



INTRUSIONE DI VAPORI NEI LUOGHI DI LAVORO, MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA SATURA E INSATURA

Simona Berardi

ISPESL

L'INTRUSIONE DI VAPORI

L'intrusione di vapori è la migrazione di sostanze volatili dal sottosuolo all'interno di ambienti confinati.

Le specie chimiche volatili presenti nei rifiuti interrati o nel suolo saturo (falda) o insaturo contaminato possono migrare attraverso il suolo insaturo stesso e raggiungere gli edifici sovrastanti alterando la qualità dell'aria indoor [USEPA, 2002].

In casi estremi, i vapori possono accumularsi raggiungendo livelli di concentrazione tali da comportare gravi rischi per la sicurezza dell'uomo (es. esplosioni), rischi acuti per la salute (es. intossicazione) o problemi estetici (es. cattivi odori).

Più comunemente però i livelli di concentrazione sono bassi, per cui ad essi può corrispondere un rischio cronico per la salute umana dovuto ad una esposizione a lungo termine.

Nel nostro paese, il problema della “vapor intrusion” ricade nell'abito della ben più ampia problematica riguardante la gestione dei siti contaminati, normata a mezzo del D.Lgs. 152/06 e s.m.i.

L'INTRUSIONE DI VAPORI

Il rischio per la salute e la sicurezza di un uomo presente all'interno di un ambiente confinato, che sia di tipo residenziale, industriale o commerciale, può inoltre derivare dagli effetti di una qualsiasi specie chimica presente a qualsiasi titolo e per qualsiasi ragione all'interno dell'edificio in questione. Tale tipologia di rischio viene comunemente denominata "rischio chimico". Nel caso in cui ci si riferisca ad ambienti di lavoro, tale problematica è normata a mezzo del D.Lgs. 81/2008 ("Testo unico in materia di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro").

Le due problematiche, del "rischio chimico" e della intrusione dei vapori ("vapor intrusion"), possono manifestarsi separatamente o, situazione ancor più complessa, possono coesistere e quindi contribuire entrambe al deterioramento della qualità dell'aria nell'ambiente confinato e a generare un rischio inaccettabile per la salute umana dei recettori esposti.

L'INTRUSIONE DI VAPORI

L'Appendice S “Intrusione di vapori” del documento [APAT, 2008 rev.2] riporta:

1. I principali riferimenti bibliografici internazionali inerenti la valutazione del fenomeno dell'intrusione di vapori nei siti contaminati.
2. Le modalità di valutazione dell'esposizione professionale in siti industriali interessati da fenomeni di contaminazione.
3. I metodi di misura delle concentrazioni di contaminanti nell'aria indoor e outdoor.

LINEE GUIDA E DOCUMENTI TECNICI SVILUPPATI NEGLI U.S.A (1/3)

“Negli Stati Uniti la “vapor intrusion” rappresenta una problematica ambientale di notevole rilevanza ed è oggetto di numerosissimi studi e linee guida sviluppati sia dall’EPA che dai dipartimenti per la protezione dell’ambiente di ogni singolo stato.

Nel 1990 furono gli stati del Massachusetts e del Colorado a sollevare la problematica. In particolare, il sito di Redfield in Colorado fu una delle prime realtà che portarono la problematica dell’intrusione dei vapori all’attenzione dell’EPA e della nazione. Concentrazioni relativamente basse di 1,1-dicloroetilene (1,1-DCE) nella falda evidenziarono un rischio per inalazione indoor di vapori in un gran numero di abitazioni sovrastanti il plume di contaminazione. Test di qualità dell’aria indoor furono effettuati in almeno 800 case ed appartamenti, e in 400 di questi fu necessario attivare interventi di risanamento. I monitoraggi proseguirono per i successivi 8 anni, nel corso dei quali furono eseguiti circa 7000 test di qualità dell’aria indoor [ITRC, 2007].



LINEE GUIDA E DOCUMENTI TECNICI SVILUPPATI NEGLI U.S.A (2/3)

“Draft Guidance for Evaluating the Vapor Intrusion to Indoor Air Pathway from Groundwater and Soils, Subsurface Vapor Intrusion Guidance, USEPA 2002”: prima guida tecnica che affronta specificamente tale problema.

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

“Weinberg N., Sager S., Lowenbach B., Clarkson R. (2006), “Comparing State Vapor Intrusion Programs: Are we All Headed Down the Same Path?”, Risk Policy Report, www.insideEPA.com, April 11, 2006”: documento in cui sono posti a confronto gli approcci utilizzati da California, Colorado, Connecticut, New Jersey, New York e Pennsylvania nell'affrontare il problema del “vapor intrusion”.



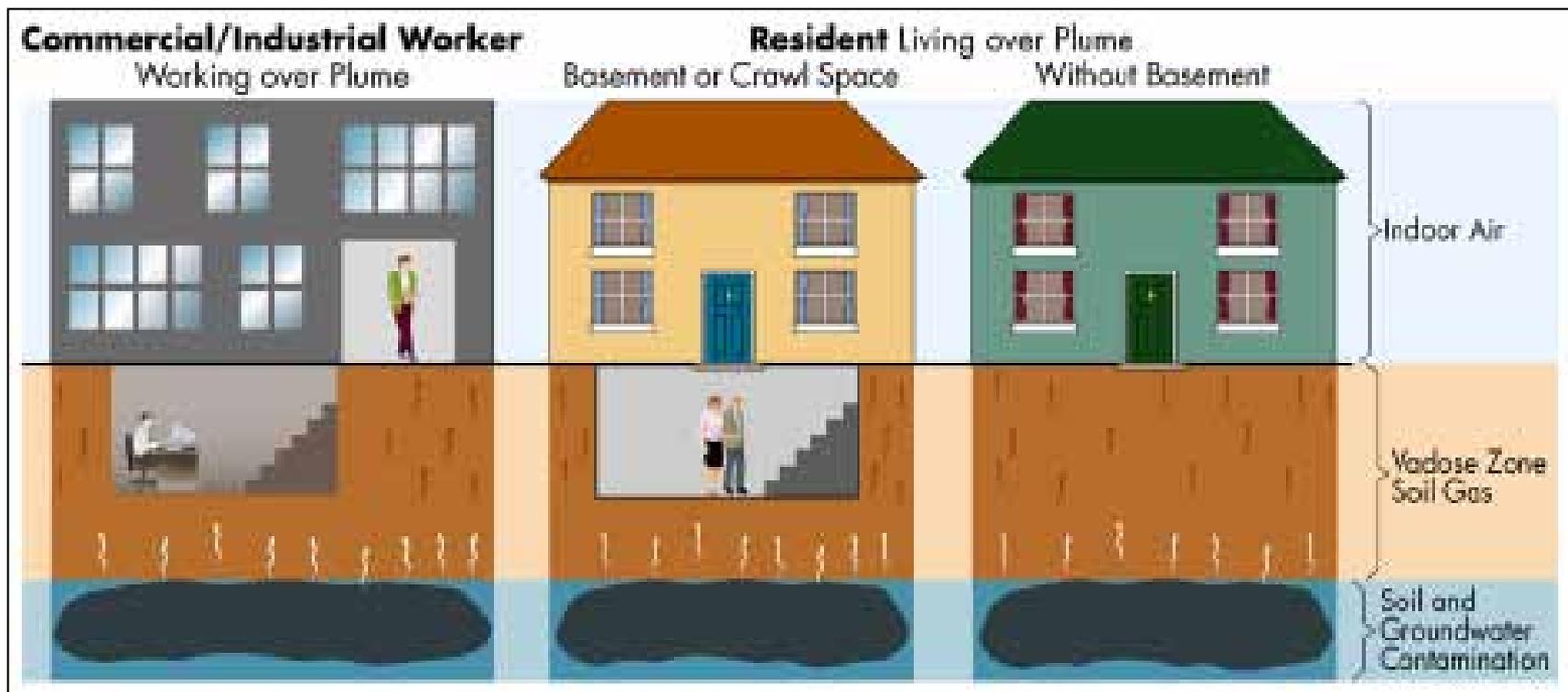
LINEE GUIDA E DOCUMENTI TECNICI SVILUPPATI NEGLI U.S.A (3/3)

Gli approcci presentati, sebbene con molte specificità, presentano degli elementi comuni:

- i valori di screening sono calcolati assumendo un rischio tollerabile per le sostanze cancerogene pari a 10^{-6} (unica eccezione la Pennsylvania);
- le indagini per la valutazione dell'intrusione di vapori interessano almeno le sorgenti in un raggio di 100 ft (circa 33 m) dal recettore;
- devono essere valutati i percorsi preferenziali;
- almeno una delle campagne di campionamento deve essere effettuata in inverno per poter escludere la presenza di un rischio potenziale da intrusione di vapori (worst case scenario).

