

PROGETTAZIONE DEL MONITORAGGIO DI VAPORI NEI SITI CONTAMINATI

Delibera del Consiglio SNPA. Seduta del 03.10.18. Doc. n. 41/18





PROGETTAZIONE DEL MONITORAGGIO DI VAPORI NEI SITI CONTAMINATI

Delibera del Consiglio SNPA. Seduta del 03.10.18. Doc. n. 41/18

LINEE GUIDA SNPA | **15** 2018

ISBN 978-88-448-0922-5 - Roma, Novembre 2018

Informazioni legali

Il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) è operativo dal 14 gennaio 2017, data di entrata in vigore della Legge 28 giugno 2016, n.132 "Istituzione del Sistema nazionale a rete per la protezione dell'ambiente e disciplina dell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale".

Esso costituisce un vero e proprio Sistema a rete che fonde in una nuova identità quelle che erano le singole componenti del preesistente Sistema delle Agenzie Ambientali, che coinvolgeva le 21 Agenzie Regionali (ARPA) e Provinciali (APPA), oltre all'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

Attraverso il Consiglio dell'SNPA, il Sistema esprime il proprio parere vincolante sui provvedimenti del Governo di natura tecnica in materia ambientale e segnala al MATTM e alla Conferenza permanente per i rapporti tra lo Stato, le regioni e le province autonome di Trento e Bolzano l'opportunità di interventi, anche legislativi, ai fini del perseguimento degli obiettivi istituzionali.

Tale attività si esplica anche attraverso la produzione di documenti, prevalentemente linee guida o rapporti, che diffondono tali pareri, tramite la pubblicazione nell'ambito delle rispettive Collane Editoriali, a cura delle singole Agenzie o dell'ISPRA.

L'ISPRA, le ARPA, le APPA e le persone che agiscono per loro conto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

ISBN 978-88-448-0922-5

© Linee Guida SNPA, 15/2018

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Foto di copertina: Gruppo di Lavoro 9 bis SNPA

ISPRA

Coordinamento pubblicazione on line:

Daria Mazzella

ISPRA – Area Comunicazione

Novembre 2018

Autori

Madela Torretta, Sara Puricelli (ARPA Lombardia)

Adele Lo Monaco, Renata Emiliani, Maria Grazia Scialoja, Fabrizio Cacciari (ARPAE Emilia Romagna)

Lucina Luchetti (ARTA Abruzzo)

Antonella Vecchio (ISPRA)

Gruppo di Lavoro 9 Bis – Sottogruppo 1 “Campionamento”

Maurizio Di Tonno, Paolo Fornetti (ARPA Piemonte)

Daniela Fanutza, Lucrezia Belsanti, Maurizio Garbarino (ARPA Liguria)

Federico Fuin (ARPA Veneto)

Ringraziamenti

Simona Berardi (INAIL)

INDICE

| | |
|---|-----------|
| PREMESSA | 4 |
| QUADRO NORMATIVO | 5 |
| 1 SOSTANZE DI INTERESSE PER IL PERCORSO DI VOLATILIZZAZIONE | 8 |
| 2 METODICHE ANALITICHE | 8 |
| 3 IL MONITORAGGIO DEGLI AERIFORMI NEI SITI CONTAMINATI E L'APPROCCIO PER LINEE DI EVIDENZA | 9 |
| 3.1 La migrazione dei vapori e la sua valutazione all'interno dell'Analisi di Rischio.... | 10 |
| 3.2 Le linee di evidenza | 12 |
| 4 CRITERI DI UBICAZIONE DEI PUNTI DI CAMPIONAMENTO | 15 |
| 5 INFLUENZA DEI PARAMETRI METEOCLIMATICI E AMBIENTALI | 18 |
| 5.1 Temperatura..... | 18 |
| 5.2 Pressione..... | 18 |
| 5.3 Umidità..... | 19 |
| 5.4 Precipitazioni ed irrigazione..... | 20 |
| 5.5 Vento | 20 |
| 5.6 Indicazioni operative | 21 |
| 6 PRESENZA DI IMPIANTI ATTIVI | 22 |
| 7 PIANO DI CAMPIONAMENTO | 23 |
| 8 VALUTAZIONE DEI RISULTATI DELLE INDAGINI | 24 |
| 8.1 Indicazioni sul numero di campagne di monitoraggio | 24 |
| 8.2 Valutazione dei risultati dei monitoraggi del soil gas | 25 |
| 8.3 Valutazione dei risultati dei monitoraggi con camere di flusso | 26 |
| BIBLIOGRAFIA | 27 |
| ALLEGATO 1 – SOSTANZE DI INTERESSE PER L'ATTIVAZIONE DEL PERCORSO DI INALAZIONE DI VAPORI | 30 |

PREMESSA

Il presente documento è stato sviluppato da ISPRA e dalle ARPA all'interno delle attività del Gruppo di Lavoro 9 bis del Sistema Nazionale Protezione Ambiente (SNPA) che ha come finalità la definizione di una "Procedura per la validazione da parte degli Enti di controllo dei dati derivanti dalle misure dirette di aeriformi nell'ambito di siti sottoposti a procedura di bonifica".

Lo scopo del documento è quello di fornire indicazioni tecniche condivise a livello nazionale per il campionamento degli aeriformi nell'ambito dei procedimenti di bonifica ai sensi della Parte Quarta del Titolo V del D.Lgs. 152/06 e s.m.i..

Le indicazioni tecniche sono state desunte dalle esperienze già maturate dalle Agenzie, che si sono dotate di Linee Guida per indirizzare tecnicamente lo svolgimento delle suddette attività, e da una serie di attività di sperimentazione condotte dal GdL 9 bis al fine sia di confrontare le diverse tecniche di monitoraggio e di campionamento, sia di raccogliere elementi utili per superare le criticità connesse alla rappresentatività dei dati e alla gestione dell'incertezza associata alla variabilità spaziale e temporale delle misure.

Il documento prende in considerazione esclusivamente le procedure di campionamento finalizzate alla valutazione dell'entità della frazione volatile della contaminazione e della emissione di vapori dal suolo e/o dalle acque sotterranee (misure di soil gas, misure di flusso). Non sono invece incluse nel documento le misure di aria effettuate in ambiente sia indoor sia outdoor in quanto, benché importanti anche per la valutazione ambientale del sito, le stesse possono interessare aspetti di valutazione sanitaria dell'esposizione di residenti e/o sicurezza dei lavoratori che non sono di esclusiva competenza del SNPA. Per la definizione delle modalità di campionamento e di utilizzo del dato relative alle misure in aria si è pertanto definito di coinvolgere nell'ambito degli specifici procedimenti anche gli altri Enti Competenti e di lasciare tale trattazione ad un altro documento.

Il documento include quindi le considerazioni generali relative al campionamento dei gas interstiziali e alle misure di flusso. Per gli aspetti tecnici di dettaglio sono state predisposte due appendici: Appendice A per le misure di gas interstiziali e Appendice B per le misure di flusso. Il trattamento dei dati di gas interstiziali è affrontato nel documento "Procedura operativa per la valutazione e l'utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell'analisi di rischio dei siti contaminati".

Infine, a mero scopo informativo e conoscitivo, viene riportata in Appendice C una panoramica delle tecniche di monitoraggio dei gas del suolo mediante "campionatori passivi". Le considerazioni riportate in tale allegato sono una disamina della letteratura esistente in materia anche se tuttavia tali tecniche meritano un approfondimento di sperimentazione da parte di SNPA per poterne valutare l'applicabilità nell'ambito della valutazione dei siti contaminati.

QUADRO NORMATIVO

Le attività di bonifica dei siti contaminati sono disciplinate a livello nazionale dalla Parte Quarta, Titolo V del D.Lgs. 152/06 e s.m.i., anche conosciuto come Testo Unico Ambientale. Con l'entrata in vigore di questo decreto è stato modificato il significato stesso di sito contaminato, fondandolo sul concetto di rischio da determinare con l'applicazione di una procedura di analisi sito-specifica. I Criteri generali per l'analisi di rischio sanitario ambientale sito-specifica (AdR) sono contenuti nell'Allegato 1 al Titolo V parte IV del Decreto e si sviluppano secondo lo schema sorgente – percorso – bersaglio della contaminazione. L'inalazione di vapori è espressamente indicata nell'Appendice 1 fra le modalità di esposizione attraverso le quali l'inquinante può venire in contatto con il bersaglio. Successivamente, al fine di fornire un documento di riferimento valido a livello nazionale per la predisposizione degli studi di analisi di rischio sito-specifica (AdR), caratterizzato da un maggior livello di dettaglio rispetto al citato riferimento normativo, viene predisposto il manuale «Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati», elaborato dal gruppo di lavoro APAT-ARPA/APPA-ISS-ISPEL. Tale documento nella Revisione 2 del marzo 2008, pur non avendo carattere normativo, rappresenta ancora oggi il principale riferimento nazionale per l'applicazione della metodologia citata.

I Criteri metodologici descrivono i modelli che simulano il trasporto degli aeriformi nel sottosuolo (Appendice D - Fattore di volatilizzazione e di emissione di particolato in ambienti aperti; Appendice F - Fattore di volatilizzazione in ambienti confinati) e dedicano una specifica sezione al tema dell'intrusione di vapori, limitando però la trattazione ai luoghi di lavoro (Appendice S). Nel documento principale emerge tuttavia la necessità di studiare meglio il fenomeno della migrazione dei vapori dal sottosuolo verso gli ambienti chiusi (indoor) ed aperti (outdoor) attraverso campagne di rilievi in campo; viene infatti affermato: *“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; il piano delle indagini e dei monitoraggi dovrà essere concordato con le Autorità di Controllo”*.

A circa un anno dalla pubblicazione della revisione 2, i Criteri metodologici si arricchiscono di una nuova Appendice dedicata all'applicazione dell'AdR ai punti vendita carburante (Appendice V, giugno 2009). In relazione alla via di esposizione inalazione di vapori outdoor e/o indoor l'Appendice V riprende le considerazioni contenute nel documento principale e riporta indicazioni tecniche sul numero minimo di punti e sulla profondità di indagine ma soprattutto fornisce indicazioni sulla gestione dei dati derivanti dalle misure sperimentali di gas interstiziale del sottosuolo indicando, per le sostanze di interesse, i valori di concentrazione accettabili ai fini dell'esclusione del percorso inalazione di vapori (§ V.5.5 “verifica sperimentale della presenza di rischi da inalazione di vapori indoor e outdoor”).

In questo contesto è necessario precisare che ad oggi i gas interstiziali del sottosuolo, così come le altre matrici aeriformi oggetto della presente linea guida, non sono considerati una matrice ambientale associata al sito ai sensi del D.Lgs. 152/06, non essendo infatti citati nella Parte IV del Titolo Quinto del decreto. La definizione di sito ivi contenuta recita all'art. 240 c. 1 lett. a): *“l'area o porzione di territorio, geograficamente definita e determinata, intesa nelle*

diverse matrici ambientali (suolo, materiali di riporto¹, sottosuolo ed acque sotterranee) e comprensiva delle eventuali strutture edilizie e impiantistiche presenti”.

