



# FATTORI DI TRASPORTO

**Simona Berardi**

ISPESL

## Concentrazione nel Punto di Esposizione

RISCHIO = **ESPOSIZIONE** x TOSSICITA'

$$E = C_{POE} \cdot EM$$

$E$  = Esposizione [mg/kg - giorno]; assunzione cronica giornaliera del contaminante

$EM$  = Portata effettiva di esposizione, es. [L (kg giorno)<sup>-1</sup>]; quantità di suolo ingerita o di aria inalata o di acqua contaminata bevuta al giorno per unità di peso corporeo

$C_{poe}$  = Concentrazione del contaminante nel suolo, nell'acqua, nell'aria o negli alimenti calcolata in corrispondenza del punto di esposizione, es. [mg/L] o [mg/kg-suolo]

## Concentrazione nel Punto di Esposizione

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

$C_{poe}$  = concentrazione al punto di esposizione

$C_s$  = concentrazione in sorgente

$FT$  = fattore di trasporto

## Vie di migrazione: criteri per la stima dei parametri

Per il calcolo dei fattori di trasporto (FT) e, quindi, per stimare la concentrazione della specie chimica in corrispondenza del bersaglio ( $C_{poe}$ ), nota quella alla sorgente ( $C_s$ ), è indispensabile determinare le caratteristiche fisiche dei comparti ambientali coinvolti:

- suolo insaturo
- suolo saturo
- aria outdoor
- aria indoor
- **acqua superficiale (eliminata nella rev. 2 del doc. ISPRA)**

Per un'analisi di livello 1, in genere, vengono utilizzati “valori sito-generici” (“valori di default”), ossia valori indipendenti dalle caratteristiche specifiche del sito in esame. Questi sono definiti sulla base di assunzioni estremamente conservative.

Per un livello 2 e 3 di analisi, si utilizzano “valori sito-specifici”, ossia valori strettamente dipendenti dalle caratteristiche del sito potenzialmente contaminato (**vedi MODULO I del corso**).

## Parametri del terreno in zona insatura

SIMBOLO	PARAMETRO	UNITA' DI MISURA	Valore di default doc. APAT (tab. 5.2)	Necessità di misure sito-specifiche
<b><i>Caratteristiche fisiche del terreno in zona insatura</i></b>				
$\gamma_s$	Densità del suolo	g/cm <sup>3</sup>	1,7	<b>SI'</b>
$q_T$	Porosità totale del terreno in zona insatura	adim.	0,41	
$q_e$	Porosità efficace del terreno in zona satura	adim.	0,353	
$q_w$	Contenuto volumetrico di acqua	adim.	0,103	
$q_a$	Contenuto volumetrico di aria	adim.	0,25	
$q_{wcap}$	Contenuto volumetrico di acqua nelle frangia capillare	adim.	0,318	
$q_{acap}$	Contenuto volumetrico di aria nelle frangia capillare	adim.	0,035	
$f_{oc}$	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo	g-C/g-suolo	0,01	<b>SI'</b>
$l_{ef}$	Infiltrazione efficace	cm/anno	30	<b>SI'</b>
pH	pH del suolo insaturo	adim.	6,8	<b>SI'</b>

## Parametri del terreno in zona satura

SIMBOLO	PARAMETRO	UNITA' DI MISURA	Valore di default doc. APAT (tab. 5.2)	Necessità di misure sito-specifiche
<b>Caratteristiche fisiche del terreno in zona satura</b>				
$v_{gw}$	Velocità di Darcy	cm/anno	2500	SI'
$K_{sat}$	Conducibilità idraulica del terreno saturo	cm/anno	---	SI'
$i$	Gradiente idraulico	adim.	---	SI'
$v_e$	Velocità media effettiva nella falda	cm/anno	7082	SI'
$q_T$	Porosità totale del terreno in zona satura	adim.	0,41	
$q_e$	Porosità efficace del terreno in zona satura	adim.	0,353	
$f_{oc}$	Frazione di carbonio organico nel suolo saturo	g-C/g-suolo	0,001	SI'
$a_x$	Dispersività longitudinale	cm	10	
$a_y$	Dispersività trasversale	cm	3,3	
$a_z$	Dispersività verticale	cm	0,5	
$pH$	pH del suolo saturo	adim.	6,8	SI'
$l$	Coefficiente di decadimento del primo ordine	1/giorno	0	SI'

## Parametri degli ambienti aperti

SIMBOLO	PARAMETRO	UNITA' DI MISURA	Valore di default doc. APAT (tab. 5.2)	Necessità di misure sito-specifiche
<b>Caratteristiche ambienti outdoor</b>				
$d_{air}$	Altezza della zona di miscelazione	cm	200	
$W'$	Estensione della sorgente di contaminazione nella direzione principale del vento	cm	4500	<b>SI'</b>
$S_w'$	Estensione della sorgente di contaminazione nella direzione ortogonale a quella principale del vento	cm	4500	<b>SI'</b>
$A'$	Area della sorgente (rispetto alla direzione prevalente del vento)	cm <sup>2</sup>	20250000	<b>SI'</b>
$U_{air}$	Velocità del vento	cm/s	225	<b>SI'</b>
$s_y$	Coefficiente di dispersione trasversale	cm	---	
$s_z$	Coefficiente di dispersione verticale	cm	---	
$t$	Tempo medio di durata del flusso di vapore (RES.)	anno	30	
$t$	Tempo medio di durata del flusso di vapore (IND.)	anno	25	
$P_e$	Portata di particolato per unità di superficie	g/(cm <sup>2</sup> -s)	6,90E-14	

## Parametri degli ambienti confinati

SIMBOLO	PARAMETRO	UNITA' DI MISURA	Valore di default doc. APAT (tab. 5.2)	Necessità di misure sito-specifiche
<b>Caratteristiche ambienti indoor (1/2)</b>				
$A_b$	Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	cm <sup>2</sup>	700000	SI'
$L_{crack}$	Spessore delle fondazioni/muri	cm	15	SI'
$L_b$	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione (RES.)	cm	200	SI'
$L_b$	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione (IND.)	cm	300	SI'
$h$	Frazione areale di fratture	adim.	0,01	
$q_{wcrack}$	Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture	adim.	0,12	
$q_{acrack}$	Contenuto volumetrico di aria nelle fratture	adim.	0,26	
ER	Tasso di ricambio di aria indoor (RES.)	1/s	0,00014	

## Parametri degli ambienti confinati

<b>Caratteristiche ambienti indoor (2/2)</b>				
<b>ER</b>	Tasso di ricambio di aria indoor (IND.)	1/s	0,00023	
<b>L<sub>T</sub></b>	Distanza tra il top della sorgente nel suolo insaturo (in falda) e la base delle fondazioni	cm	0 (285)	<b>SI'</b>
<b>Z<sub>crack</sub></b>	Profondità delle fondazioni	cm	15	<b>SI'</b>
<b>K<sub>v</sub></b>	Permeabilità del suolo al flusso di vapore	cm <sup>2</sup>	1,00E-08	
<b>D<sub>p</sub></b>	Differenza di pressione tra indoor e outdoor	g/(cm*s <sup>2</sup> )	0	
<b>m<sub>air</sub></b>	Viscosità del vapore	g/(cm*s)	1,81E-04	
<b>t</b>	Tempo medio di durata del flusso di vapore (IND.)	anni	25	
<b>t</b>	Tempo medio di durata del flusso di vapore (RES.)	anni	30	
<b>F<sub>i</sub></b>	Frazione di polvere indoor	adim.	1	

## Parametri degli ambienti confinati

### Superficie delle fondazioni e delle pareti coinvolte dall'infiltrazione $A_b$ [cm<sup>2</sup>]

Rappresenta la superficie dell'edificio complessivamente interessata dal fenomeno di infiltrazione indoor dei contaminanti.

Nel caso di edificio e/o locale fuori terra, questa coincide con l'area delle fondazioni, ossia l'area della base della struttura:

$$A_b = a' b$$

Nel caso di locali interrati o seminterrati, tale superficie sarà data dalla somma dell'area della base dell'edificio più l'area delle pareti interrate:

$$A_b = (a' b) + 2(a' c) + 2(b' c)$$

I simboli  $a$  e  $b$  indicano rispettivamente la larghezza e la lunghezza dell'edificio, mentre  $c$  indica l'altezza della parete interrata

### (3.2.5) Parametri degli ambienti confinati

#### Rapporto tra volume indoor e area di infiltrazione $L_B$ [cm]

Nel caso di edifici fuori terra il rapporto tra volume e area dell'edificio coincide con l'altezza  $h$  dell'edificio stesso:

$$L_b = \frac{V_b}{A_b} = h$$

Nel caso di locali interrati o seminterrati, tale rapporto risulta inferiore all'altezza dell'edificio, poiché nel calcolo di  $A_b$  si tiene conto anche dell'area delle pareti interrate soggette a infiltrazione:

$$L_b = \frac{V_b}{A_b} < h$$

## Parametri degli ambienti confinati

### Frazione areale di fratture $h$ [adim.]

La frazione areale di fratture rappresenta il rapporto tra l'area delle fratture nella superficie di infiltrazione e l'area totale della superficie:

$$h = \frac{A_{crack}}{A_b}$$

Può variare in un range compreso tra 0 (superficie priva di fratture) e 1 (superficie priva di pavimentazione).

Il valore indicato come default all'interno del presente documento è 0,01, in conformità a quanto riportato negli standard ASTM e nel database dei software ROME, RBCA Toolkit, GIUDITTA e RISC.

Si osserva che, qualora l'Ente di Controllo preposto alla valutazione dell'analisi di rischio ritenga opportuno, tale valore, nell'applicazione di un Livello 2 di analisi, potrebbe essere modificato sulla base delle risultanze di indagini specifiche condotte sul sito oggetto di analisi e/o di stime indirette effettuate su un numero significativo di punti secondo quanto indicato nel documento EPA "User's Guide for Evaluating Subsurface Intrusion into Buildings" (EPA, 2003).

