

Vie di migrazione dei contaminanti e selezione dei Fattori di Trasporto (FT)

Ing. Simona Berardi

Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza sul Lavoro (ISPESL)

Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati (APAT, 2005)

3. COSTRUZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE

3.2 Vie di migrazione: criteri per la stima dei parametri

3.2.1 Criteri per la stima dei parametri caratteristici del sito

3.2.2 Parametri del terreno in zona insatura

3.2.3. Parametri del terreno in zona satura

3.2.4 Parametri degli ambienti aperti

3.2.5 Parametri degli ambienti confinati

3.2.6 Parametri delle acque superficiali

3.2 Vie di migrazione: criteri per la stima dei parametri

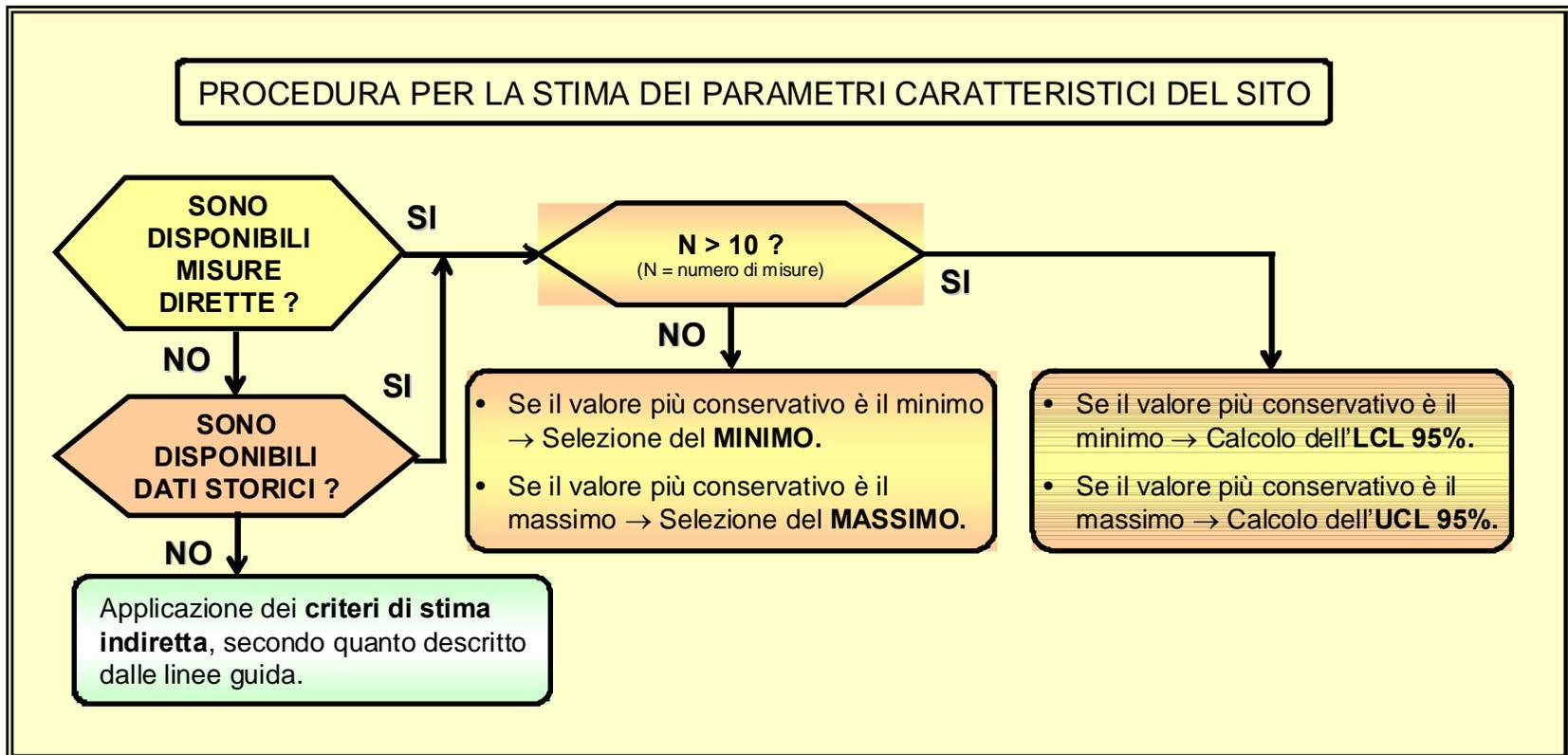
Per il calcolo dei fattori di trasporto e, quindi, per stimare la concentrazione della specie chimica in corrispondenza del bersaglio, nota quella alla sorgente, è indispensabile determinare le caratteristiche fisiche dei comparti ambientali coinvolti:

- suolo insaturo
- suolo saturo
- aria outdoor
- aria indoor
- acqua superficiale

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.