Pertanto non è possibile individuare obiettivi di bonifica (CSR) nella matrice aeriformi.

Il D.Lgs. 152/06 si occupa invece della matrice aeriformi nella Parte Quinta (Norme in materia di tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni in atmosfera), Titolo I (Prevenzione e limitazione delle emissioni in atmosfera di impianti e attività) in cui all'art. 268 c. 1 lett. ll) fornisce la seguente definizione di composto organico volatile: *“qualsiasi composto organico che abbia a 293,15 K una pressione di vapore di 0,01 kPa o superiore, oppure che abbia una volatilità corrispondente in condizioni particolari di uso”.*

Il fatto che la matrice aeriformi non sia compresa fra le matrici ambientali contemplate dalla norma sulle bonifiche viene ripreso qualche anno dopo dall'Istituto Superiore di Sanità che, in una nota alla Regione Piemonte², afferma: *“ancorché tra le matrici considerate dal D.Lgs. 152/2006 parte IV Titolo V relativo alle bonifiche dei siti contaminati, non sia prevista la matrice “gas interstiziali dei terreni” si ritiene che le informazioni derivanti dalla misura di detti gas interstiziali siano maggiormente rispondenti ad una valutazione della reale esposizione umana e siano comunque da considerare, ove correttamente eseguite, obiettive ed univoche”.*

Ancora una volta quindi il parere propende favorevolmente per l'utilizzo di campagne di misure sperimentali, affermando che *“campagne di indagini in campo sono da preferire al mero utilizzo di modelli matematici, che per quanto scientificamente validi, debbono necessariamente operare delle semplificazioni rispetto ai fenomeni che avvengono in natura”.*

La medesima indicazione si ritrova ancora nelle “Linee guida sull'analisi di rischio” emanate nel novembre 2014 dal MATTM³, le cui conclusioni del punto 2 “Utilizzo dei dati di campo per la verifica dei risultati ottenuti con l'applicazione modellistica”, riportano quanto segue:

“a) si ritiene condivisibile l'utilizzo di dati derivanti da misure dirette (soil-gas e/o aria ambiente e/o camera di flusso, etc.) rappresentative del fenomeno studiato, per l'esclusione del percorso di volatilizzazione (fase di costruzione del modello concettuale del sito), per la verifica in itinere dei risultati dei modelli di calcolo dell'analisi di rischio e per il monitoraggio dell'efficienza/efficacia degli interventi di messa in sicurezza e bonifica sia in fase di esercizio che in fase di collaudo degli interventi. Le modalità di utilizzo di tali dati vengono definite nell'ambito dei singoli procedimenti sulla base delle indicazioni di ARPA e ASL, tenendo conto delle tempistiche previste dalla normativa vigente per la conclusione dei procedimenti stessi;

b) in casi complessi, allo scopo di garantire la rappresentatività dei dati di campo, dovranno essere adottate più linee di evidenza con campionamento di diverse matrici ambientali (ad es.: suolo, soil-gas, aria ambiente). A tal fine dovrà essere privilegiato il ricorso a tecniche di indagine per le quali sono stati già elaborati in ambito regionale o nazionale protocolli tecnici specifici da parte di enti di controllo o istituti scientifici nazionali competenti in materia”.

Un nuovo dispositivo di legge che tratta in specifico il tema dei punti vendita carburanti è il D.M. 31/2015 “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”. Tale Regolamento richiama espressamente in premessa l'Appendice V del manuale "Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi di rischio ai siti contaminati", attribuendo una implicita legittimazione normativa al documento

¹ Voce aggiunta dall'art. 3, comma 4, D.L. 25 gennaio 2012, n. 2, convertito, con modificazioni, dalla L. 24 marzo 2012, n. 28.

² Istituto superiore di Sanità, prot. n. 0030600 del 20/08/2012.

³ Nota Prot.29706/TRI del 18 novembre 2014 – MATTM Direzione Generale per la Tutela del territorio e delle Risorse Idriche.

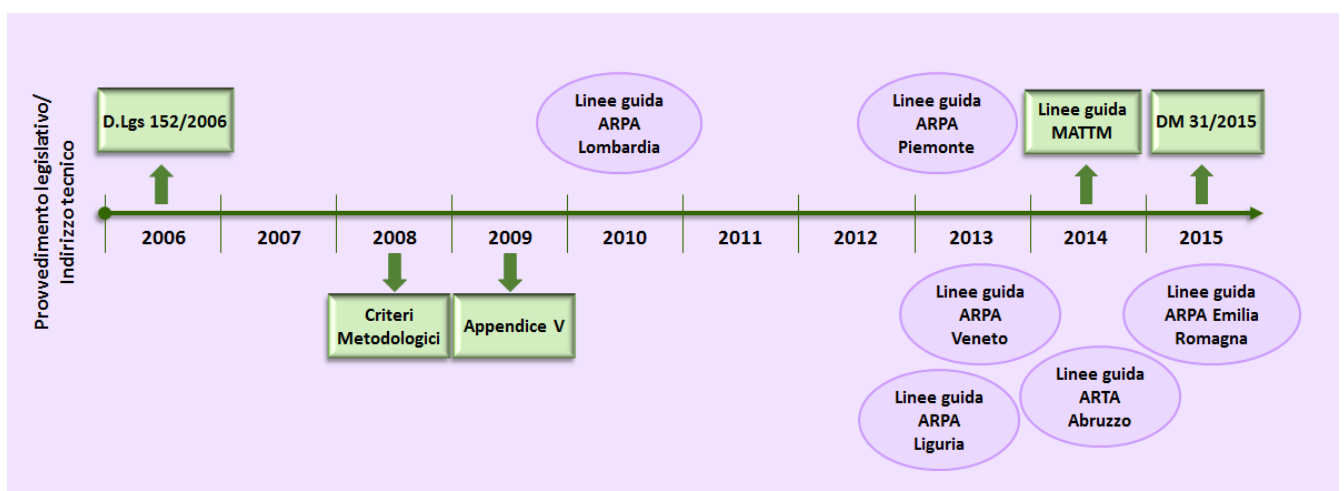
tecnico di riferimento prodotto dagli Istituti e dal sistema delle Agenzie ambientali. Nell'art. 3 c. 2 del Regolamento viene prevista la possibilità di effettuare, ad integrazione delle indagini dirette, altri tipi di verifiche, fra le quali vengono citate espressamente le misure di soil-gas. Nell'Allegato 2, in cui vengono forniti i Criteri semplificati per l'applicazione dell'AdR alla rete dei punti vendita carburanti, viene dedicato il § 2.3 alla valutazione del percorso di inalazione di vapori indoor e outdoor. All'interno di tale sezione il Regolamento inserisce le considerazioni sopra riportate contenute nei documenti di riferimento (Criteri metodologici e Appendice V), fornendo peraltro le stesse indicazioni tecniche sul numero minimo di punti e sulla profondità di indagine; introduce tuttavia una nuova indicazione tecnica sull'utilizzo dei dati derivanti dalle misure sperimentali di soil gas, affermando che tali dati possono essere utilizzati per il calcolo del rischio in modalità diretta (modalità già prevista dai documenti tecnici di riferimento), o per il calcolo degli obiettivi di bonifica (CSR).

Rispetto a tale ultima possibilità il Decreto invero non fornisce indicazioni procedurali su come realizzarla: pertanto poiché, secondo quanto sopra esposto, le CSR non possono essere stabilite per la matrice aeriforme, occorre fare un passaggio modellistico per pervenire dalla concentrazione accettabile nel gas interstiziale alla CSR nella matrice suolo, sottosuolo o acqua sotterranea (tale passaggio che avviene utilizzando i modelli analitici di AdR sta proprio alla base della necessità di introdurre un approccio sperimentale supportato da misure di aeriformi in campo).

Parallelamente allo svilupparsi del panorama normativo sulla matrice aeriformi applicata ai siti contaminati, in conseguenza del crescente numero di siti oggetto di procedimento di bonifica interessati dall'esecuzione di misure sperimentali di aeriformi, a partire dal 2010 alcune Agenzie ambientali regionali (Arpa Lazio, ARPA Liguria, ARPA Lombardia, ARPA Piemonte, ARPA Veneto, ARPAE Emilia Romagna ed ARTA Abruzzo) hanno cominciato a pubblicare proprie linee guida e procedure operative, valide a livello regionale, nel tentativo di definire quegli elementi di buona pratica che devono essere seguiti nella progettazione e nell'esecuzione di questo tipo di indagini, spingendosi in alcuni casi a definire le principali regole di utilizzo del dato nell'ambito del procedimento di bonifica.

Per avere un'idea nel tempo dello sviluppo della normativa tecnica e della predisposizione dei principali manuali/linee guida si veda la successiva Fig.1.

Figura 1 – Sviluppo temporale della normativa e dei principali manuali/linee guida che riguardano il monitoraggio dei vapori



1 SOSTANZE DI INTERESSE PER IL PERCORSO DI VOLATILIZZAZIONE

Le sostanze di interesse per il monitoraggio dei vapori ai fini dell'Analisi di Rischio sono in generale quelle per cui è attivabile il percorso di volatilizzazione dal suolo e/o dalle acque di falda.

In accordo con quanto riportato nella Banca Dati ISS-INAIL del marzo 2018 (ISS-INAIL, 2018) sono state definite come VOC (Volatile Organic Compound - Composti Organici Volatili) le sostanze che soddisfano i seguenti criteri:

- escludere il percorso di volatilizzazione da suolo insaturo/saturo per le specie chimiche la cui pressione di vapore risulta inferiore a $1,0E-06$ kPa (= $7,5E-06$ mm Hg) (Harkov, 1989);
- per le specie chimiche, che non soddisfano quanto sopra, adottare il criterio USEPA (USEPA, 2015), modificato a favore di cautela, ossia attivare il percorso di inalazione di vapori se:
 - la pressione di vapore è maggiore di $0,075$ mm Hg⁴ (10 Pa), oppure
 - la Costante di Henry è maggiore di $1,0E-05$ atm x m³/mol.

Il suddetto criterio è stato applicato a tutte le specie chimiche della banca dati, ad eccezione degli idrocarburi, per i quali, in accordo con quanto contenuto nel documento (MADEP, 2009), si ritiene opportuno attivare il percorso di "inalazione di vapori" per le classi di idrocarburi aromatici e alifatici $C \leq 12$.

Ovviamente, nel caso di presenza nel suolo saturo e/o insaturo di composti idrocarburici $C > 12$, saranno ricercate le frazioni $C \leq 12$ nei gas interstiziali, anche nel caso in cui tali frazioni non siano presenti nei due comparti ambientali di cui sopra.