Modello concettuale del sito nel caso di “vapor intrusion”

Modello concettuale per l'intrusione dei vapori [ITRC, 2007]



ITRC (2007), *Vapor intrusion pathway: a practical guideline*, Interstate Technology & Regulatory Council Vapor Intrusion Team.

Modello concettuale del sito nel caso di “vapor intrusion”



SORGENTE:

Nel caso specifico della “vapor intrusion”, è necessario che la contaminazione sia legata alla presenza di specie chimiche volatili. Queste includono i composti organici volatili (“Volatile Organic Compounds” – VOC), alcuni composti organici semivolatili, e alcuni analiti inorganici come il mercurio elementare e l’idrogeno solforato [ITRC, 2007].

Il documento [USEPA, 2002] riporta un elenco di sostanze che, per le loro caratteristiche di volatilità e di tossicità, possono comportare rischio per tale via di esposizione.

Modello concettuale del sito nel caso di “vapor intrusion”



Definizione di “Composto Organico Volatile”:

L’Art. 268, Titolo I, Parte V del D.Lgs. 152/06, definisce: “Composto organico volatile (COV): qualsiasi composto organico che abbia a 293,15 K una pressione di vapore di 0,01 kPa (= 0,075 mm Hg) o superiore, oppure che abbia una volatilità corrispondente in condizioni particolari di uso”.

Il documento [USEPA, 2002] identifica come sostanze volatili quelle alle quali corrisponde una Costante di Henry $^3 10^{-5} \text{ atm m}^3/\text{mol}$.

Il documento [NJDEP, 2005] identifica come sostanze volatili quelle alle quali corrisponde una Costante di Henry $^3 10^{-5} \text{ atm m}^3/\text{mol}$ ed una pressione di vapore $^3 1 \text{ mm Hg}$.

Modello concettuale del sito nel caso di “vapor intrusion”

Sorgente	↳	Trasporto	↳	Bersaglio
----------	---	-----------	---	-----------

TRASPORTO:

Le vie di migrazione:

-Volatilizzazione da suolo o da falda contaminati (esposizione on-site).

-Percolazione da suolo in falda, la diluizione e il trasporto in falda, e la volatilizzazione da falda (esposizione off-site).

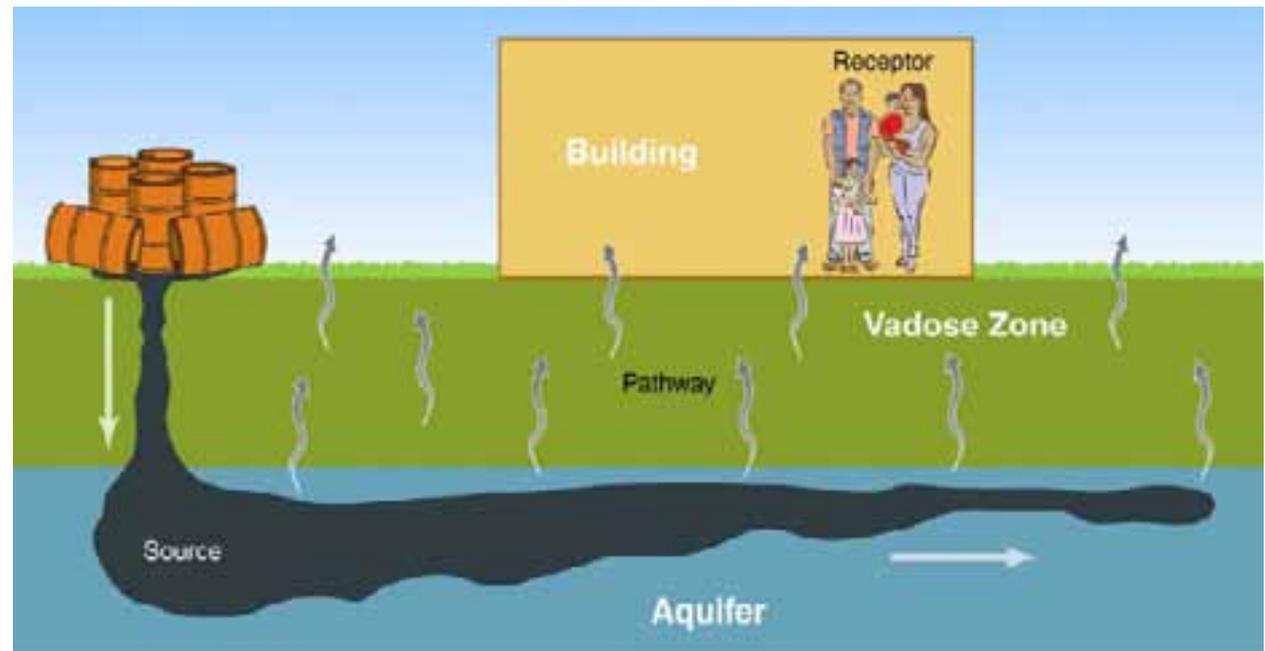


Figure 1 2 Potential source, migration route, and receptor for vapor intrusion.

Modello concettuale del sito nel caso di “vapor intrusion”



BERSAGLIO:

E' necessario che sia appurata la presenza di edifici utilizzati a scopo residenziale, commerciale o industriale.

Oppure che sia prevista la loro realizzazione in corrispondenza della sorgente di contaminazione ed inoltre, nel caso di contaminazione della falda idrica, a valle idrogeologica della sorgente stessa.

Il documento [USEPA, 2002] suggerisce di porre particolare attenzione agli edifici per i quali la contaminazione, nel suolo o nella falda, è stata riscontrata ad una profondità pari o inferiore a circa 30 m (100 piedi) dal piano campagna.

Stima del rischio per la salute umana da “vapor intrusion”

Una volta definito il MCS è possibile stimare i valori di Concentrazione Soglia di Rischio (CSR) nel suolo insaturo e/o saturo (falda), selezionando il valore più conservativo tra quelli forniti dalle espressioni di seguito riportate:

$$CSR_{canc} = \frac{TR}{SF \times FT \times EM} \quad (\text{per effetti cancerogeni});$$

$$CSR_{non-canc} = \frac{THQ \times RfD}{FT \times EM} \quad (\text{per effetti tossici});$$

Dove:

$FT = VF_{sesp}$ [kg/m³] nel caso in cui la sorgente di contaminazione è nel suolo saturo (falda);

$FT = VF_{wesp}$ [L/m³] nel caso in cui la sorgente di contaminazione è nel suolo insaturo.