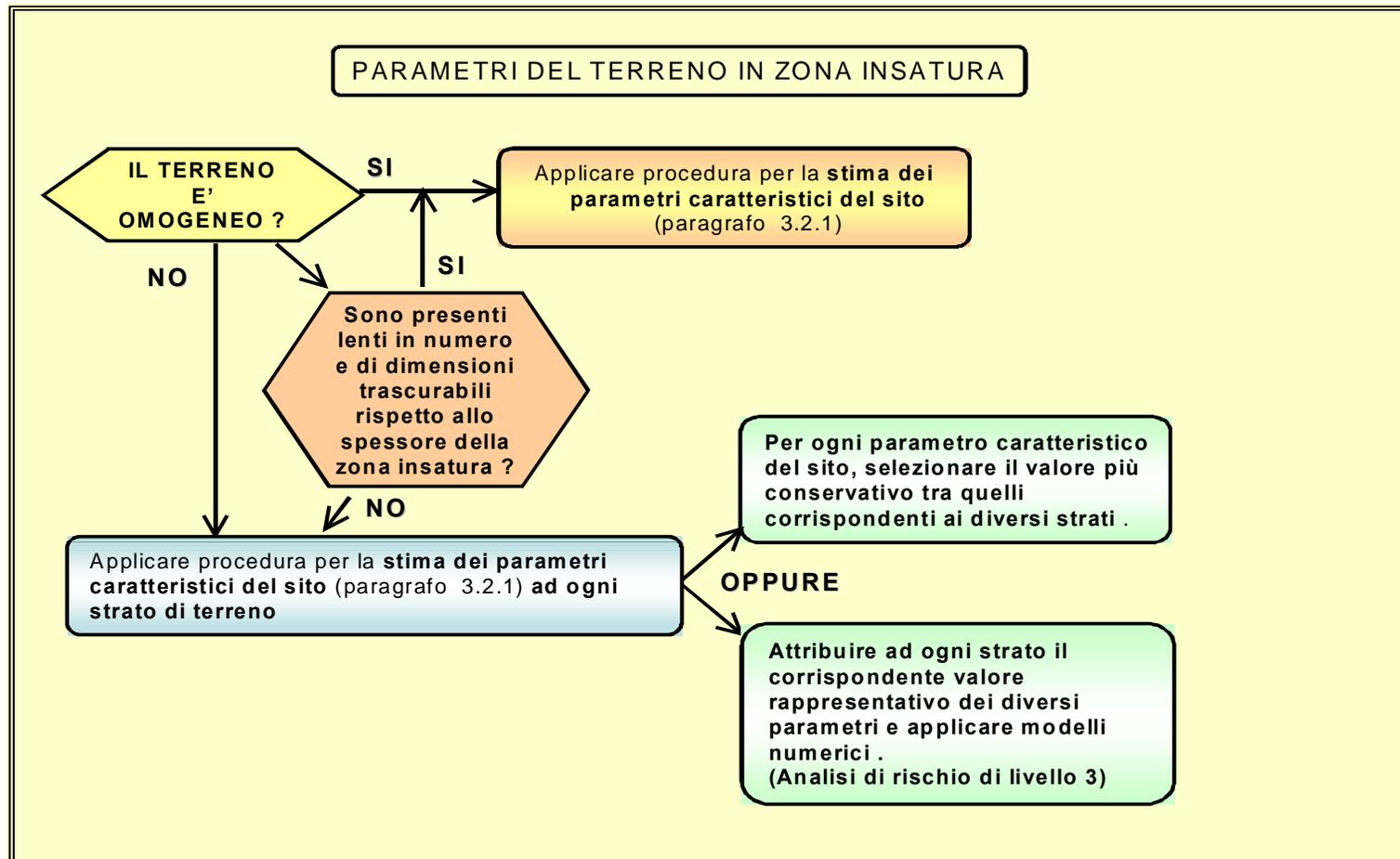
Per un livello 2 e 3 di analisi, si utilizzano “valori sito-specifici”, ossia valori strettamente dipendenti dalle caratteristiche del sito potenzialmente contaminato.