Alla luce dei criteri precedenti, le sostanze di interesse per l'attivazione del percorso di volatilizzazione sono quelle indicate nella Banca Dati ISS-INAIL 2018 (ISS-INAIL 2018) ed elencate in Allegato 1.

Gli specifici contaminanti da ricercare durante i monitoraggi devono in ogni caso essere individuati tenendo conto delle caratteristiche sito-specifiche dell'area in studio, valutando le attività svolte in passato o ancora in essere sul sito e considerando anche i relativi sottoprodotti.

2 METODICHE ANALITICHE

Per quanto riguarda le indicazioni sugli aspetti analitici si rimanda al documento "Metodiche analitiche per le misure di aeriformi nei siti contaminati".

⁴ Come limite per la pressione di vapore si è assunto, a favore di cautela, il valore presente nel D.Lgs. 152/2006 (pari a $0,075$ mm Hg), anziché il valore proposto dall'USEPA (pari a 1 mm Hg).

3 IL MONITORAGGIO DEGLI AERIFORMI NEI SITI CONTAMINATI E L'APPROCCIO PER LINEE DI EVIDENZA

In generale le misure di aeriformi sono utilizzate nell'ambito dei procedimenti di bonifica dei siti contaminati sia in fase di indagine preliminare/caratterizzazione ambientale, sia per l'esecuzione dell'AdR, sia per la progettazione degli interventi che della loro verifica.

In Tabella 1 è indicato l'utilizzo delle misure di aeriformi nell'ambito del procedimento di bonifica.

Tabella 1 – Ambiti procedurali di utilizzo delle misure di vapori

| Fase del procedimento di bonifica | Utilizzo delle misure di aeriformi |
|--|--|
| Indagine preliminare/caratterizzazione | Indagine qualitativa per ubicare correttamente le indagini geognostiche |
| Analisi di Rischio | Esclusione del percorso di migrazione degli inquinanti volatili |
| | Misura delle concentrazioni di composti volatili nella sorgente di contaminazione |
| | Misura dei livelli di composti volatili a cui sono esposti i recettori |
| | Verifica dei valori attesi da modelli di simulazione |
| Bonifica/Messa in sicurezza | Misura dell'efficacia di interventi di bonifica sulle fonti di composti volatili (es. soil vapour extracion) |
| | Verifica dell'efficacia di interventi di mitigazione del percorso di volatilizzazione (es. barriere ai vapori) |

Le tecniche di campionamento degli aeriformi utilizzate nei siti contaminati sono differenti sia per tipologia sia per risultati ottenuti.

Il *soil gas survey*, che consiste in un campionamento attivo dei gas del suolo mediante l'installazione di sonde di campionamento adeguatamente progettate (cfr. Appendice A "Prelievo di gas interstiziali - *soil gas survey* - in modalità attiva"), permette di misurare le concentrazioni dei composti volatili nel suolo generalmente in corrispondenza della sorgente di contaminazione oppure in prossimità del bersaglio.

L'utilizzo della camera di flusso (*flux chamber*) (cfr. Appendice B "Misure di flusso - *flux chamber*"), invece, permette di determinare il flusso di massa degli inquinanti volatili emessi dal suolo.

Infine le misure in aria consentono di determinare l'effettiva concentrazione dei composti volatili nell'aria ambiente (indoor o outdoor) alle quali sono esposti i bersagli.

Poiché le diverse tipologie di monitoraggio misurano grandezze differenti (flusso, concentrazioni), spesso i risultati sono difficilmente confrontabili, inoltre ognuna delle tecniche presenta differenti vantaggi e diverse limitazioni e/o criticità applicative ed occorre effettuare, nei casi più complessi, un monitoraggio integrato basato su più linee di evidenza.

La pianificazione delle indagini, la selezione delle tipologie di misure da effettuare deve in primo luogo tener conto delle finalità del campionamento. Non meno importante è la definizione del modello concettuale della contaminazione per definire sia l'ubicazione dei punti di campionamento che le modalità di campionamento.

Nel presente documento si farà riferimento in particolare all'utilizzo delle misure di aeriformi nell'ambito dell'AdR, in particolare quando l'AdR effettuata a partire dai dati relativi ai terreni e/o alle acque sotterranee (per il percorso di volatilizzazione) dia risultati non conformi ai criteri di accettabilità previsti per legge.

3.1 La migrazione dei vapori e la sua valutazione all'interno dell'Analisi di Rischio

Nell'AdR, per il recettore uomo, il percorso di esposizione spesso più critico riguarda l'inalazione di vapori di inquinanti volatili provenienti dal sottosuolo. Il rischio associato all'inalazione di vapori è funzione della concentrazione dei contaminanti attesa in aria indoor e/o outdoor ($C_{\text{aria ambiente}}$) e dovuta all'emissione di sostanze volatili presenti nelle sorgenti di contaminazione nei terreni e/o nelle acque di falda.

Le concentrazioni di VOC presenti nel suolo insaturo possono migrare in ambiente aperto o confinato sotto l'influenza di molte variabili connesse alle proprietà chimico-fisiche dei composti volatili stessi, alle caratteristiche geologiche e idrogeologiche, alle condizioni meteo/climatiche ed alla presenza di elementi infrastrutturali e pavimentazioni del sito oggetto di studio. Le caratteristiche geologiche e idrologiche locali sono elementi essenziali da valutare ai fini di una corretta progettazione di campagne di monitoraggio di gas interstiziali e di misure di aria all'interfaccia suolo-atmosfera in quanto la presenza di terreni a bassa permeabilità o falde superficiali possono impedire la libera circolazione gassosa nel suolo a causa della mancanza di vuoti interconnessi (porosità efficace) nel terreno ovvero possono definirsi delle aree con flussi preferenziali. Tali aspetti vengono descritti nei paragrafi seguenti che individuano i criteri di ubicazione (§ 4) ed i fattori meteorologici influenti (§ 5).

In sintesi i due meccanismi principali del trasporto di sostanze volatili nel suolo sono (Fig. 2) la diffusione (per gradiente di concentrazione) e l'avvezione (per gradiente di pressione).

Il trasporto per diffusione dovuto ad un gradiente di concentrazione è in generale sempre presente, mentre l'importanza del trasporto avveztivo è influenzata da diversi fattori ambientali che condizionano anche la partizione tra i diversi stati di fase, ed in particolare in risposta a:

- fluttuazioni di pressione: variazioni giornaliere (giorno/notte) dovute a temperatura, umidità e pressione atmosferica dell'ordine di pochi millibar e variazioni a lungo termine che derivano da condizioni climatiche a scala più ampia, dell'ordine delle decine di millibar. Gli effetti di tali variazioni si risentono soprattutto negli strati superficiali di terreno e in generale la zona di influenza aumenta all'aumentare dello spessore dell'insaturo e della permeabilità del mezzo;
- oscillazioni del livello di falda: il contributo è importante se la falda è molto superficiale, se le variazioni sono repentine e significative e se la permeabilità del mezzo è elevata;
- produzione di gas derivanti dalla degradazione di sostanza organica: i processi di respirazione e di degradazione di composti organici causano aumenti di volume di gas nel suolo che, qualora siano significativi, possono determinare un flusso avveztivo;
- negli ambienti indoor, per gli impianti di aspirazione, riscaldamento e ventilazione, nonché per effetto camino legato a differenze di temperature tra ambiente chiuso ed aperto.

In generale anche gradienti di pressione relativamente piccoli possono generare flussi significativi di tipo avveztivo. Tuttavia al diminuire della pressione, della granulometria (diametro medio dei pori) o della saturazione del gas nei pori (ovvero all'aumento del grado di saturazione dell'acqua) oppure all'approfondirsi della sorgente, il flusso avveztivo si riduce lasciando il posto a quello diffusivo che può diventare predominante (Auer et al., 1996, De Jong, 1973, Chiodini et al. 1998, Etiope et al., 2002, Choi, 2002, Luo et al., 2006, Etiope, 2009, Rey et al., 2012, CRC CARE, 2013).

Un altro meccanismo importante è la miscelazione del flusso di contaminanti dal suolo con l'aria indoor e outdoor, che nel caso in cui l'aria ambiente con cui si miscela il flusso dal suolo sia priva di contaminazione (ipotesi generalmente verificata) determina una diluizione delle concentrazioni.

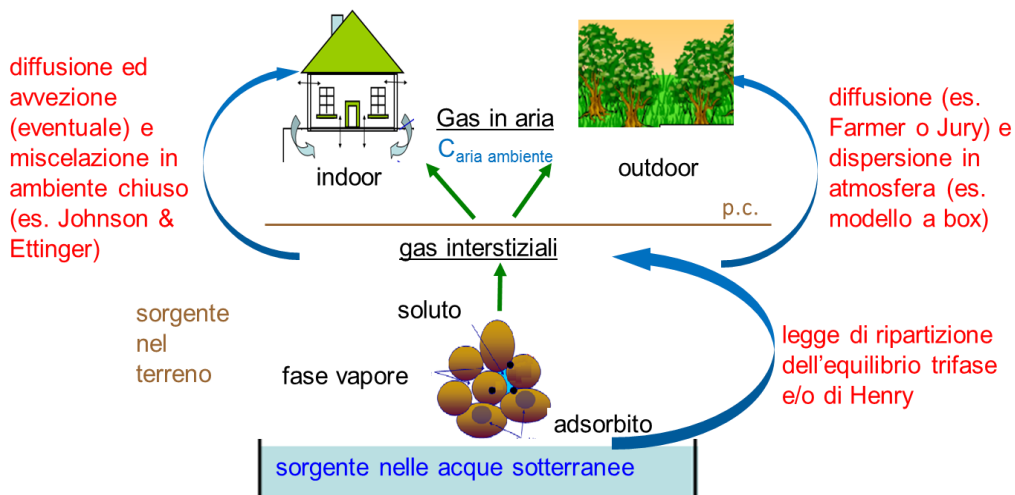
L'elemento forzante della miscelazione in ambiente outdoor è la presenza di vento, mentre in ambiente indoor è la frequenza del ricambio di aria all'interno dello spazio chiuso. Un altro elemento importante che governa il fenomeno è il volume di aria in cui avviene la miscelazione. In ambiente indoor tale volume corrisponde allo spazio chiuso direttamente a contatto con il flusso emissivo: il piano terra o il piano interrato dell'edificio a contatto con il terreno o, nel caso di vie preferenziali di migrazione verso i piani superiori (es. presenza di camini o di condotte d'aria che collegano tutti i piani dell'edificio), gli spazi chiusi interessati da tali percorsi di migrazione. In ambiente outdoor il volume d'aria in cui avviene la miscelazione dipende dalle condizioni atmosferiche (cfr § 5) che possono favorire o limitare il moto verso l'alto dei vapori contaminati.

