocità del vento	m/s	8.40E-01
P_e	Portata di particolato per unità di superficie	g/(cm·s ²)	NA
$T_{outdoor}$	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anni	25
POC ADF	Distanza recettore off site (ADF)	m	NA
σ_y	Coefficiente di dispersione trasversale	m	NA
σ_z	Coefficiente di dispersione verticale	m	NA

Ambiente Indoor			
Edificio On-Site			
Z_{crack}	Profondità fondazioni da p.c.	m	0.15
L_{crack}	Spessore delle fondazioni/muri	m	0.15
η	Frazione areale di fratture indoor	adim.	0.01
L_b	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione	m	3
θ_{wcrack}	Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture	adim.	0.12
θ_{acrack}	Contenuto volumetrico di aria nelle fratture	adim.	0.26
ER	Tasso di ricambio di aria indoor	1/s	0.00023
T_{indoor}	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anni	25
Δp	Differenza di pressione tra indoor e outdoor	g/(cm·s ²)	NA
K_v	Permeabilità del suolo al flusso di vapore	m ²	NA
A_b	Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	m ²	NA
X_{crack}	Perimetro delle fondazioni/muri	m	NA
μ_{air}	Viscosità del vapore	g/(cm·s)	NA

Tab. 5.14 - Tabella riassuntiva delle caratteristiche del sito per il suolo profondo

- Caratteristiche sito per falda:

Simbolo	Parametro	Unità di misura	Valore
Zona Insatura			
L_s (SS)	Profondità del top della sorgente nel suolo superficiale rispetto al p.c.	m	NA
L_s (SP)	Profondità del top della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c.	m	NA
d	Spessore della sorgente nel suolo superficiale (insaturo)	m	NA
d_s	Spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)	m	NA
L_{GW}	Profondità del piano di falda	m	1.685
h_v	Spessore della zona insatura	m	1.003
$f_{oc, SS}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo superficiale	g-C/g-suolo	NA
$f_{oc, SP}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo profondo	g-C/g-suolo	NA
t_{LF}	Tempo medio di durata del lisciviato	anni	NA
pH	pH	adim.	6.8
ρ_s	Densità del suolo	g/cm ³	1.7
θ_e	Porosità efficace del terreno in zona insatura	adim.	0.383
θ_w	Contenuto volumetrico di acqua	adim.	0.255
θ_a	Contenuto volumetrico di aria	adim.	0.128
θ_{wcap}	Contenuto volumetrico di acqua nelle frangia capillare	adim.	0.297
θ_{acap}	Contenuto volumetrico di aria nelle frangia capillare	adim.	0.086
h_{cap}	Spessore frangia capillare	m	0.682
I_{ef}	Infiltrazione efficace	cm/anno	NA
P	Piovosità	cm/anno	NA
$\eta_{outdoor}$	Frazione areale di fratture outdoor	adim.	NA

Simbolo	Parametro	Unità di misura	Valore	Note
Ambiente Outdoor				
δ_{air}	Altezza della zona di miscelazione	m	2	Default
W'	Estensione della sorgente nella direzione principale del vento	m	76.61	Modificato
S_w'	Estensione della sorgente nella direzione ortogonale a quella del vento	m	NA	Non Richiesto
U_{air}	Velocità del vento	m/s	8.40E-01	Modificato
P_e	Portata di particolato per unità di superficie	g/(cm ² ·s)	NA	Non Richiesto
$T_{outdoor}$	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anni	25	Modificato
POC ADF	Distanza recettore off site (ADF)	m	NA	Non Richiesto
σ_y	Coefficiente di dispersione trasversale	m	NA	Non Richiesto
σ_z	Coefficiente di dispersione verticale	m	NA	Non Richiesto

Ambiente Indoor			
Edificio On-Site			
Z_{crack}	Profondità fondazioni da p.c.	m	0.15
L_{crack}	Spessore delle fondazioni/muri	m	0.15
η	Frazione areale di fratture indoor	adim.	0.01
L_b	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione	m	3
θ_{wcrack}	Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture	adim.	0.12
θ_{acrack}	Contenuto volumetrico di aria nelle fratture	adim.	0.26
ER	Tasso di ricambio di aria indoor	1/s	0.00023
T_{indoor}	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anni	25
Δp	Differenza di pressione tra indoor e outdoor	g/(cm ² ·s ²)	NA
K_v	Permeabilità del suolo al flusso di vapore	m ²	NA
A_b	Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	m ²	NA
X_{crack}	Perimetro delle fondazioni/muri	m	NA
μ_{air}	Viscosità del vapore	g/(cm·s)	NA

Tab. 5.15 - Tabella riassuntiva delle caratteristiche del sito per la falda

5.7.2 - Analisi degli output

Completato l'inserimento degli input si è passati al vero e proprio calcolo del rischio per inalazione per le tre sorgenti.

5.7.2.1 - Calcolo del rischio da inalazione di vapori da suolo superficiale

Per questa sorgente i superamenti delle CSC si erano riscontrati relativamente ai parametri idrocarburi alifatici e aromatici, sostanze non classificate come cancerogene. Dunque l'unico rischio calcolabile in questo caso è quello tossicologico "HI" (indice di pericolo).

I risultati sono i seguenti:

On-Site	Inalazione Vapori Outdoor		Inalazione Vapori Indoor		
	Contaminanti	R	HI	R	HI
	Alifatici C5-C8	---	1.64E+00	---	2.70E+01
	Alifatici C9-C18	---	5.19E-01	---	8.54E+00
	Aromatici C9-C10	---	6.54E+00	---	1.07E+02
	Aromatici C11-C22	---	2.07E+00	---	1.39E+01
	Alifatici C5-C6 (n-esano < 53%)	---	1.82E-02	---	2.99E-01
	Alifatici C >12-16	---	2.07E-01	---	3.40E+00
	Aromatici C > 7-8	---	1.72E-01	---	2.83E+00
	Aromatici C >12-16	---	5.19E-01	---	5.22E+00

Tab. 5.16 - Risultati dell'analisi di rischio per suolo superficiale

Come è facilmente intuibile, le celle in rosso rappresentano i valori che superano la soglia accettabile di rischio per sostanze non cancerogene, ossia 1. In questo caso risulta esserci rischio applicando entrambe le speciazioni, ma quella MADEP risulta più cautelativa avendo risultati anche di due ordini di grandezza maggiori. Rispettando il principio della considerazione del "caso peggiore", non si terrà conto dei risultati dell'altra speciazione.

Osservando i risultati si ottiene il rischio totale "HI Tot" outdoor pari a 10,8 e quello indoor pari a 157.

Il rischio maggiore, dunque, dovuto all' inalazione di vapori provenienti da suolo superficiale si verifica, secondo i risultati ottenuti, indoor (ossia in ambienti chiusi).

On-site	R tot	HI tot
Outdoor	---	1.08E+01
Indoor	---	1.57E+02

Tab. 5.17- Calcolo del rischio totale outdoor e indoor per suolo superficiale

5.7.2.2 - Calcolo del rischio da inalazione di vapori da suolo profondo

Anche per questa sorgente i dati di input per le CRS riguardano gli idrocarburi aromatici e alifatici, analizzati nelle due possibili speciazioni MADEP E TPH WG.

I risultati dell'analisi sono i seguenti:

On-Site	Inalazione Vapori Outdoor		Inalazione Vapori Indoor		
	Contaminanti	R	HI	R	HI
	Aromatici C9-C10	---	3.64E+00	---	4.91E+01
	Aromatici C11-C22	---	1.01E+00	---	1.37E+01
	Alifatici C5-C8	---	1.18E+00	---	1.23E+01
	Alifatici C9-C18	---	1.09E+00	---	1.99E+01
	Alifatici C5-C6 (n-esano < 53%)	---	1.31E-02	---	1.37E-01
	Alifatici C >12-16	---	5.88E-01	---	7.94E+00
	Aromatici C > 7-8	---	1.24E-01	---	1.29E+00
	Aromatici C >12-16	---	3.03E-01	---	5.17E+00

Tab. 5.18 - Risultati dell'analisi di rischio per suolo profondo

In questo caso, pur risultando superate le soglie di rischio per la speciazione TPH WG, si terrà conto dei risultati della speciazione MADEP essendo di un ordine di grandezza maggiore e dunque più cautelativi.

Si ottiene così il rischio totale "HI Tot" per i vapori outdoor pari a 6,91 e quello pari ai vapori indoor pari a 95,1. Il rischio maggiore, anche per il suolo profondo, dunque, proviene dall' inalazione indoor.

