

APPENDICE P

PRESENZA DI PRODOTTO LIBERO (NAPL)

P.1 Modello concettuale

La presenza di prodotto libero in falda (NAPL, Non-Aqueous Phase Liquid) è indice di un livello di contaminazione particolarmente severo del sottosuolo o delle acque sotterranee.

E' opportuno osservare in primo luogo che il prodotto libero costituisce una sorgente primaria di contaminazione e pertanto si dovrebbe sempre intervenire immediatamente per una rimozione dello stesso.

In alcuni casi è possibile identificare la presenza di prodotto libero nella fase di investigazione, ma in altri casi si può avere solo una indicazione indiretta, legata a valori di concentrazioni apparente misurati nelle acque che superano i corrispondenti limiti di solubilità. In funzione della entità dello sversamento di inquinanti nel terreno, della natura del contaminante e della natura del sottosuolo, il prodotto libero può essere rilevato nello strato insaturo o nello strato saturo. In particolare, con riferimento allo schema riportato in Figura P.1, si possono avere le seguenti situazioni:

1. il contaminante rimane nella zona insatura di terreno con formazione di una fase costituita da prodotto libero (NAPL residua) nell'insaturo stesso;
2. il contaminante si muove in direzione verticale fino al raggiungimento della tavola d'acqua, dove, essendo caratterizzato da densità inferiore rispetto all'acqua, galleggia sulla tavola formando uno strato di prodotto libero, o "pancake" (LNAPL);
3. il contaminante si muove in direzione verticale attraversando la zona insatura di terreno, raggiunge la tavola d'acqua, e, essendo caratterizzato da densità maggiore rispetto all'acqua, attraversa la zona satura di terreno e infine si deposita sul fondo della falda dove forma una pozza (pool) di prodotto libero (DNAPL).


$$h = \frac{VOL}{\pi \cdot r_0 \cdot \phi_{r0}} \quad (\text{P.1})$$

P.2 Prodotto libero nella zona insatura: NAPL

- Fase aeriforme – il contaminante è presente nella porosità del suolo occupata dall'aria;
- Fase solida – il contaminante è adsorbito o ripartito sul suolo o sul materiale dell'acquifero;
- Fase acquosa– il contaminante è disciolto nell'acqua in accordo con la sua solubilità;

- Prodotto libero – il contaminante è presente come fase liquida non acquosa.

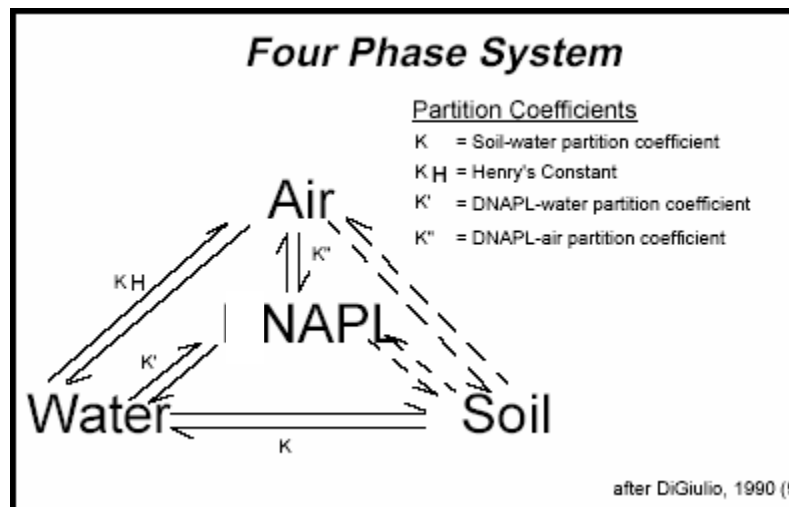


Fig.P.2 - Distribuzione di NAPL nelle quattro fasi nella zona vadosa.

La distribuzione tra le fasi può cambiare con il tempo e/o la locazione nello stesso sito e durante differenti stagioni; la saturazione residua, rappresentata nello schema delle quattro fasi dalla scritta NAPL, è sostanzialmente immobile nelle condizioni ordinarie di pressione del sottosuolo. I contaminanti presenti nella NAPL possono pertanto migrare solamente ripartendosi dalla NAPL nella fase acquosa e/o nella fase aeriforme. Una volta presenti in queste fasi, i contaminanti possono subire processi di lisciviazione e volatilizzazione, come nei casi di contaminanti già presenti in fase disciolta.

P.3 Prodotto libero nella zona satura: LNAPL / DNAPL

La zona satura contenente prodotto libero, leggero o denso, può essere descritta come un sistema a tre fasi, costituito da fase solida, fase acquosa e appunto prodotto libero. Come riportato facendo riferimento al caso di DNAPL in Figura P.3, i contaminanti si ripartiscono tra queste tre fasi. Anche in questo caso, quanto meno in prima approssimazione, si può supporre che il prodotto libero (DNAPL o LNAPL) sia immobile. Nel caso di DNAPL, i contaminanti possono migrare solo a seguito della loro ripartizione in fase liquida, con successiva migrazione in falda o volatilizzazione da falda. Nel caso di LNAPL, i contaminanti possono migrare a seguito della loro ripartizione in fase liquida, con successiva migrazione in falda, o in fase vapore, con successivo trasporto fino al piano campagna.