Figura 2 – Modello concettuale della migrazione dei gas del suolo



All'interno dell'AdR sito-specifica per il calcolo delle CSR, come indicato in Fig. 3, la stima di Caria ambiente viene usualmente condotta a partire dai dati di concentrazione rilevati nelle sorgenti secondarie (terreno/falda) mediante l'applicazione di modelli matematici che si basano sulla legge di ripartizione di fase, nel caso di contaminazione adsorbita al terreno, o direttamente sulla legge di Henry nel caso di contaminazione disciolta. Definita la concentrazione all'equilibrio nella fase gassosa, presente nei vuoti interstiziali, vengono poi applicati modelli differenti, di tipo analitico, nel caso vi sia un'emissione di vapori in ambiente esterno (outdoor) o un'intrusione in ambienti confinati (indoor).

Figura 3 – Schema rappresentativo dell'equilibrio di ripartizione della contaminazione e fenomeni di trasporto utilizzati nell'AdR per definire la concentrazione in aria ($C_{aria\ ambiente}$)



Nel primo caso possono essere utilizzati per il trasporto fino a piano campagna (p.c.) i modelli di Farmer (1978 e 1980) o di Jury (1990), seguiti dal modello di dispersione atmosferica a box, mentre nel secondo direttamente il modello di Johnson & Ettinger (1991) che include anche eventuali valutazioni di avvezione in ambienti confinati, così come indicato nei Criteri metodologici di ISPRA (ex-APAT) del 2008.

Tali modelli sono tuttavia basati su ipotesi semplificative, spesso non sito-specifiche, poco rappresentative del sottosuolo e della dispersione in aria e, mediante l'uso di dati soggetti ad elevata incertezza, forniscono previsioni non sempre rappresentative della realtà.

3.2 Le linee di evidenza

In alternativa alle soluzioni modellistiche proposte all'interno dell'AdR è possibile effettuare misure dirette di campo per ottenere risultati il più possibile aderenti alle condizioni reali. In Tabella 2 sono indicate le finalità delle diverse tipologie di monitoraggio degli aeriformi ed i modelli da utilizzare, dove necessario, per definire la concentrazione al recettore ovvero $C_{\text{aria ambiente}}$.

Tabella 2 – *Caratteristiche delle diverse tipologie di monitoraggio vapori*

| Tipologia di monitoraggio | Risultato del monitoraggio | Modelli sostituiti | Modelli da combinare per la stima delle concentrazioni in aria |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| monitoraggio dei gas interstiziali | concentrazione nei gas interstiziali | equilibrio di ripartizione | calcolo del flusso in aria ambiente miscelazione in aria ambiente |
| misure di flusso | flusso di massa emesso dal suolo | equilibrio di ripartizione calcolo del flusso in aria ambiente | miscelazione in aria ambiente |
| misure in aria | concentrazione in aria ambiente | equilibrio di ripartizione calcolo del flusso in aria ambiente miscelazione in aria ambiente | nessuno |

Ognuna delle tipologie di monitoraggio presenta punti di forza e punti di debolezza.

Il monitoraggio dei gas interstiziali consente di determinare la concentrazione reale di sostanze volatili nei gas del suolo, permettendo di by-passare il primo passaggio dell'approccio modellistico ovvero la simulazione degli equilibri di fase. Tuttavia la necessità di un campionamento attivo dei gas determina di fatto l'alterazione dell'equilibrio reale all'interno dell'orizzonte di suolo indagato.

In Tabella 3 sono indicati i punti di forza e i punti di debolezza del monitoraggio dei gas interstiziali.

Tabella 3 – Vantaggi e svantaggi del monitoraggio di gas interstiziali

| Monitoraggio dei gas interstiziali | |
|--|--|
| <i>Punti di forza</i> | <i>Punti di debolezza</i> |
| E' una tecnica consolidata da anni in ambito bonifiche | Può dare problemi nel caso di necessità di campionamenti superficiali (< 1 m da p.c.) come nel caso di falda contaminata affiorante |
| Consente di individuare la presenza e le concentrazioni delle frazioni volatili all'interno della sorgente di contaminazione | Non consente direttamente la quantificazione dell'emissione di vapori contaminati verso gli ambienti outdoor/indoor, ma necessita dell'implementazione di modelli di trasporto |
| Consente di effettuare una mappatura dei profili di concentrazione di volatili all'interno dell'insaturo in suolo profondo (da 1 m da p.c.) per la valutazione dei gradienti di concentrazione, lungo la verticale, e di eventuali fenomeni di biodegradazione | Non consente la valutazione dell'entità dei fenomeni di avvezione (con i modelli analitici previsti dai Criteri metodologici, 2008) |
| Consente di quantificare l'eventuale accumulo di vapori contaminati in corrispondenza di orizzonti impermeabili, al di sotto di pavimentazioni, di impermeabilizzazioni e di edifici | Non consente di quantificare direttamente le concentrazioni attese in aria indoor/outdoor al fine di valutare l'esposizione dei recettori |
| | Sono misure localizzate e pertanto richiedono l'ubicazione di più sonde in funzione delle indicazioni sulle vie preferenziali di migrazione e sulla variabilità spaziale del fenomeno emissivo |

L'utilizzo delle camere di flusso o flux chamber (CF) permette di quantificare direttamente il flusso emissivo di vapori verso p.c., lasciando alla parte modellistica solo la dispersione in atmosfera o eventualmente, seppur applicate raramente per casi indoor, miscelazione in ambienti confinati. In Tabella 4 sono indicati i punti di forza e i punti di debolezza del monitoraggio con camere di flusso.

Tabella 4 – Vantaggi e svantaggi del monitoraggio con camera di flusso

| Monitoraggio con camera di flusso (flux chambers) | |
|---|---|
| <i>Punti di forza</i> | <i>Punti di debolezza</i> |
| Consente di valutare la migrazione di vapori contaminati dal suolo (incluso tutte le componenti di trasporto) | E' una tecnica poco consolidata in ambito di bonifiche ed esistono diverse tipologie di camere, alcune delle quali ancora non sufficientemente testate |
| Può essere utilizzata nel caso di sorgenti di contaminazione superficiali (< 1 m da p.c.) | Sono misure estremamente localizzate (puntuali) e pertanto in assenza di valutazioni sulle vie preferenziali di migrazione e sulla variabilità spaziale del fenomeno emissivo potrebbero dare risultati non sufficientemente rappresentativi |
| Può confermare o escludere la migrazione delle sostanze volatili verso gli ambienti indoor/outdoor | Nel caso di presenza di più matrici contaminate (suolo e/o falda) non consente di distinguere il contributo delle diverse fonti |
| L'uso di camere di accumulo consente di effettuare una mappatura del sito e di individuare i punti a flusso significativo | Può essere poco rappresentativo nel caso di monitoraggio indoor e più in generale nel caso di superfici pavimentate per la difficoltà in questi casi di determinare le zone con reale presenza di flusso emissivo (fessurazioni, vie preferenziali di migrazione) |
| | Non consente di quantificare direttamente le concentrazioni attese in aria indoor/outdoor al fine di valutare l'esposizione dei recettori in quanto necessita dell'utilizzo di modelli di miscelazione in aria ambiente. |

Infine è possibile effettuare delle misure dirette di concentrazione in aria ambiente, che eliminano l'incertezza modellistica.

Le misure in aria ambiente possono avere due principali finalità che condizionano in maniera importante la progettazione delle stesse:

- valutazione della presenza e dell'entità del trasporto di vapori verso gli ambienti indoor/outdoor (valutazione ambientale);
- valutazione dell'esposizione dei recettori alle sostanze inquinanti provenienti dal suolo (valutazione esclusivamente sanitaria).

E' pertanto necessario che la progettazione delle indagini tenga conto della finalità della valutazione per poter utilizzare i risultati ai fini della definizione di eventuali necessità di intervento.

Tuttavia anche le misure in aria presentano punti di forza e di debolezza che sono sintetizzati in Tabella 5.

Tabella 5 – Vantaggi e svantaggi del monitoraggio di aria ambiente

| Monitoraggio aria ambiente | |
|---|---|
| <i>Punti di forza</i> | <i>Punti di debolezza</i> |
| Presenta minori difficoltà operative rispetto ai monitoraggi di gas dal suolo e alle misure di flusso | Nel caso di presenza di fonti di emissione di vapori diverse da suolo o falda contaminati, è fortemente influenzato dalla presenza di background (es. aree industriali attive) |
| I risultati dei monitoraggi possono essere utilizzati direttamente per la valutazione dell'esposizione e del rischio senza l'ausilio di modelli | Nel caso di presenza di più matrici contaminate (suolo e/o falda) non consente di distinguere il contributo delle diverse fonti |
| Il campionamento può essere di lunga durata (giorni, settimane) | Rispetto alle altre tecniche di monitoraggio, i monitoraggi in aria outdoor, in particolare, risentono molto della variabilità atmosferica e dalle condizioni meteorologiche al contorno, risultando talvolta poco significativi |
| In ambienti indoor risente meno delle variazioni giornaliere/stagionali | Rispetto alle altre tecniche di monitoraggio, è più difficile stabilire correlazioni tra i risultati ottenuti in aria e le contaminazioni registrate nei terreni pertanto non consentono di definire/valutare strategie di intervento sulle fonti di contaminazione (MISO e/o bonifica) |

Alla luce delle criticità legate a ciascuna delle tipologie di monitoraggio e sulla base delle esperienze maturate all'interno del SNPA, per ora più mature e consolidate sul monitoraggio dei gas interstiziali nell'ambito della gestione dei siti contaminati, anche alla luce della strumentazione ad oggi più facilmente reperibile, il GdL ha focalizzato principalmente le linee guida sul *soil gas survey* in modalità attiva che viene quindi proposta come scelta prioritaria di tipologia di monitoraggio.

L'utilizzo di altre tipologie di monitoraggio (misure di flusso, misure in aria) è previsto nei seguenti casi:

- non sia possibile o significativo effettuare misure di gas interstiziali sulla base delle indicazioni riportate nel seguente documento (e relative appendici);
- il sito presenti problematiche di contaminazione estremamente complesse tali da necessitare di un monitoraggio integrato con più tecniche in parallelo (approccio per linee di evidenza) secondo quanto indicato nel Documento MATTM "Linee Guida per l'applicazione dell'Analisi di Rischio sito-specifica" del 2014 con integrazione del gennaio 2015 (MATTM 2014-2015).