## Vie di migrazione: Criteri di stima dei fattori di trasporto



I fattori di trasporto intervengono nella valutazione delle esposizioni indirette ovvero laddove eventuali contaminanti possono raggiungere i bersagli solo attraverso la migrazione dal comparto ambientale sorgente della contaminazione.

Nella **analisi di livello 2**, le relazioni per il **calcolo** dei fattori di trasporto sono di tipo prettamente **analitico**. Si utilizzano invece modelli numerici nel caso in cui venga condotto uno studio di livello 3.

## Vie di migrazione: Criteri di stima dei fattori di trasporto

Si elencano di seguito i fattori di trasporto che intervengono nella procedura di analisi di rischio di livello 2:

**LF** = fattore di lisciviazione in falda da suolo superficiale e/o profondo;

**DAF** = fattore di attenuazione in falda;

**VF<sub>ss</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale;

**VF<sub>samb</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo;

**VF<sub>wamb</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda;

**ADF** = fattore di dispersione in aria outdoor;

**PEF** = emissione di particolato outdoor da suolo superficiale;

**PEF<sub>in</sub>** = emissione di particolato indoor da suolo superficiale;

**VF<sub>sesp</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo superficiale e profondo;

**VF<sub>wesp</sub>** = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda;

*(RDF = fattore di migrazione dall'acqua di falda all'acqua superficiale – ELIMINATO in rev. 2 doc. ISPRA).*

## FATTORI DI TRASPORTO: Standard di riferimento

**ASTM E-1739 (USA 1995)**  
"Standard guide for Risk Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites-RBCA" .

**EPA (USA 1994)**  
"Technical Background Document for Soil Screening Guidance"

**ASTM PS-104 (USA 1998)**  
"Standard provisional guide for Risk-Based Corrective Action"

**EPA (USA 1996)**  
"Soil Screening Guidance: Fact Sheet".

**UNICHIM**  
"Manuale n. 196/1 "Suoli e falde contaminati, analisi di rischio sito-specifica, criteri e parametri".

**CONCAWE**  
"Report 3/03: european oil industry guideline for risk based assessment of contaminated sites ".



## FATTORI DI TRASPORTO: Software di riferimento

**RBCA TOOLKIT ver. 2.0**  
**Groudwater seivice Inc.**  
**(USA 2008)**

**BP-RISK ver. 4.0**  
**BP Amoco Oil (UK 2001)**

**ROME ver. 2.1**  
Agenzia Nazionale per la Protezione  
Ambientale (IT 2002)

**GIUDITTA ver. 3.1**  
Provincia di Milano (IT 2006)

## **FATTORI DI TRASPORTO: Software di riferimento**

**Nelle Appendici A-G del documento ISPRA (ex-APAT) sono descritti, nel dettaglio, i criteri adottati e le analisi effettuate per la individuazione e la selezione delle suddette equazioni.**

La scelta dell'equazione da utilizzare per ciascun fattore di trasporto è stata effettuata tenendo conto di significatività, conservatività e applicabilità alla situazione italiana.

Appendice R: Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in zona insatura

Appendice T: Modelli analitici e numerici per il trasporto dei contaminanti in zona satura

## FATTORI DI TRASPORTO: Ipotesi di base

In generale, le principali assunzioni, su cui si basano le equazioni riportate nel documento APAT (2006), sono:

- La concentrazione degli inquinanti è uniformemente distribuita nel suolo ed è costante per tutto il periodo di esposizione.
- Terreno omogeneo, isotropo e incoerente (si escludono quindi i suolo porosi per fessurazione, i quali necessitano di modellistica specifica corrispondente ad un livello 3 di analisi).
- Non si considerano fenomeni di biodegradazione (ad eccezione del DAF) o meccanismi di decadimento/trasformazione delle sostanze inquinanti nel suolo, in soluzione nell'acqua o in fase vapore.

## FATTORE DI LISCIVIAZIONE IN FALDA (LF)

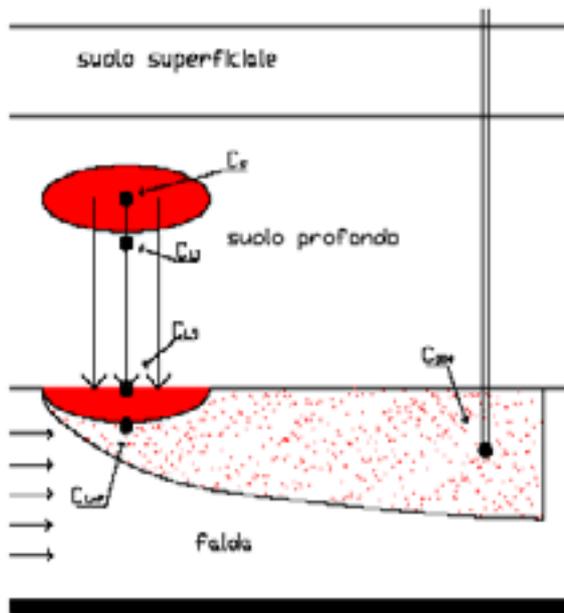


Fig. 4.2

Il fattore di lisciviazione consente di valutare l'attenuazione subita dalla concentrazione di contaminante dovuta al trasporto dalla sorgente di contaminazione, dal suolo profondo o superficiale al piano di falda.

Quindi, tale fattore rappresenta il rapporto tra la concentrazione nella sorgente ( $C_s$ ) e quella che si avrà nella falda ( $C_{Lmf}$ ):

**Il fattore di lisciviazione deve essere calcolato separatamente per i comparti suolo superficiale e suolo profondo.**

$$LF = \frac{C_{Lmf}}{C_s} = \frac{\frac{mg}{l \cdot H_2O}}{Kg - \text{suolo}} \quad LF = \frac{\rho_s}{(\theta_w + \rho_s k_s + H\theta_a) \cdot \left(1 + \frac{V_{EW} \cdot \delta_{EW}}{I_{ef} \cdot W}\right)} \cdot \frac{d_s}{L_F} = \frac{k_{ws} \cdot SAM}{LDF} = \frac{C_{L1}}{C_s} \cdot \frac{C'_{L1}}{C_{L1}} \cdot \frac{C_{Lmf}}{C'_{L1}}$$

## FATTORE DI LISCIVIAZIONE IN FALDA (LF)

### 1. Coefficiente di partizione suolo-acqua:

$$k_{sw} = \frac{C_{L1}}{C_s} = \frac{\hat{e} \text{ mg / L - } H_2O}{\hat{e} \text{ mg / kg - suolo}} \frac{\dot{U}}{\dot{U}} = \frac{r_s}{q_w + k_s r_s + Hq_a}$$

*tiene conto della partizione dell'inquinante tra acqua, aria e suolo*

### 2. Coefficiente di attenuazione del suolo (Soil Attenuation Model):

$$SAM = \frac{C'_{L1}}{C_{L1}} = [a \text{ dim}] = \frac{d_s}{L_F}$$

*tiene conto del percorso che l'inquinante fa per raggiungere il piano di falda*

### 3. Fattore di diluizione (Leachate Dilution Factor):

$$LDF = \frac{C'_{L1}}{C_{Lmf}} = [a \text{ dim}] = 1 + \frac{V_{gw} \times d_{gw}}{I_{ef} \times W}$$

*tiene conto della diluizione che il contaminante subisce, una volta raggiunto il piano di falda, nel passaggio tra terreno insaturo e terreno saturo*

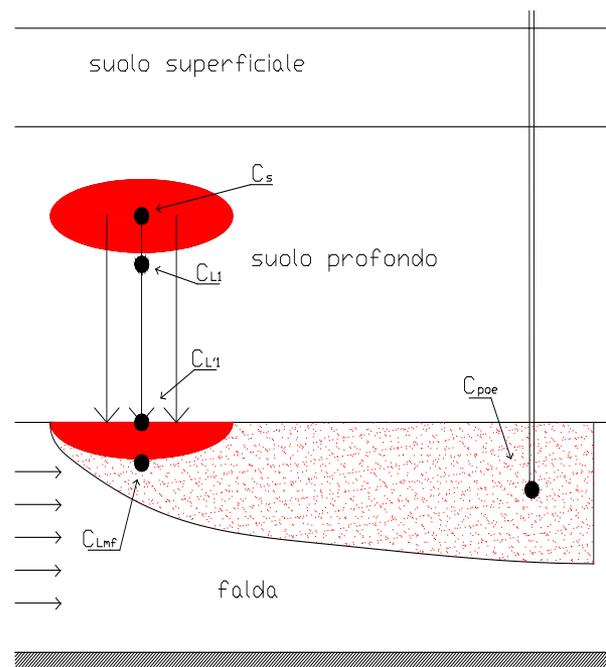


Fig. 4.2

$d_s$	Spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)
$L_F$	Soggiacenza della falda rispetto al top della sorgente

## FATTORE DI LISCIVIAZIONE IN FALDA (LF)

	ASTM E-1739-95	PS 104-98	UNICHIM n. 196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
$k_{sw}$	X	X	X		X	---
LDF	X	X	X		X	
SAM			X			
BDF			X			
TAF			X			

Il manuale Unichim n.196/1 introduce inoltre altri due fattori di attenuazione:

**BDF (BioDegradation Factor)**, che tiene conto dei fattori di biodegradazione che possono avvenire nel tragitto dell'inquinante nella zona insatura

**TAF (Time Averaging Factor)**, che per i **contaminanti cancerogeni** considera la concentrazione media per un particolare periodo di esposizione. Questo rimuove l'ipotesi di concentrazione stazionaria durante tutto il periodo di esposizione perché considera la diminuzione del rilascio del contaminante dalla sorgente nel tempo.