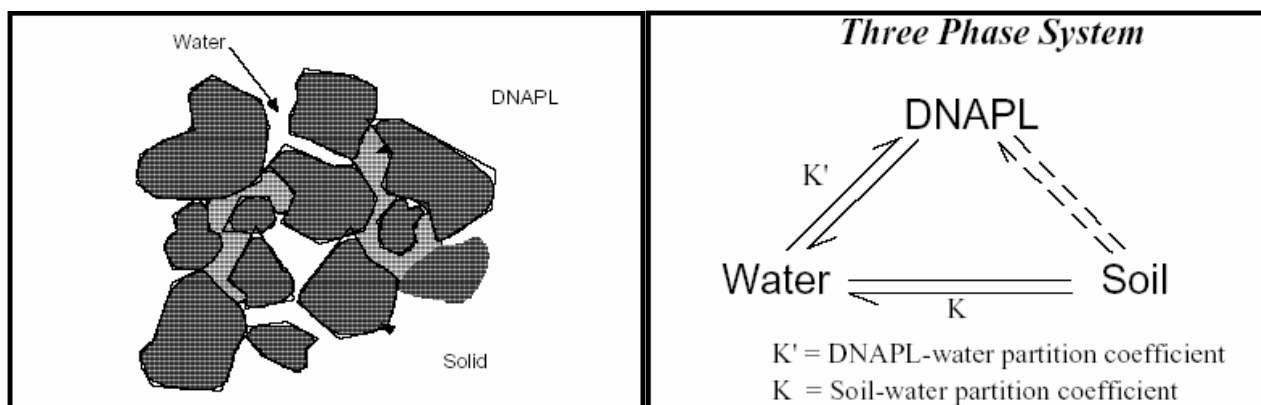


Fig.P.3 - Campione di suolo della zona satura con presenza di DNAPL e distribuzione nelle tre fasi nella zona satura.

P.4 Analisi delle equazioni

Come descritto in precedenza, la presenza di prodotto libero costituisce una sorgente di rischio per la salute umana in quanto i contaminanti in esso presente possono ripartirsi nelle fasi liquida e aeriforme adiacenti e da qui migrare secondo meccanismi di lisciviazione e volatilizzazione. Pertanto, il calcolo della concentrazione al punto di esposizione di contaminanti presenti nel prodotto libero richiede due passaggi:

1. Calcolo della concentrazione dei contaminanti nelle fasi liquida e aeriforme a contatto con il prodotto libero;
2. Determinazione del corrispondente fattore di trasporto.

Questa procedura è schematizzata di seguito nei casi di prodotto libero presente nella zona insatura (NAPL) e nella zona satura (DNAPL / LNAPL).

P.4.1 Presenza di DNAPL

Come schematizzato in Figura P.4, i contaminanti presenti come prodotto libero denso (DNAPL) possono seguire due diversi meccanismi di trasporto: solubilizzazione in fase liquida, con successivo trasporto in falda, da quantificare utilizzando il fattore di attenuazione in falda (DAF), come riportato nel paragrafo 3.3.1b; sempre solubilizzazione in falda, seguita da volatilizzazione da falda del contaminante, quantificabile mediante i corrispondenti fattori di trasporto per volatilizzazione outdoor (VF_{wamb}), descritto nel paragrafo 3.3.2c e indoor (VF_{wesp}), descritto nel paragrafo 3.3.3b.



Fig.P.4: trasporto di contaminanti da prodotto libero denso in zona satura (DNAPL)

P.4.2 Presenza di LNAPL

Come schematizzato in Figura P.5, i contaminanti presenti come prodotto libero leggero (LNAPL) possono seguire due diversi meccanismi di trasporto: solubilizzazione in fase liquida, con successivo trasporto in falda, da quantificare utilizzando il fattore di attenuazione in falda (DAF), come riportato nel paragrafo 3.3.1b; volatilizzazione diretta da prodotto libero con successiva migrazione dei contaminanti presenti in fase aeriforme verso ambienti outdoor o indoor, da quantificare mediante opportuni fattori di attenuazione (α_{indoor} / α_{outdoor}), da definirsi basandosi comunque sui fattori di volatilizzazione già utilizzati (vedi paragrafo 3.3.2c e 3.3.3b)

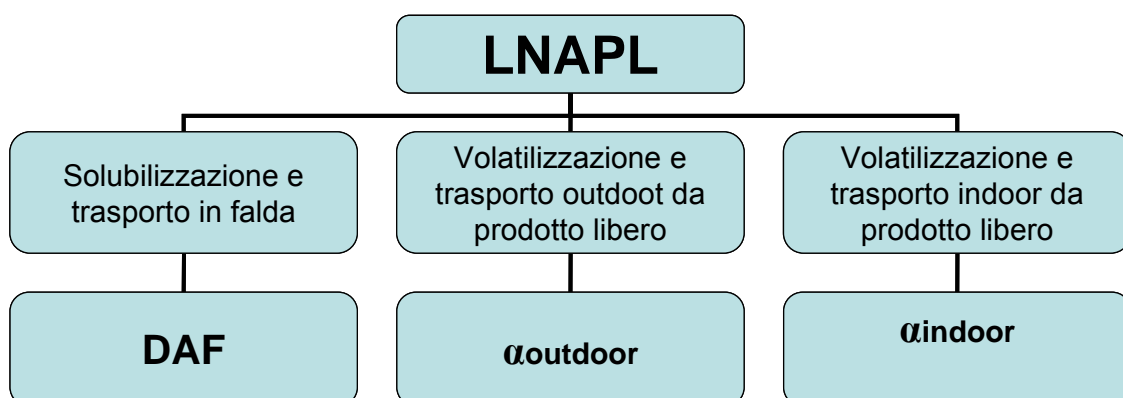


Fig.P.5:- Trasporto di contaminanti da prodotto libero leggero in zona satura (LNAPL)

P.4.3 Presenza di NAPL nella zona insatura

Come schematizzato in Figura P.6, i contaminanti presenti come prodotto libero in zona insatura (NAPL) possono seguire due diversi meccanismi di trasporto: solubilizzazione in fase liquida, con successivo trasporto per lisciviazione, da quantificare utilizzando il corrispondente fattore di trasporto (LF), come riportato nel paragrafo 3.3.1a; volatilizzazione diretta da prodotto libero con successiva migrazione dei contaminanti presenti in fase aeriforme verso ambienti outdoor o indoor, da quantificare mediante opportuni fattori di attenuazione (α_{indoor} / α_{outdoor}), da definirsi basandosi comunque sui fattori di volatilizzazione già utilizzati (vedi paragrafo 3.3.2b e 3.3.3a)