On-site	R tot	HI tot
Outdoor	---	6.91E+00
Indoor	---	9.51E+01

Tab. 5.19- Calcolo del rischio totale outdoor e indoor per suolo profondo

5.7.2.3 - Calcolo del rischio da inalazione di vapori da falda

Per la sorgente falda i contaminanti che potrebbero creare rischio, oltre agli idrocarburi, sono Benzene (sostanza a rischio cancerogeno oltre che tossicologico) e MTBE.

On-site	Inalazione Vapori Outdoor		Inalazione Vapori Indoor		
	Contaminanti	R	HI	R	HI
	Benzene	6.95E-10	8.32E-06	6.07E-09	7.26E-05
	Aromatici C9-C10	---	6.73E-02	---	5.88E-01
	Aromatici C11-C22	---	6.41E-03	---	5.25E-02
	Alifatici C5-C8	---	3.09E+00	---	2.72E+01
	Alifatici C9-C18	---	3.46E+00	---	3.04E+01
	Alifatici C5-C6 (n-esano < 53%)	---	2.79E-02	---	2.45E-01
	Alifatici C >12-16	---	1.85E+00	---	1.63E+01
	Aromatici C > 7-8	---	1.34E-03	---	1.17E-02
	Aromatici C >12-16	---	2.67E-03	---	2.28E-02
	MTBE	---	2.09E-07	---	1.73E-06

Tab. 5.20- Risultati dell'analisi di rischio per falda

Tuttavia anche in questo caso dai risultati si evince come, oltre ad escludere il rischio cancerogeno da inalazione, le uniche sostanze che superano le soglie accettabili di rischio tossicologico sono gli idrocarburi alifatici secondo entrambe le speciazioni. Tenendo conto delle precedenti analisi sulle altre sorgenti, per coerenza si terrà conto solo della speciazione MADEP.

Si conferma quanto visto per le altre sorgenti analizzate nei paragrafi precedenti, riguardo il rischio totale indoor: esso infatti è pari a 58,3, a differenza di quello

outdoor un ordine di grandezza più piccolo, pari a 6,63. Il maggior rischio per inalazione di sostanze volatili provenienti dalla falda, dunque, in base ai dati ottenuti, è da considerarsi negli ambienti chiusi del sito in esame.

On-site	R tot	HI tot
Outdoor	6.95E-10	6.63E+00
Indoor	6.07E-09	5.83E+01

Tab. 5.21- Calcolo del rischio totale outdoor e indoor per la falda

5.8 - Analisi di rischio sui soil gas

I dati ottenuti dall'elaborazione dell'Analisi di Rischio su falda e suolo insaturo hanno evidenziato rischio da inalazione di vapori sia indoor che outdoor.

Vista la risaputa conservatività delle equazioni per il calcolo dei fattori di volatilizzazione, in parte legata alla scelta dei parametri di input spesso estremamente cautelativi, si è optato per elaborare una verifica considerando i dati ottenuti dalle campagne d'indagine, di cui si è trattato al capitolo 4, effettuate direttamente sui soil gas nell' ultimo anno. Questa analisi viene trattata separatamente rispetto alle altre in quanto diversi parametri derivano da quelli ricavati per le tre sorgenti prima considerate e, in secondo luogo, perché si vuole mettere in risalto l'importanza delle indagini sui soil gas come mezzo utile e non trascurabile nell' ambito di un'Analisi di Rischio con sostanze volatili. Esso, infatti, diventa un mezzo indispensabile per fare un confronto fra dati elaborati direttamente sui gas prelevati in sito e dati ottenuti tramite l'approccio modellistico. Così facendo si può dunque ridimensionare l'eventuale sovrastima del rischio ed evitare di prendere misure di sicurezza e/o adottare sistemi di bonifica inadatti alle reali condizioni del sito e dei bersagli al suo interno.

5.8.1 - Geometria della sorgente e caratteristiche del sito

La problematica riscontrata nel delimitare la sorgente dei soil gas sta nel fatto che non esistono delle CSC per i gas interstiziali. Dunque, anche volendo effettuare una poligonizzazione tenendo conto delle sonde SG 1-5 installate nel sito non sarebbe possibile stimare quale poligono sia contaminato o meno rispetto ad un altro.

Un' ipotesi cautelativa per la stima dell' area potrebbe essere quella di considerare l'intera superficie in cui sono stati fatti i sondaggi e sono state riscontrate tracce di inquinanti.

Per questo studio, però, avendo a disposizione tre aree distinte relative a tre sorgenti risultate tutte a rischio inalazione, è parso più idoneo andare a creare una "sovrapposizione" delle suddette aree contaminate (come mostrato in figura) per ottenere una "macroarea" relativa al soil gas.

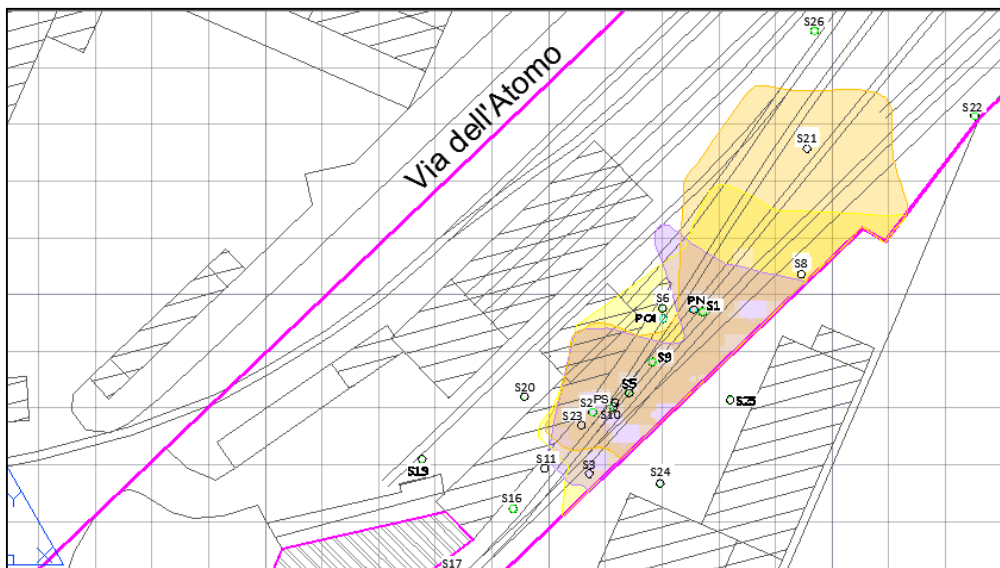


Fig. 5.17 - Delimitazione della sorgente soil gas tramite la sovrapposizione delle aree delle 3 sorgenti precedentemente stimate; scala 1:500

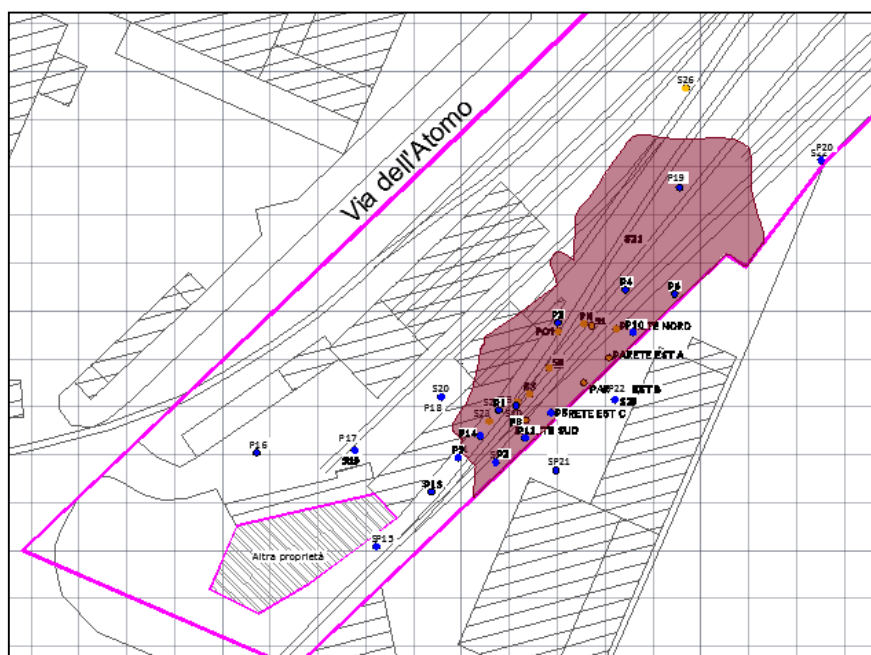


Fig. 5.18 - Area stimata della sorgente di contaminazione soil gas; scala 1:500

La massima estensione nella direzione prevalente del vento dell' area sorgente per i soil gas misurata è pari circa a 85, 65 metri.