	RBCA Tool Kit ver. 2.0	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
$k_{sw}$	X	X	X	X
LDF	X	X	X	X
SAM	X			X
BDF				
TAF				

## FATTORE DI ATTENUAZIONE IN FALDA (DAF)

Il parametro DAF (Dilution Attenuation Factor) esprime il rapporto tra la concentrazione di un contaminante in corrispondenza della sorgente secondaria in falda  $C_{s(falda)}$  e la concentrazione al punto di esposizione  $C_{POE(falda)}$  situato a distanza  $x$  dalla sorgente nel verso di flusso:

$$DAF = \frac{C_{s(falda)} \left[ \frac{mg}{l - H_2O} \right]}{C_{POE(falda)} \left[ \frac{mg}{l - H_2O} \right]}$$

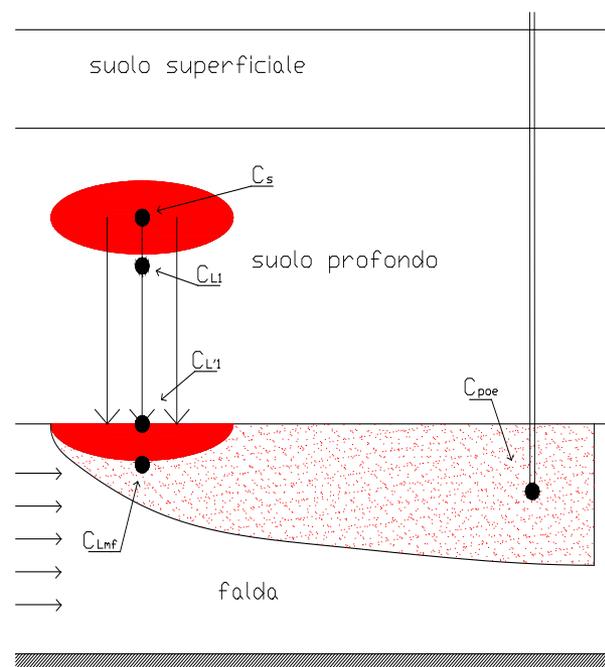
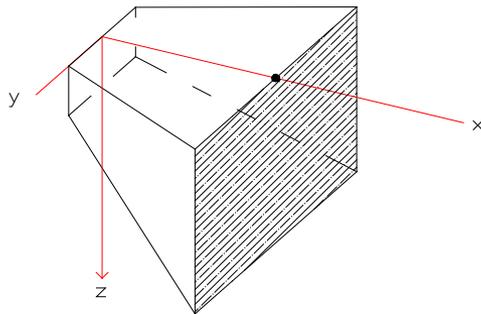


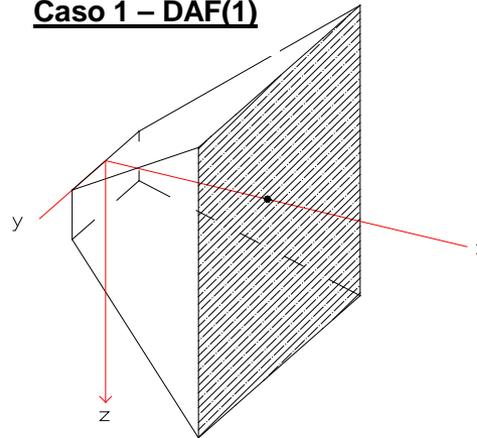
Fig. 4.2

## FATTORE DI ATTENUAZIONE IN FALDA (DAF)

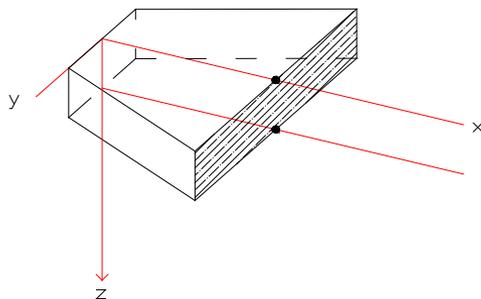
**Caso 2 – DAF(2)**



**Caso 1 – DAF(1)**



**Caso 3 – DAF(3)**



**Sorgente areale di inquinamento con concentrazione costante  $C_0$  e possibili geometrie di dispersione verticale: **Caso 2)** dispersione verticale solo verso il basso; **Caso 1)** dispersione verticale verso il basso e verso l'alto; **Caso 3)** nessuna dispersione verticale (nella zona di miscelazione, il contaminante ha già raggiunto la base dell'acquifero)**

## FATTORE DI ATTENUAZIONE IN FALDA (DAF)

### Caso 1 - DAF(1)

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left(-\frac{x}{2a_x}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4/a_x R_i}{v_e}}} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{a_y x}}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_d}{4\sqrt{a_z x}}\right)$$

In tale equazione si tiene conto del fenomeno dispersivo in tutte le direzioni (x,y,z).

### Caso 2 - DAF(2)

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left(-\frac{x}{2a_x}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4/a_x R_i}{v_e}}} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{a_y x}}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_d}{2\sqrt{a_z x}}\right)$$

Se si ipotizza una dispersione lungo z solo nella direzione positiva. Questa ipotesi è valida ipotizzando che il piano di falda si comporti come un limite superiore nella direzione z e che la sorgente possa trovarsi al limite del piano di falda.

### Caso 3 - DAF(3)

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left(-\frac{x}{2a_x}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4/a_x R_i}{v_e}}} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{a_y x}}\right)$$

Se l'acquifero è interessato in tutto il suo spessore dalla contaminazione, quindi non potrà esserci dispersione verticale. Tale condizione è possibile quanto minore è lo spessore dell'acquifero.

## FATTORE DI ATTENUAZIONE IN FALDA (DAF)

L'equazione per la stima del fattore di attenuazione laterale in falda (DAF), la cui selezione è discussa in Appendice C, prende come riferimento **il modello di Domenico**, ed è la seguente :

$$1) \quad \frac{1}{DAF} = \exp \left[ \frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}} \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}} \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}} \right) \right]$$

quando l'altezza della sorgente di contaminazione in falda  $S_d (= \delta g_w)$  è inferiore allo spessore della falda  $da$ .

$$2) \quad \left( \frac{1}{DAF} \right)' = \exp \left[ \frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}} \right) \right] \cdot \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}} \right) \right]$$

quando tutto lo spessore dell'acquifero è interessato dalla contaminazione (cosa che può facilmente accadere nei casi di piccoli spessori di falda).

## FATTORE DI ATTENUAZIONE IN FALDA (DAF)

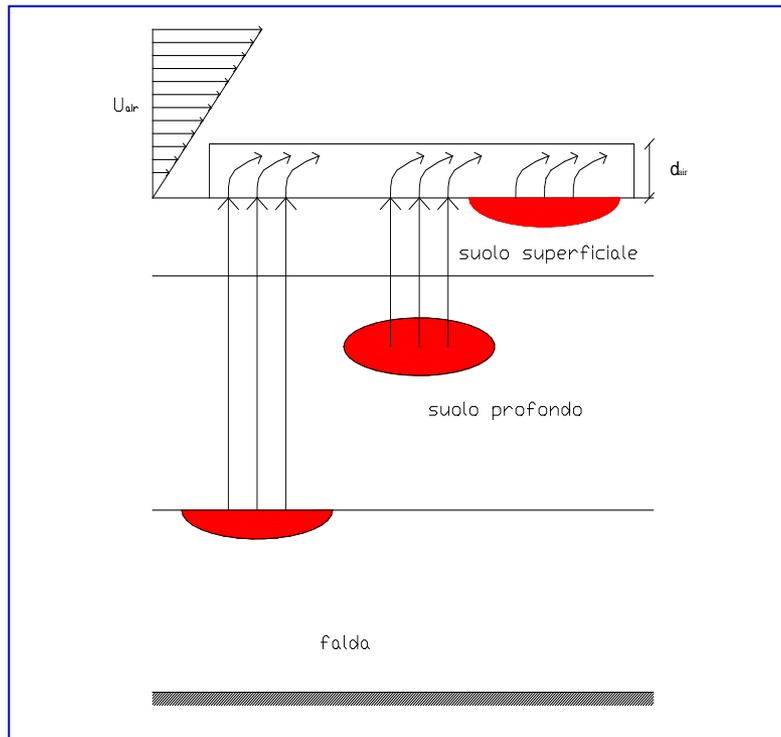
**Tab. 3.3.2.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
DAF(1)	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	---
DAF(2)			<b>X</b>			
DAF(3)			<b>X</b>			

**Tab. 3.3.2.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF)**

	RBCA Tool Kit ver. 2.0	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
DAF(1)	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
DAF(2)				
DAF(3)				

## FATTORI DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR



### SORGENTE DI CONTAMINAZIONE:

- a) suolo superficiale (SS)
- b) suolo profondo (SP)
- c) falda (GW)

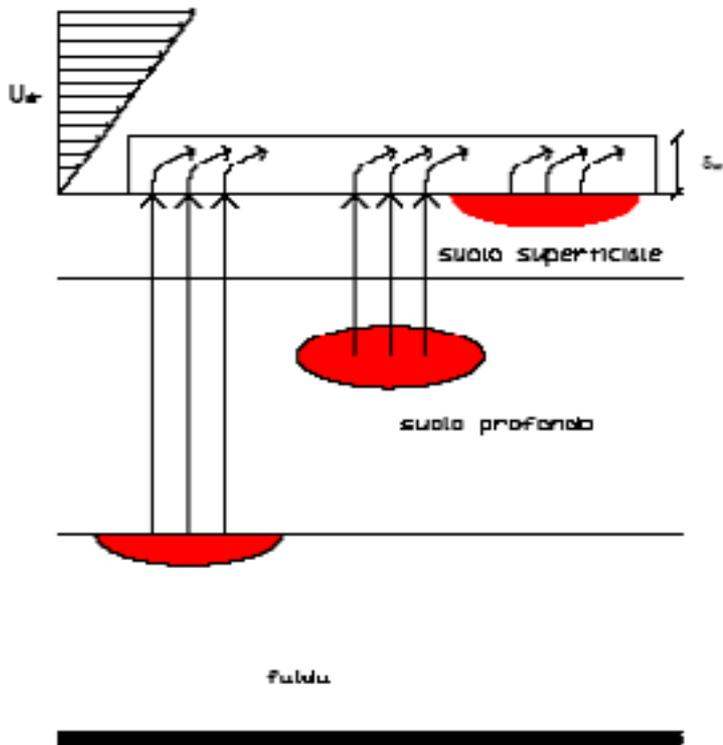
### MODALITA' DI ESPOSIZIONE:

- § Inalazione in ambienti aperti (OUTDOOR)

hp.