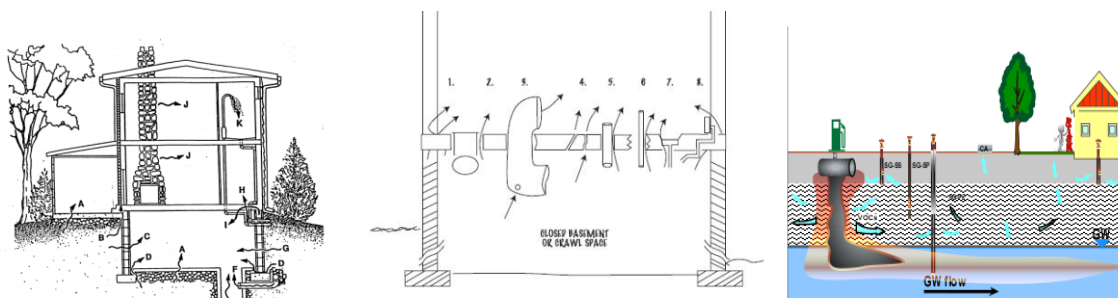
In ogni caso la possibilità di utilizzare altre tipologie di monitoraggio rispetto al soil gas survey deve essere preventivamente concordata con gli Enti di Controllo.

4 CRITERI DI UBICAZIONE DEI PUNTI DI CAMPIONAMENTO

Il numero e l'ubicazione dei punti di monitoraggio deve essere deciso sulla base del modello concettuale ed in funzione dell'obiettivo dell'indagine. È quindi importante effettuare, in fase di progettazione della campagne di monitoraggio, una ricostruzione storica del sito, esaminando l'eventuale documentazione disponibile relativa alle attività lavorative impattanti svolte in passato o ancora in essere, ed una valutazione sia degli elementi antropici presenti sull'area (quali sottoservizi, serbatoi d'accumulo...) sia degli aspetti naturali (ad esempio variazioni litostratigrafiche) che possono costituire delle vie preferenziali di migrazione dei gas interstiziali.

In particolare, per ambienti antropizzati, la collocazione dei punti di monitoraggio deve tenere in considerazione la presenza di percorsi preferenziali di trasporto nel sottosuolo per la presenza di falle in sottoservizi, pozzetti interrati, fondazioni e pavimentazioni; in casi estremi, i vapori possono accumularsi in ambienti confinati raggiungendo livelli di concentrazione tali da comportare rischi immediati per la sicurezza (es. esplosioni per metano o altre miscele esplosive e anossia per anidride carbonica), rischi acuti per la salute umana (es. intossicazioni) o problemi organolettici (es. cattivi odori) (cfr Fig. 4, tratta da USEPA 1993 e 2008, ARTA Abruzzo, 2014).

Figura 4 – Principali vie d'intrusione dei gas dal suolo



Qualora l'indagine sui vapori intervenga dopo la caratterizzazione, nella proposta di indagine potrà essere prevista un'ubicazione ragionata dei punti di campionamento che tenga conto delle sorgenti di contaminazione nelle matrici suolo, sottosuolo e acque sotterranee, dei bersagli individuati nonché della presenza di aree che possano presentare una significatività particolare dal punto di vista ambientale.

L'uso di una griglia di campionamento può invece essere la strategia più idonea a valutazioni effettuate in fase di caratterizzazione oppure a integrazione della stessa.

Si ritiene auspicabile suddividere la superficie del sito su idonea base cartografica per aree omogenee in funzione di: granulometria, porosità e permeabilità del terreno; tipologia di pavimentazione; soggiacenza della falda (per aree estese o con falde locali sospese presenti solo in alcune parti del sito); spessore della frangia capillare e tipologia del contaminante. La distribuzione dei punti di controllo deve essere proporzionale alla estensione di ogni singola area.

Il numero di punti deve essere deciso caso per caso sulla base delle caratteristiche del sito e, per l'esposizione indoor, in funzione dello stato degli edifici oggetto di indagine (caratteristiche costruttive, presenza di piani interrati o pavimentazioni danneggiate, presenza di pozzetti di raccolta o fosse di ascensori, ecc...). I punti di campionamento devono essere in numero minimo di 3 e, per aree outdoor di grandi dimensioni, si suggerisce di prevedere almeno 1 punto di campionamento ogni 2500 m² (50 m x 50 m).

L'ubicazione deve tenere in considerazione anche la posizione di possibili recettori sensibili (si ricorda che il percorso di inalazione indoor viene influenzato anche dalle sorgenti collocate

entro 30 m dal perimetro dall'edificio, per convenzione ridotto a 10 m nel caso di siti con Punti Vendita Carburanti).

In merito alla valutazione del rischio da inalazione indoor tramite sonde di soil gas, il numero di punti di controllo può essere definito anche in base alle dimensioni dell'edificio, come suggerito nella in Tabella 6 (NJDEP, 2018).

Tabella 6 – Indicazioni sulla definizione del numero di indagini di soil gas survey in ambienti indoor

| Dimensione dell'edificio (m ²) | Numero di punti di monitoraggio (sonde outdoor o sotto soletta) |
|--|---|
| fino a 140 | 2 |
| da 140 a 450 | 3 |
| da 450 a 900 | 4 |
| da 900 a 1.800 | 5 |
| da 1.800 a 4.500 | 6 |
| da 4.500 a 23.000 | 8 |
| da 23.000 a 90.000 | 10 |
| > 90.000 | > 12 |

Solo per i siti più complessi, in cui si hanno insufficienti informazioni sulle caratteristiche della distribuzione della contaminazione e della geologia del sito, è possibile procedere ad una definizione dei punti supportata da misure con camera di flusso non stazionaria “di accumulo” (cfr. Appendice B). La scelta dei punti di campionamento deve avvenire procedendo per progressive fasi di approfondimento prevedendo:

- individuazione preliminare dei punti di controllo, applicando il principio di prossimità geometrica ai sondaggi/piezometri con contaminazione più significativa ed ai bersagli (richiamati entrambi in seguito come punti di attenzione);
- eventuale screening di concentrazione e flusso di COV e CO₂ con camera di flusso non stazionaria “di accumulo”, nell’intorno di 2,5/5 m da tali punti di attenzione;
- qualora non si rilevino valori significativi del flusso nei punti definiti in precedenza, procedere alle verifiche con camere di flusso non stazionarie “di accumulo” ampliando progressivamente il lato della maglia fino a 50 m, al fine di verificare la presenza/assenza di flussi significativi (cfr Fig. 5);
- nei siti con presenza di scenari di esposizione e contaminazioni molto rilevanti, in cui si abbiano dubbi sul modello concettuale del sito, si suggerisce di procedere alla estensione delle misure di flusso ad almeno 50 punti nell’intera area del sito, ed alla elaborazione di mappe di isoflusso (cfr Fig. 6).

Figura 5 – Schema di individuazione dei punti di monitoraggio per casi complessi

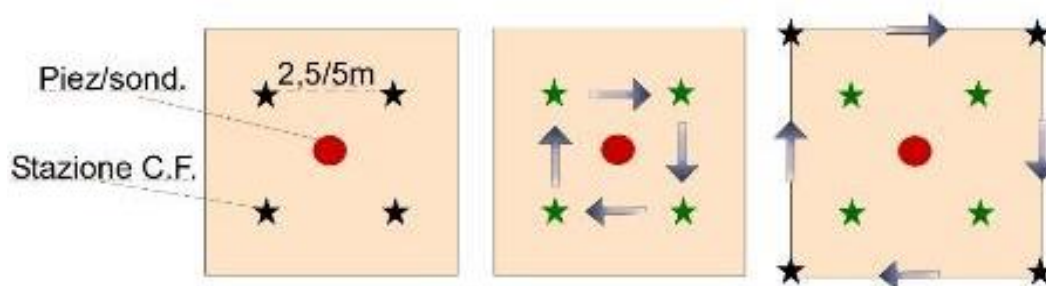
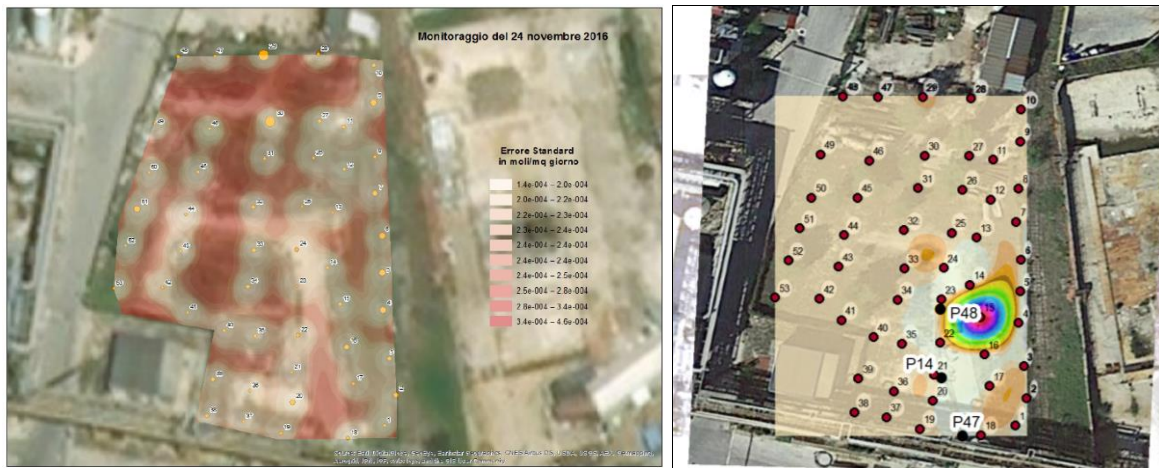


Figura 6 – Esempio di mappa di isoflussi di CO₂ e COV determinati con camera di accumulo



Tra tutti i punti di controllo risultati significativi per flusso ed in cui effettuare i campionamenti ne saranno selezionati, in base alle dimensioni del sito, un numero non inferiore a tre da aumentare in funzione dell'estensione dell'area, indicativamente di 1 punto ogni 2500 m² (50 m x 50 m).

In ogni caso, il documento di progettazione del monitoraggio degli aeriformi redatto da parte del proponente deve sempre essere adeguatamente supportato da argomentazioni e documentazione tecnica che contenga le motivazioni che hanno portato alla proposta, indicando vantaggi e svantaggi delle tecniche di monitoraggio indicate per il sito in studio.

5 INFLUENZA DEI PARAMETRI METEOCLIMATICI E AMBIENTALI

Alcuni fattori atmosferici e stagionali possono condizionare i valori di concentrazione dei vapori nei gas interstiziali e quindi gli esiti dei monitoraggi. Si fa riferimento a fattori meteoroclimatici quali temperatura, pressione atmosferica, contenuto di frazione organica nel terreno, livello di falda e più in generale umidità, irrigazione e precipitazioni, intensità e direzione del vento ed irraggiamento solare.

5.1 Temperatura

Per quanto riguarda la temperatura, in generale l'aria atmosferica più calda accumula più umidità dal suolo ed aumenta quindi gli spazi destinati ai gas nelle porosità del suolo, favorendo così l'emissione di soil gas. Non sono comunque ad oggi state individuate delle condizioni critiche, ovvero quelle condizioni nelle quali il flusso emissivo di vapori è maggiore. Le condizioni meteoroclimatiche idonee per la misura degli aeriformi devono presentare temperature non inferiori a 0°C e non superiori a 50°C. Le basse temperature possono produrre congelamento/condensazione del vapore acqueo, limitando la migrazione del soil gas e causando la diluizione del contaminante; temperature inferiori a 0°C possono causare l'interruzione del percorso dei gas a causa della formazione di ghiaccio soprattutto nel top soil (ISO 18400-204, 2017). Già a temperature sopra i 30°C si possono rilevare funzionamenti non corretti della strumentazione portatile che sarà necessario proteggere dagli agenti atmosferici.