Non viene richiesto in questo caso lo spessore della sorgente perché il software nell'elaborare l'analisi tiene conto solo della profondità a cui sono stati campionati i gas e del fatto che essi si muovano verso l'alto.

Dunque il dato fondamentale risulta essere la profondità alla quale si trovano le sonde SG, ossia 0,70 metri al di sotto del piano campagna.

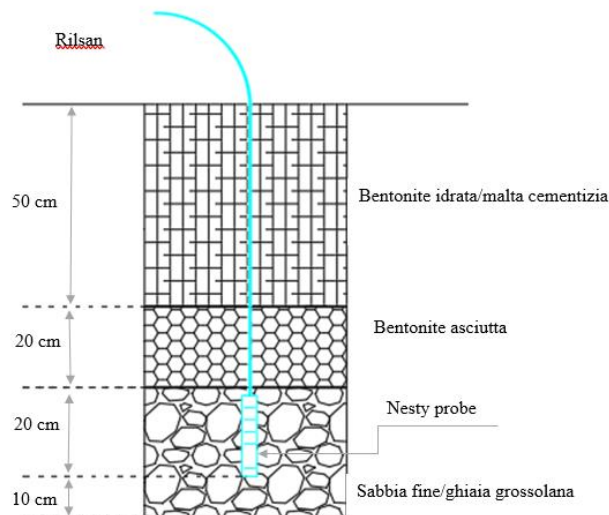


Fig. 5.19 - Schema costruttivo delle sonde impiegate per il campionamento dei soil gas

Essendo le sonde a una profondità di 0,70 m, nella sezione del software "caratteristiche del sito" sono stati inseriti i parametri di granulometria e Foc relativi al suolo superficiale (0-1 m dal p.c.) trattati nel paragrafo 5.4.1.

La velocità e direzione del vento è la medesima stimata per le altre sorgenti.

Di seguito un riassunto dei dati di input impiegati:

Simbolo	Parametro	Unità di misura	Valore
Zona Insatura			
L_s (SS)	Profondità del top della sorgente nel suolo superficiale rispetto al p.c.	m	0
L_s (SP)	Profondità del top della sorgente nel suolo profondo rispetto al p.c.	m	NA
d	Spessore della sorgente nel suolo superficiale (insaturo)	m	1
d_s	Spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)	m	NA
L_{GW}	Profondità del piano di falda	m	NA
h_v	Spessore della zona insatura	m	NA
$f_{oc, SS}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo superficiale	g-C/g-suolo	0.002
$f_{oc, SP}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo profondo	g-C/g-suolo	NA
t_{LF}	Tempo medio di durata del lisciviato	anni	NA
pH	pH	adim.	6.8
ρ_s	Densità del suolo	g/cm ³	1.7
θ_e	Porosità efficace del terreno in zona insatura	adim.	0.353
θ_w	Contenuto volumetrico di acqua	adim.	0.103
θ_a	Contenuto volumetrico di aria	adim.	0.25
θ_{wcap}	Contenuto volumetrico di acqua nelle frangia capillare	adim.	NA
θ_{acap}	Contenuto volumetrico di aria nelle frangia capillare	adim.	NA
h_{cap}	Spessore frangia capillare	m	NA
I_{ef}	Infiltrazione efficace	cm/anno	NA
P	Piovosità	cm/anno	NA
$\eta_{outdoor}$	Frazione areale di fratture outdoor	adim.	NA
Ambiente Outdoor			
δ_{air}	Altezza della zona di miscelazione	m	2
W'	Estensione della sorgente nella direzione principale del vento	m	85.65
S_w'	Estensione della sorgente nella direzione ortogonale a quella del vento	m	NA
U_{air}	Velocità del vento	m/s	8.40E-01
P_e	Portata di particolato per unità di superficie	g/(cm·s ²)	NA
$T_{outdoor}$	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anni	25
POC ADF	Distanza recettore off site (ADF)	m	NA
σ_y	Coefficiente di dispersione trasversale	m	NA
σ_z	Coefficiente di dispersione verticale	m	NA
Ambiente Indoor			
Edificio On-Site			
Z_{crack}	Profondità fondazioni da p.c.	m	0.15
L_{crack}	Spessore delle fondazioni/muri	m	0.15
η	Frazione areale di fratture indoor	adim.	0.01
L_b	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione	m	3
θ_{wcrack}	Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture	adim.	0.12
θ_{acrack}	Contenuto volumetrico di aria nelle fratture	adim.	0.26
ER	Tasso di ricambio di aria indoor	1/s	0.00023
T_{indoor}	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anni	25
Δp	Differenza di pressione tra indoor e outdoor	g/(cm·s ²)	NA
K_v	Permeabilità del suolo al flusso di vapore	m ²	NA
A_b	Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	m ²	NA
X_{crack}	Perimetro delle fondazioni/muri	m	NA
μ_{air}	Viscosità del vapore	g/(cm·s)	NA

Tab. 5.22 - Tabella riassuntiva delle caratteristiche del sito per il soil gas

5.8.2 - Definizione delle Concentrazioni Rappresentative alla Sorgente

Per la definizione delle CRS si è fatto capo ai risultati delle analisi delle tre campagne soil gas condotte a febbraio, giugno e settembre 2017, in ottemperanza alle linee guida redatte dall' ARPAV per il sito di Porto Marghera, in cui si riporta che la campagna deve essere rappresentativa di tutte le possibili condizioni espositive, con particolare riguardo a quelle più critiche; è dunque opportuno eseguire come minimo una campagna di misura nella stagione calda e una nella stagione fredda. Questo al fine di poter valutare eventuali variazioni stagionali dovute a condizioni meteorologiche e/o legate alla variabilità dei cicli delle attività civili (riscaldamenti, flussi di traffico, ecc.) (*Protocollo per il monitoraggio dell'aria indoor/outdoor ai fini della valutazione dell'esposizione inalatoria nei siti contaminati Sito di Venezia – Porto Marghera, ARPAV, Settembre 2014*).

Le sonde campionate sono 5 e le sostanze indagate, con le relative concentrazioni rilevate, sono le seguenti:

Nome Punto			SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	ARPAV	SG4	SG5
Nome Laboratorio Analisi			ECOCHÉM S.r.l.						ARPAV	
Data Campionamento			07/10/2016							
Rapporto Di Prova			16-003448/01	16-003448/02	16-003448/03	16-003448/04	16-003448/05		520002 rev.0	520003 rev.0
Idrocarburi policiclici aromatici	Acenafilene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Antracene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Benzo(a)antracene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Benzo(a)pirene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Benzo(b)fluorantene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Benzo(g,h,i)perilene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Benzo(j)fluorantene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Benzo(k)fluorantene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Crisene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Dibenzo(a,h)antracene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Fenantrene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Fluorantene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Fluorene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
	Naftalene	µg/m ³	<1	<1	<1	10	<1			
	Pirene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1			
BTEX	Benzene	µg/m ³	24	30	13	3	<1	µg/m ³	6.4	3.5
	Etilbenzene	µg/m ³	8	7	8	4	<1	µg/m ³	21.6	5.3
	m+p-Xilene	µg/m ³	44	50	53	26	<1	µg/m ³	53.7	12.3
	o-Xilene	µg/m ³	8	11	11	6	<1	µg/m ³	21.1	5.3
	Toluene	µg/m ³	58	80	51	35	<1	µg/m ³	92.7	22.8
Idrocarburi alifatici	Idrocarburi alifatici (C5-C8)	mg/m ³	46	1.1	4	<0,001	<0,001	µg/m ³	46	<23
	Idrocarburi alifatici (C9-C12)	mg/m ³	14	3	9	<0,001	<0,001	µg/m ³	161	43
	Idrocarburi alifatici (C13-C18)	mg/m ³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001			
	Idrocarburi alifatici (C19-C36)	mg/m ³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001			
Idrocarburi aromatici	Idrocarburi aromatici (C9-C10)	mg/m ³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	µg/m ³	46	<15
	Idrocarburi aromatici (C11-C12)	mg/m ³								
	Idrocarburi aromatici (C11-C22)	mg/m ³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001			
altri parametri	MTBE	µg/m ³						µg/m ³	<3,7	<3,7
	1,3-Butadiene	µg/m ³						µg/m ³	<2,2	<2,2