- 1) Concentrazione inquinante uniformemente distribuita e costante per tutto il periodo di esposizione
- 2) Non si considerano i fenomeni di biodegradazione

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA SS (VF<sub>ss</sub>)



Il fenomeno di volatilizzazione di vapori da suolo superficiale (SS) in ambienti aperti (outdoor) è un processo secondo il quale i flussi di vapore organici presenti nella porzione superficiale di terreno migrano verso l'aria al di sopra della superficie del terreno stesso. Il fattore di volatilizzazione in aria outdoor da SS si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria) e quella in corrispondenza della sorgente di contaminazione (suolo superficiale):

$$VF_{ss} = \frac{C_{poe}}{C_s} = \frac{\frac{mg}{m^3 - \text{aria}}}{\frac{mg}{Kg - \text{suolo}}}$$

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA SS (VF<sub>ss</sub>)

### ASTM E 1739-95 / PS 104-98 + UNICHIM

$$VF_{ss} (1) = \frac{2W' r_s}{U_{air} d_{air}} \times \sqrt{\frac{D_s^{eff} H}{pt(J_w + k_s r_s + HJ_a)}} \times 10^3 \quad (D.1)$$

$$VF_{ss} (2) = \frac{W' r_s d}{U_{air} d_{air} t} \times 10^3$$

$$D_s^{eff} = D_a \frac{J_a^{3.33}}{J_e^2} + \frac{D_w}{H} \times \frac{J_w^{3.33}}{J_e^2}$$

(D.2)

### CONCAWE

$$VF_{ss} (3) = \frac{Hr}{U_{air} W' d_{air} \times [q_{as} H + k_s r_s + q_{ws}]} \times A \times D_s^{eff} \times \frac{1}{L_s} \times 10^3 \quad (D.4)$$

### EPA SSG

$$VF_{ss} (4) = \frac{Q}{C} \times \frac{\sqrt{3.14 D_A t}}{2 r_s D_A} \times 10^{-4} \quad (D.5)$$

## FATTORI DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR

### CONFRONTO TRA LE EQUAZIONI ANALITICHE

Sostanze chimiche selezionate per l'analisi:

Specie chimica	n.	Costante di Henry	$D_{air}$
		adim.	cm <sup>2</sup> /s
Cloruro di vinile	1	1,09E+00	1,06E-01
1,1,2-Tricoloetano	2	7,05E-01	7,80E-02
Benzene	3	2,31E-01	8,80E-02
Tricloroetilene	4	4,18E-01	8,18E-02
Mercurio	5	4,70E-01	3,07E-02
2-Clorofenolo	6	1,60E-02	5,01E-02
PCB	7	4,45E-02	4,30E-02
Pentaclorofenolo	8	1,00E-06	5,60E-02
Crisene	9	3,88E-03	2,48E-02
S PCDD, PCDF	10	1,35E-03	1,00E-01
Benzo(a)pirene	11	4,63E-05	4,30E-02

+ VOLATILI

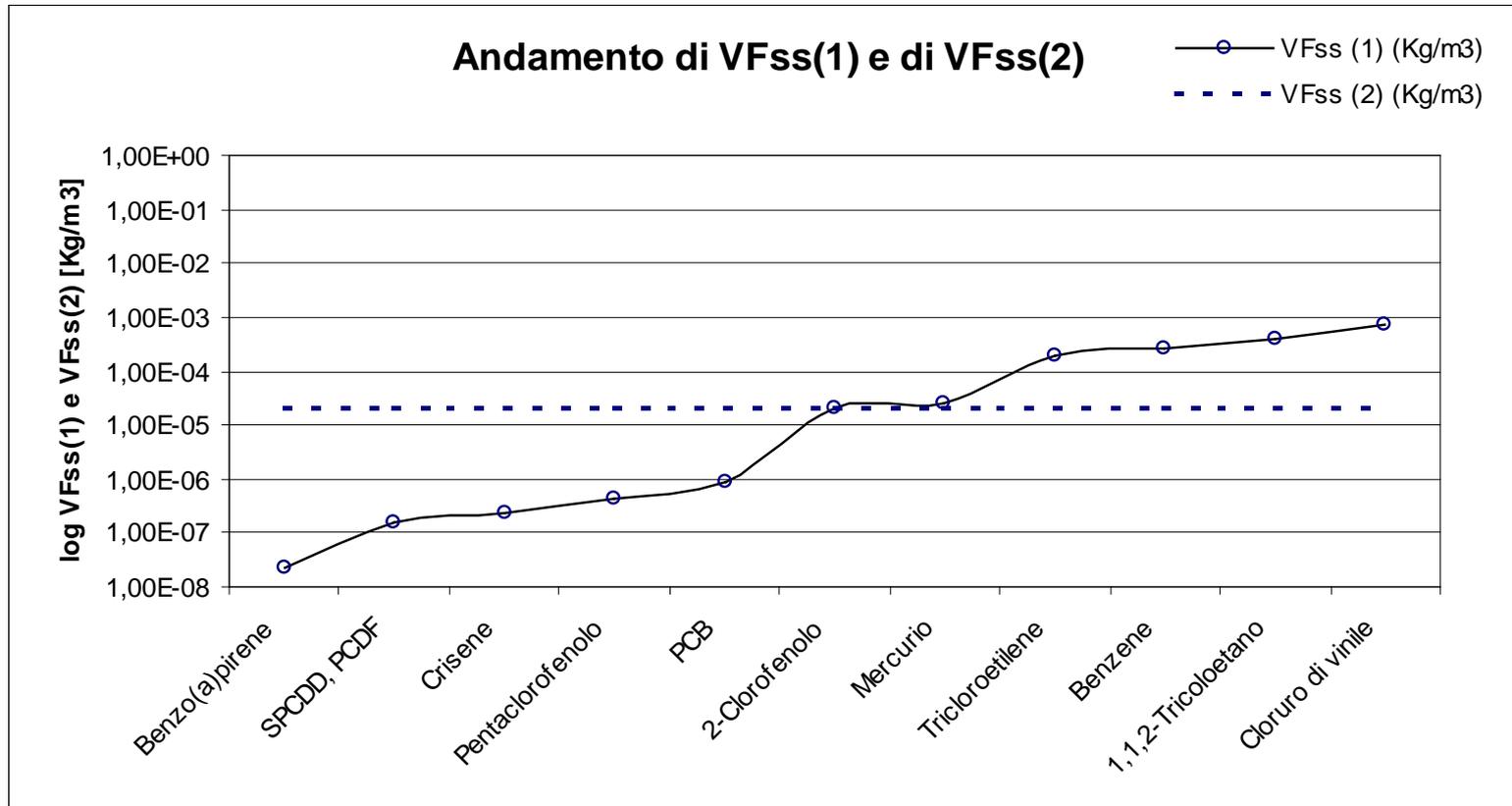
- VOLATILI

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA SS (VF<sub>ss</sub>)

*A valle delle analisi e delle considerazioni fatte sopra, si ritiene opportuno:*

- *Escludere l'utilizzo dell'equazione VF<sub>ss</sub>(3) perché i valori del fattore di volatilizzazione outdoor da suolo superficiale calcolati a mezzo di tale equazione, se posti a confronto con quelli ottenuti applicando l'equazione VF<sub>ss</sub>(1), risultano essere estremamente conservativi per i composti molto volatili, e poco conservativi per i composti meno volatili. Inoltre, l'utilizzo della equazione VF<sub>ss</sub>(3) non permette di considerare il caso in cui il top della sorgente di contaminazione nel suolo coincida o sia prossimo al piano campagna, poiché la stessa perde di validità.*
- *Selezionare, quindi, tra le equazioni VF<sub>ss</sub>(1) e VF<sub>ss</sub>(2) quella che restituisce il valore minore.*

## Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Superficiale



## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA SS (VF<sub>ss</sub>)

**Tab. 3.3.3.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (VF<sub>ss</sub>)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG (*)	RAGS (*)
<b>VF<sub>ss</sub>(1)</b>	X	X	X			
<b>VF<sub>ss</sub>(2)</b>	X	X	X			
VF <sub>ss</sub> (3)				X		
VF <sub>ss</sub> (4)					X	X

(\*) le due equazioni non coincidono essendo l'una l'evoluzione dell'altra

**Tab. 3.3.3.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (VF<sub>ss</sub>)**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VF<sub>ss</sub>(1)</b>	X	X		X
<b>VF<sub>ss</sub>(2)</b>	X	X		X
VF <sub>ss</sub> (3)			X	
VF <sub>ss</sub> (4)				

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA SP (VF<sub>samb</sub>)

Il fenomeno di volatilizzazione di vapori da suolo profondo (SP) in ambienti aperti è un processo secondo il quale le specie chimiche volatili presenti nel SP migrano verso la superficie del terreno ed inoltre si rimescolano con l'aria della zona posta al di sopra della sorgente contaminante.