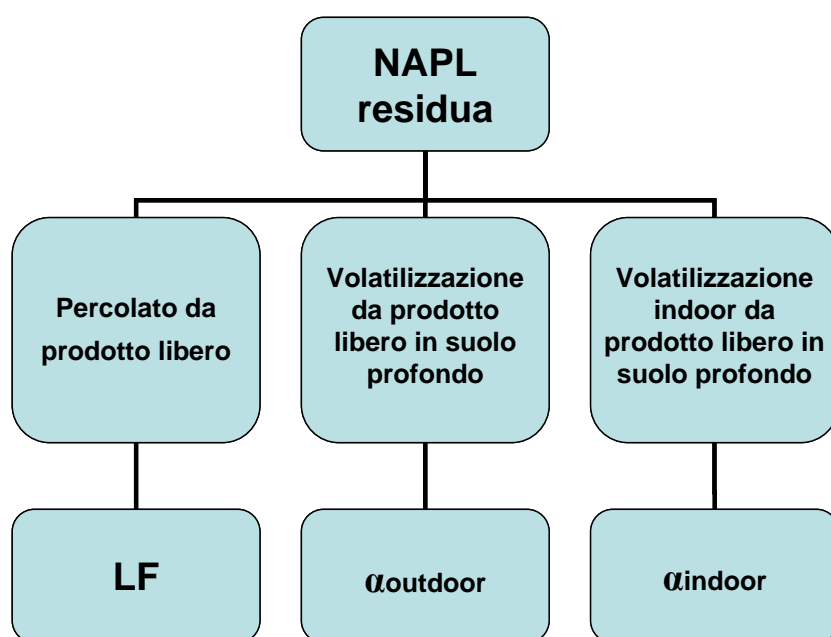


Fig.P.6 - Trasporto di contaminanti da prodotto libero in zona insatura (NAPL)

Pertanto, a parte la definizione dei fattori di trasporto α_{indoor} e α_{outdoor} , che verranno discussi in seguito (paragrafo P.7), il principale aspetto da definire riguardo al prodotto libero è rappresentato dalle modalità da seguire per la determinazione della concentrazione dei contaminanti nelle fasi aeriforme e liquida presenti a contatto con il prodotto libero stesso. I seguenti paragrafi sono dedicati a questo aspetto, che verrà affrontato facendo riferimento a quanto proposto da standard e software di riferimento e dalla letteratura tecnico-scientifica.

P.4.4 Testi di riferimento

I testi di riferimento esaminati, ASTM E-1739-95, Concawe report n.2/97, ASTM PS-104-98, UNICHIM n.196/1 del 2002, EPA SSG e RAGS, non presentano alcuna trattazione relativa alla presenza di contaminanti in fase libera nè alcun modello per la determinazione della concentrazione di sostanza inquinante in aria e in acqua dovuta alla presenza di NAPL nel suolo. L'unico approccio standardizzato, che però esula da quelli utilizzati come riferimento nel resto del documento, è quello definito dalla Washington State Pollution Liability Insurance Agency, nel quale viene proposto un modello che permette di stimare la ripartizione dei componenti del NAPL utilizzati poi per il calcolo dei relativi fattori di attenuazione.

Tab.7.1 - Testi di riferimento: modello per NAPL

	ASTM E-1739-95	PS 104-98	UNICHIM n. 196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
NAPL	-	-	-	-	-	-

P.4.5 Software di riferimento

I software che sono stati esaminati sono, come detto in precedenza: RBCA Tool Kit ver. 1.2, BP-RISC ver. 4.0 (livello1), ROME ver. 2.1 e GIUDITTA ver. 3.0.

Per quanto riguarda la presenza di NAPL, GIUDITTA ver. 3.0 ne tiene conto per ciò che concerne il trasporto di contaminanti in aria outdoor e indoor da suolo profondo; ROME ver 3.0 considera la presenza di NAPL per quanto attiene al caso di prodotto libero in falda. RBCA Tool Kit suggerisce di tenere conto della legge di Raoult in presenza di NAPL, correggendo in questo modo i termini di concentrazione in fase liquida e gassosa. In aggiunta ai software suddetti, sono stati presi in considerazione i software MTCATPH/MTCASGL, scaricabili free da internet, che implementano il modello del Washington State citato in precedenza, rispettivamente nel caso di miscele di contaminanti o di contaminante singolo.

Tab. 7.2 - Software esaminati: Presenza di NAPL

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0	MTCATPH/ MTCASGL
NAPL	X	-	X	X	X

P.5 Scelta delle equazioni

Dall'analisi di equazioni e software esaminati, sono stati individuati due diversi approcci per la determinazione della concentrazione di contaminanti nelle fasi gassosa e liquida a contatto con il prodotto libero. Il primo (modello dettagliato) prevede di considerare la ripartizione del contaminante in quattro fasi, ovvero prodotto libero, fase liquida, fase gassosa e fase solida, che ovviamente si riducono a tre nel caso di prodotto libero denso nella zona satura. Tale approccio è applicato nei software MTCATPH/MTCASGL. Il secondo approccio, seguito dai software GIUDITTA, ROME e RBCA, prevede invece di considerare che, in presenza di prodotto libero, la fase gassosa e la fase liquida siano sature di contaminante. I due approcci sono di seguito prima discussi e poi messi a confronto.

P.5.1 Modello dettagliato

Quando una sostanza inquinante è presente nel sottosuolo, il modello, proposto da Park e coautori (1999, 2001) ed utilizzato dai software MTCATPH/MTCASGL assume che i contaminanti si ripartiscano in quattro fasi in equilibrio tra di loro: fase vapore, fase acquosa, fase solida e prodotto libero. Assumendo che non ci sia degradazione chimica o biologica o volatilizzazione nella zona insatura, l'equilibrio di partizione suolo/acqua è praticamente immediato, reversibile e lineare nel suolo contaminato; utilizzando un bilancio di massa possiamo dire che la massa totale dell' i -esimo componente (M_T^i) è uguale alla somma della massa di ogni componente in ognuna delle quattro fasi,

$$M_T^i = M_{NAPL}^i + M_w^i + M_a^i + M_S^i \quad (P.2)$$

Le equazioni che governano l'equilibrio di partizione tra le quattro fasi (NAPL, aria, acqua, suolo), possono essere scritte rispettivamente come:

$$C_{s,i} = K_{oc,i} \cdot f_{oc} \cdot C_{w,i} \quad (P.3)$$

$$C_{a,i} = H_i \cdot C_{w,i} \quad (P.4)$$

$$C_{w,i} = x_i \cdot S_i \quad (P.5)$$

Dove C_i è la concentrazione dell' i -esimo componente in ognuna delle fasi (s , solida; a , gassosa; w , acquosa), K_{oc} il coefficiente di ripartizione carbonio organico-acqua, f_{oc} la frazione di carbonio organico, mentre H_i è la costante di Henry, x_i la frazione molare ed S_i la solubilità in acqua dell' i -esimo componente all'interno del NAPL.