Nome Punto			SG1	SG2	SG3	SG4	SG5
Nome Laboratorio Analisi			ECOCHÉM S.r.l.				
Data Campionamento			14/02/2017				
Rapporto Di Prova			17-000515/01 Rev.2	17-000515/02 Rev.2	17-000515/03 Rev.2	17-0005/04 Rev.2	17-000515/05 Rev.2
Idrocarburi policiclici aromatici	Acenafilene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Antracene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Benzo(a)antracene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Benzo(a)pirene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Benzo(b)fluorantene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Benzo(g,h,i)perilene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Benzo(j)fluorantene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Benzo(k)fluorantene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Crisene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Dibenzo(a,h)antracene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Fenantrene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Fluorantene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Fluorene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Naftalene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
	Pirene	µg/m ³	<1	<1	<1	<1	<1
BTX	Benzene	µg/m ³	49	570	<1	2	<1
	Etilbenzene	µg/m ³	8	12	8	4	<1
	m+p-Xilene	µg/m ³	45	160	77	60	26
	o-Xilene	µg/m ³	12	25	13	6	4
	Toluene	µg/m ³	37	310	39	35	7
Idrocarburi alifatici	Idrocarburi alifatici (C5-C8)	mg/m ³	1.5	0.8	0.5	0.6	0.9
	Idrocarburi alifatici (C9-C12)	mg/m ³	0.18	0.7	0.37	0.29	0.2
	Idrocarburi alifatici (C13-C18)	mg/m ³	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2
	Idrocarburi alifatici (C19-C36)	mg/m ³	0.03	0.03	0.1	<0,02	<0,02
Idrocarburi aromatici	Idrocarburi aromatici (C9-C10)	mg/m ³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Idrocarburi aromatici (C11-C12)	mg/m ²					
	Idrocarburi aromatici (C11-C22)	mg/m ³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	MTBE	µg/m ³					
altri parametri	1,3-Butadiene	µg/m ³					

Nome Punto			SG1	SG2	SG3	SG4	SG5
Nome Laboratorio Analisi			ECOCHÉM S.r.l.				
Data Campionamento			09/06/2017				
Rapporto Di Prova			17-002125/06	17-002125/07	17-002125/08	17-002125/09	17-002125/10
Idrocarburi policiclici aromatici	Acenafilene	µg/m ³					
	Antracene	µg/m ³					
	Benzo(a)antracene	µg/m ³					
	Benzo(a)pirene	µg/m ³					
	Benzo(b)fluorantene	µg/m ³					
	Benzo(g,h,i)perilene	µg/m ³					
	Benzo(j)fluorantene	µg/m ³					
	Benzo(k)fluorantene	µg/m ³					
	Crisene	µg/m ³					
	Dibenzo(a,h)antracene	µg/m ³					
	Fenantrene	µg/m ³					
	Fluorantene	µg/m ³					
	Fluorene	µg/m ³					
	Naftalene	µg/m ³					
	Pirene	µg/m ³					
BTX	Benzene	µg/m ³	5	8	25	3	4
	Etilbenzene	µg/m ³	9	9	13	16	5
	m+p-Xilene	µg/m ³	63	63	68	97	32
	o-Xilene	µg/m ³	15	16	14	24	9
	Toluene	µg/m ³	33	26	43	42	11
Idrocarburi alifatici	Idrocarburi alifatici (C5-C8)	mg/m ³	21.05	0.777	1.067	2.47	1.525
	Idrocarburi alifatici (C9-C12)	mg/m ³	6.512	0.899	0.407	1.858	2.01
	Idrocarburi alifatici (C13-C18)	mg/m ³					
	Idrocarburi alifatici (C19-C36)	mg/m ³					
Idrocarburi aromatici	Idrocarburi aromatici (C9-C10)	mg/m ³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Idrocarburi aromatici (C11-C12)	mg/m ²	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Idrocarburi aromatici (C11-C22)	mg/m ³					
altri parametri	MTBE	µg/m ³					
	1,3-Butadiene	µg/m ³					

Tab. 5.23 - Risultati dei campionamenti soil gas

È importante mettere in luce che dall' analisi sono stati esclusi gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) perché considerati poco volatili.

L'analisi, inoltre, è stata divisa in due, l'una per il rischio outdoor e l'altra per il rischio indoor. Secondo quanto riportato nel documento redatto per il monitoraggio dell'aria indoor/outdoor per il sito di Porto Marghera infatti " *Per gli ambienti indoor, se si tratta di un edificio, generalmente non è necessario investigare tutti i suoi ambienti, ma è opportuno individuare l'area più rappresentativa e a maggior rischio espositivo, posizionata al piano terra*". A tal proposito per l'analisi indoor si sono presi in considerazione solo i dati ricavati dalle sonde più prossime agli edifici, ossia SG2, SG4 e SG3. In giallo le concentrazioni usate per il calcolo del rischio.

Nome Punto			SG2	SG3	SG4	ARPAV	SG4	SG2	SG3	SG4	SG2	SG3	SG4
Nome Laboratorio Analisi			ECOCHÉM S.r.l.				ARPA	ECOCHÉM S.r.l.			ECOCHÉM S.r.l.		
Data Campionamento			07/10/2016					14/02/2017			09/06/2017		
Rapporto Di Prova			16-003448/0	16-003448/03	16-003448/04		520002 rev.0	17-000515/02	17-000515/03	17-000515/04	17-0002125/0	17-0002125/08	17-0002125/0
BTEX	Benzene	µg/m³	30	13	3	µg/m³	6.4	570	<1	2	8	25	3
	Etilbenzene	µg/m³	7	8	4	µg/m³	21.6	12	8	4	9	13	16
	m+p-Xilene	µg/m³	50	53	26	µg/m³	53.7	160	77	60	63	68	97
	o-Xilene	µg/m³	11	11	6	µg/m³	21.1	25	13	6	16	14	24
	Toluene	µg/m³	80	51	35	µg/m³	92.7	310	39	35	26	43	42
Idrocarburi alifatici	Idrocarburi alifatici (C5-C8)	mg/m³	1.1	4	<0,001	µg/m³	46	0.8	0.5	0.6	0.78	1.067	2.47
	Idrocarburi alifatici (C9-C12)	mg/m³	3	9	<0,001	µg/m³	161	0.7	0.37	0.29	0.9	0.407	1.86
	Idrocarburi alifatici (C13-C18)	mg/m³	<0,001	<0,001	<0,001			0.2	0.4	0.3			
	Idrocarburi alifatici (C19-C36)	mg/m³	<0,001	<0,001	<0,001			0.03	0.1	<0,02			
Idrocarburi aromatici	Idrocarburi aromatici (C9-C10)	mg/m³	<0,001	<0,001	<0,001	µg/m³	46	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Idrocarburi aromatici (C11-C12)	mg/m²									<0,001	<0,001	<0,001
	Idrocarburi aromatici (C11-C22)	mg/m³	<0,001	<0,001	<0,001			<0,001	<0,001	<0,001			
altri para metri	MTBE	µg/m³				µg/m³	<3,7						

Tab. 5.24 - Tabella delle concentrazioni relative alle sonde più vicine agli edifici prese in considerazione per l'analisi indoor

Per gli ambienti outdoor , invece, secondo il documento APAT-ISPRA del 2008" Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati", " è opportuno prevedere un campionamento per ogni area omogenea di contaminazione ". Per l'analisi outdoor, dunque, si sono considerati i dati di tutte le sonde installate. In giallo le concentrazioni usate per il calcolo del rischio.