In generale, il fattore di volatilizzazione in aria outdoor da SP si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria), al di sopra del sito, e quella in corrispondenza della sorgente di contaminazione (nel suolo profondo):

$$VF_{samb} = \frac{C_{poe} \left[ \frac{mg}{m^3 - aria} \right]}{C_{sp} \left[ \frac{mg}{Kg - suolo} \right]}$$

# FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA SP (VF<sub>samb</sub>)

## ASTM E 1739-95 / PS 104-98

$$VF_{samb}(1) = \frac{Hr_s}{(J_w + k_s r_s + HJ_a) \times \left[ 1 + \frac{U_{air} d_{air} L_s}{D_s^{eff} W'} \right]} \times 10^3 \quad (D.8)$$

## UNICHIM

$$VF_{samb}(2) = \frac{W' r_s d_s}{U_{air} d_{air} t} \times 10^3 \quad (D.9)$$

## CONCAWE

$$VF_{samb}(3) = \frac{Hr}{U_{air} W' d_{air} [q_{as} H + k_s r_s + q_{ws}]} \times A \times D_s^{eff} \times \frac{1}{L_s} \times 10^3 \quad (D.10)$$

## EPA SSG / RAGS

$$VF_{ss}(4) = \frac{Q}{C} \times \frac{\sqrt{3.14 D_A t}}{2 r_s D_A} \times 10^{-4} \quad (D.5)$$

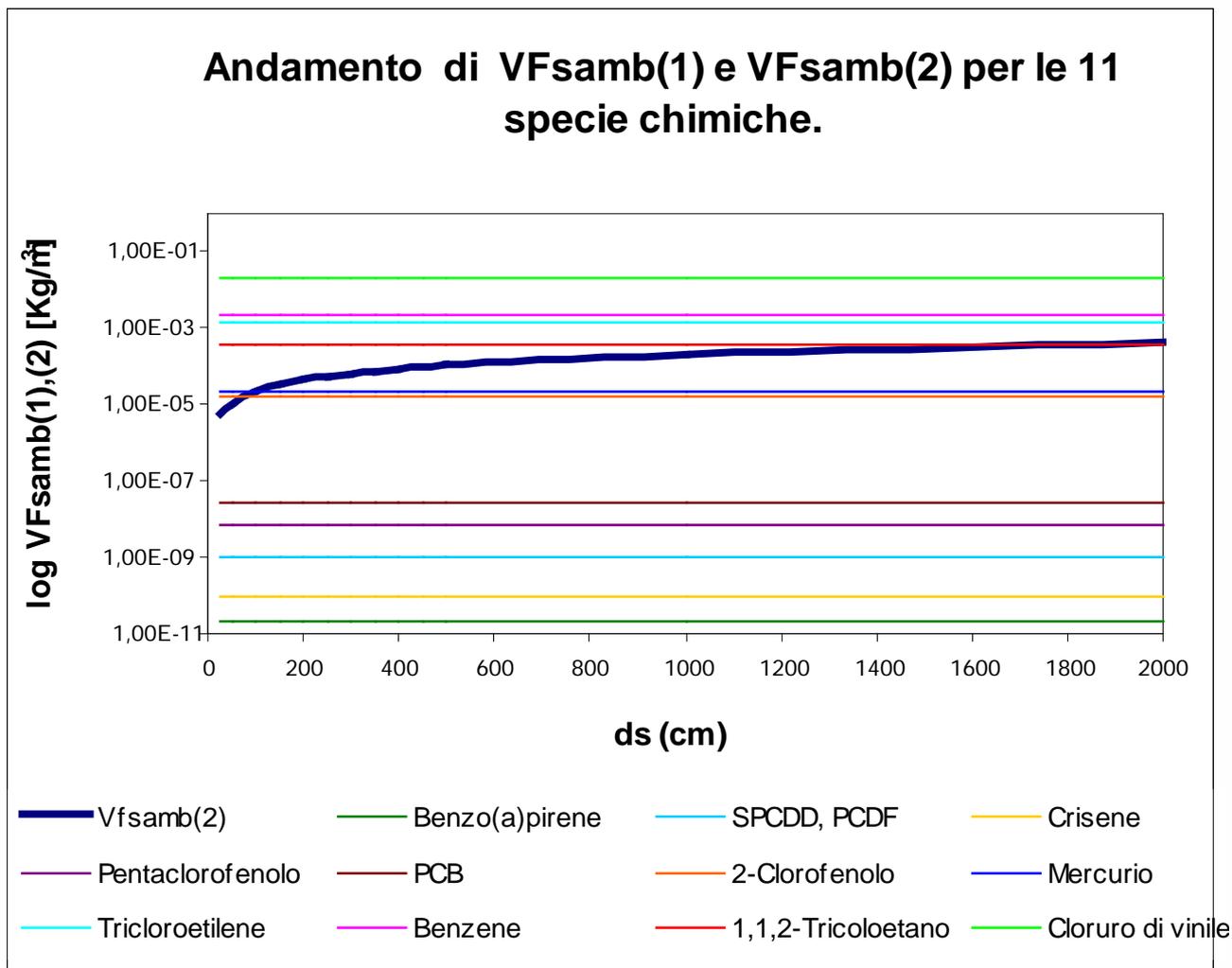
## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA SP (VF<sub>samb</sub>)

*A valle di tutte le analisi e le considerazioni fatte sopra, si ritiene opportuno selezionare, quindi, tra le equazioni  $VF_{samb}(1)$  e  $VF_{samb}(2)$  quella che restituisce il valore minore.*

*Come per il suolo superficiale nel calcolo del fattore di trasporto per volatilizzazione outdoor bisogna tener conto del bilancio di massa. Quindi se il fattore di trasporto calcolato con  $VF_{sa}(1)$  e/o  $VF_{samb}(1)$  risulta maggiore del bilancio di massa ( $VF_{samb}(2)$ ) si assume come valore del fattore di volatilizzazione quest'ultimo.*

*Si sottolinea che il calcolo delle due equazioni deve essere fatto sia nel caso in cui la sorgente di contaminazione è presente nel suolo superficiale e profondo sia quando la stessa coinvolge solamente il suolo profondo.*

## Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Profondo



**d<sub>s</sub>: spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)**

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA SP (VF<sub>samb</sub>)

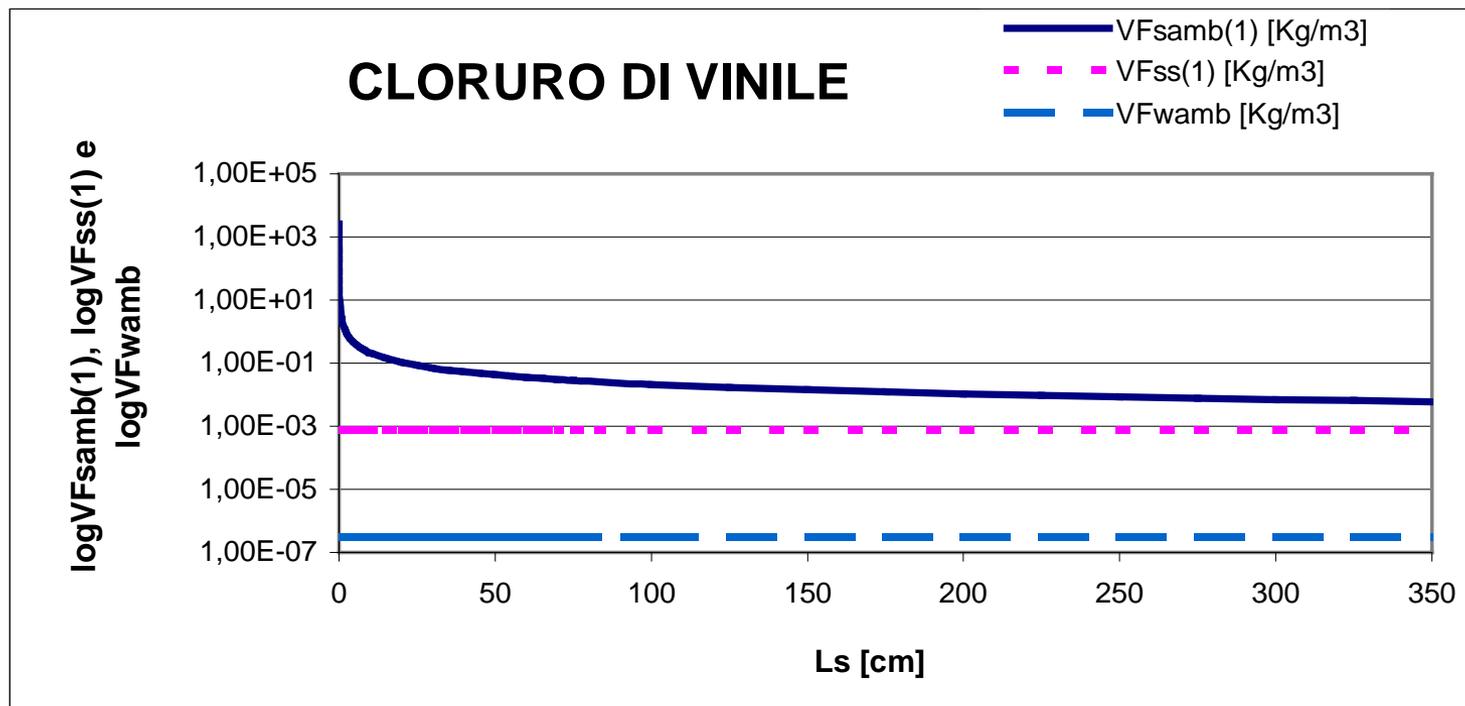
**Tab. 3.3.4.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (VF<sub>Samb</sub>)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
<b>VF<sub>samb</sub>(1)</b>	X	X	X			
<b>VF<sub>samb</sub>(2)</b>			X			
VF <sub>samb</sub> (3)				X		
VF <sub>samb</sub> (4)					X	X

**Tab. 3.3.4.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (VF<sub>Samb</sub>)**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VF<sub>samb</sub>(1)</b>	X	X		X
<b>VF<sub>samb</sub>(2)</b>	X			X
VF <sub>samb</sub> (3)			X	

## Volatilizzazione in ambienti aperti (Suolo Superficiale e Profondo)



Per i composti molto volatili il fattore di volatilizzazione da suolo profondo risulta maggiore di quello da suolo superficiale, già conservativo.