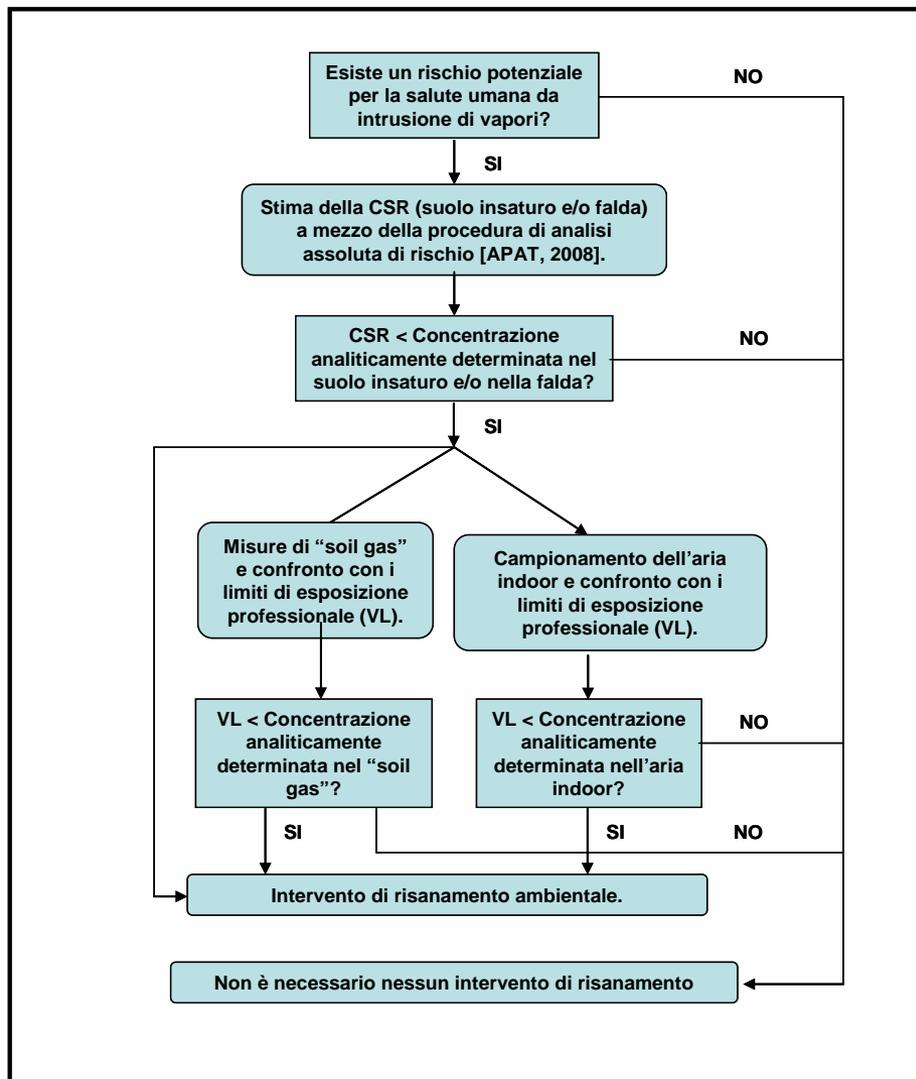
Stima del rischio per la salute umana da “vapor intrusion”

I suddetti fattori di trasporto, VF_{sesp} e VF_{wesp} , possono essere calcolati utilizzando le equazioni analitiche riportate nel documento [APAT, 2008], che fanno riferimento al modello proposto da Johnson e Ettinger [Johnson, Ettinger 1991].

Tali equazioni rappresentano la capacità attuale di descrizione matematica dei fenomeni nell’ambito di applicazione di un Livello 2 di Analisi di Rischio e forniscono degli output in genere estremamente conservativi.

“Laddove l’applicazione di tali equazioni determini un valore di rischio non accettabile, dovranno essere eventualmente previste campagne di indagini (misure di soil-gas, campionamenti dell’aria) 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” [APAT, 2008 rev. 2].

BOZZA di procedura nel caso di intrusione dei vapori nei luoghi di lavoro



Valori limite di esposizione professionale (VL)

Attualmente in Italia, nell'Allegato XXXVIII (riferito genericamente agli agenti chimici) e nell'Allegato XLIII (riferito specificatamente agli agenti cancerogeni e mutageni) al D.Lgs. 81/2008 sono riportati i valori limite di esposizione professionale rispettivamente per 95 e 3 agenti chimici. E' possibile osservare che delle 97 sostanze elencate nel D.Lgs. 152/06 solo 22 sono normate dal D.Lgs. 81/2008.

A livello europeo, esistono numerose liste di valori limite, predisposte dai diversi Stati membri (Francia, Germania, Gran Bretagna, Olanda, Danimarca, Svezia), comunque per gli agenti non compresi negli allegati al D.Lgs. 81/2008 in genere si può fare riferimento ai TLVs dell'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists). Tali valori sono riportati come riferimento anche nei Contratti Collettivi di Lavoro.

Valori limite di esposizione professionale (VL)

Sono previste tre categorie di TLV [AIDII, 2006]:

Valore limite di soglia – media ponderata nel tempo (TLV-TWA): concentrazione media ponderata nel tempo su una giornata lavorativa convenzionale di otto ore e su 40 ore lavorative settimanali, alla quale si ritiene che quasi tutti i lavoratori possono essere ripetutamente esposti, giorno dopo giorno, per una vita lavorativa, senza effetti negativi.

• Valore limite di soglia – limite per breve tempo di esposizione (TLV-STEL): concentrazione TWA di 15 minuti che non deve essere superata in qualsiasi momento durante la giornata lavorativa, anche se il TWA sulle otto ore non supera il valore TVL-TWA.

• Valore limite di soglia – Ceiling (TLV-C): concentrazione che non deve essere superata durante qualsiasi momento della esposizione lavorativa.

Per la maggior parte delle sostanze assume rilevanza solo il TWA, con il relativo STEL (se esistente). Per alcune sostanze (ad es. i gas irritanti) è applicabile soltanto il TLV-Ceiling. Se un qualsiasi di questi TLV è superato, si presume esista un rischio potenziale.

Valori limite di esposizione professionale (VL)

Un aspetto di indubbia importanza è quello relativo alla contemporanea presenza di più inquinanti.

A tal riguardo, ACGIH propone che, in assenza di una dimostrazione contraria, gli effetti dei singoli inquinanti devono essere considerati additivi. In particolare, nel caso in cui due o più sostanze nocive, presenti contemporaneamente, provocano gli stessi effetti sulla salute o agiscono sullo stesso organo o sistema dell'organismo, allora bisogna prendere in considerazione gli effetti combinati, piuttosto che quelli dei singoli componenti.

A seguito di tali considerazioni, l'ACGIH propone l'applicazione della nota formula per le miscele:

$$\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + \dots + \frac{C_n}{T_n} \leq 1$$

dove C_n rappresenta la concentrazione dell' n -esima sostanza rilevata nell'aria e T_n il valore limite corrispondente. Se la somma delle frazioni supera l'unità, allora il limite per la miscela deve essere considerato superato.