L'equazione di conservazione del volume è la seguente:

$$\theta_w + \theta_a + \theta_{NAPL} = \theta_e \quad (P.6)$$

dove θ_w è il contenuto volumetrico di acqua, θ_a è il contenuto volumetrico di aria, θ_{NAPL} è il contenuto volumetrico di NAPL e θ_e è la porosità efficace.

La massa dei componenti nelle quattro fasi viene determinata secondo le seguenti relazioni:

$$M_T^i = C_{T,i} \cdot \rho_s \cdot V \quad (P.7)$$

$$M_S^i = C_{S,i} \cdot m_{soil} = C_{S,i} \cdot \rho_s \cdot V = K_{oc,i} \cdot f_{oc} \cdot C_{w,i} \cdot \rho_s \cdot V \quad (P.8)$$

$$M_w^i = C_{w,i} \cdot \theta_w \cdot V \quad (P.9)$$

$$M_a^i = C_{a,i} \cdot \theta_a \cdot V = H_i \cdot C_{w,i} \cdot \theta_a \cdot V \quad (P.10)$$

dove $C_{T,i}$ è la concentrazione totale del componente i-mo nel suolo, ρ_s è la densità bulk del suolo, V è il volume totale del campione di suolo e m_{soil} è la massa totale di suolo.

Laddove esista prodotto libero, come descritto da Roberts e Allen-King (1998), sostituendo l'equazione P.6 attraverso la P.10 nell'equazione P.2 ottengo:

$$C_{T,i} = \frac{M_T^i}{m_{soil}} = \frac{x_i \cdot S_i}{\rho_s} \cdot \left[\theta_w + K_{oc,i} \cdot f_{oc} \cdot \rho_s + H_i \cdot \theta_a + \frac{PM_i}{S_i} \cdot \rho_{NAPL} \cdot \theta_{NAPL} \right] \quad (P.11)$$

Dove PM_i è il peso molecolare del componente i-esimo dell'NAPL e ρ_{NAPL} è la densità dell'NAPL.

Assumendo che l'NAPL sia una miscela ideale la densità dell'NAPL può essere stimata attraverso l'uso della seguente relazione:

$$\rho_{NAPL} = \frac{\left[\frac{\sum (x_i \cdot PM_i)}{\sum (x_i \cdot PM_i / \rho_i)} \right]}{\sum (x_i \cdot PM_i)} = \frac{1}{\sum (x_i \cdot PM_i / \rho_i)} \quad (P.12)$$

Dove con ρ_i si intende la densità di ogni componente dell'NAPL.

L'equazione P.12 viene scritta per ogni sostanza che compone l'NAPL, avendo come incognite le frazioni molari dei componenti il prodotto libero, x_i , e la frazione di porosità occupata dal prodotto libero, θ_{NAPL} ; quando la soluzione ottenuta fornisce un valore positivo del θ_{NAPL} , ciò implica la presenza di prodotto libero. Se la soluzione fornisce un valore negativo per θ_{NAPL} , allora ciò implica che non c'è prodotto libero. In questo caso, il modello prevede la ripartizione dell'inquinante in tre fasi come descritto qui di seguito.

Sostituendo le equazioni P.7, P.8, P.9, P.10, nell'equazione P.2 e imponendo M_{NAPL}^i uguale a zero (non presenza di NAPL) e scrivendo tutto in termini di $C_{a,i}$ e $C_{T,i}$ si ottiene la seguente relazione per la concentrazione in fase aeriforme, $C_{a,i}$, che poi può essere utilizzata per calcolare le corrispondenti concentrazioni in fase liquida e solida.

$$C_{a,i} = \frac{C_{T,i} \cdot H_i \cdot \rho_s}{\theta_w + K_{oc,i} \cdot f_{oc} \cdot \rho_s + H_i \cdot \theta_a} \quad (P.13)$$

P.5.2 Approccio a saturazione

In questo approccio, proposto da GIUDITTA e ROME, il calcolo della concentrazione dei contaminanti in fase liquida e vapore viene effettuata assumendo che, in presenza di prodotto libero, siano entrambe sature.

Determinazione della concentrazione in fase aeriforme:

Per determinare la concentrazione di ogni componente dell'NAPL nei pori del terreno viene utilizzata la Legge di Raoult,

$$C_{a,pori,i} = \frac{x_i \cdot P_v^i \cdot MW_i}{R \cdot T} \quad (P.14)$$

Dove P_v^i è la tensione di vapore del componente; P_{Mi} è il peso molecolare; T è la temperatura assoluta e R è la costante molare dei gas e x_i è la frazione molare dell'i-esimo componente della NAPL.

Determinazione della concentrazione in fase liquida:

Per determinare la concentrazione in fase liquida dei componenti della NAPL nei pori del terreno viene utilizzata la seguente relazione:

$$C_{w,i} = x_i \cdot S_i \quad (\text{P.15})$$

Dove x_i e S_i sono rispettivamente frazione molare e solubilità dell'i-esimo componente della NAPL.

P.5.3 Confronto tra i due approcci

I risultati ottenuti applicando i due approcci sono stati confrontati con riferimento a due casi di contaminazione. Il primo caso è relativo ad una contaminazione da singolo inquinante, in questo caso benzene; il secondo caso è relativo a contaminazione da diverse miscele di idrocarburi. In entrambi i casi tutti i parametri del modello sono stati definiti utilizzando i valori di default e il database dei software MTCATPH/MTCASGL.

P.5.3a Contaminazione da benzene

I risultati relativi alla concentrazione di contaminante calcolata dai due approcci (modello dettagliato e modello a saturazione) sono riportati in Figura P.7. Si può notare che il modello dettagliato prevede un valore di concentrazione in fase aeriforme crescente al crescere della concentrazione totale di inquinante fino al raggiungimento di un valore asintotico. Tale valore corrisponde sostanzialmente con la concentrazione di saturazione calcolata applicando la legge di Raoult.