In questi casi :  $VF_{samb} = VF_{ss}$

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA GW (VF<sub>wamb</sub>)

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

L'equazione per la stima del fattore di volatilizzazione da falda in ambienti aperti, la cui selezione è discussa nell'appendice D, è la seguente:

$$VF_{wamb} = \frac{C_{poe} \frac{mg}{m^3 - aria}}{C_{gw} \frac{mg}{L - acqua}}$$

# FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR DA GW (VF<sub>wamb</sub>)

## Tutti gli standard e software

$$VF_{wamb} = \frac{H}{1 + \frac{U_{air} d_{air} L_{GW}}{D_{ws}^{eff} W}} \times 10^3 \quad (D.13)$$

**Tab. 3.3.5.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF<sub>wamb</sub>)**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
<b>VF<sub>wamb</sub></b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	---	---

**Tab. 3.3.5.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF<sub>wamb</sub>)**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VF<sub>wamb</sub></b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

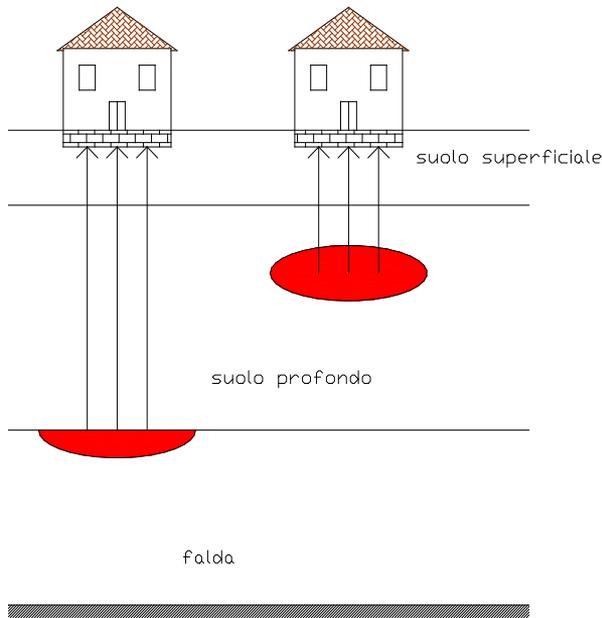


## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR

In caso di presenza di pavimentazione del suolo superficiale in ambienti outdoor, previo accertamento dello stato di conservazione della pavimentazione da parte degli Enti di Controllo, si propone di moltiplicare il valore del fattore di volatilizzazione per la frazione areale di fratture  $\eta_{out}$  della superficie pavimentata.

(eliminata nella rev. 2 del doc. ISPRA (ex-APAT))

## FATTORI DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR



### SORGENTE DI CONTAMINAZIONE:

- a) suolo (SS e SP)
- b) falda (GW)

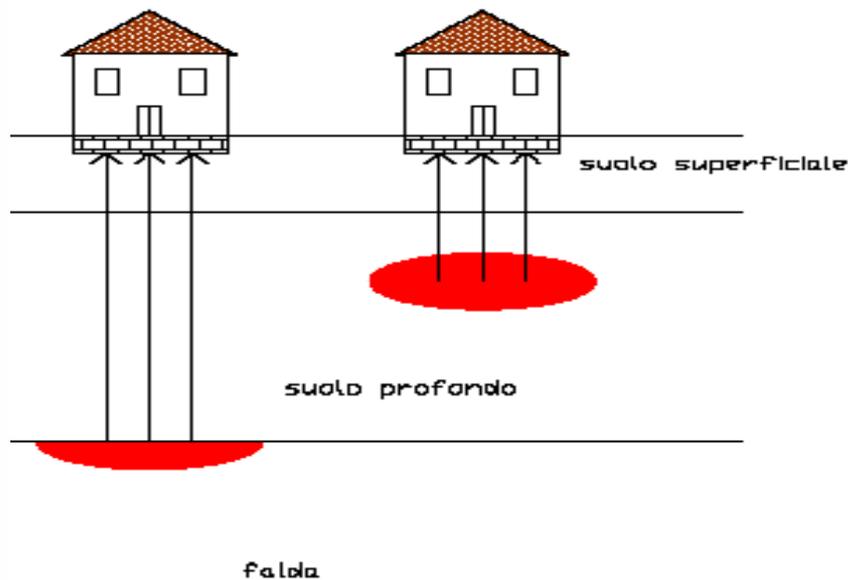
### MODALITA' DI ESPOSIZIONE:

- § Inalazione in ambienti confinati (INDOOR)

hp.

- 1) Concentrazione inquinante uniformemente distribuita e costante per tutto il periodo di esposizione
- 2) Non si considerano i fenomeni di biodegradazione

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA SUOLO (VF<sub>se</sub>sp)



In generale, il fattore di volatilizzazione in aria indoor da suolo (SS e SP) si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria indoor) e quella in corrispondenza della sorgente di contaminazione (suolo).

**Il fattore di volatilizzazione di vapori indoor deve essere calcolato separatamente per i comparti suolo superficiale e suolo profondo.**

$$VF_{se}sp = \frac{C_{poe}}{C_s} = \frac{\frac{mg}{m^3 - aria}}{\frac{mg}{Kg - suolo}}$$

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA SUOLO (VF<sub>sesp</sub>)

### ***Modello di Jonson-Ettinger.***

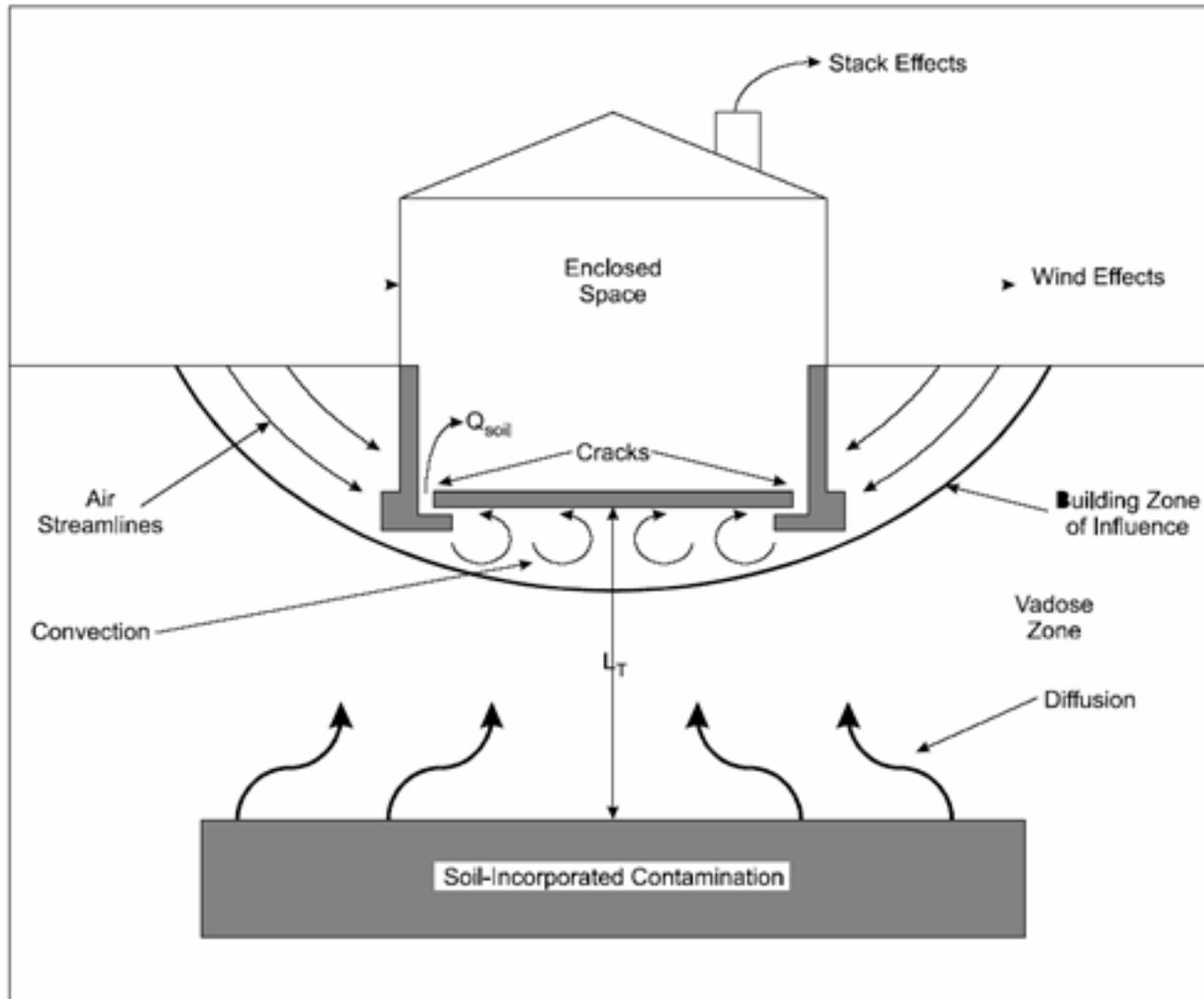
Il modello di Johnson-Ettinger è un modello analitico monodimensionale, che descrive il meccanismo di trasporto di una specie chimica dal suolo o dalla falda in ambienti indoor secondo modalità diffusive e convettive.

Nei punti distanti dal basamento prevale il fenomeno diffusivo (il contaminante migra solo per diffusione).