Esempio di confronto tra CSR e VL

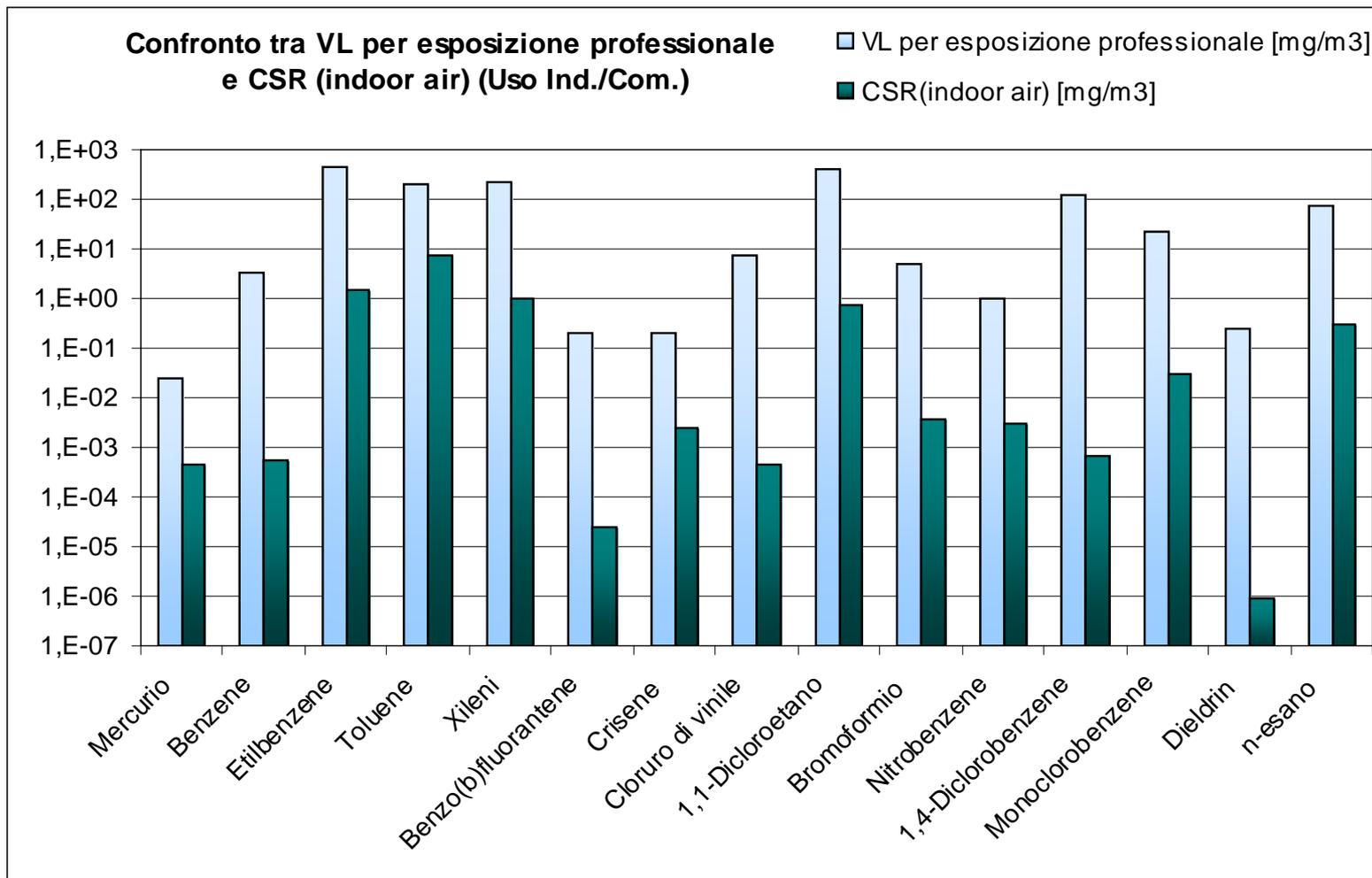
Elenco delle specie chimiche oggetto del confronto e relativi VL

SPECIE CHIMICA	Numero CAS	Valori limite di esposizione professionale [mg/mc] (1)	
Composti Inorganici			
Mercurio (come Hg)	7439-97-6	0,025	TLV-TWA
Aromatici			
Benzene (Benzolo)	71-43-2	3,25	D.Lgs. 81/2008
Etilbenzene	100-41-4	442	D.Lgs. 81/2008
Toluene (Toluolo)	108-88-3	192	D.Lgs. 81/2008
Xileni	1330-20-7	221	D.Lgs. 81/2008
Aromatici policiclici			
Benzo(b)fluorantene	205-99-2	0,2	TLV-TWA (2)
Crisene	218-01-9	0,2	TLV-TWA (2)
Alifatici clorurati			
Cloruro di vinile (Cloroetilene)	75-01-4	7,77	D.Lgs. 81/2008
1,1-Dicloroetano (Cloruro di etilidene)	75-34-3	412	D.Lgs. 81/2008
Alifatici alogenati cancerogeni			
Tribromometano (bromoformio)	75-25-2	5,2	TLV-TWA
Nitrobenzeni			
Nitrobenzene	98-95-3	1	D.Lgs. 81/2008
Clorobenzeni			
1,4-Diclorobenzene (p-Diclorobenzene)	106-46-7	122	D.Lgs. 81/2008
Monoclorobenzene	108-90-7	23	D.Lgs. 81/2008
Fitofarmaci			
Dieldrin	60-57-1	0,25	TLV-TWA
Idrocarburi			
n-esano	110-54-3	72	D.Lgs. 81/2008

(1) Misurato e calcolato rispetto ad un periodo di riferimento di 8 ore, come media ponderata.

(2) Idrocarburi policiclici aromatici adsorbiti su particolato (PPAH) - Catrame e pece di carbone prc

Esempio di confronto tra CSR e VL



Appendice R [Documento APAT rev. 2 – 2008]

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA INSATURA

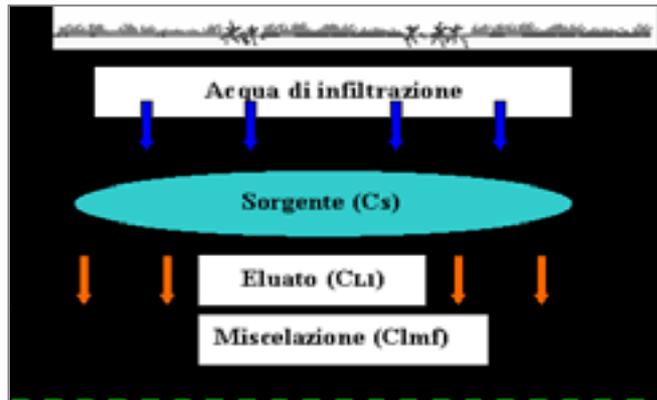
- **Obiettivi :**

- **1.** Verificare la conservatività degli output ottenuti con l'applicazione del modello analitico rispetto a quelli ottenuti a mezzo di modelli numerici.
- **2.** Verificare la necessità di considerare il coefficiente di attenuazione del suolo SAM nell'applicazione del modello analitico.

- **Modelli utilizzati per il confronto:**

- “modello analitico” → modello proposto da doc. ISPRA (ex-APAT)
- “modello numerico” → software Chemflo ver. 2005
software VS2DTI ver. 1.2.