Questo parametro è particolarmente significativo nel caso di monitoraggio con camere di flusso, in cui l'innalzamento di temperatura nella camera, in giorni caldi e soleggiati, può essere anche generato dal riscaldamento della superficie prima del posizionamento della camera che comporta un aumento della temperatura interna dovuto alla convezione del calore. Inoltre nel caso di suolo particolarmente umido un incremento di temperatura può generare condensa all'interno della camera rischiando di portare in solubilizzazione, sulle sue pareti, i composti di interesse, causando delle sottostime di flussi campionati.

5.2 Pressione

La pressione atmosferica è definita come il peso della massa atmosferica per unità di superficie e viene misurata con barometri collocati in prossimità del suolo; l'unità di misura del sistema internazionale è il Pascal (Pa) ma in meteorologia si utilizza spesso il millibar, coincidente con 100 Pascal (1 mbar = 1 hPa).

La pressione influenza le condizioni meteorologiche: quella alta favorisce il bel tempo ed è caratterizzata da aria caldo-umida, meno densa, quella bassa invece comporta l'arrivo e la permanenza del cattivo tempo, ed è costituita da aria fredda e asciutta, più densa.

Nello specifico l'alta pressione, con valori indicativamente superiori a 1013 mbar, favorisce il bel tempo (ISO 18400-204, 2017), mentre la bassa pressione, con valori inferiori a 1013 mbar, favorisce l'arrivo e la permanenza di cattivo tempo (perturbazioni).

Il peso dell'aria (intesa come atmosfera sovrastante un sito) varia in base a diversi fattori tra i quali l'altitudine, la temperatura ed il grado di umidità.

La densità dell'aria in particolare diminuisce con l'aumentare della temperatura e dell'umidità: l'aria più fredda e asciutta risulta dunque più "pesante" di quella calda e umida. Questa differenza di densità genera la comparsa di "fronti", quando masse d'aria di origine diversa, e quindi di diversa temperatura e umidità, si incontrano in atmosfera. Essi tendono a non mescolarsi ma a salire uno sull'altro (fronte caldo, in cui l'aria caldo umida sale su quella

fredda e asciutta) dando origine a piogge diffuse oppure a insinuarsi una sotto l'altra (fronte freddo, in cui l'aria fredda e asciutta solleva quella caldo umida) dando origine a temporali.

La presenza di condizioni di alta pressione produce una minor emissione dei gas dal suolo e si consiglia pertanto di effettuare i monitoraggi all'interfaccia suolo/aria in giornate in cui si registrano condizioni di pressione atmosferica con una tendenza stazionaria o in diminuzione. In situazioni di rapida variazione della pressione è opportuno acquisirne l'andamento nel corso dei campionamenti/misure per valutarne l'influenza sulle misure.

5.3 Umidità

Un tenore di umidità elevata riduce il numero dei pori a disposizione per il passaggio dei vapori ed influenza significativamente il campionamento del soil gas (nel suolo umido si riscontra una bassa permeabilità del soil gas, mentre nel suolo secco un'alta permeabilità del soil gas), ed inoltre altera la solubilità dei gas e l'attività biologica.

Il suolo secco favorisce il movimento verticale dei gas, non solo perché ne aumenta la permeabilità, ma anche perché generalmente si creano crepe nel terreno che costituiscono vie preferenziali. L'umidità del suolo è legata anche alla presenza della frangia capillare, che è la zona posta al di sopra della falda e ad essa legata idraulicamente, nella quale i pori sono quasi interamente occupati da acqua capillare, con coefficienti di saturazione anche superiori il 75%. Lo spessore della frangia capillare è riportato in Tabella 7 (ISPRA, ex-APAT, 2008) e varia in funzione della litologia, aumentando dai terreni più grossolani a quelli più fini.

Tabella 7 – Spessore della frangia capillare in funzione della tessitura del suolo

| Tessitura | Spessore della frangia capillare [m] |
|------------------|---|
| sand | 0,1 |
| loamy sand | 0,188 |
| sandy loam | 0,25 |
| sandy clay loam | 0,29 |
| loam | 0,375 |
| silt loam | 0,682 |
| clay loam | 0,469 |
| silty clay loam | 1,339 |
| silty clay | 1,92 |
| silt | 1,63 |
| sandy clay | 0,3 |
| clay | 0,815 |

Si segnala che la strumentazione portatile utilizzata per effettuare le misure di campo degli aeriformi deve essere dotata di adeguati dispositivi di protezione. Nei contraddittori si suggerisce di effettuare tra le parti una verifica preliminare dell'allineamento delle misure rilevate con strumentazione portatile.

In generale si segnala che la presenza di terreni umidi può causare condizioni di assenza di flusso o flusso basso: in tali condizioni deve essere interrotto il campionamento. Per ridurre gli effetti dell'umidità, in particolare per le camere di flusso, è utile ridurre i tempi di campionamento e per valutare gli effetti di diluizione generati dal vapore acqueo si suggerisce di misurare sempre le variazioni di umidità all'interno della camera.

5.4 Precipitazioni ed irrigazione

L'infiltrazione nel suolo delle acque di pioggia occlude i pori del terreno ed impedisce il passaggio dei vapori. Pertanto, a seguito di eventi meteorici significativi, indicativamente di intensità superiore ai 13 mm/d (CalEPA, 2015) a causa del riempimento dei pori del terreno con l'acqua meteorica, si verifica una riduzione della presenza di soil gas con conseguente spostamento dello stesso a maggiori profondità.

In generale si raccomanda inoltre di effettuare il campionamento dei gas interstiziali dopo almeno 36 ore di tempo secco; si ritiene opportuno svolgere i campionamenti dopo un tempo minimo di almeno 48 ore nel caso di verificarsi di un evento meteorico significativo, anche attendendo 4-5 giorni dopo il verificarsi di piogge molto intense.

Là dove le condizioni lo consentono, sarebbe comunque preferibile attendere, prima del campionamento, un tempo pari a quello riportato in Tabella 8 che, in relazione alle tipologie di terreno ed alla stagione, riporta, i tempi di svuotamento di una colonna di suolo di 1,5 m, calcolati con l'ausilio del software gratuito CRITERIA (http://www.arpa.emr.it/dettaglio_documento.asp?id=708&idlivello=64).

Tabella 8 – Calcolo dei tempi di attesa per il monitoraggio degli aeriformi a seguito di un evento meteorico di intensità $i=13$ mm/giorno, svolto col software CRITERIA

$i = 13$ mm/giorno

| Stagione Terreno | Giorni di attesa prima del campionamento del soil gas | | | |
|---------------------|---|-----------|----------|---------|
| | Inverno | Primavera | Estate | Autunno |
| Sabbioso | 2 | 2 | 2 6** | 3 |
| Limoso | 3 | 3 | 3 6** | 6 |
| Argilloso | NA | NA | NA | NA |

** : tempo di attesa dopo acquazzone estivo $i > 100$ mm/giorno;
NA: modellizzazione non applicabile a tale tipologia di suolo.

Nel caso di aree verdi irrigate, è necessario interrompere l'uso di acqua almeno 5 giorni prima del campionamento (CalEPA, 2015).

Nel caso di punti di monitoraggio ubicati all'interno di aree coperte, come edifici o tettoie (non in prossimità del perimetro delle stesse), è possibile campionare anche dopo eventi piovosi (CalEPA, 2015); in presenza di soil gas in aree outdoor ben pavimentate (in assenza di evidenze di fessurazioni/discontinuità) è ammissibile ridurre i tempi di attesa dopo eventi piovosi.

5.5 Vento

Il vento è un fattore ambientale che influenza l'emissione di inquinanti a p.c.; in giorni ventosi all'esterno della porzione di suolo isolata dalla camera l'emissione aumenta poiché il vento riduce la resistenza diffusionale. Si sconsiglia di svolgere il monitoraggio con presenza di vento forte (indicativamente superiore a 3 m/sec), se non rappresentativo delle condizioni generali del sito, in quanto esso inibisce il flusso emissivo di vapori. Questo elemento insieme alla radiazione solare determina la turbolenza atmosferica che agisce sul rimescolamento nello strato limite planetario ed anche nello strato laminare dell'atmosfera a contatto col suolo, condizionando il flusso emissivo di vapori.

5.6 Indicazioni operative

Il flusso di vapori alla superficie del suolo varia con ciclo giornaliero, massimo diurno e minimo o addirittura nullo di notte, con un fattore di circa 3-4 volte di variazione tra giorno e notte, indotto dalla radiazione solare, dalla velocità del vento e dalla temperatura dell'aria.

Alla luce di quanto detto, è necessario progettare il campionamento all'interfaccia suolo /aria in relazione alle condizioni meteorologiche, evitando, preferibilmente, di effettuare campionamenti nelle seguenti condizioni:

- nel corso di eventi meteorici (nel caso di campionamenti outdoor ed in aree non pavimentate);
- 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 e superiori a 50 °C;
- in giornate di vento forte.

Durante le fasi di campionamento devono essere registrati i seguenti parametri meteorologici e idrologici al fine di una successiva valutazione dei risultati analitici, avvalendosi eventualmente anche dei dati acquisiti da centraline meteo, riconosciute ufficialmente, collocate in prossimità del sito in esame:

- data dell'ultimo evento meteorico ed intensità;
- umidità dell'aria ambiente;
- pressione atmosferica;
- temperatura dell'aria ambiente;
- velocità del vento e direzione, specificando la quota di misura delle stesse;
- temperatura dei gas interstiziali/nella camera di flusso;
- se possibile, umidità nei gas interstiziali;
- livello piezometrico nei piezometri significativi;
- se possibile, temperatura del suolo (a profondità di circa 5 cm);
- se possibile, temperatura delle acque sotterranee nei piezometri significativi.

6 PRESENZA DI IMPIANTI ATTIVI

Nel caso di presenza di impianti di MISE/MISO/Bonifica attivi, quali ad esempio aspirazione vapori (SVE) o Pump and Treat, si ritiene che il loro funzionamento possa influenzare il trasporto di gas interstiziali fino ad impedire di ottenere un loro monitoraggio rappresentativo. In tal caso si suggerisce, se questo non determina problemi di ordine sanitario o ambientale, sentita anche l'Autorità Sanitaria competente, di spegnere l'impianto prima di effettuare il monitoraggio, per un tempo significativo, indicativamente diverse settimane, fino ad un mese per suoli sabbiosi e fino ad alcuni mesi per suoli caratterizzati da granulometria più fine (AFC, 2001).