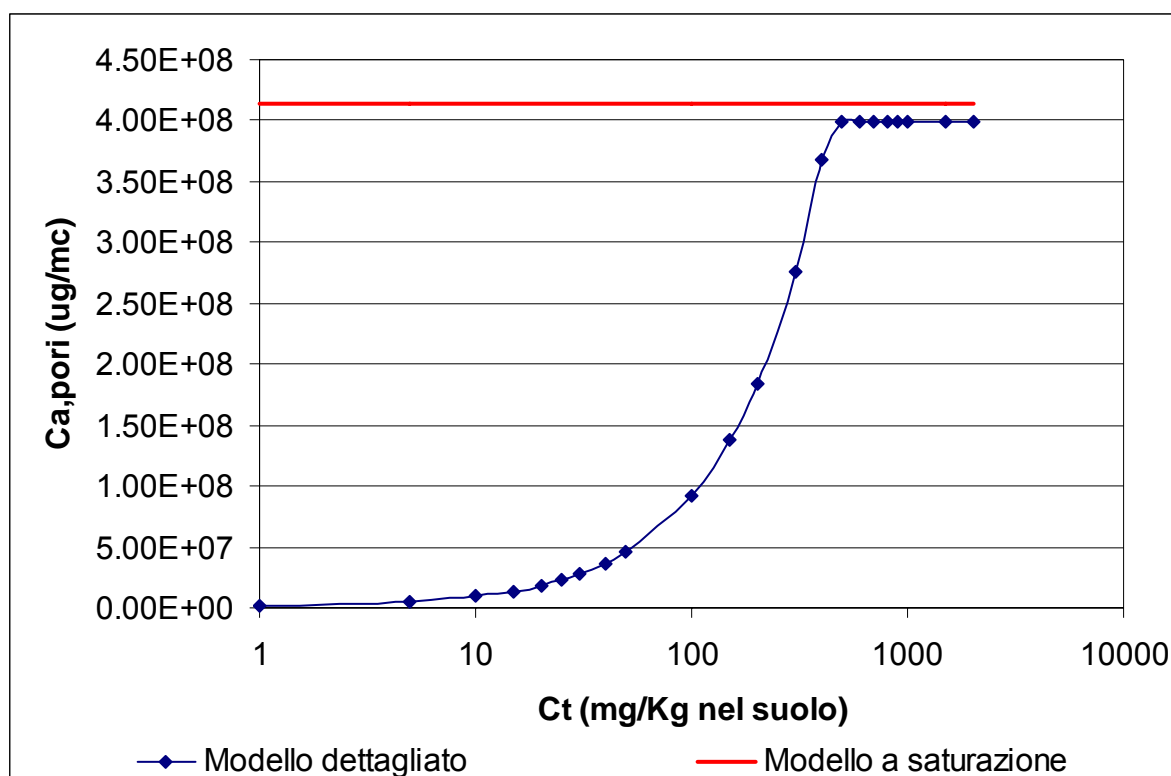


Fig. P.7 concentrazione della fase gas nei pori,
confronto tra i due approcci (Benzene)

Nella figura P.8 sono invece riportati i valori di concentrazione in fase liquida calcolati con i due approcci. Anche in questo caso, il modello dettagliato prevede valori crescenti al crescere della concentrazione totale di inquinante, fino al raggiungimento di un valore asintotico che coincide sostanzialmente con la solubilità del benzene.

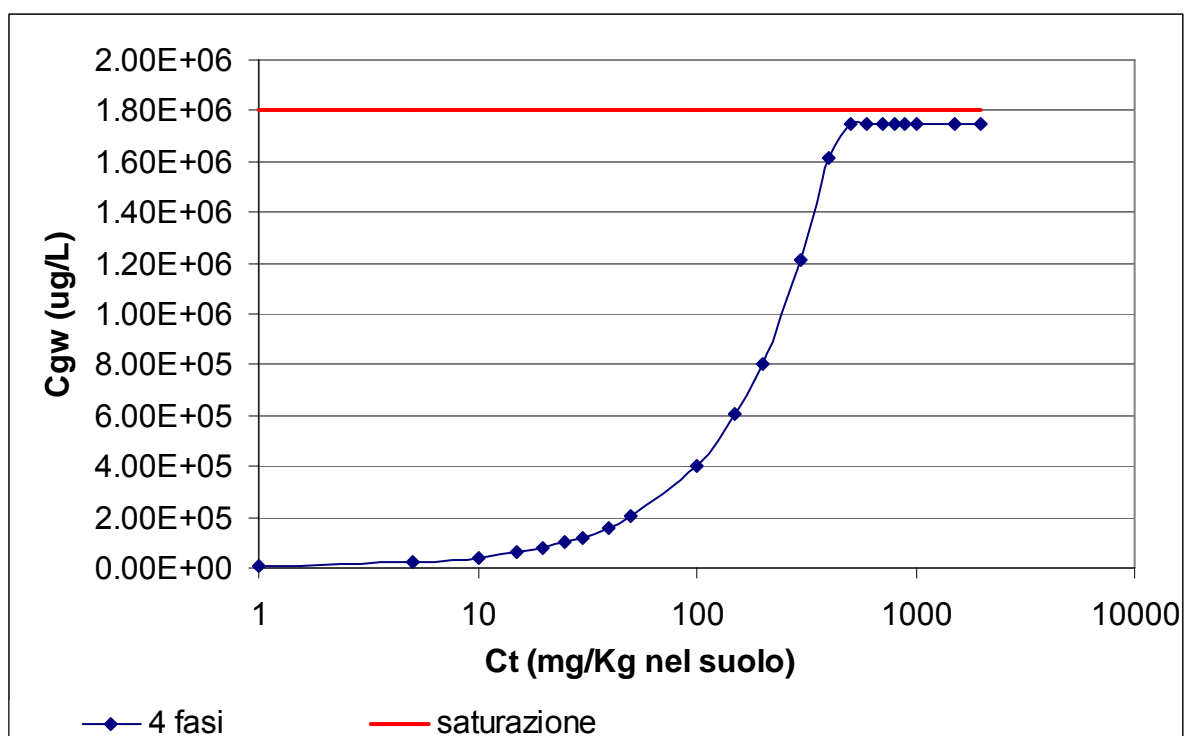


Fig. P.8 concentrazione della fase liquida nei pori,
confronto tra gli approcci (Benzene)

P.5.3b Contaminazione da idrocarburi

A titolo esemplificativo si è fatto riferimento al caso di sorgente di contaminazione nell'insaturo costituita da idrocarburi, la cui composizione corrisponda al caso di contaminazione recente a seguito di sversamento di benzine (Fresh Gasoline). La composizione della miscela è riportata in tabella P.3, mentre in tabella P.4 sono riassunte le proprietà chimico-fisiche delle frazioni costituenti le miscele.