3.2.1 Criteri per la stima dei parametri caratteristici del sito



3.2.1 Criteri per la stima dei parametri caratteristici del sito

Nel caso dei parametri del terreno in zona insatura, la suddetta procedura è preceduta da una ulteriore fase di analisi dei dati:



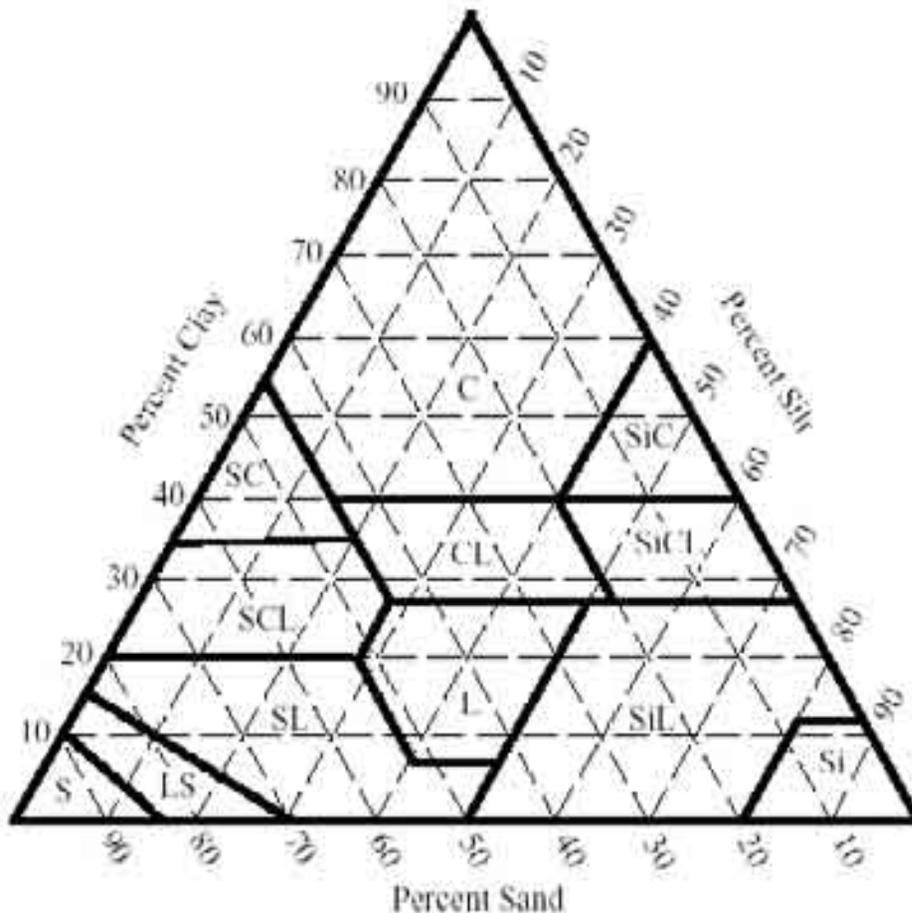
3.2.1 Criteri per la stima dei parametri caratteristici del sito

La granulometria del terreno non entra direttamente nelle equazioni utili per il calcolo dei fattori di trasporto. Nonostante ciò, la sua determinazione risulta spesso utile per la stima indiretta dei valori di alcune proprietà fisiche del suolo saturo e insaturo.

TIPO DI TERRENO		DIAMETRO DELLE PARTICELLE (mm)	
TERRENI A GRANA MOLTO GROSSA	Blocchi	200	
	Ciottoli	60	
TERRENI A GRANA GROSSA (più del 65% in sabbia e ghiaia)	Ghiaia	Grossa	20
		Media	6
		Fine	2
	Sabbia	Grossa	0,6
		Media	0,2
		Fine	0,06
TERRENI A GRANA FINE (più del 35% in argilla e limo)	Limo	Grosso	0,02
		Medio	0,006
		Fine	0,002
	Argilla	< 0.002	

3.2.1 Criteri per la stima dei parametri caratteristici del sito

E' possibile effettuare una classificazione dei terreni composti basata sul metodo dell'USDA (U.S. Department of Agriculture)