Modello analitico - LF

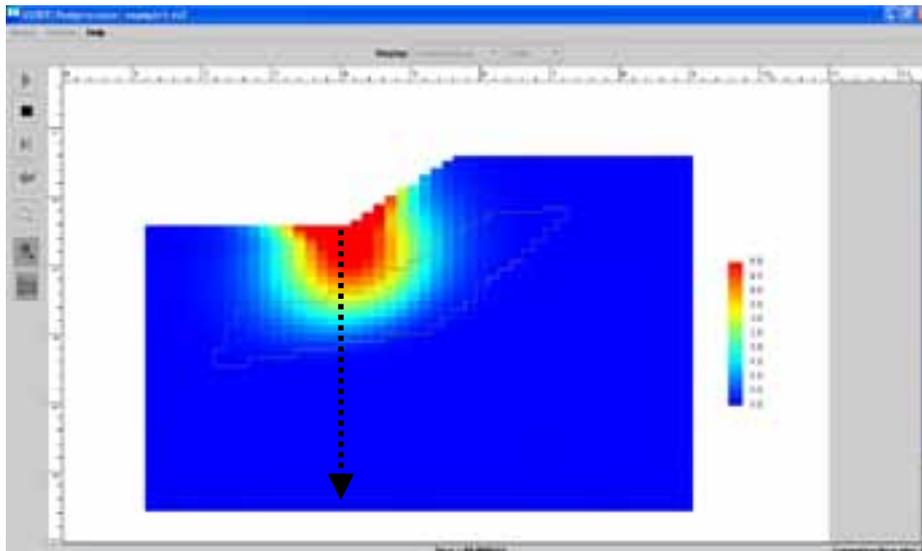


Consente di stimare l'entità dell'attenuazione subita nel trasporto dalla sorgente al piano di falda per:

Coefficiente di ripartizione suolo-acqua
Soil Attenuation Model

§ **Infiltrazione nello strato insaturo di suolo;**
Fattore di diluizione
 § **Diluizione nell'acquifero.**

Modello numerico - VS2DTI



Meccanismi di trasporto

- Dispersione
- Assorbimento
- Scambio ionico
- Advezione
- Decadimento del primo ordine

Output Forniti

- Contenuto d'umidità
- Concentrazione soluto

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA INSATURA

- **Modello concettuale utilizzato** →
- **Inquinanti selezionati per confronto** ↓

Elementi del modello concettuale	
Geometria del sito	[APAT, 2005] Livello 1
Geometria della sorgente	[APAT, 2005] Livello 1
Proprietà suolo	[APAT, 2005] Livello 1
Tipo di inquinanti	[APAT, 2005] Appendice B
CRS	Teoriche

Inquinanti	S	P _v	H	K _{oc} /K _d	logk _{oc}	D _a	D _w
Benzene	1,75E+03	9,53E+01	2,28E-01	6,20E+01(*)	2,13E+00	8,80E-02	9,80E-06
1,1,2,Tetracloroetano	2,97E+03	5,95E+00	1,41E-02	7,90E+01(*)	2,39E+00	7,10E-02	7,90E-06
Benzo(a)pirene	1,62E-03	5,68E-04	4,63E-05	9,69E+05(*)	6,11E+00	4,30E-02	9,00E-06
1,4Diclorobenzene	7,38E+01	1,06E+00	9,96E-02	6,16E+02(*)	3,42E+00	6,90E-02	7,90E-06
Arsenico	4,41E+05	1,01E+04	-	2,9E+01(**)	-	-	-

(*)Coefficiente d'adsorbimento del carbonio organico k_{oc} da cui si ricava $k_d = f_{oc} * k_{oc}$.