	Fresh Gasoline
EC 5-6	0.26
EC>6-8	0.19
EC>8-10	0.09
EC>10-12	0.03
EC>12-16	0
EC>16-21	0
BENZENE	0.025
TOLUENE	0.12
AEC>8-10	0.26
AEC>10-12	0.025
AEC>12-16	0
AEC>16-21	0
AEC>21-35	0

Tab. P.3 Composizione in volume del prodotto libero

	MW (mg/mole)	S (mg/L)	H (adim)	Koc (L/Kg)
Alifatici				
EC 5-6	8,10E+04	2,80E+01	3,40E+01	7,94E+02
EC>6-8	1,00E+05	4,20E+00	5,10E+01	3,98E+03
EC>8-10	1,30E+05	3,30E-01	8,20E+01	3,16E+04
EC>10-12	1,60E+05	2,60E-02	1,30E+02	2,51E+05
EC>12-16	2,00E+05	5,90E-04	5,40E+02	5,01E+06
EC>16-21	2,70E+05	1,00E-06	6,40E+03	1,00E+09
Aromatici				
BENZENE	7,80E+04	1,78E+03	2,30E-01	7,94E+01
TOLUENE	9,20E+04	5,20E+02	2,70E-01	2,51E+02
AEC>8-10	1,20E+05	6,50E+01	4,90E-01	1,58E+03
AEC>10-12	1,30E+05	2,50E+01	1,40E-01	2,51E+03
AEC>12-16	1,50E+05	5,80E+00	5,40E-02	5,01E+03
AEC>16-21	1,90E+05	5,10E-01	1,30E-02	1,58E+04
AEC>21-35	2,40E+05	6,60E-06	6,80E-04	1,26E+05

Tab. P.4 Caratteristiche chimiche del prodotto libero

In figura P.9 è riportata la distribuzione percentuale degli idrocarburi nelle diverse fasi calcolate con il modello dettagliato al crescere della concentrazione totale riferita all'unità di peso del suolo. Si noti come il modello non preveda la presenza di NAPL fino ad un valore di concentrazione soglia di circa 10 mg/kg. Fino a questo valore soglia, il contaminante risulta quindi correttamente ripartito tra le fasi aeriforme, solida e acquosa. Al di sopra del valore soglia, si osserva che al crescere della contaminazione aumenta la percentuale di idrocarburi presente come prodotto libero.

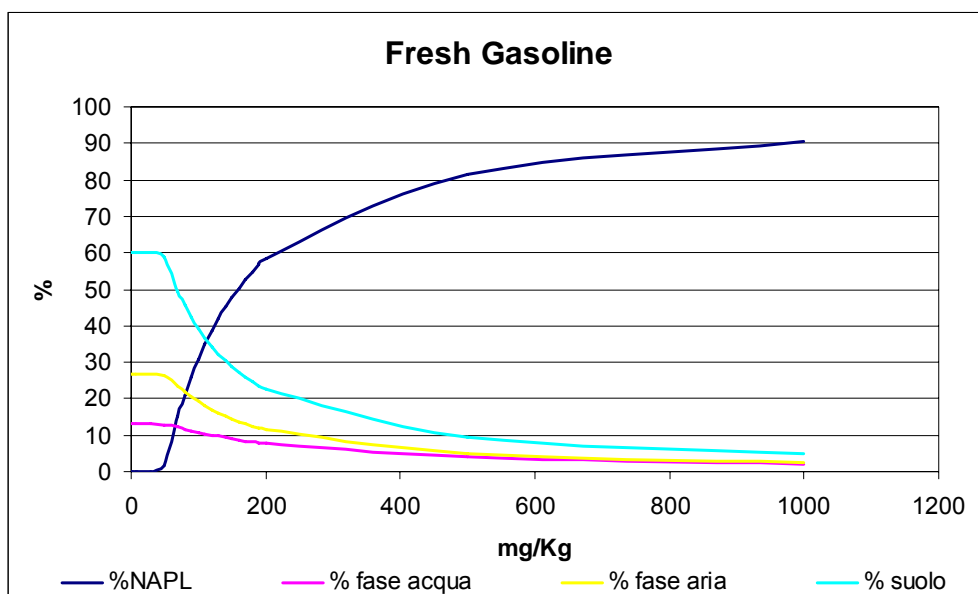


Fig. P.9 Modello MTCATP, passaggio da tre a quattro fasi (Fresh Gasoline)

Il modello dettagliato restituisce anche i valori di concentrazione in fase gassosa corrispondenti a diversi valori di concentrazione totale di idrocarburi nel suolo (vedi Figura P.10). Si nota come la concentrazione in fase gassosa cresca pressoché linearmente fino ad una contaminazione di 10mg/kg per poi aumentare fino a raggiungere un valore asintotico.