Tessitura del suolo	
Simbolo	nome
S	Sand
LS	Loamy Sand
SL	Sandy Loam
SCL	Sandy Clay Loam
L	Loam
SiL	Silt Loam
CL	Clay Loam
SiCL	Silty Clay Loam
SiC	Silty Clay
Si	Silt
SC	Sandy Clay
C	Clay

3.2.1 Criteri per la stima dei parametri caratteristici del sito

Percentuali di sabbia, argilla e limo calcolate nei centroidi di ogni zona caratteristica del terreno descritta nel diagramma triangolare

Tessitura del suolo			% argilla	% limo	% sabbia
Simbolo	<i>inglese</i>	<i>italiano</i>			
S	Sand	Sabbioso	3.33	5.00	91.67
LS	Loamy Sand	Sabbioso tendente medio	6.25	11.25	82.50
SL	Sandy Loam	Medio sabbioso	10.81	27.22	61.97
SCL	Sandy Clay Loam	Medio argilloso tendente sabbioso	26.73	12.56	60.71
L	Loam	Di grana media	18.83	41.01	40.16
SiL	Silt Loam	Medio limoso	12.57	65.69	21.74
CL	Clay Loam	Medio argilloso	33.50	34.00	32.50
SiCL	Silty Clay Loam	Medio argilloso tendente limoso	33.00	56.50	10.00
SiC	Silty Clay	Argilloso limoso	46.67	46.67	6.66
Si	Silt	Limoso	6.00	87.00	7.00
SC	Sandy Clay	Argilloso sabbioso	41.67	6.67	51.66
C	Clay	Argilloso	64.83	16.55	18.62

3.2.2 Parametri del terreno in zona insatura

Simbolo	Parametro	Unità
ρ_s	Densità del suolo	g/cm ³
θ_T	Porosità totale del terreno in zona insatura	adim.
θ_e	Porosità effettiva del terreno in zona insatura	adim.
θ_w	Contenuto volumetrico di acqua	adim.
θ_a	Contenuto volumetrico di aria	adim.
θ_{wcap}	Contenuto volumetrico di acqua nella frangia capillare	adim.
θ_{acap}	Contenuto volumetrico di aria nella frangia capillare	adim.
f_{oc}	Frazione di carbonio organico nel suolo insaturo	adim.
l_{ef}	Infiltrazione efficace	cm/anno

3.2.2 Parametri del terreno in zona insatura

Per la stima indiretta di q_T , q_e , q_w e q_a si fa riferimento ai valori riportati in Tabella e desunti dalla integrazione dei dati forniti dai riferimenti bibliografici a cui si fa più comunemente riferimento [Carsel et al., 1988] [Van Genuchten model, 1980].

Range di valori di θ_w in funzione della distribuzione granulometrica

Tessitura	θ_w (massimo)	θ_w (minimo)	θ_w (varianza)
Sand	0,08	0,05	1,62E-04
Loamy Sand	0,12	0,05	1,34E-03
Sandy Loam	0,23	0,04	9,54E-03
Sandy Clay Loam	0,24	0,06	9,89E-03
Loam	0,26	0,06	1,20E-02
Silt Loam	0,30	0,07	2,76E-02
Clay Loam	0,26	0,08	1,64E-02
Silty Clay Loam	0,31	0,09	2,42E-02
Silty Clay	0,34	0,11	1,62E-02
Silt	0,30	0,05	1,93E-02
Sandy Clay	0,31	0,12	1,08E-02
Clay	0,38	0,10	2,26E-02

Valori di θ_T , θ_r , θ_e , θ_w e θ_a in funzione della distribuzione granulometrica

Tessitura	θ_T	θ_r	θ_e	θ_w	θ_a
Sand	0,43	0,045	0,385	0,068	0,317
Loamy Sand	0,41	0,057	0,353	0,103	0,250
Sandy Loam	0,41	0,065	0,345	0,194	0,151
Sandy Clay Loam	0,39	0,100	0,290	0,178	0,112
Loam	0,43	0,078	0,352	0,213	0,139
Silt Loam	0,45	0,067	0,383	0,255	0,128
Clay Loam	0,41	0,095	0,315	0,200	0,115
Silty Clay Loam	0,43	0,089	0,341	0,246	0,095
Silty Clay	0,36	0,070	0,290	0,274	0,016
Silt	0,46	0,034	0,426	0,278	0,148
Sandy Clay	0,38	0,100	0,280	0,228	0,052
Clay	0,38	0,068	0,312	0,304	0,008

3.2.2 Parametri del terreno in zona insatura

Per la stima indiretta di $q_{w,cap}$ e $q_{a,cap}$ si fa riferimento ai valori riportati in Tabella e desunti dalla integrazione dei dati forniti dai riferimenti bibliografici a cui si fa più comunemente riferimento [Connor et al., 1996] [Van Genuchten model, 1976 e 1980].