Vicino al basamento, se abbiamo depressurizzazione dell'edificio, sono presenti entrambi i fenomeni: diffusivo e convettivo (la migrazione del contaminante avviene anche per convezione oltre che per diffusione).

Il fenomeno convettivo è dovuto alla differenza di temperatura e quindi di pressione (DP) tra indoor e outdoor .

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA SUOLO (VF<sub>soil</sub>)



## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA SUOLO (VF<sub>sresp</sub>)

Tutti i testi adottati quali standard di riferimento propongono, per il calcolo di VF<sub>sresp</sub>, l'equazione valida ipotizzando  $Q_s = 0$  (quindi  $\Delta P = 0$ ), che tiene conto del contributo diffusivo e trascura quello convettivo:

$$VF_{sresp} (1) = \frac{\frac{H\rho_s}{(\vartheta_w + k_s\rho_s + H\vartheta_a)} \cdot \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER}}{1 + \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_s^{eff} L_{crack}}{D_{crack}^{eff} L_T \eta}} \cdot 10^3$$

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA SUOLO (VF<sub>sresp</sub>)

Il documento EPA [EQM, 2003], lo standard PS 104-98 e il manuale UNICHIM n.196/1 propongono anche l'equazione del modello di Johnson-Ettinger che tiene conto del contributo diffusivo e convettivo ( $Q_s > 0$ , quindi  $\Delta P > 0$ ):

$$VF_{sresp}(2) = \frac{\frac{H\rho_s}{(\vartheta_w + k_s\rho_s + H\vartheta_a)} \cdot \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} \cdot e^\xi}{e^\xi + \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_s^{eff} A_b}{Q_s L_T} \cdot (e^\xi - 1)} \cdot 10^3$$

$Q_s$  è il flusso di vapore entrante nell'edificio dovuto al fenomeno convettivo:

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA SUOLO (VF<sub>sresp</sub>)

Il documento EPA [EQM, 2003], e il manuale UNICHIM n. 196/1 propongono anche l'equazione ricavata da Johnson-Ettinger considerando la sorgente di contaminazione finita:

$$VF_{sresp} (3) = \frac{\rho_s \cdot d_s}{L_b \cdot ER \cdot \tau} \cdot 10^3 \quad \text{nel caso di } \tau > \tau_d. \quad (F.12)$$

Solo nel documento dell'EPA del 2003 si tiene conto del caso in cui si verifichi  $\tau < \tau_d$ , introducendo la seguente espressione:

$$VF_{sresp} (4) = \frac{\rho_s L_s}{L_b \cdot ER \cdot \tau} \left[ \left( \beta^2 + 2\psi\tau \right)^{1/2} - \beta \right] \cdot 10^3$$

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA SUOLO (VF<sub>soesp</sub>)

*A valle di tutte le analisi e le considerazioni fatte sopra, si ritiene opportuno:*

- *Escludere l'utilizzo dell'equazione  $VF_{soesp}(2)$  poiché fornisce, anche per  $\Delta P$  molto piccoli, valori estremamente conservativi, se posti a confronto con quelli di  $VF_{soesp}(1)$ , già, esso stesso, ritenuto molto conservativo, in particolar modo per i composti volatili. Inoltre, per  $\eta > 0,3$  o  $\eta < 1E-06$ , l'equazione  $VF_{soesp}(2)$  perde di significato.*
- *Selezionare, quindi, tra le equazioni  $VF_{soesp}(1)$  e  $VF_{soesp}(3)$  quella che restituisce il valore minore.*

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA SUOLO (VF<sub>se</sub>sp)

**Tab. 3.3.8.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VF<sub>se</sub>sp)**

	ASTM 1739-95	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report 1997	EPA - 2003 (*)	RAGS
<b>VF<sub>se</sub>sp(1)</b>	X	X	X	X	X	---
VF <sub>se</sub> sp(2)		X	X		X	
<b>VF<sub>se</sub>sp(3)</b>			X		X	
VF <sub>se</sub> sp(4)					X	

(\*) EPA-EQM 2003 "User's guide for evaluating subsurface vapour intrusion into building"

**Tab. 3.3.8.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VF<sub>se</sub>sp)**

	RBCA Tool Kit ver. 2.0	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VF<sub>se</sub>sp(1)</b>	X	X	X	X
VF <sub>se</sub> sp(2)	X	X		X
<b>VF<sub>se</sub>sp(3)</b>	X			X
VF <sub>se</sub> sp(4)				

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA GW (VFwesp)

La volatilizzazione indoor da falda si verifica quando sopra la zona di falda contaminata vi è un edificio nel quale avviene l'infiltrazione dei contaminanti. Il fattore di volatilizzazione in aria indoor da falda si esprime come rapporto tra la concentrazione della specie chimica nel punto di esposizione (in aria indoor) e quella in corrispondenza della sorgente di contaminazione (falda).

tutti i testi di riferimento adottano il modello proposto da Johnson & Ettinger nel 1991 [Johnson-Ettinger ,1991] valida ipotizzando  $Q_s = 0$  (quindi  $DP = 0$ ), che tiene conto del contributo diffusivo e trascura quello convettivo:

$$VF_{wesp}(1) = \frac{H \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER}}{1 + \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_w^{eff} L_{crack}}{D_{crack}^{eff} L_T h}} \times 10^3$$

**SELEZIONATA**

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA GW (VF<sub>wesp</sub>)

Il documento EPA [EQM, 2003], lo standard PS 104-98 e il manuale UNICHIM n.196/1 propongono anche l'equazione del modello di Johnson-Ettinger che tiene conto del contributo diffusivo e convettivo ( $Q_s > 0$ , quindi  $\Delta P > 0$ ):

$$VF_{wesp}(2) = \frac{H \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER} \cdot e^{\xi}}{e^{\xi} + \frac{D_w^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_w^{eff} A_b}{Q_s L_T} \cdot (e^{\xi} - 1)} \cdot 10^3 \quad (F.18)$$

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA GW (VFwesp)

dove  $D_{\text{crack}}^{\text{eff}}$  è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso le fenditure delle fondazioni e  $D_w^{\text{eff}}$  è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso la tavola di acqua:

$$D_{\text{crack}}^{\text{eff}} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] = D_a \cdot \frac{g_{\text{acrack}}^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{\text{wcrack}}^{3.33}}{g_e^2} \quad (\text{F.15})$$

$$D_w^{\text{eff}} = \left( h_{\text{cap}} + h_v \right) \left( \frac{h_{\text{cap}}}{D_{\text{cap}}^{\text{eff}}} + \frac{h_v}{D_s^{\text{eff}}} \right)^{-1} \quad (\text{F.16})$$

dove  $D_{\text{cap}}^{\text{eff}}$  è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso la frangia capillare:

$$D_{\text{cap}}^{\text{eff}} \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] = D_a \cdot \frac{g_{\text{acap}}^{3.33}}{g_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{g_{\text{wcap}}^{3.33}}{g_e^2} \quad (\text{F.17})$$

## FATTORE DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR DA GW (VFwesp)

**Tab. 3.3.9.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda ( $VF_{se\text{sp}}$ )**

	ASTM 1739-95 <sup>E</sup>	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report 1997	EPA - 2003 (*)	RAGS
<b>VFwesp(1)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	---
VFwesp(2)		<b>X</b>	<b>X</b>		<b>X</b>	

(\*) EPA-EQM 2003 "User's guide for evaluating subsurface vapour intrusion into building"

**Tab. 3.3.9.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda ( $VF_{se\text{sp}}$ )**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
<b>VFwesp(1)</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>
VFwesp(2)	<b>X</b>			



## FATTORI DI TRASPORTO: Ambienti aperti e confinati

Le equazioni per il **calcolo dei fattori di volatilizzazione, in ambienti aperti (outdoor) e confinati (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.

Tale approccio risulta in accordo con le più recenti indicazioni tecnico-scientifiche elaborate da organismi di controllo statunitensi sulla base di una consolidata esperienza applicativa. Tra i documenti di riferimento è opportuno citare il riferimento CalEPA (2005).



## FATTORI DI TRASPORTO: Ambienti aperti e confinati

Per maggiori approfondimenti si rimanda all'Appendice S nella quale:

- sono riportati i principali riferimenti bibliografici internazionali inerenti la valutazione del fenomeno dell'intrusione di vapori nei siti contaminati;
- vengono descritte le modalità di valutazione dell'esposizione professionale in siti industriali interessati da fenomeni di contaminazione;
- vengono descritti i metodi di misura delle concentrazioni di contaminanti nell'aria indoor e outdoor.

## Emissione di particolato outdoor da suolo superficiale (PEF)

Il fenomeno di emissione di particolato da suolo superficiale (SS) è un processo secondo il quale avviene il sollevamento di polveri dal suolo superficiale contaminato, a seguito di fenomeni di erosione, e il rimescolamento, e la conseguente diluizione di queste polveri con l'aria della zona sovrastante la sorgente di contaminazione. L'inalazione di tale particolato può avvenire sia in ambienti aperti che in ambienti confinati.

$$PEF = \frac{C_{poe}}{C_{ss}} \frac{\frac{mg}{m^3 - aria}}{\frac{mg}{Kg - suolo}}$$

## Emissione di particolato outdoor da suolo superficiale (PEF)

L'equazione per la stima d fattore di emissione di particolato in ambienti aperti da suolo superficiale è la seguente:

$$PEF = \frac{P_o W'}{U_{air} \delta_{air}} 10^3 \quad (3.3.39)$$

In caso di presenza di pavimentazione del suolo superficiale in ambienti outdoor, previo accertamento dello stato di conservazione della pavimentazione da parte degli Enti di Controllo, si propone di moltiplicare il valore del PEF per la frazione areale di fratture  $\eta_{out}$  della superficie pavimentata.