(**)Coefficiente di partizione suolo-acqua k_d a pH 7

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA INSATURA

- **ESEMPIO : Benzene (contaminazione di spessore = 1 m)**

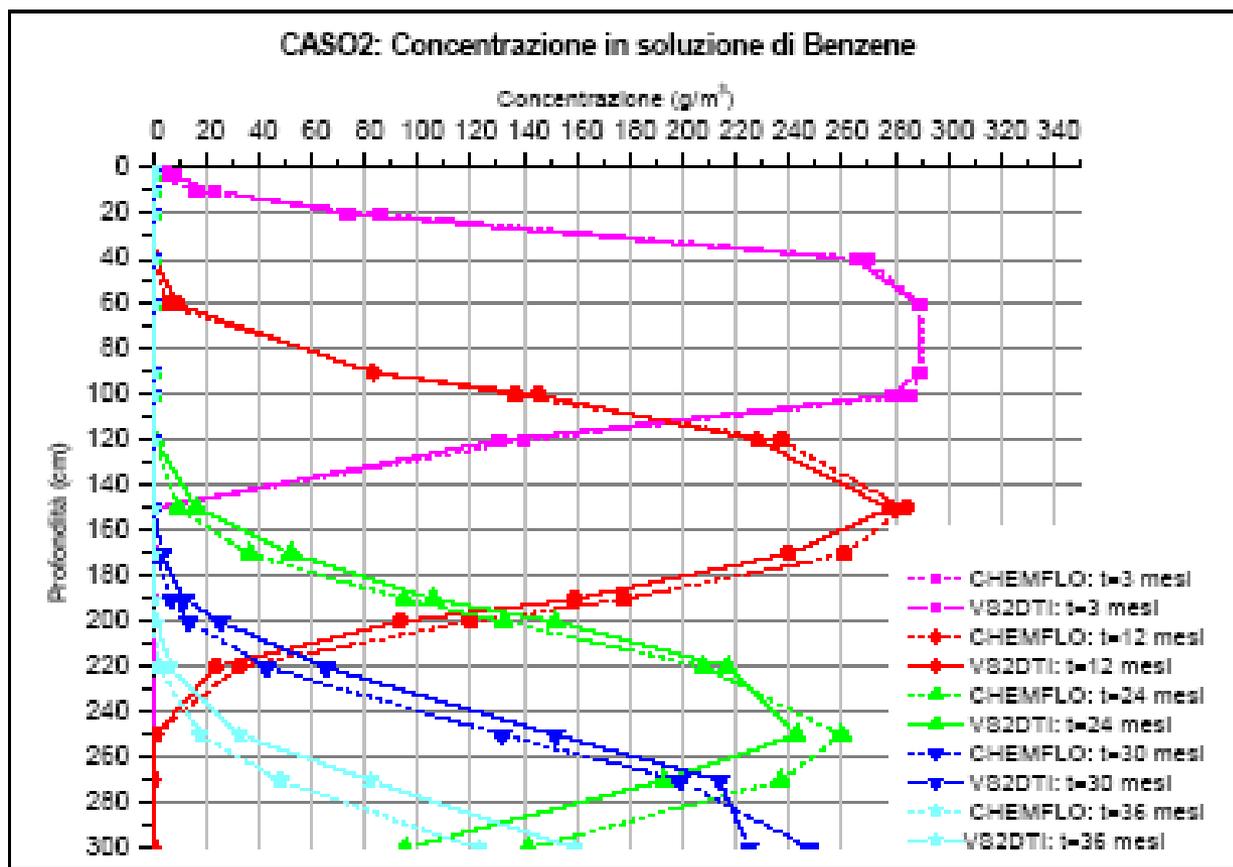


Figura R.3.4: Andamento della concentrazione di Benzene a $x=300$ cm

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA INSATURA

- **ESEMPIO : Benzene (contaminazione di spessore = 1 m)**

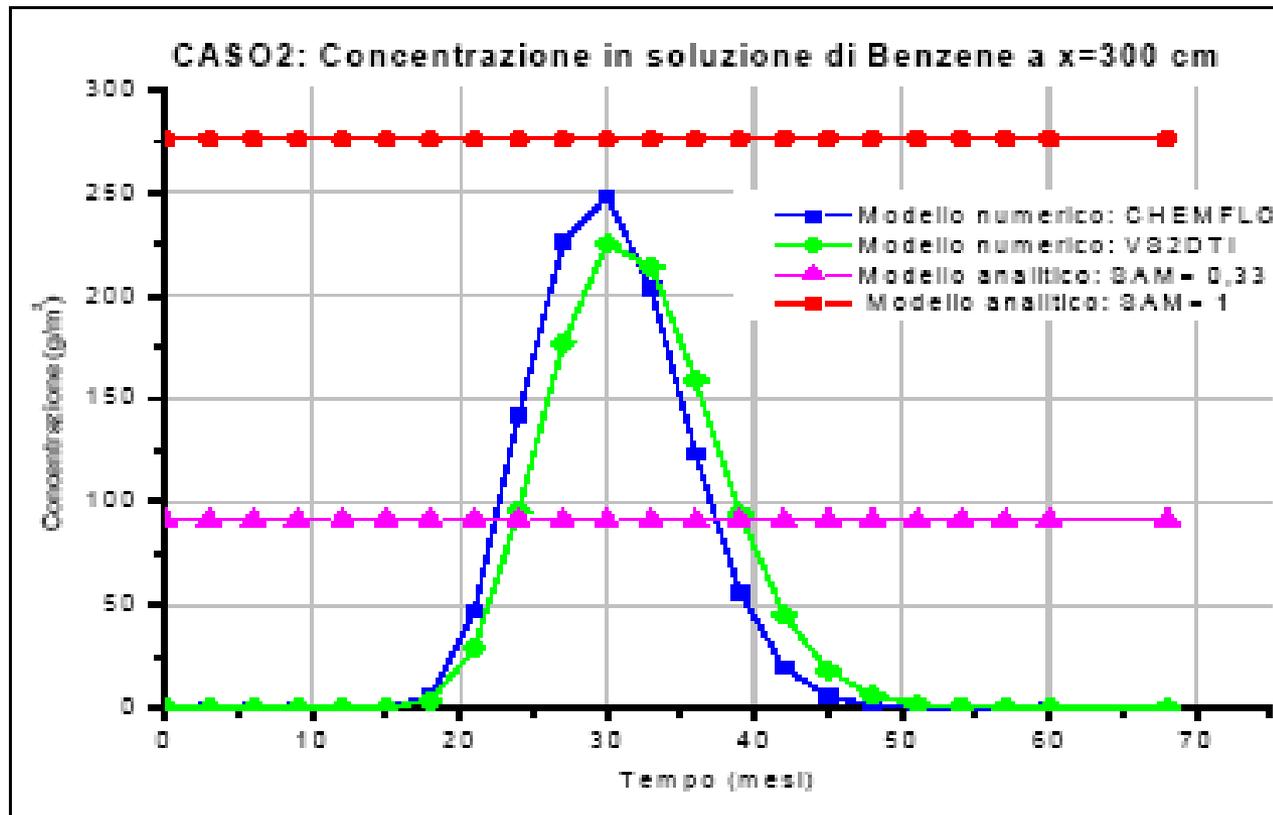


Figura R.3.5: Confronto modello analitico e numerico

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA INSATURA

• ESEMPIO : Benzene

CASO 1 : contaminazione di spessore = 0,03 m

CASO 2 : contaminazione di spessore = 1,00 m

CASO 3 : contaminazione di spessore = 2,00 m

ANALISI DI RISCHIO					
	Rischio analitico senza SAM	Rischio analitico con SAM	Rischio numerico: CHEMFLO	Rischio numerico: VS2DTI	BP-RISC
Caso 1	1,38E-02	1,35E-04	7,82E-05	2,45E-05	---
Caso 2		4,48E-03	4,40E-04	4,37E-04	9,7E-04
Caso 3		9,09E-03	8,79E-04	8,75E-04	5E-03

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA INSATURA

• ESEMPIO : Benzene

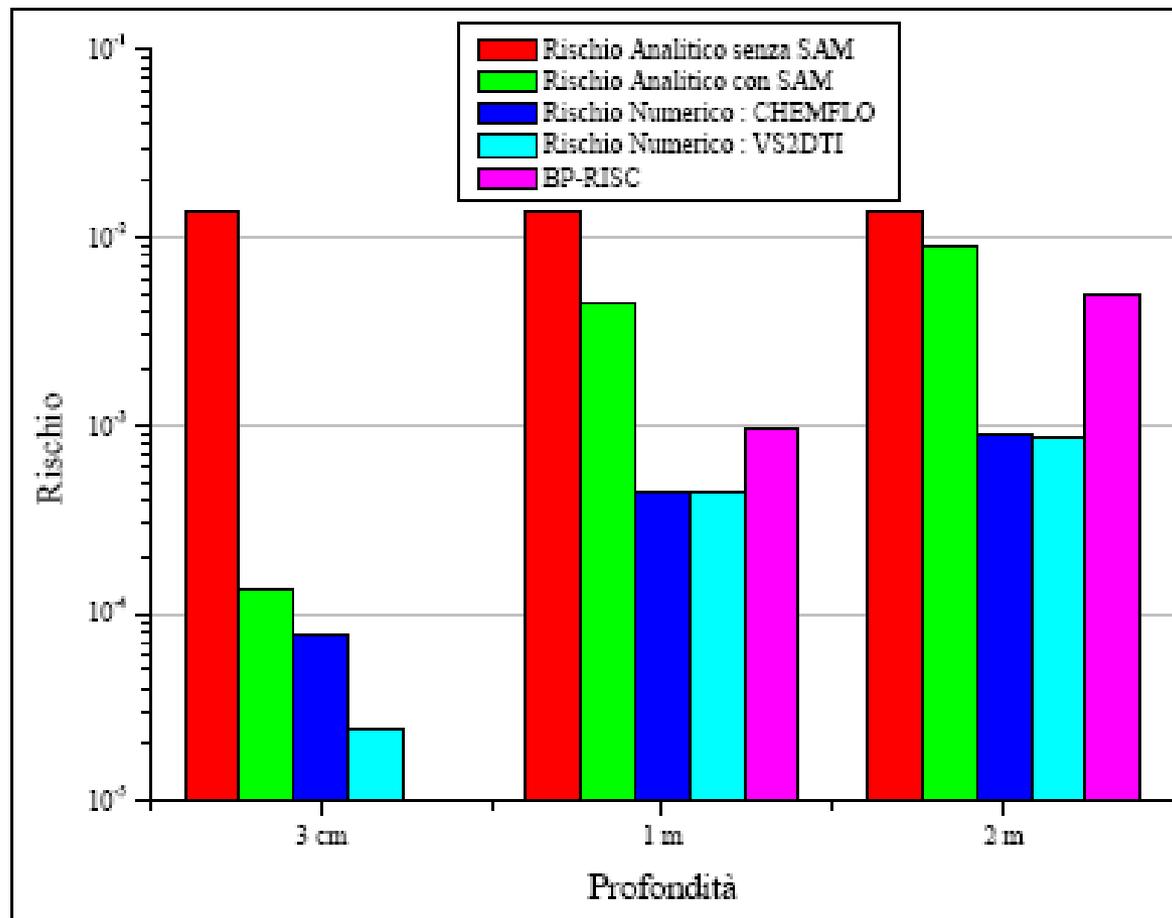


Figura R.3.28: Rischio Sanitario associato ad ingestione d'acqua di falda - Benzene



MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA INSATURA

Conclusioni :

- **Il modello analitico risulta più conservativo del numerico.**
- **Se consideriamo un modello analitico è opportuno prevedere l'uso del SAM.**

Appendice T [Documento APAT rev. 2 – 2008]

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN FALDA

- **Obiettivi :**
 - confronto tra di modelli analitici e numerici per la simulazione del fenomeno di trasporto di un contaminante in falda.
 - **Modelli utilizzati per il confronto:**
 - “modello analitico” → modello di “Domenico”
 - “modello numerico” → software FeFlow 5.3x
- I due modelli, analitico e numerico, permettono di stimare la concentrazione dell'inquinante al punto di esposizione (punto di conformità) nota la concentrazione dello stesso in corrispondenza della sorgente di contaminazione.