Valori di $q_{w,cap}$ e $q_{a,cap}$ in funzione della distribuzione granulometrica

<i>Tessitura</i>	θ_T	θ_r	θ_e	$\theta_{w,cap}$	$\theta_{a,cap}$
Sand	0,43	0,045	0,385	0,330	0,055
Loamy Sand	0,41	0,057	0,353	0,318	0,035
Sandy Loam	0,41	0,065	0,345	0,288	0,057
Sandy Clay Loam	0,39	0,100	0,290	0,248	0,042
Loam	0,43	0,078	0,352	0,317	0,035
Silt Loam	0,45	0,067	0,383	0,297	0,086
Clay Loam	0,41	0,095	0,315	0,288	0,027
Silty Clay Loam	0,43	0,089	0,341	0,317	0,024
Silty Clay	0,36	0,070	0,290	0,282	0,008
Silt	0,46	0,034	0,426	0,383	0,043
Sandy Clay	0,38	0,100	0,280	0,252	0,028
Clay	0,38	0,068	0,312	0,308	0,004

3.2.2 Parametri del terreno in zona insatura

Nel caso in cui la sorgente secondaria di contaminazione sia costituita da terreno omogeneo o approssimabile come tale, l'infiltrazione efficace media annua può essere stimata in funzione delle precipitazioni medie annue e del tipo di tessitura prevalente nel suolo (sabbiosa, limosa o argillosa) a mezzo delle seguenti relazioni empiriche:

$$I_{ef} = 0,0018 \cdot P^2 \quad \text{per terreni sabbiosi (SAND)}$$

$$I_{ef} = 0,0009 \cdot P^2 \quad \text{per terreni limosi (SILT)}$$

$$I_{ef} = 0,00018 \cdot P^2 \quad \text{per terreni argillosi (CLAY)}$$

dove le suddette correlazioni prevedono valori di precipitazione media annua e di Infiltrazione efficace espressi in cm/anno.

Inoltre, per correlare le relazioni sopra riportate con la classificazione dei terreni composti basata sul metodo dell'USDA, si sottolinea che :

- Nella classe SAND sono comprese le tessiture: Sand, Loamy Sand e Sandy Loam;
- Nella classe SILT sono comprese le tessiture: Sandy Clay Loam, Loam, Silt Loam e Silt;
- Nella classe CLAY sono comprese le tessiture: Clay Loam, Silty Clay Loam, Silty Clay, Sandy Clay e Clay.

3.2.3 Parametri del terreno in zona satura

Simbolo	Parametro	Unità
V_{gw}	Velocità di Darcy	cm/anno
K_{sat}	Conducibilità idraulica del terreno saturo	cm/anno
i	Gradiente idraulico	adim.
V_e	Velocità media effettiva nella falda	cm/anno
θ_T	Porosità totale del terreno in zona satura	adim.
θ_e	Porosità effettiva del terreno in zona satura	adim.
f_{oc}	Frazione di carbonio organico nel suolo saturo	adim.
α_x	Dispersione longitudinale	cm
α_y	Dispersione trasversale	cm
α_z	Dispersione verticale	cm
λ	Coefficiente di decadimento del primo ordine	1/giorno

3.2.3 Parametri del terreno in zona satura

Velocità di Darcy v_{gw} [cm/anno]

$$v_{gw} = K_{sat} \cdot i$$

Gradiente idraulico: rapporto tra la perdita di carico piezometrico Δh e il tratto L in cui essa si verifica