(eliminata nella rev. 2 del doc. ISPRA (ex-APAT))

## Emissione di particolato indoor da suolo superficiale ( $PEF_{in}$ )

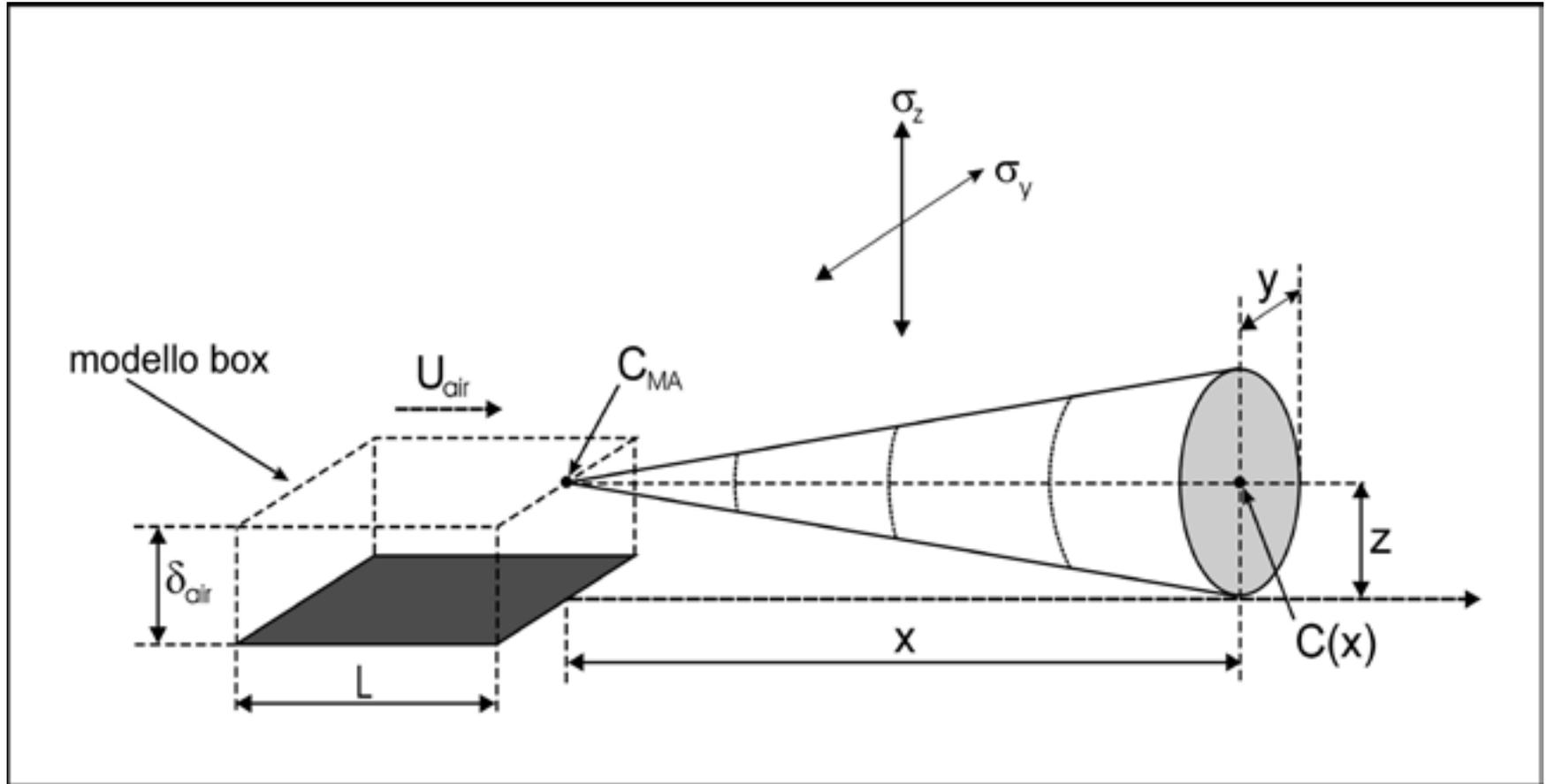
Nel caso di inalazione di particolato in ambienti indoor, il corrispondente fattore di trasporto  $PEF_{in}$  si calcola secondo la seguente relazione:

$$PEF_{in} = PEF \times F_i \quad (3.3.40)$$

dove  $F_i$  [adim] rappresenta la frazione di polveri indoor. In via cautelativa, è possibile porre tale parametro pari all'unità.

Si osserva che, ai fini di una corretta valutazione del rischio derivante dall'inalazione di polveri indoor (ad es: nel caso di capannoni situati in aree contaminate e privi di pavimentazione) è opportuno che gli Enti di Controllo richiedano l'esecuzione di campagne di monitoraggio delle polveri negli ambienti indoor. Gli eventuali interventi di mitigazione del rischio da intraprendere dovranno essere basati preferibilmente sulle risultanze di tali monitoraggi.

## Fattore di trasporto e dispersione in atmosfera (ADF)



**Schema concettuale del modello gaussiano di trasporto e dispersione dei contaminanti in atmosfera**

## Fattore di trasporto e dispersione in atmosfera (ADF)

Il fattore di diluizione-attenuazione per il trasporto e la dispersione in atmosfera **ADF (Air Dispersion Factor)**, adimensionale, definito come il rapporto tra la concentrazione nella zona di miscelazione in aria al di sopra della sorgente di volatilizzazione  $C_{MA}$  e la concentrazione in atmosfera  $C_A$  a valle della zona di miscelazione, rispetto alla direzione principale del vento:

$$ADF = \frac{C_{MA}}{C_A}$$

Applicando un modello gaussiano, il fattore di trasporto in fase aeriforme è determinato dalla seguente espressione:

essendo: 
$$Q = \frac{U_{air} \times d_{air} \times A_{atm}}{L}$$

$$ADF = \frac{C_{MA}}{C(x)} = \frac{Q}{2p \times U_{air} \times s_y \times s_z} \times e^{-\frac{y^2}{2s_y^2}} \times e^{-\frac{(z-d_{air})^2}{2s_z^2} + e^{-\frac{(z+d_{air})^2}{2s_z^2}}}$$

- dove:
- $y$  = distanza laterale dalla sorgente [L];
  - $z$  = altezza della zona di respirazione (usualmente assunta pari a  $d_{air}$ ) [L];
  - $A_{atm}$  = area della sezione trasversale della sorgente di emissione [L<sup>2</sup>];
  - $s_y$  = coefficiente di dispersione aerea trasversale [L];
  - $s_z$  = coefficiente di dispersione aerea verticale [L];
  - $Q$  = portata volumetrica d'aria attraverso la zona di miscelazione [L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>];
  - $L$  = lunghezza della sorgente di emissione parallela alla direzione principale del vento [L].

## Fattore di trasporto e dispersione in atmosfera (ADF)

**Tab. 3.3.7.a - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)**

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

**Tab. 3.3.7.b - Software esaminati: calcolo del Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)**

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.1
ADF	X	X		

## VIE DI MIGRAZIONE E DI ESPOSIZIONE

SCENARIO DI ESPOSIZIONE	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0	BP-RISC ver. 4.0	RBCA Tool Kit ver. 1.2	Documento APAT
<b>CONTATTO DIRETTO CON SUOLO</b>					
Ingestione	0	0	0	0	0
Contatto dermico	0	0	0	0	0
<b>OUTDOOR</b>					
Inalazione di polveri da SS	0	0		0	0
Inalazione di Vapori da SS	0	0	0	0	0
Inalazione di Vapori da SP	0	0	0	0	0
Inalazione di Vapori da GW	0	0	0	0	0
<b>INDOOR</b>					
Inalazione di polveri da SS	0	0			0
Inalazione di Vapori da SS	0	0	0	0	0
Inalazione di Vapori da SP	0	0	0	0	0
Inalazione di Vapori da GW	0	0	0	0	0
<b>ACQUA AD USO DOMESTICO</b>					
Ingestione	0	0	0	0	0
Contatto dermico durante la doccia			0		
Inalazione durante la doccia			0		
<b>ACQUA SUPERFICIALE AD USO RICREAZIONALE</b>					
Ingestione durante il bagno			0	0	0
Contatto dermico durante il bagno			0	0	0
Consumo di pesce				0	
<b>ACQUA AD USO IRRIGAZIONE</b>					
Ingestione accidentale			0		
Contatto dermico			0		
Inalazione di vapori			0		
<b>INGESTIONE DI VEGETALI</b>					
Vegetali che crescono su terreno contaminato			0		
Vegetali che sono irrigati con acque contaminate			0		

## Attinenza dei software ai criteri metodologici [APAT, 2008]

<b>FATTORE DI TRASPORTO</b>	<b>RBCA Tool Kit ver. 2.0</b>	<b>BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)</b>	<b>ROME ver. 2.1</b>	<b>GIUDITTA ver.3.1</b>
<i>Fattore di lisciviazione (LF)</i>	ALTA	MEDIA	MEDIA	ALTA
<i>Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF)</i>	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (<math>VF_{ss}</math>)</i>	ALTA	ALTA	MEDIO/BASSA	ALTA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (<math>VF_{Samb}</math>)</i>	ALTA	MEDIA	MEDIO/BASSA	ALTA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (<math>VF_{wamb}</math>)</i>	ALTA	ALTA	ALTA	ALTA
<i>Fattore di emissione di particolato outdoor da suolo superficiale (PEF)</i>	ALTA	ALTA	MEDIA	ALTA
<i>Fattore di emissione di particolato indoor da suolo superficiale (<math>PEF_{in}</math>)</i>	---	---	MEDIA	MEDIA
<i>Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)</i>	ALTA	ALTA	---	---
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (<math>VF_{sesp}</math>)</i>	MEDIO/ALTA	MEDIO/BASSA	MEDIO/BASSA	MEDIO/ALTA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (<math>VF_{wesp}</math>)</i>	MEDIO/ALTA	ALTA	ALTA	MEDIO/ALTA