Nome Punto			SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	ARPAV	SG4	SG5	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5	SG1	SG2	SG3	SG4	SG5
Nome Laboratorio Analisi			ECOCHÉM S.r.l.						ARPAV		ECOCHÉM S.r.l.					ECOCHÉM S.r.l.				
Data Campionamento			07/10/2016								14/02/2017					09/06/2017				
Rapporto Di Prova			16-003448/01	16-003448/02	16-003448/03	16-003448/04	16-003448/05		520002 rev.0	520003 rev.0	17-000515/01 Rev.2	17-000515/02 Rev.2	17-000515/03 Rev.2	17-000515/04 Rev.2	17-000515/05 Rev.2	17-002125/06	17-002125/07	17-002125/08	17-002125/09	17-002125/10
BTX	Benzene	µg/m³	24	30	13	3	<1	µg/m³	6.4	3.5	49	570	<1	2	<1	5	8	25	3	4
	Etilbenzene	µg/m³	8	7	8	4	<1	µg/m³	21.6	5.3	8	12	8	4	<1	9	9	13	16	5
	m+p-Xilene	µg/m³	44	50	53	26	<1	µg/m³	53.7	12.3	45	160	77	60	26	63	63	68	97	32
	o-Xilene	µg/m³	8	11	11	6	<1	µg/m³	21.1	5.3	12	25	13	6	4	15	16	14	24	9
	Toluene	µg/m³	58	80	51	35	<1	µg/m³	92.7	22.8	37	310	39	35	7	33	26	43	42	11
Idrocarburi alifatici	Idrocarburi alifatici (C5-C8)	mg/m³	46	1.1	4	<0,001	<0,001	µg/m³	46	<23	1.5	0.8	0.5	0.6	0.9	21.05	0.777	1.067	2.47	1.525
	Idrocarburi alifatici (C9-C12)	mg/m³	14	3	9	<0,001	<0,001	µg/m³	161	43	0.18	0.7	0.37	0.29	0.2	6.512	0.899	0.407	1.858	2.01
	Idrocarburi alifatici (C13-C18)	mg/m³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001				0.3	0.2	0.4	0.3	0.2					
	Idrocarburi alifatici (C19-C36)	mg/m³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001				0.03	0.03	0.1	<0,02	<0,02					
Idrocarburi aromatici	Idrocarburi aromatici (C9-C10)	mg/m³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	µg/m³	46	<15	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Idrocarburi aromatici (C11-C12)	mg/m³														<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	Idrocarburi aromatici (C11-C22)	mg/m³	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001				<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001					
altri parametri	MTBE	µg/m³						µg/m³	<3,7	<3,7										
	1,3-Butadiene	µg/m³						µg/m³	<2,2	<2,2										

Tab. 5.25 - Tabella delle concentrazioni relative a tutte le sonde per l'analisi outdoor

Non essendoci, come già detto, delle CSC che permettano di fare una cernita fra le concentrazioni di cui tener conto e quelle non a rischio, per entrambe le analisi si sono considerati fra i dati di interesse quelli con la concentrazione maggiore per ogni sostanza.

Tuttavia, i valori misurati nel soil-gas (CRS_{soil gas}) possono essere utilizzati per valutare l' effettivo rischio legato al percorso di volatilizzazione outdoor.

Il rischio per sostanze cancerogene si calcola dunque :

$$R = \text{CRS}_{\text{soil gas}} * SF_{\text{Ina}} * \alpha_{\text{samb}} * EM_{\text{InaO}}$$

L'indice di pericolo assume la seguente formula:

$$HI_{SP.InaO} = \text{CRS}_{\text{soil gas}} * \alpha_{\text{samb}} * EM_{\text{InaO}} / RfD_{\text{Ina}}$$

Con:

CRSsg = Concentrazione nel soil-gas

SFIna = Slope factor - inalazione

RfD Ina = Reference dose - inalazione

EMInaO = Fattore di inalazione outdoor

α samb = Volatilizzazione outdoor da soil-gas

Per quanto riguarda gli Xileni, prima di inserire la concentrazione fra i dati di input, è stata fatta una somma della concentrazione maggiore riferita a m+p Xilene e quella maggiore dell' o-Xilene in modo tale da farli rientrare tutti nella categoria "Xileni" proposta da Risk net nella scelta dei contaminanti.

5.8.3 - Calcolo del rischio

Completato l'inserimento di tutti i dati di input si è passati all'elaborazione dell'analisi vera e propria.

I risultati ottenuti per ambiente outdoor e indoor sono i seguenti:

On-Site		Inalazione Vapori Outdoor	
Contaminanti	R	HI	
Benzene	5.62E-08	6.73E-04	
Etilbenzene	3.87E-10	4.33E-07	
Toluene	---	1.91E-06	
Xileni	---	6.19E-05	
Alifatici C5-C8	---	7.30E-03	
Alifatici C9-C18	---	1.94E-03	
Alifatici C19-C36	---	6.66E-06	
Aromatici C9-C10	---	5.53E-07	
Aromatici C11-C22	---	4.74E-07	
MTBE	---	3.68E-08	

Tab. 5.26 - Risultati dell'analisi di rischio soil gas outdoor

On-site	R tot	HI tot
Outdoor	5.66E-08	9.99E-03
Indoor	---	---

Tab. 5.27- Calcolo del rischio totale outdoor da soil gas

On-Site		
Inalazione Vapori Indoor		
Contaminanti	R	HI
Benzene	2.55E-08	3.05E-04
Etilbenzene	1.76E-10	1.96E-07
Toluene	---	8.65E-07
Xileni	---	2.81E-05
Alifatici C5-C8	---	2.88E-04
Alifatici C9-C18	---	5.67E-04
Alifatici C19-C36	---	3.02E-06
Aromatici C9-C10	---	2.51E-07
Aromatici C11-C22	---	2.15E-07
MTBE	---	1.67E-08

Tab. 5.28 - Risultati dell'analisi di rischio soil gas indoor

On-site	R tot	HI tot
Outdoor	---	---
Indoor	2.57E-08	1.19E-03

Tab. 5.29- Calcolo del rischio totale indoor da soil gas

Come si può notare nessuna cella evidenzia rischio e i risultati sia indoor che outdoor, oltre che discostarsi di poco, sono decisamente bassi rispetto ai valori di rischio cancerogeno (10^{-6}) e per sostanze tossiche (1) tollerabile.

L' "R Tot" e l' "HI Tot" per l'inalazione di vapori outdoor sono rispettivamente pari a 5,66E-08 e 9,99E-03.

L' "R Tot" e l' "HI Tot" per l'inalazione di vapori indoor sono rispettivamente pari a 2,57 E-08 e 1,19E-03.

Confrontando questi risultati con quelli ottenuti dalle Analisi di Rischio effettuate su suolo superficiale, suolo profondo e falda si evince una netta discrepanza sul fatto che il sito sia da considerarsi o meno a rischio per inalazione di sostanze inquinanti. Tale differenza nei risultati è da imputarsi ad una sovrastima del rischio.

CAPITOLO VI

CONCLUSIONI

6. CONCLUSIONI

Sulla base dei dati ottenuti si possono trarre le seguenti conclusioni: dalle analisi svolte tramite modellizzazione del fenomeno "volatilizzazione" da falda, suolo profondo e suolo superficiale, si è riscontrato rischio outdoor e indoor da sostanze tossiche quali Idrocarburi leggeri e pesanti. Il rischio maggiore in tutte le sorgenti citate si è riscontrato indoor; il rischio totale delle stesse, infatti, è risultato essere maggiore rispetto al limite di accettabilità ($HI=1$) anche di un ordine di grandezza per i valori indoor:

- Suolo Superficiale: $OUTDOOR = 1,08E+01$

$INDOOR = 1,57E+02$

-Suolo Profondo: $OUTDOOR = 6,91E+00$

$INDOOR = 9,51E+01$

- Falda: $OUTDOOR = 6,63E+00$

$INDOOR = 5,83E+01$

Dalle analisi svolte successivamente sulla sorgente soil gas i risultati emersi sono differenti. Non si riscontra, infatti, rischio né outdoor né indoor. I valori di R_{tot} e HI_{tot} sono i seguenti, nettamente inferiori a 1:

- Soil gas: $R_{tot} OUTDOOR = 5,66E-08$

$HI_{tot} OUTDOOR = 9,99E-03$

$R_{tot} INDOOR = 2,57E-08$

$HI_{tot} INDOOR = 1,19E-03$

Come già scritto, un'analisi diretta sui gas nell'ambito di un'Analisi di Rischio sanitaria su sostanze volatili, permette di ottenere risultati più affidabili rispetto alla stessa applicata a suolo e falda. La volatilizzazione da suolo e falda, infatti, valuta tramite formule empiriche un percorso del contaminante volatile in cui esso si ripartisce in fase liquida e aeriforme (nel caso della porzione satura) e solida e aeriforme (nel caso del suolo insaturo). E' proprio la creazione di questo modello che comporta sovrastime del rischio da volatilizzazione. Effettuando, invece un'analisi direttamente sui soil gas, la ripartizione è già avvenuta e non c'è bisogno di modellizzarla. Si ottiene, dunque, una stima più realistica dell'esposizione del recettore al contaminante.