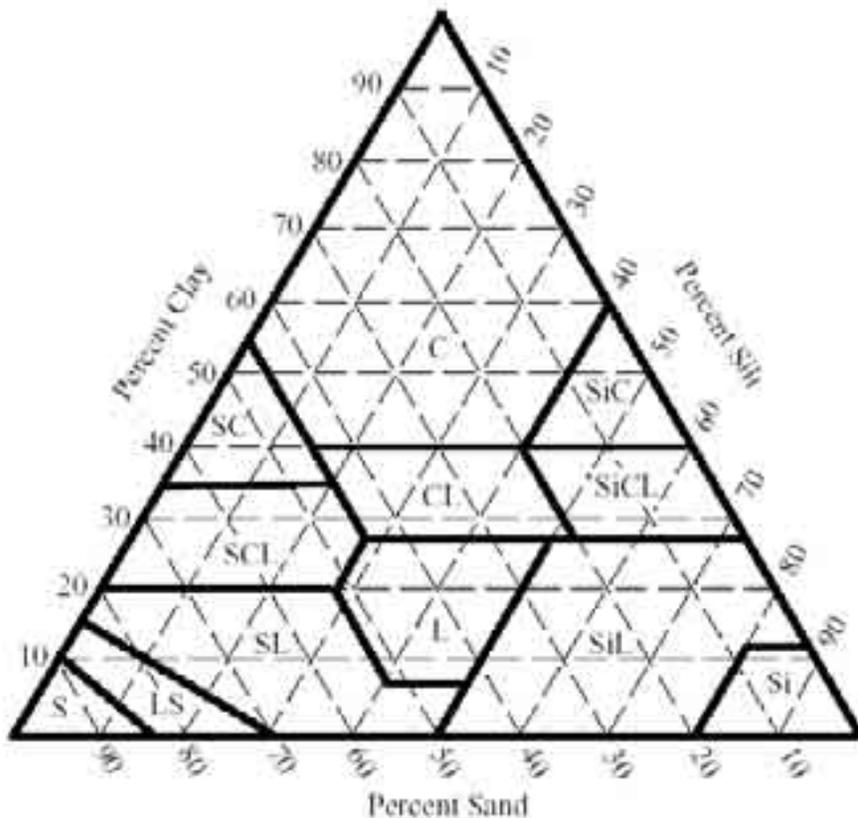
$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Velocità media effettiva dell'acqua nella falda v_e [cm/anno]

$$v_e = \frac{v_{gw}}{\theta_e} = \frac{K_{sat} \cdot i}{\theta_e}$$

3.2.3 Parametri del terreno in zona satura

Valori di K_{sat} in funzione della distribuzione granulometrica



<i>Tessitura</i>	K_{sat} [cm/s]
	(Carsel and Parrish., 1988)
Sand	8,25E-03
Loamy Sand	4,05E-03
Sandy Loam	1,23E-03
Sandy Clay Loam	3,64E-04
Loam	2,89E-04
Silt Loam	1,25E-04
Clay Loam	7,22E-05
Silty Clay Loam	1,94E-05
Silty Clay	5,56E-06
Silt	6,94E-05
Sandy Clay	3,33E-05
Clay	5,56E-05

3.2.3 Parametri del terreno in zona satura

Dispersività longitudinale

1. Pickens e Grisak (1981) $\alpha_x(1) = 0,1 \times L$ (A.1)

2. Xu e Eckstein (1995) $\alpha_x(2) = 0,83 \times (\log L)^{2,414}$ (A.2)

3. Gelhar et al. (1985): $\ln \alpha_x(3) = -3,795 + 1,774 \ln L - 0,093(\ln L)^2$ (A.3)

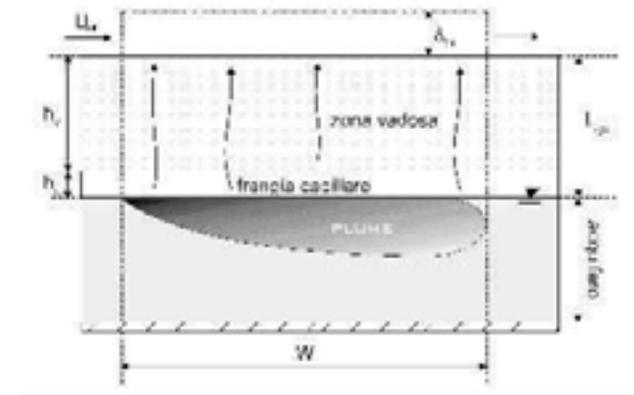
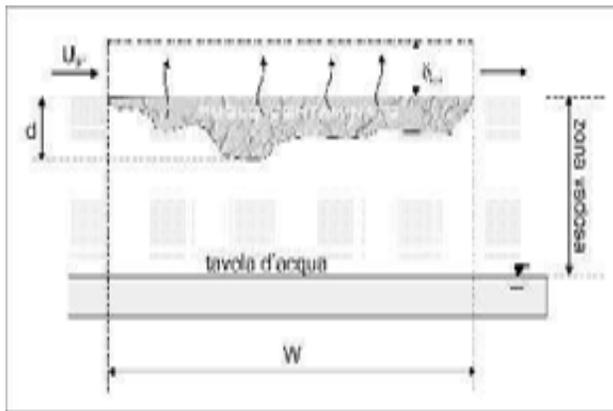
Noto il valore di dispersività longitudinale α_x , si stimano i valori di dispersività trasversale α_y e verticale α_z attraverso le seguenti relazioni [American Petroleum Institute's Report, 1987]:

$$\alpha_y = \frac{\alpha_x}{3}$$

$$\alpha_z = \frac{\alpha_x}{20}$$

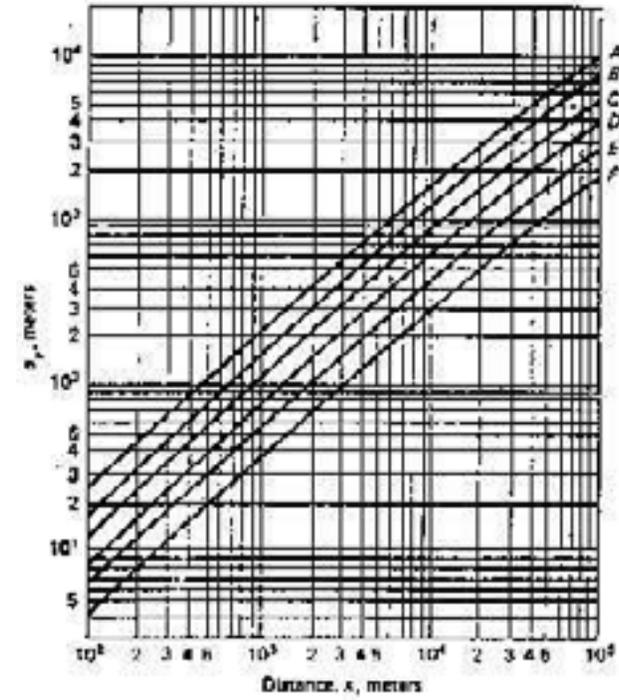
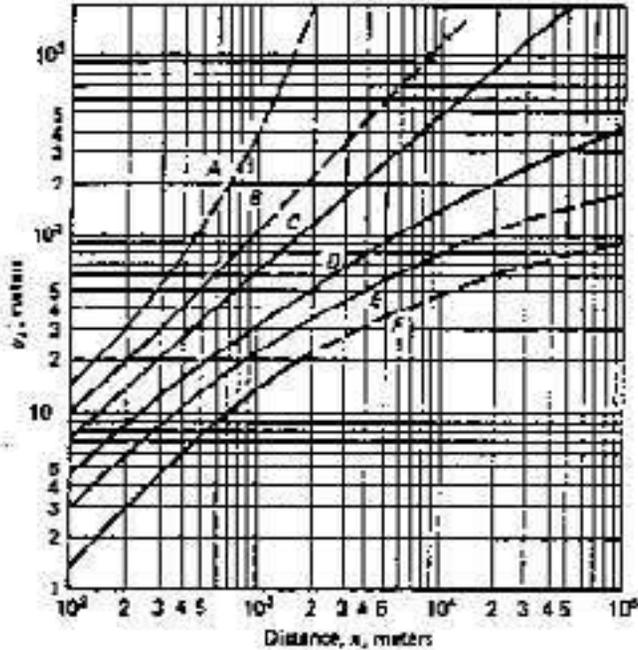
3.2.4 Parametri degli ambienti aperti

Simbolo	Parametro	Unità
δ_{air}	Altezza della zona di miscelazione in aria	cm
W'	Estensione della sorgente di contaminazione nella direzione principale del vento	cm
S_w'	Estensione della sorgente di contaminazione nella direzione ortogonale a quella principale del vento	cm
A'	Area della sorgente (rispetto alla direzione prevalente del vento)	cm ²
U_{air}	Velocità del vento	cm/s
σ_y	Coefficiente di dispersione trasversale	cm
σ_z	Coefficiente di dispersione verticale	cm
τ	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anno
P_e	Portata di particolato per unità di superficie	g/(cm ² -s)