Nel caso in cui non fosse possibile fermare gli impianti di MISE/MISO/Bonifica, si consiglia di effettuare il monitoraggio dei gas interstiziali o con camere di flusso registrando le condizioni operative della falda (livello piezometrico, pH, O₂, CO₂, conducibilità, Temperatura). In questi casi i monitoraggi saranno rispondenti alle condizioni operative registrate al momento dell'esecuzione e dovranno essere pertanto ripetute al termine degli interventi, compiendo lo spegnimento degli impianti con i tempi sopra indicati.

Diverso ovviamente è il caso in cui la misura sia finalizzata ad accertare l'efficacia di un contenimento operato dallo stesso impianto di MISE/MISO/Bonifica.

7 PIANO DI CAMPIONAMENTO

Preventivamente all'avvio del monitoraggio deve essere predisposto a cura della Parte e presentato agli Enti il Piano di Campionamento, con l'indicazione delle attività che la Parte intende effettuare, dettagliando l'ubicazione dei punti di misura, la strumentazione che intende utilizzare ed evidenziando in particolare l'idoneità del metodo per quantificare la concentrazione del/degli analita/i di interesse.

La documentazione deve essere presentata con un congruo anticipo rispetto all'inizio dei lavori, indicativamente 30 giorni prima del loro avvio, in modo tale da consentire agli Enti competenti di effettuare le opportune valutazioni ed esprimere un parere.

I contenuti minimali del Piano sono indicati di seguito, fermo restando che dovranno comunque essere riportate tutte le indicazioni utili per valutare quanto proposto:

- le informazioni litostratigrafiche dell'area;
- il protocollo di installazione delle sonde di soil gas o dei punti di monitoraggio con CF;
- i criteri di ubicazione dei punti (riportando in cartografia la posizione degli eventuali bersagli, delle possibili vie preferenziali di migrazione dei gas note, dei potenziali centri di pericolo/anomalie, etc...);
- le profondità di campionamento per i *soil gas survey*;
- la frequenza di campionamento;
- le sostanze da ricercare e le relative caratteristiche chimico-fisiche;
- la strumentazione che si intende utilizzare (specifiche sulla CF eventualmente impiegata, tipologia e numero delle pompe disponibili in campo e relative schede tecniche, fiale e relative specifiche tecniche, canister, flussimetri e relative schede di taratura e specifiche tecniche, sonda biogas, termometro, igrometro, PID e relativa scheda tecnica) ed informazioni circa la manutenzione e la taratura degli strumenti utilizzati;
- i metodi di campionamento;
- la tecnica di analisi;
- Limiti di Quantificazione analitici (LOQ);
- i Limiti di Rilevabilità da garantire per acquisire indicazioni sufficientemente significative ai fini della stima del rischio, necessari per definire i tempi di monitoraggio, allegando i file delle simulazioni realizzate per calcolarli;
- le condizioni di prelievo previste (portata, durata di campionamento...);
- il calcolo dei tempi di spurgo;
- i criteri di conservazione dei campioni;
- cronoprogramma dei lavori.

8 VALUTAZIONE DEI RISULTATI DELLE INDAGINI

A differenza del suolo e delle acque sotterranee per i quali la singola campagna di campionamento è considerata sufficientemente rappresentativa di una condizione stazionaria per un intervallo di tempo significativamente lungo (anni per quel che concerne il suolo, una stagione per quel che concerne le acque di falda), gli aeriformi in generale non sono una matrice stazionaria ma possono subire variazioni repentine in tempi relativamente brevi (anche nell'arco della stessa giornata).

D'altra parte, a differenza della matrice aria ambiente (indoor o outdoor) che può essere campionata per periodi lunghi o monitorata in continuo, le altre tipologie di monitoraggio non si prestano a campionamenti eccessivamente lunghi che possono alterare le condizioni di equilibrio o di migrazione dei gas nel suolo e risultare di conseguenza poco rappresentativi.

Infine occorre sottolineare che l'utilizzo delle misure di aeriformi all'interno dell'AdR presuppone che esse siano idonee a consentire valutazioni di esposizione a "lungo termine", non occasionale, ovvero 30 anni nel caso dello scenario residenziale e 25 anni nel caso dello scenario commerciale/industriale.

Nel presente paragrafo vengono indicati alcuni criteri di massima per individuare il numero di campagne di misura e per valutare i risultati ottenuti.

8.1 Indicazioni sul numero di campagne di monitoraggio

Complessivamente, poiché i risultati dei monitoraggi degli aeriformi variano periodicamente, si deve assicurare che i dati raccolti siano rappresentativi delle differenti condizioni atmosferiche e stagionali, effettuando più campagne di monitoraggio nell'arco dell'anno.

Nel caso di sorgente secondaria ubicata nel saturo, è opportuno definire i periodi di campionamento sulla base dell'andamento delle oscillazioni della falda acquifera e del suo stato di qualità, considerando i dati relativi ad almeno gli ultimi due anni di monitoraggio (in analogia alle indicazioni del D.M. 31/2015).

Le campagne di misura devono in generale garantire la rappresentatività in termini di:

- variabilità giornaliera del dato: è possibile che misure effettuate in giorni diversi possano dare risultati diversi tra loro; tuttavia la variabilità giornaliera in molti casi potrebbe rientrare anche nel range di incertezza legata alla intera procedura di campionamento ed analisi;
- variabilità stagionale del dato: le variazioni stagionali dei parametri meteorologici possono influenzare i risultati della misura;
- valutazione a lungo termine dell'esposizione dei recettori: il numero di campagne deve essere sufficiente a rendere il dato significativo per una valutazione a lungo termine del rischio associato all'esposizione dei recettori.

A giudizio degli Enti di Controllo, sulla base delle condizioni specifiche del sito, potrà essere richiesta la valutazione degli effetti della variabilità giornaliera dei dati. Tale valutazione potrà riguardare in particolare i siti di grandi dimensioni con un numero significativo di punti di campionamento. In tal caso si suggerisce di effettuare, anche in un numero limitato di punti di campionamento e possibilmente in corrispondenza delle zone in cui si registrano picchi di concentrazione dei gas interstiziali e/o sono stati misurati flussi significativi all'interfaccia, la ripetizione delle misure in più giorni anche non consecutivi. Al fine di poter effettuare valutazioni statistiche sull'entità della variabilità giornaliera si richiede una durata minima di 3 giorni. In particolare la ripetizione su più giorni dovrà essere valutata, in accordo con gli Enti di Controllo, qualora sia previsto l'abbinamento delle misure di soil gas o delle misure di flusso con altre tipologie di monitoraggio (misure in aria) per le quali sia prevista una durata di più giorni.

Nel caso di un monitoraggio di screening in fase di investigazione iniziale può ritenersi invece sufficiente un solo rilievo.

Di seguito sono indicati i criteri di massima, per il numero minimo di campagne richieste al fine di garantire la rappresentatività del dato per la valutazione a lungo termine dell'esposizione dei recettori.

In particolare dovranno essere previste:

- almeno 4 campagne (rappresentative delle stagionalità di un anno) per l'esclusione del percorso di volatilizzazione;
- da 4 a 6 campagne (rappresentative delle stagionalità di uno o due anni) per la verifica di accettabilità del rischio associato ai risultati dei monitoraggi;

In generale il numero di campagne dipende da:

- grado di cautela della valutazione;
- incertezza della valutazione legata alla rappresentatività del dato: ai fini della valutazione del rischio si è fissato per il primo anno di monitoraggio (4 campagne) una incertezza legata alla rappresentatività del dato del 10%⁵; per le campagne successive al primo anno, tenendo conto degli esiti dei monitoraggi già eseguiti, si ritiene che il dataset sia sufficientemente robusto e rappresentativo da non necessitare più della valutazione di incertezza;
- risultati ottenuti nel primo anno di monitoraggio: la definizione della necessità di ulteriori monitoraggi dipende dai risultati, in termini di rischio, ottenuti nelle prime 4 campagne eseguite tenendo conto del range di incertezza.

Ai fini della validazione dei dati di monitoraggio in una o più campagne di monitoraggio potranno essere effettuati campionamenti in contraddittorio con l'Ente di controllo su un numero minimo di punti (10-20%) tale da rappresentare comunque un campione statisticamente significativo.

Può essere eventualmente consentito, a discrezione dell'Ente procedente, l'avvio delle attività di ripristino edilizio e/o riconversione territoriale del sito in caso di esclusione del percorso o assenza di rischio in base agli esiti della prima campagna di misure, se tale campagna risulta effettuata nel periodo maggiormente critico in base al modello concettuale e se tali attività non pregiudicano la realizzazione dell'eventuale bonifica. Ovviamente dovranno essere comunque eseguite tutte le successive le campagne di monitoraggio previste e, qualora queste ultime evidenzino una situazione ambientale diversa da quella descritta dalla prima campagna (percorso di volatilizzazione attivo o presenza di valori di rischio non accettabili), dovranno essere adottate le opportune azioni.

8.2 Valutazione dei risultati dei monitoraggi del soil gas

Per gli aspetti relativi alla gestione dei dati acquisiti con sonde di soil gas si faccia riferimento al documento "Procedura operativa per la valutazione e l'utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell'Analisi di Rischio dei siti contaminati".

⁵ L'incertezza relativa al primo anno di monitoraggio tiene conto della rappresentatività della singola campagna rispetto alla stagione a cui si riferisce. Qualora nel primo anno di monitoraggio si registrino situazioni anomale (es. rischio da non accettabile) esse andranno rivalutate al fine di verificare se tali anomalie siano dovute ad una reale situazione di criticità ambientale, oppure possano essere gestite nell'ambito della variabilità del dato. Nel secondo anno di monitoraggio si ritiene che due campagne effettuate nella stessa stagione siano sufficientemente rappresentative da non richiedere più l'adozione di range di incertezza.

8.3 Valutazione dei risultati dei monitoraggi con camere di flusso

Per quanto riguarda la determinazione dei flussi di massa dal suolo mediante monitoraggi con camere di flusso ed il calcolo della relativa concentrazione attesa in aria si rimanda all'Appendice B, §§ B4.5 e B6.8.

In analogia con quanto riportato nel documento "Procedura operativa per la valutazione e l'utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell'Analisi di Rischio dei siti contaminati" dovrà essere calcolato in modalità diretta il rischio associato alle misure di flusso. Tale calcolo sarà effettuato per singola campagna di monitoraggio valutando in primo luogo la concentrazione attesa in aria $C_{\text{aria ambiente}}$ a partire dalle misure di flusso, secondo quanto indicato al § B7.2 dell'Appendice B.

Per coerenza con la procedura indicata per i gas interstiziali, il calcolo del rischio associato alle concentrazioni in aria ($C_{\text{aria ambiente}}$), stimate sulla base delle misure di flusso, dovrà essere effettuato secondo le pertinenti formule di cui al § 3 del documento "Procedura operativa per la valutazione e l'utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell'Analisi di Rischio dei siti contaminati" utilizzando i parametri di esposizione riportati sempre nello stesso documento (§ 2.2).