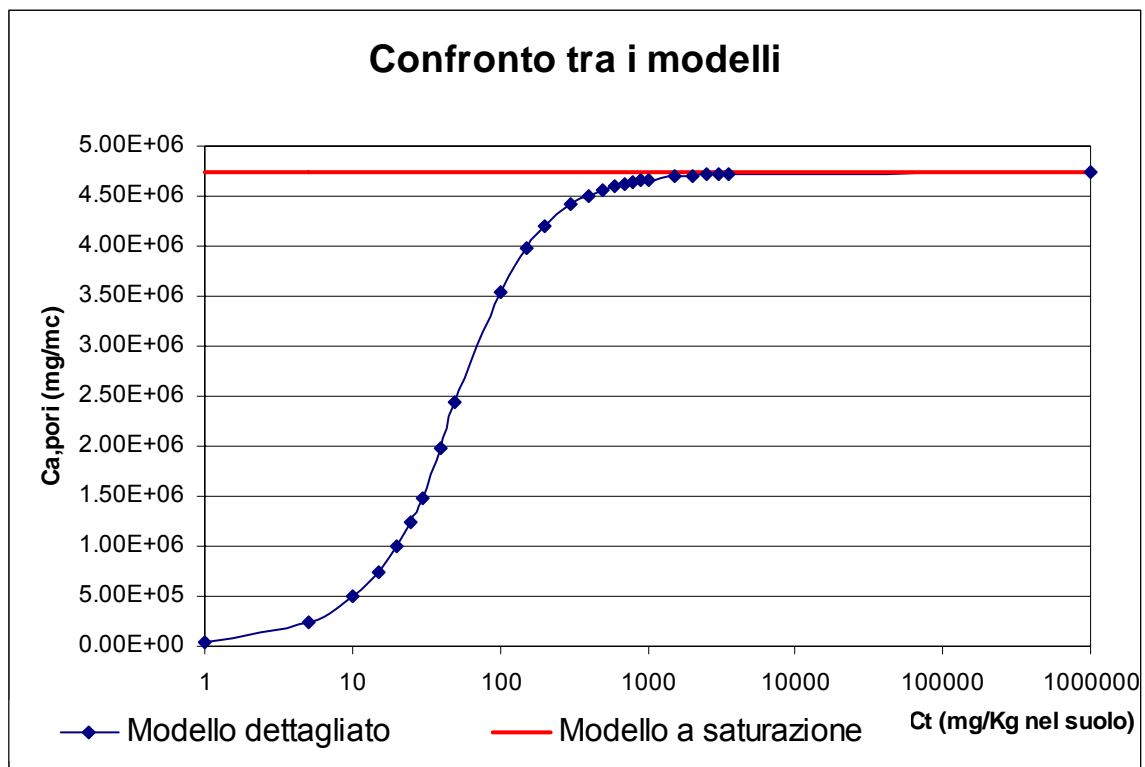


Fig. P.10 concentrazione di gas nei pori, confronto tra i due approcci

Discorso analogo per quanto riguarda la concentrazione in fase liquida, che risulta crescente al crescere della contaminazione fino a raggiungere un valore asintotico (vedi Figura P.11).

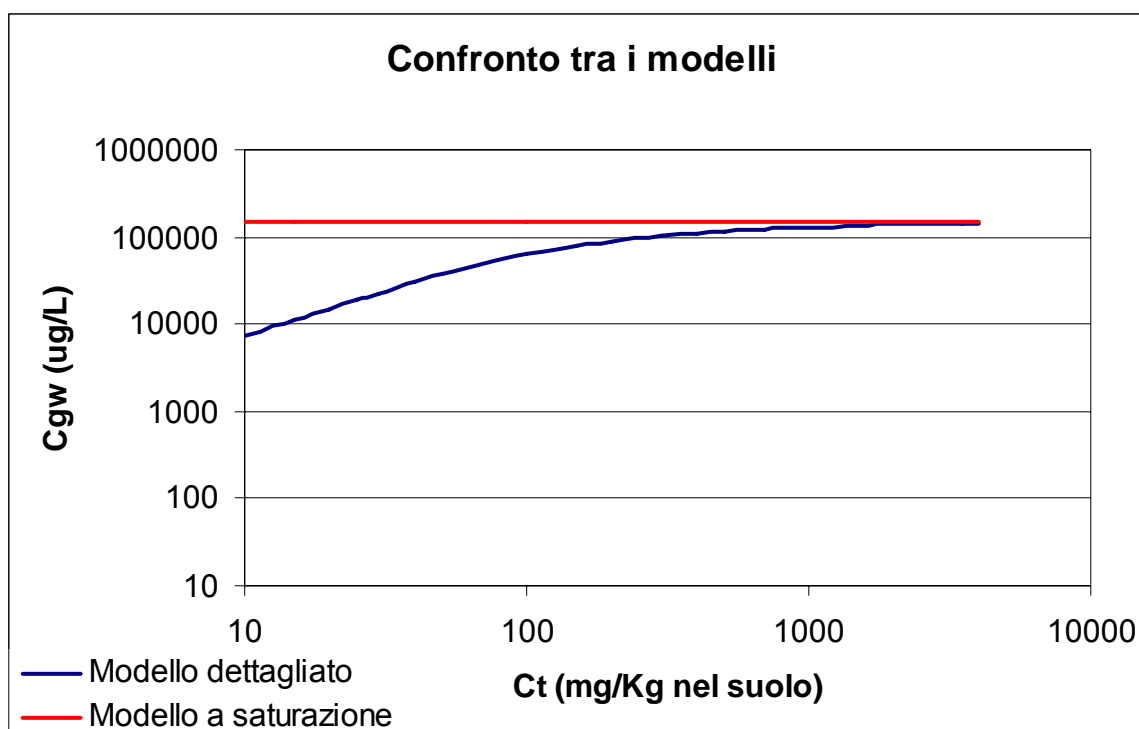


Fig P.11 concentrazione della fase liquida nei pori, confronto tra i due approcci

In entrambe le Figure P.10 e P.11 i valori restituiti dal modello dettagliato sono stati confrontati con quelli previsti dal modello a saturazione (linea rossa continua). Si nota che in entrambi i casi i risultati del modello a saturazione coincidono con il valore asintotico del modello dettagliato. Si nota inoltre come il modello a saturazione, a differenza di quello dettagliato, non consenta di valutare il valore di concentrazione totale soglia, oltre il quale si prevede la presenza di prodotto libero.

P. 6 Conclusioni

Il modello dettagliato fornisce indicazioni precise riguardo alla ripartizione del prodotto libero nel suolo: esso infatti è in grado di prevedere la presenza o meno di prodotto libero ed in ogni caso di valutare la distribuzione dei contaminanti nelle diverse fasi e la relativa concentrazione. Si tratta altresì di un approccio che richiede la conoscenza di diversi parametri relativi al suolo ed ai contaminanti, che non sono invece richiesti dall'approccio a saturazione. Quest'ultimo però può rappresentare una scelta eccessivamente conservativa, come evidenziato nell'analisi comparativa appena presentata.