A conferma di ciò, una volta ottenuti tutti i risultati delle Analisi di Rischio, si sono andate a confrontare le concentrazioni dei soil gas calcolate dal modello da suolo e falda con quelle effettivamente campionate, riportate in giallo in tabella 5.25 (capitolo5). Si prendano come esempi gli aromatici C9-C10 e gli alifatici C5-C8, ossia le due categorie di idrocarburi più leggeri, dunque maggiormente volatili, dunque più pericolosi.

Di seguito vengono riportati degli esempi schematici di volatilizzazione outdoor e indoor ottenuti come output finale delle analisi di rischio, in cui si vuole mettere in luce il calcolo modellistico delle concentrazioni dei soil gas:

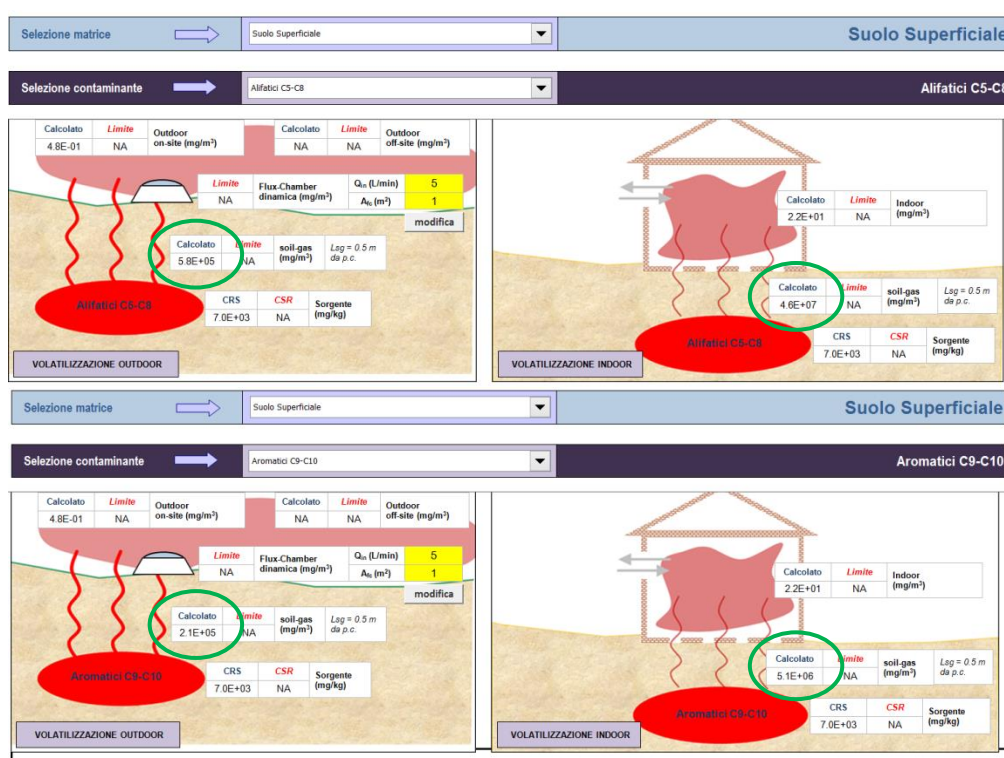


Fig.6.1 - Schema della volatilizzazione di idrocarburi alifatici e aromatici leggeri, in ambiente outdoor e indoor da sorgente suolo superficiale, sulla base del calcolo modellistico delle concentrazioni dei soil gas.

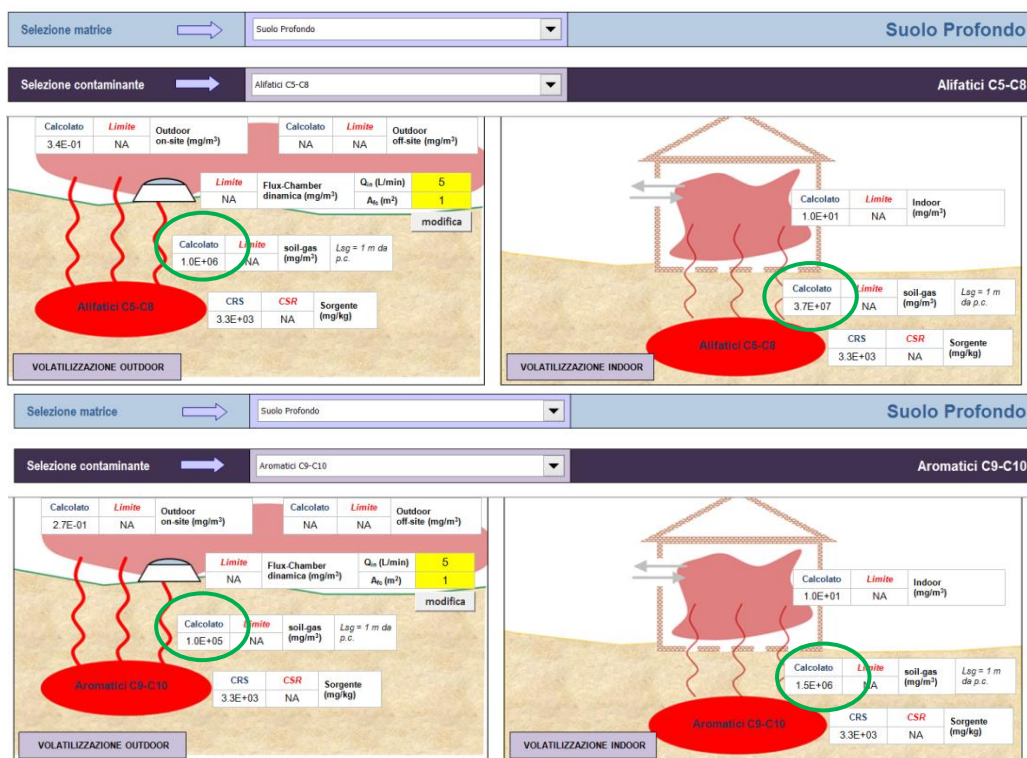


Fig.6.2 - Schema della volatilizzazione di idrocarburi alifatici e aromatici leggeri, in ambiente outdoor e indoor da sorgente suolo profondo, sulla base del calcolo modellistico delle concentrazioni dei soil gas.

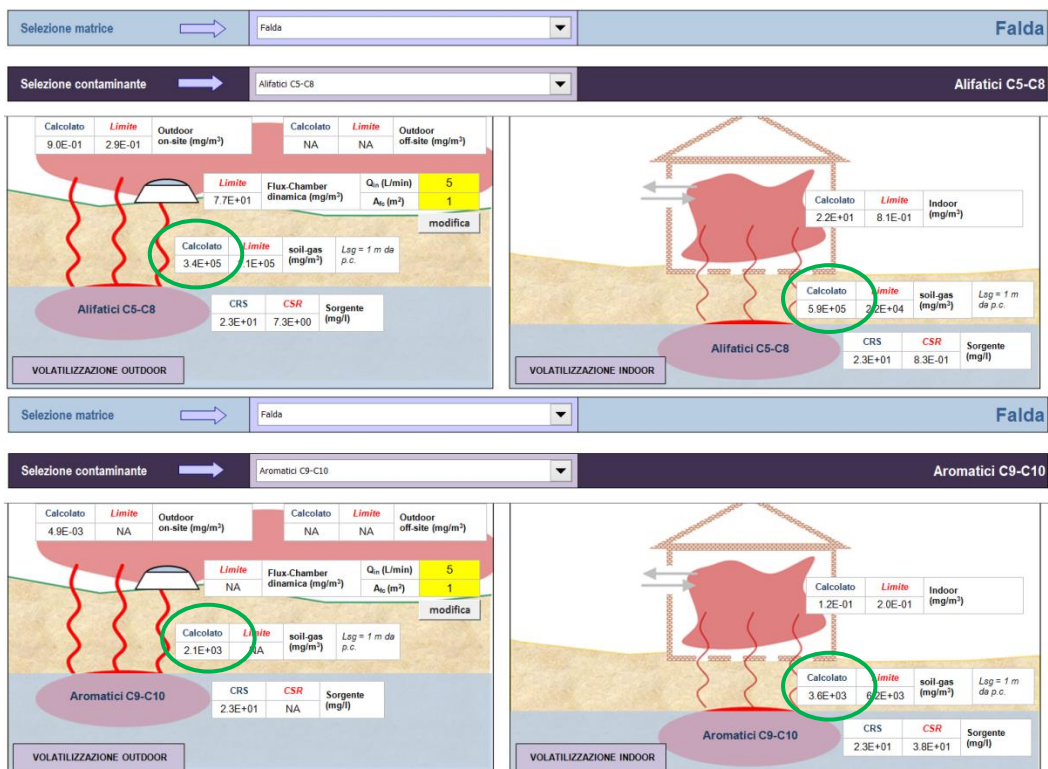


Fig.6.3. - Schema della volatilizzazione di idrocarburi alifatici e aromatici leggeri, in ambiente outdoor e indoor da sorgente falda, sulla base del calcolo modellistico delle concentrazioni dei soil gas.