Per la gestione dei risultati relativi alle diverse campagne effettuate sul sito, non essendo ancora consolidata una metodologia condivisa a livello nazionale, si ritiene sostenibile l'utilizzo del medesimo criterio di confronto con il Rischio accettabile descritto nella "Procedura operativa per la valutazione e l'utilizzo dei dati derivanti da misure di gas interstiziali nell'Analisi di Rischio dei siti contaminati" (§ 4.2). Analoga considerazione vale anche per la definizione delle CSR nel suolo e nelle acque (§ 1.4).

BIBLIOGRAFIA

Air Force Center for Environmental Excellence AFC, 2001 – Final Guidance on Soil Vapor Extraction Optimization

APAT, 2008 – ‘Criteri metodologici per l’applicazione dell’analisi assoluta di rischio ai siti contaminati – <http://www.isprambiente.gov.it/files/temi/siti-contaminati-02marzo08.pdf>

ARPA Emilia Romagna, 2015 – Linea guida operativa per il campionamento, il trasporto e l’analisi dei gas interstiziali nei siti contaminati – Allegato a D.G.R. 4/5/15 n. 484 – http://bur.regione.emilia-romagna.it/bur/area-bollettini/bollettini-in-lavorazione/n-111-del-14-05-2015-parte-seconda.2015-05-13.0568787941/approvazione-della-linea-guida-operativa-per-il-campionamento-il-trasporto-e-lanalisi-dei-gas-interstiziali-nei-siti-contaminati-per-il-loro-utilizzo-a-supperto-dellanalisi-di-rischio/allegato-a-dgr-4842015_parte-i.2015-05-13.1431521064

ARPA Liguria, 2010 – Istruzione Operativa – Esecuzione di indagini geognostiche, prove e campionamenti – Criteri per il campionamento e l’analisi dei gas interstiziali

ARPA Lazio, 2016 – Procedura operativa – Il ruolo di Arpa Lazio per l’esecuzione ed il monitoraggio di campagne di misura di soil gas ai fini della valutazione del rischio connesso all’intrusione di vapori in ambiente indoor/outdoor in aree interessate da procedimento di bonifica, rev. 0

ARPA Lombardia, 2018 – Linee Guida su camere di flusso – <http://www.arpalombardia.it/Pages/Arpa-per-le-imprese/Servizi%20e%20procedure/Consulta-procedure-ARPA-Lombardia.aspx>

ARPA Lombardia, 2016 – Modalità di campionamento dei soil gas in ambito di bonifica e relativi controlli – <http://www.arpalombardia.it/Pages/Arpa-per-le-imprese/Servizi%20e%20procedure/Consulta-procedure-ARPA-Lombardia.aspx>

ARPA Piemonte, 2013 – Campionamento dei gas interstiziali e rilievo delle emissioni di vapori dal terreno in corrispondenza dei siti contaminati – http://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/siti-contaminati/approfondimenti-tecnici/linea_guida_gas_interstiziali

ARPA Veneto, 2011 – Linee guida per il monitoraggio attivo dei gas interstiziali del terreno (soil gas) – <http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/siti-contaminati/file-e-allegati/documenti/DOC7%20-%20Linee%20guida%20ARPA%20VENETO%20monitoraggio%20soil%20gas.pdf/view>

ARTA Abruzzo, 2014 – Protocollo tecnico per il campionamento e l’analisi dei soil-gas – https://www.artaabruzzo.it/download/news/433/20150302_approvazione_pdc_bussi_all_02.pdf

California Environmental Protection Agency CalEPA, 2015 – Advisory active soil gas investigations

Chiodini G, Cioni R, Guidi M, Raco B, 1998 – Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas - Applied Geochemistry 1998 13(5)

Choi JW, Tillman FD, Smith JA – Relative Importance of Gas-Phase Diffusive and Advective Trichloroethene (TCE) Fluxes in the Unsaturated Zone under Natural Conditions – Environmental Science and Technology 2002 36 (14)

CRC CARE, 2013 – Cooperative Research Centre for Contamination Assessment and Remediation of the Environment. Technical Report series, n. 23. Petroleum hydrocarbon vapour intrusion assessment: Australian guidance.

CRITERIA – Modello di bilancio idrico predisposto da ARPA Emilia Romagna – https://www.arpae.it/dettaglio_documento.asp?id=708&idlivello=64

De Jong E, 1973 – Evidence for significance of other-than-normal diffusion transport in soil gas exchange – a discussion – Geoderma 1973 10

D.Lgs. n. 152/2006 e s.m.i. – Norme in materia ambientale (Titolo V della Parte IV e Allegati)

D.M. n. 31/2015 – Decreto del Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare contenente 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.

Etiopie G, 1999 – Subsoil CO₂ and CH₄ and their advective transfer from faulted grassland to the atmosphere – Journal of Geophysical Research 1999 104 (14)

Etiopie G, Martinelli G, 2002 – Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview – Physics of the Earth and Planetary Interiors 2002 129

Farmer WJ, Yang MS, Letey J, Spencer WF, 1980 – Hexachlorobenzene: Its Vapor Pressure and Vapor Phase Diffusion in Soil – Soil Science Society of America Journal, 44, 676-680.

ISO 18400-204 (2017). Soil quality – sampling- Part 204: Guidance on sampling gas.

Johnson PC, Ettinger RA, 1991 – Heuristic Model for Predicting the Intrusion Rate of Contaminant Vapors into Buildings – Environmental Science & Technology, 25, 1445-1452.

Jury WA., Russo D, Streile G, El Abd H, 1990 – Evaluation of Volatilization by Organic Chemicals Residing Below the Soil Surface – Water Resources Research, 26, 13-20.

Luo Y, Zhou X, 2006 – Soil Respiration and the Environment – Academic Press/Elsevier 2006.

New Jersey Department of Environmental Protection NJDEP, 2018 – Site Remediation and Waste Management Program. Vapor Intrusion Technical Guidance, Version 4.1.

Rey A, Belelli-Marchesini L, Were A, Serrano-Ortiz P, Etiopie G, Papale D, Domingo F, Pegoraro E, 2012 – Wind as a main driver of the net ecosystem carbon balance of a semiarid Mediterranean steppe in the South East of Spain – Global Change Biology 2012 18

United States Environmental Protection Agency USEPA, 1993 – Options for developing and evaluating mitigation strategies for indoor air impacts at Cercla sites – https://clu-in.org/conf/tio/vapor_021203/pb94110517.pdf

United States Environmental Protection Agency USEPA, 2008 – Indoor Air Vapor Intrusion Mitigation Approaches – https://clu-in.org/conf/tio/vapor_021203/pb94110517.pdf

ALLEGATO 1 – SOSTANZE DI INTERESSE PER L'ATTIVAZIONE DEL PERCORSO DI INALAZIONE DI VAPORI

| Sostanza | Numero CAS |
|--|------------|
| Microinquinanti inorganici | |
| Cianuri | 57-12-5 |
| Mercurio elementare | 7439-97-6 |
| Aromatici | |
| Benzene | 71-43-2 |
| Etilbenzene | 100-41-4 |
| Stirene | 100-42-5 |
| Toluene | 108-88-3 |
| m-Xilene | 108-38-3 |
| o-Xilene | 95-47-6 |
| p-Xilene | 106-42-3 |
| Xileni | 1330-20-7 |
| Aromatici policiclici | |
| Acenaftene | 83-32-9 |
| Acenaftilene | 208-96-8 |
| Antracene | 120-12-7 |
| Fenantrene | 85-01-8 |
| Fluorene | 86-73-7 |
| Naftalene | 91-20-3 |
| Alifatici clorurati | |
| 1,1,2-Tricloroetano | 79-00-5 |
| 1,1-Dicloroetilene | 75-35-4 |
| 1,2,3-Tricloropropano | 96-18-4 |
| 1,2-Dicloroetano | 107-06-2 |
| Clorometano | 74-87-3 |
| Cloruro di vinile | 75-01-4 |
| Diclorometano | 75-09-2 |
| Tetracloroetilene (PCE) | 127-18-4 |
| Tricloroetilene | 79-01-6 |
| Triclorometano | 67-66-3 |
| 1,1,2,2-Tetracloroetano | 79-34-5 |
| 1,1,1-Tricloroetano | 71-55-6 |
| 1,1-Dicloroetano | 75-34-3 |
| 1,2-Dicloropropano | 78-87-5 |
| 1,2-Dicloroetilene | 156-59-2 |
| Esaclorobutadiene | 87-68-3 |
| Alifatici alogenati cancerogeni | |
| 1,2-Dibromoetano | 106-93-4 |
| Bromodiclorometano | 75-27-4 |
| Dibromoclorometano | 124-48-1 |
| Tribromometano (Bromoformio) | 75-25-2 |
| Nitrobenzeni | |
| Nitrobenzene | 98-95-3 |

| Clorobenzeni | |
|---|-----------|
| 1,2,4,5-Tetraclorobenzene | 95-94-3 |
| 1,2,4-Triclorobenzene | 120-82-1 |
| 1,2-Diclorobenzene | 95-50-1 |
| 1,4-Diclorobenzene | 106-46-7 |
| Esaclorobenzene | 118-74-1 |
| Monoclorobenzene | 108-90-7 |
| Pentaclorobenzene | 608-93-5 |
| Fenoli non clorurati | |
| Fenolo | 108-95-2 |
| m-Metilfenolo | 108-39-4 |
| o-Metilfenolo | 95-48-7 |
| p-Metilfenolo | 106-44-5 |
| Metilfenoli | 1319-77-3 |
| Fenoli clorurati | |
| 2,4-Diclorofenolo | 120-83-2 |
| 2-Clorofenolo | 95-57-8 |
| Ammine aromatiche | |
| Anilina | 62-53-3 |
| m,p-Anisidina | 536-90-3 |
| o-Anisidina | 90-04-0 |
| p-Toluidina | 106-49-0 |
| Idrocarburi (Classificazione TPHCWG) | |
| Alifatici C 5-6 | |
| Alifatici C >6-8 | |
| Alifatici C >8-10 | |
| Alifatici C >10-12 | |
| Aromatici C > 7-8 | |
| Aromatici C >8-10 | |
| Aromatici C >10-12 | |
| Idrocarburi (Classificazione MADEP) | |
| Alifatici C5-C8 | |
| Alifatici C9-C12 | |
| Aromatici C9-C10 | |
| Aromatici C11-C12 | |
| Altre sostanze | |
| MTBE | 1634-04-4 |
| ETBE | 637-92-3 |
| Altre sostanze | |
| Piombo Tetraetile | 78-00-2 |
| Composti organostannici (Tributilstagno) | 688-73-3 |



SNPA
15 2018