P.7 Stima dei coefficienti di attenuazione

Come discusso in precedenza nel paragrafo P.4 (vedi in particolare gli schemi delle Figure P.4, P.5 e P.6), una volta disponibili i valori di concentrazione in fase gassosa o acquosa, vanno utilizzati opportuni fattori di attenuazione o di trasporto per determinare la concentrazione di contaminanti al punto di esposizione. Tali fattori sono i medesimi utilizzati nella trattazione relativa a contaminanti presenti in fase disciolta, ad eccezione dei fattori di attenuazione per il calcolo della volatilizzazione da prodotto libero, che vengono discussi di seguito.

P.7.1 Volatilizzazione di vapori indoor da prodotto libero nella zona insatura o satura (LNAPL)

Applicando il modello a saturazione o dettagliato, si determina la concentrazione di contaminante nella fase aeriforme nei pori a contatto con il prodotto libero, $C_{a,pori}$. La corrispondente concentrazione al punto di esposizione indoor, $C_{a,poe}$, viene calcolata determinando il fattore di attenuazione α_{indoor} , definito dalla equazione P.16 ricavata dalla 3.3.32, a cui si rimanda per il significato dei simboli:

$$\alpha_{indoor} = \frac{C_{a,poe}}{C_{a,pori}} = \frac{\frac{D_s^{eff}}{L_t \cdot L_b \cdot ER}}{1 + \frac{D_s^{eff}}{L_t \cdot L_b \cdot ER} + \frac{D_s^{eff} \cdot L_{crak}}{D_{crak}^f \cdot L_t \cdot \eta}} \cdot 10^3 \quad (P.16)$$

P.7.2 Volatilizzazione di vapori outdoor da prodotto libero nella zona insatura o satura (LNAPL)

Anche in questo caso si utilizza il modello dettagliato o il modello a saturazione per determinare la concentrazione di contaminante nel gas a contatto con il prodotto libero, $C_{a,pori}$. La concentrazione di inquinante nei vapori outdoor da prodotto libero da suolo profondo, viene determinata, calcolando il coefficiente di attenuazione $\alpha_{outdoor}$, dato dalla equazione P.17, ricavata dalla 3.3.21:

$$\alpha_{outdoor} = \frac{C_{a,poe}}{C_{a,pori}} = \frac{1}{1 + \frac{U_{air} \cdot \delta_{air} \cdot L_{gw}}{D_{ws}^{eff} \cdot W}} \quad (P.17)$$

P.8 Procedura per il calcolo dei fattori di trasporto

In questo paragrafo si riassumono i concetti esposti ai fini di individuare la procedura da seguire per il calcolo della concentrazione al punto di esposizione nel caso di presenza di prodotto libero. La trattazione sarà condotta separatamente nel caso di prodotto libero in zona satura (DNAPL o LNAPL) e di prodotto libero in zona insatura (NAPL).

P.8.1 Prodotto libero denso in falda (DNAPL)

Come discusso in precedenza, la migrazione di contaminanti dal prodotto libero è vincolata in questo caso alla dissoluzione degli stessi in fase acquosa. Facendo riferimento allo schema di Figura P.4 si procede come segue:

1. Si calcola la concentrazione in fase liquida, C_{GW} , utilizzando il modello a saturazione o il modello dettagliato, che in questo caso considera tre fasi: prodotto libero, fase solida e fase acquosa;
2. Si calcolano le concentrazioni al punto di esposizione, utilizzando i seguenti fattori di trasporto:
 - fattore di attenuazione in falda (DAF): equazioni 3.3.11 / 3.3.12
 - fattore di volatilizzazione outdoor (VF_{wamb}): equazione 3.3.21/3.3.22
 - fattore di volatilizzazione indoor (VF_{wesp}): equazione 3.3.32

P.8.2 Prodotto libero leggero in falda (LNAPL)

Come discusso in precedenza, la migrazione di contaminanti dal prodotto libero è vincolata in questo caso alla dissoluzione degli stessi in fase acquosa per quanto attiene al trasporto in falda o alla loro diretta volatilizzazione per quanto attiene al trasporto in fase gassosa. Facendo riferimento allo schema di Figura P.5 si procede come segue:

1. Si calcolano la concentrazione in fase liquida, C_{GW} , e quella in fase gassosa, $C_{a,pori}$, utilizzando il modello a saturazione o il modello dettagliato, che in questo caso considera quattro fasi: prodotto libero, fase gassosa, fase acquosa e fase solida;
2. Si calcolano le concentrazioni al punto di esposizione, utilizzando i seguenti fattori di attenuazione:
 - Dispersione in falda, DAF : equazioni 3.3.11 / 3.3.12

- Volatilizzazione outdoor, $\alpha_{outdoor}$: equazione P.17
- Volatilizzazione indoor, $\alpha_{pindoor}$: equazione P.16

P.8.3 Prodotto libero in zona insatura (NAPL)

Come discusso in precedenza, la migrazione di contaminanti dal prodotto libero è vincolata in questo caso alla dissoluzione degli stessi in fase acquosa per quanto attiene al processo di lisciviazione o alla loro diretta volatilizzazione per quanto attiene al trasporto in fase gassosa. Facendo riferimento allo schema di Figura P.5 si procede come segue:

1. Si calcolano la concentrazione in fase liquida, C_{GW} , e quella in fase gassosa, $C_{a,pori}$, utilizzando il modello a saturazione o il modello dettagliato, che in questo caso considera quattro fasi: prodotto libero, fase gassosa, fase acquosa e fase solida;
2. Si calcolano le concentrazioni al punto di esposizione, utilizzando i seguenti fattori di attenuazione:
 - Lisciviazione, LF : equazione 3.3.9
 - Volatilizzazione outdoor, $\alpha_{outdoor}$: equazione P.17
 - Volatilizzazione indoor, $\alpha_{pindoor}$: equazione P.16

Si noti che per quanto attiene alla lisciviazione, utilizzando il fattore di trasporto LF si otterrà la concentrazione in falda sottostante alla sorgente di contaminazione, che quindi coinciderà con la concentrazione al punto di esposizione solo nel caso di recettore on-site.