Come si può notare le concentrazioni calcolate dal software assumono ordini di grandezza alti, variabili da E+03 a E+07, andando a stimare una concentrazioni nelle sorgenti di gran lunga superiore rispetto a quella reale misurata in sito:

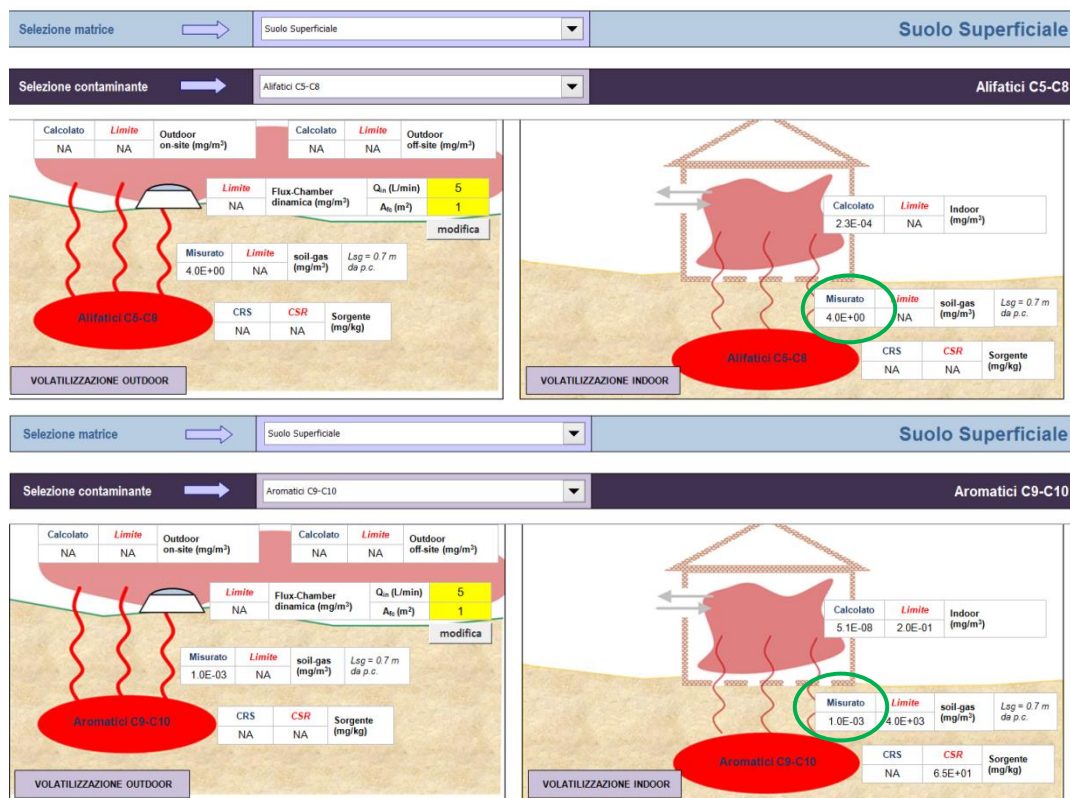


Fig.6.4. - Schema della volatilizzazione di idrocarburi alifatici e aromatici leggeri, in ambiente indoor da sorgente soil gas, sulla base delle misurazioni effettuate in sito tramite campionamento da sonde Nesty Probe.

Come si desume dalle immagini, le reali concentrazioni di soil gas sono inferiori a quelle stimate; è questo, dunque, il motivo per cui nelle analisi da suolo e falda si è ottenuto rischio, ossia una sovrastima nei passaggi fra calcolo delle CRS per suolo e falda, calcolo delle concentrazioni nei soil gas e infine calcolo del rischio. Si ritiene, pertanto, più realistico dar peso a quanto ottenuto con l' AdR Soil Gas, secondo la quale nel sito oggetto di indagine, ad oggi, non vi è rischio da inalazione di vapori.

Si sottolinea, in ultima analisi, l'importanza e la necessità di continuare il monitoraggio dei gas per verificare che i risultati ottenuti in questo lavoro di tesi si mantengano a lungo termine, oltre che per avere un riscontro sull' efficacia dei metodi di bonifica che verranno adottati.

Bibliografia

D. Lgs. 152/06 e ss.mm.ii. - Parte Quarta, Titolo V ed allegati al Titolo V
“Bonifica di siti contaminati”;

California Environment Protection Agency (Aprile 2012) - *“Advsory Active Soil Gas Investigations”*;

US EPA (2002) - *“Draft Guidance for Evaluating the Vapor Intrusion to Indoor Air Pathway from Groundwater and Soils, Subsurface Vapor Intrusion Guidance”*

ISPRA (Marzo 2008) - *“Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati”*, Rev.2;

ISPRA (Marzo 2008) - *“Intrusione di vapori nei luoghi di lavoro”*, Appendice S ai Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati, Rev.2;

ISPRA (Marzo 2008) - *“Applicazione dell'analisi di rischio ai punti vendita carburante”*, Appendice V ai Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati;

S.Berardi-G.Formenton-F.Fuin, Remtech (26 Settembre 2008) - *“Intrusione di vapori in ambienti di lavoro, Convegno sul tema: Applicazione dell'analisi di rischio ai siti contaminati”*;

ISS, Rapporti ISTISAN (13/04, 25/06/2012) - *“Strategie di monitoraggio dei composti organici volatili (COV) in ambienti indoor”*;

ISS-INAIL (Novembre 2013) - *“Documento di supporto alla Banca dati ISS-INAIL”*;

ISPRA, CdS (12/03/2014) - *“Criteri e metodologie applicative per misura del soil gas”*, SIN di Venezia - Porto Marghera;

ISPRA (Ottobre 2010) - *“Protocollo ISPRA-INAIL (ex-ISPEL) per la valutazione del rischio associato all'inalazione di vapori e polveri, in ambienti aperti e confinati nei siti di bonifica”*;

ISS (Settembre 2014) - *“Protocollo per il monitoraggio dell'aria indoor/outdoor ai fini della valutazione dell'esposizione inalatoria nei siti contaminati”*, SIN di Venezia – Porto Marghera;

ARPA Veneto (2011) - *“Linee Guida per il monitoraggio attivo dei gas interstiziali del terreno (soil gas)”*;

ARPA Veneto - *"Campionamento dei soil gas con l'uso di cannister e bottle-vac nell'ambito della caratterizzazione e bonifica di siti contaminati ai sensi del D. Lgs 152/2006 e s.m.i."*;

ARPA Emilia Romagna (Febbraio 2015) - *"Linea guida operativa per il campionamento, il trasporto e l'analisi dei gas interstiziali nei siti contaminati"*. Rev 01;

RECONnet - *"Manuale Risk Net 2.1"*;

RECONnet (Febbraio 2016) - *"Il software Risk-net v.2.0 (2015): presentazione e novità della nuova release"*;

Banca dati ISS/ISPESL - <http://www.isprambiente.gov.it>;

Banca dati ARPAV - <http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/meteo/dati>;

CalEPA (2015) - *"Advisory acitive soil gas investigations"*;

Iason Verginelli - *" Applicazione dell'analisi di rischio in condizioni di saturazione"*;

SGM ingegneria (Maggio 2014) - *"Operazione di messa in sicurezza d'emergenza"*;

SGM ingegneria (Luglio 2014) - *"Piano di caratterizzazione area interessata dallo sversamento di gasolio avvenuto in data 13/12/2013"*;

SGM ingegneria (Ottobre 2015) - *" Relazione tecnico descrittiva, integrazione Piano di indagine preliminare"*;

SGM ingegneria (Gennaio 2017) - *" Relazione tecnico descrittiva monitoraggio acque di falda e test pilota per bonifica in sito"*;

RINGRAZIAMENTI

Eccomi qui dopo 2 anni a scrivere quel famoso capitolo tutto nuovo di cui parlavo nella tesi triennale.