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN FALDA

L'Appendice T è suddivisa in tre parti:

- 1) Descrizione delle principali caratteristiche dei modelli analitici e numerici utilizzati**
- 2) Sintesi dei risultati ottenuti dall'applicazione dei suddetti modelli, ponendo in evidenza le differenze riscontrate tra approccio analitico e numerico**
- 3) Stima del rischio sanitario associato ad ingestione d'acqua di falda**

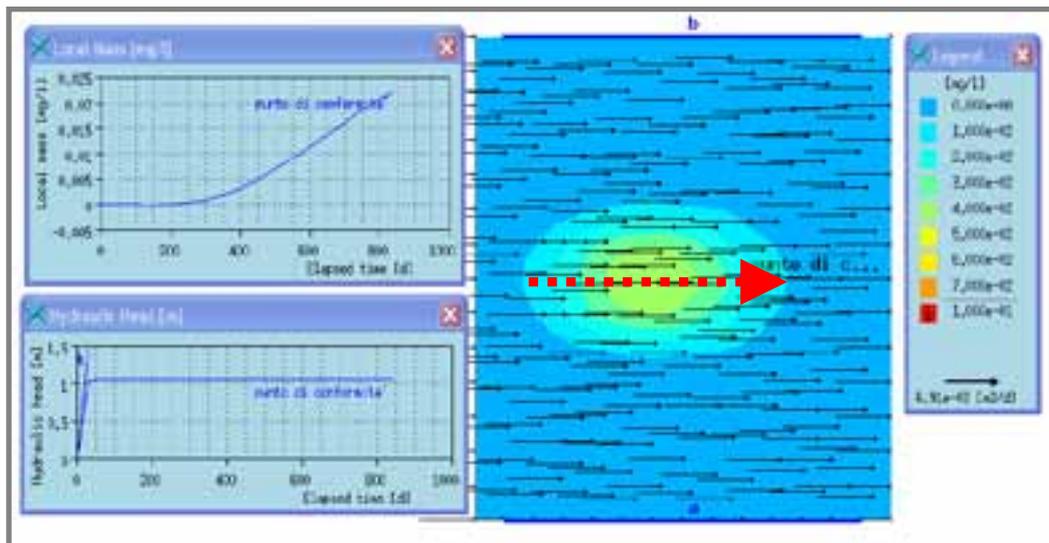
Modello Analitico – Equazione di Domenico

DAF 1: *Dispersione in tutte le direzioni*

DAF 2: *Dispersione longitudinale e trasversale in tutte le direzioni e verticale lungo l'asse positivo di z*

DAF 3: *Dispersione longitudinale e trasversale*

Modello numerico - FEFLOW



Meccanismi di trasporto

- Dispersione
- Diffusione
- Adsorbimento
- Advezione
- Decadimento del primo ordine

Output Forniti

- Carico Idraulico
- Calore
- Velocità
- Concentrazione dei contaminanti

MODELLI ANALITICI E NUMERICI PER IL TRASPORTO DEI CONTAMINANTI IN ZONA SATURA

- **Modello concettuale utilizzato** →

Elementi del modello concettuale	
Geometria del sito	[APAT, 2006] Livello 1
Geometria della sorgente	[APAT, 2006] Livello 1
Proprietà suolo	[APAT, 2006] Livello 1
CRS	Teoriche

- **Inquinante selezionato per confronto** ↓

Tutte le simulazioni sono state effettuate considerando come contaminante il Benzene ad una concentrazione in falda pari a 0,1mg/L ossia un valore superiore di 100 volte alle CSC per il Benzene (D.Lgs 152/06).

Tabella T.4: Caratteristiche chimico fisiche del Benzene

Inquinanti	S [mg/L]	P _v [mmHg]	H [Adim.]	K _{oc} /K _d [mL/g]	logk _{oc} [Adim.]	D _a [cm ² /sec]	D _w [cm ² /sec]
Benzene	1,75E+03	9,53E+01	2,28E-01	6,20E+01	2,13E+00	8,80E-02	9,80E-06

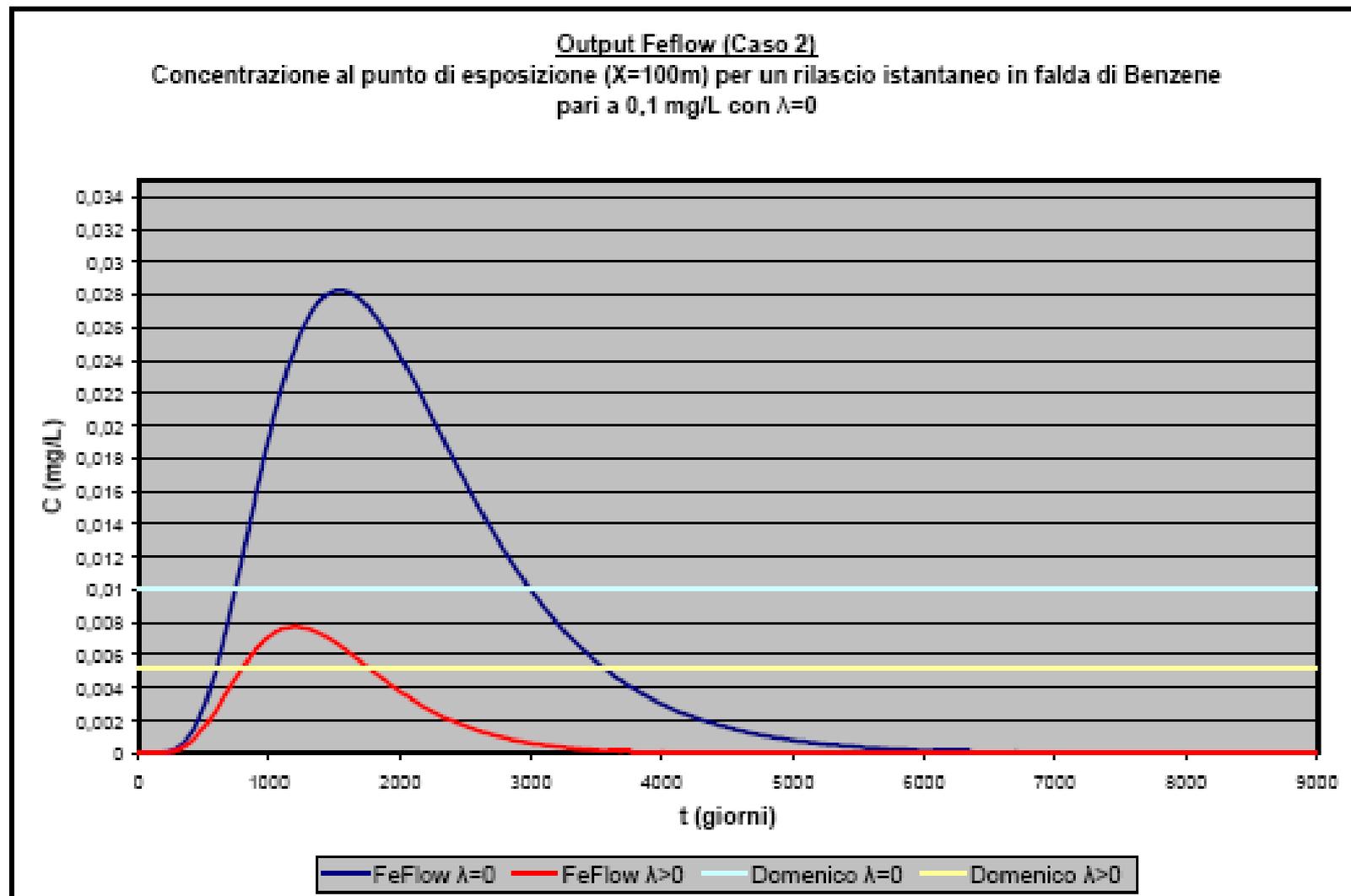
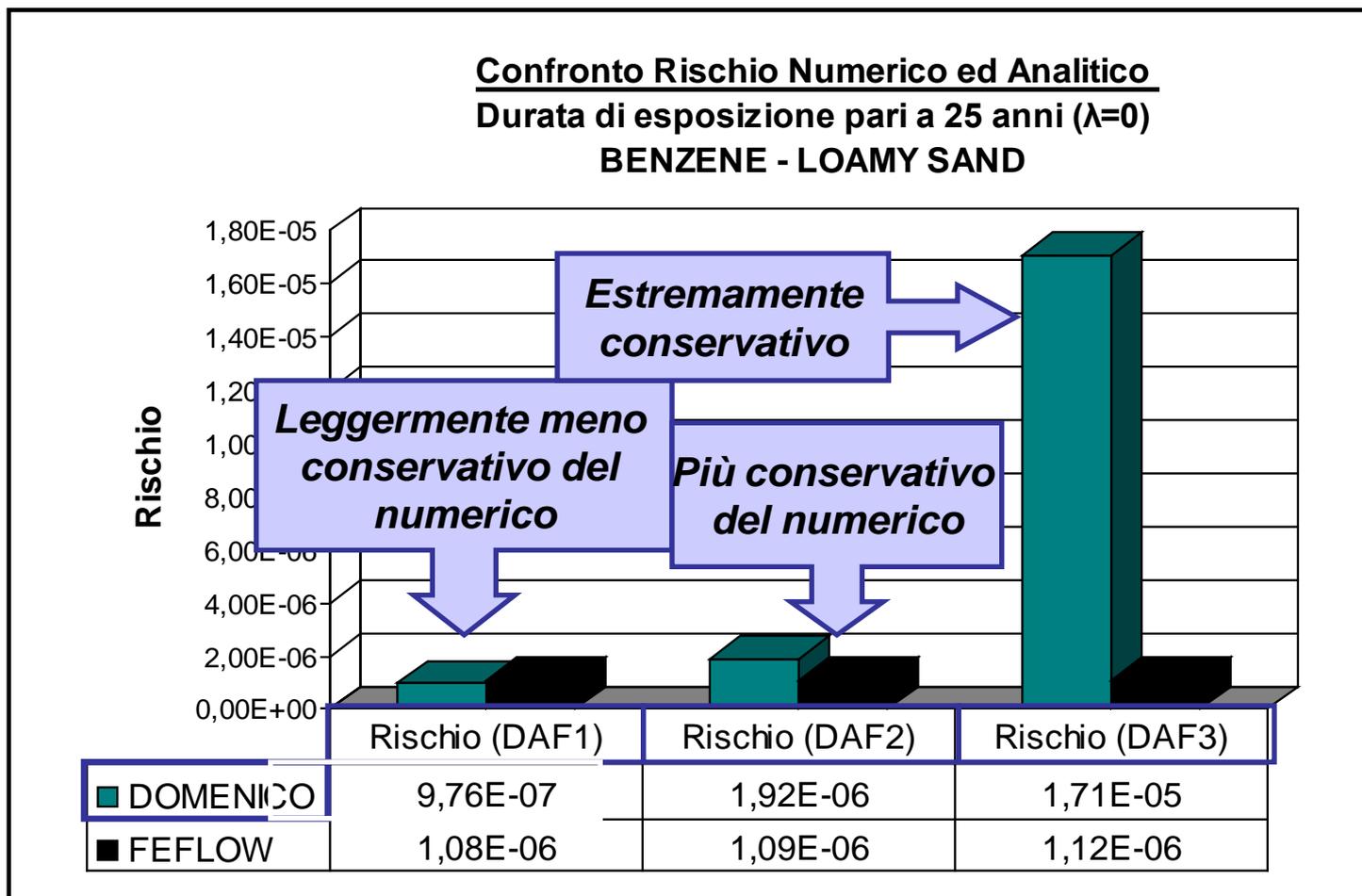