Un grazie doveroso al Professor Mason, che mi ha fatto scoprire una materia e una possibile strada per il futuro di cui ero ignara. Grazie per la disponibilità nel seguirmi nonostante i tanti impegni lavorativi e per avermi messo in contatto con la SGM ingegneria di Ferrara.

A tal proposito, grazie al mio correlatore, il Dottor Biavati, che mi ha messo a disposizione tutti gli strumenti di cui disponeva per riuscire al meglio in questo lavoro di tesi e per farmi approcciare con entusiasmo al tanto temuto "ambiente lavorativo".

Un grande grazie al Dott. Fuin, che con pazienza anche a 1000 km di distanza ha trovato il tempo per seguirmi e correggere minuziosamente i miei errori dettati dall' inesperienza, e che non ha perso mai l'occasione di chiamarmi "Dottoressa Centrone", facendomi sentire importante e in imbarazzo allo stesso tempo.

Un grazie speciale alla Dottoressa Lara Aleotti della SGM, che, nonostante i suoi impegni lavorativi, con prontezza e risoluzione non ha esitato a rispondere alle mie richieste d'aiuto/crisi di panico e passare ore al telefono per fugare tutti i dubbi.

Per i ringraziamenti meno formali non posso che cominciare con la mia famiglia.

Un immenso e inquantificabile grazie ai Miei Genitori, che mi hanno dato la possibilità di vivere questa indimenticabile esperienza da studentessa fuori sede a Padova, che mi fanno sentire una bambina felice quando dopo 26 anni di matrimonio li trovo ancora a ridere in veranda.

Grazie a Papà, che si priverebbe di tutto pur di non dirci "non possiamo permettercelo", per le telefonate e il suo immancabile "ciao bella!dimmi una cosa: tutto bene??", per i messaggi d'amore che ha imparato a scrivere su whatsapp, per aver mantenuto lo stereotipo del genitore terrone che riempie gli spazi vuoti dei pacchi e delle valigie con le scatolette di tonno. Prima di essere di chiunque altro sarò sempre prima "l'Amore di Papà".

Grazie a Mamma, per non aver mai mancato una telefonata serale in questi due anni anche solo per sentire il tono della mia voce e accertarsi da quello che andasse tutto bene. Grazie per essere stata il mio porto sicuro in un periodo non proprio felice, per avermi fatto da grillo parlante dicendomi dove sbagliavo e dove facevo bene, per essere stata a sentire le mie lacrime al telefono e aver avuto la forza, nonostante tutto, di dirmi "basta così, si va avanti e ce la farai".

Siete l'incarnazione dell'amore che può durare nella buona e nella cattiva sorte, dell' impegno reciproco che si prende quando due anime si legano, della devozione verso il sangue del proprio sangue. Spero di avervi resi un po' orgogliosi di vostra figlia "grande" oggi, e di aver ripagato i vostri sacrifici.

Grazie a Mia Sorella Giulia, che è l'amore della mia vita. Condividere con te questa pazza esperienza lontane da casa ha dato tutta una bellezza in più alla cosa. Non sarebbe stato lo stesso senza le trasferte a Parma per

piacere, per le tue crisi e per le mie crisi... e le immancabili patatine di Amor di Patata.

Ti sembrerà strano, ma sei il primo esempio di forza e determinazione per me. "Io e te, vento nel vento. Io e te, nodo dell'anima".

Grazie a mia Zia Filly, la mia "mamma per amica", per essere stata il mio pezzettino di famiglia al nord, per avermi ospitata tante volte in questi 2 anni quando il cielo veneto era un po' troppo grigio per essere vissuto da sola e avermi fatto sentire più che a casa; per essermi stata tanto tanto vicina in questo ultimo anno di cambiamenti, avendo sempre un pensiero a come io stessi. Sei una donna con la D maiuscola, grazie per il tuo cuore grande zia.

Grazie anche questa volta alle mie migliori amiche.

Grazie ad Anto per essere il mio specchio e la mia metà qualsiasi cosa accada. Per le pazze serate la Q, per le chiacchierate di ore in videocchiamata e per avermi salvata da Autocad!!!

Grazie ad Anna per avermi sempre difeso contro tutto e tutti, per i messaggi fino a notte tarda a confessarsi di tutto e di più e darsi forza a vicenda... e per le facce gatto :3.

Gioire con voi dei successi (e degli insuccessi) universitari di tutte e 3, vedere come insieme stiamo crescendo, anche a distanza, non ha prezzo. In questo anno non ce l'avrei mai fatta senza di voi, senza il vostro amore e la vostra pazienza, anche nel ripetermi cento volte le stesse cose pur di rasserenarmi. Siete l'emblema della vera amicizia per me, quella a cui ci si affida completamente.

Grazie ai miei compagni di avventura, "i Pugliesi Padovani". 4 geologi dell'università di Bari in trasferta in Veneto, nella stessa città, di cui 3 nello stesso condominio!! Ragazzi avete reso unica questa pazza vita al nordE. Non esagero quando dico che ci siamo fatti da famiglia.

Grazie a Peppe, il mio Raimondo nelle serate in cui mi sentivo Sandra. Per le paranoie che mi hai regalato e per la pazienza che mi hai fatto scoprire di aver ahahahah, per le ripetizioni insieme e per le serate di chiacchiere post cena con latte e cereali. Ho trovato un amico.

Grazie a Lucia, con cui ci siamo sempre sostenute a vicenda, non solo in senso figurato XD Sei stata una scoperta e il mio punto di riferimento femminile fra tutti i geologi di cui ero circondata in condominio. Ti voglio bene.

Grazie al Mio Biondo preferito, innanzitutto per aver condiviso questo percorso con me dall'inizio alla fine, per le cene gourmet, per i tuoi pantaloncini Duff, per l'incoscienza di tanti momenti e per i viaggi dopo giornate di studio, a riflettere sul senso della nostra esistenza, a parlare di futuro e a cercare di capire chi fossimo. Tu, tutto stile trasandato, coi capelli scompigliati, con il tuo "odio fare programmi"..io, fighettina precisina, come mi hai sempre definita, con la fissa per lo stare sempre in movimento e il mio "se mi organizzo la giornata vivo meglio"..in tante cose così diversi che a volte ti strozzerei, eppure così simili nel profondo, noi due piccoli acquarietti, che molte più volte ti abbraccerei. Ho avuto affianco Gigi per tanti anni..e solo ora comincio a scoprire Luigi....

Un grazie infinito alle mie pazze, strane, bellissime coinquiline: Mary, Alessia e Silvia "Grande". Ragazze vivere insieme è stato fantastico! C'è chi dalla casa condivisa con altri studenti vuole scappare, a me invece la cosa che manca più di tutte è proprio la convivenza con voi. Vi porterò sempre nel cuore, fra i miei ricordi più belli!

Infine il mio più intimo grazie va a Padova. Quello che ha significato questa città per me, non solo dal punto di vista universitario e per gli spritz, è indescrivibile. Ricordo il primo giorno che sono arrivata, i profumi che ho sentito in casa nuova, il vociare per le strade in quello strano accento, le vibrazioni positive che questa città mi ha trasmesso sin da subito. Quasi non riconosco più la "bambina" che scese da quel treno due anni fa..ho scoperto una Silvia nuova che aveva voglia di esplodere, e questo mi ha messo tanto in crisi da farmi vivere le emozioni e gli stati d'animo più belli e più brutti della mia vita qui, ma quello che ne ho ricavato non lo cambierei con niente al mondo..mi sono conosciuta a 360 gradi, sono maturata tantissimo, ho visto quanto me la so cavare da sola e fin dove arriva la mia forza, quanto non si finisca mai di imparare, di piangere, di ridere, quanto la propria individualità sia preziosa., quanto quanto quanto, potrei fare una lista immensa di quello che ho vissuto e imparato qui! Ma forse il riassunto più appropriato è questo: Padova ha segnato la svolta da Silvia ragazzina a quella che sarà la Silvia del domani, più consapevole, più ricca, con più cicatrici ma con più pazienza ed esperienza, più matura, più donna.