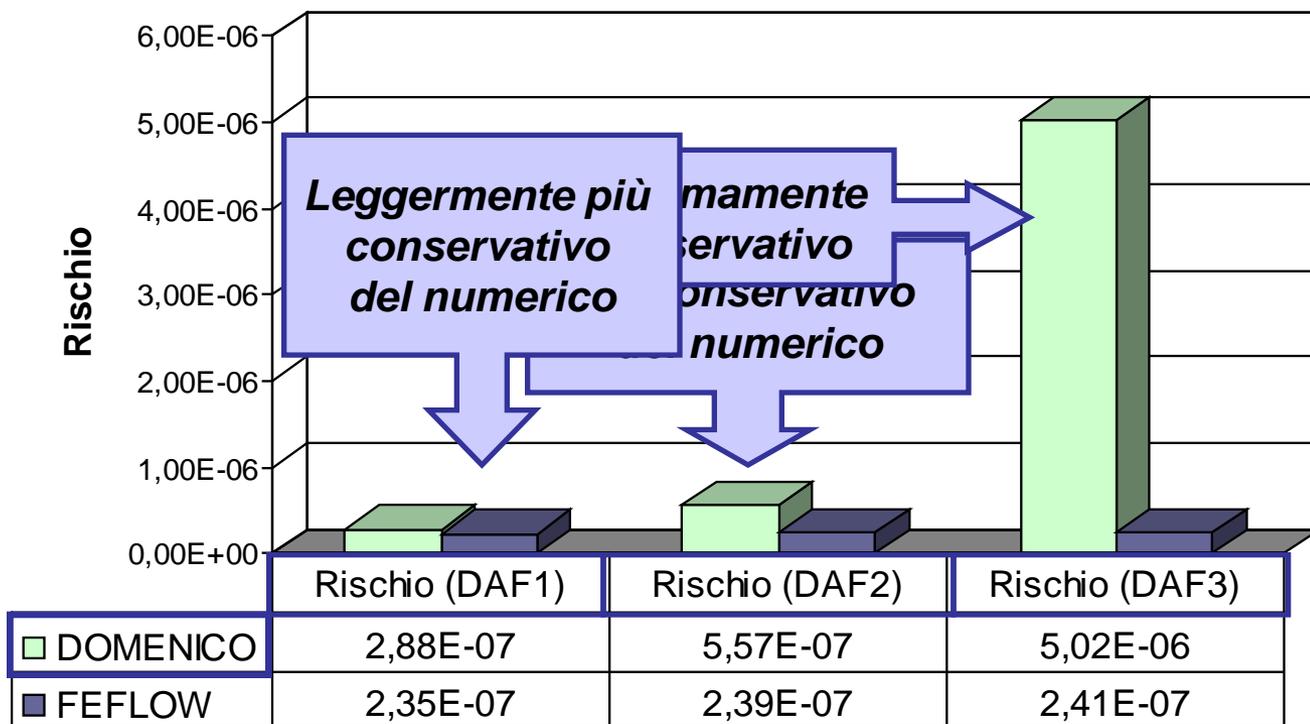
Figura T.7: Confronto output Domenico e FeFlow con dispersione orizzontale e longitudinale in tutte le direzioni e dispersione verticale solo nel verso positivo di z (DAF2)

In assenza di biodegradazione:



Considerando la biodegradazione:

Confronto Rischio Numerico ed Analitico
 Durata di esposizione pari a 25 anni ($\lambda > 0$)
BENZENE - LOAMY SAND



Conclusioni :

- 1) Nel caso di assenza di biodegradazione ($\lambda = 0$):
 - a) (DAF 1) \supset Rischio (numerico) leggermente più conservativo del Rischio (analitico).
 - b) (DAF 2) \supset Rischio (analitico) più conservativo del Rischio (numerico)
 - c) (DAF 3) \supset Rischio (analitico) estremamente più conservativo del Rischio (numerico)
- 2) Nel caso di biodegradazione ($\lambda > 0$) si ottengono dei risultati meno conservativi: Rischio ($\lambda > 0$) è di un ordine di grandezza inferiore a Rischio ($\lambda = 0$).