Coefficiente di dispersione trasversale e verticale

3.2.4 Parametri degli ambienti aperti



Coefficiente di dispersione trasversale σ_y (Turner, 1970)

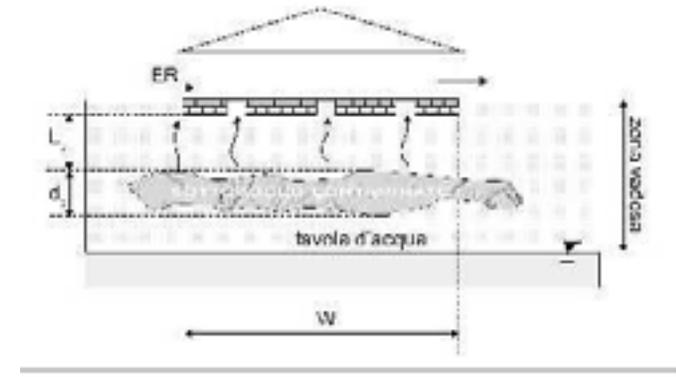
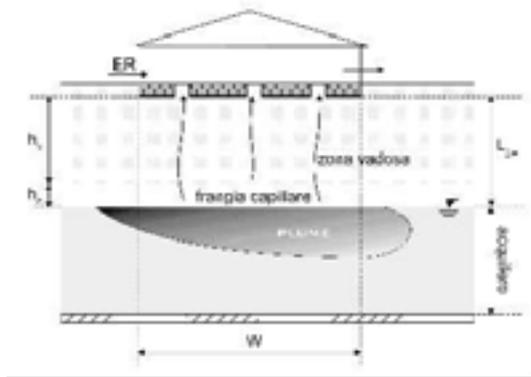
er, 1970)

Classi di stabilità di Pasquill

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

3.2.5 Parametri degli ambienti confinati

Simbolo	Parametro	Unità
A_b	Superficie totale coinvolta nell'infiltrazione	cm^2
L_{crack}	Spessore delle fondazioni/muri	cm
L_b	Rapporto tra volume indoor ed area di infiltrazione	cm
η	Frazione areale di fratture	adim.
θ_{wcrack}	Contenuto volumetrico di acqua nelle fratture	adim.
θ_{acrack}	Contenuto volumetrico di aria nelle fratture	adim.
ER	Tasso di ricambio di aria indoor	1/giorno
L_T	Distanza tra il top della sorgente e la base delle fondazioni	cm
Z_{crack}	Profondità delle fondazioni	cm
K_V	Permeabilità del suolo al flusso di vapore	cm^2
Δp	Differenza di pressione tra indoor e outdoor	$\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^2)$
μ_{air}	Viscosità del vapore	$\text{g}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$
τ	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anno



3.2.6 Parametri delle acque superficiali

Simbolo	Parametro	Unità
b_{sw}	Altezza idrometrica	m
d_{sw}	Spessore della falda	cm
D_{ysw}	Coefficiente di dispersione laterale	m/s
f_{ocs}	Contenuto di carbonio organico nei sedimenti	adim
Frac	Frazione di volume di controllo per la miscelazione	adim
h_{gw}	Potenziale idraulico della falda	cm
h_{sw}	Potenziale idraulico del corpo idrico	cm
i_{sw}	Cadente piezometrica tra falda e pelo libero del c.i.s.	adim
L_p	Distanza fra sorgente in falda e corpo idrico	cm
L_{reach}	Larghezza del plume contaminato	cm
Q_{sw}	Portata del corpo idrico superficiale	m^3/s
Q_{sw}	Portata della falda	m^3/d
S_{sw}	Sezione trasversale del corso idrico superficiale	m
V	Volume del corpo idrico per la miscelazione	m^3
v_{sw}	Velocità dell'acqua del corso idrico superficiale	m/s
W_{sw}	Larghezza del corso idrico superficiale	m

Parametri caratteristici del sito: valori di default di livello 1

			Destinazione d'uso del suolo
			Residenziale/Industriale
Simbolo	Parametro	Unità	Valore di default (Livello 1) ASTM PS-104-98
Parametri del terreno in zona insatura			
ρ_s	Densità del suolo	g/cm ³	1,7
Parametri dell'aria outdoor			
δ_{air}	Altezza della zona di miscelazione in aria	cm	200
τ	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anno	30
P_e	Portata di particolato per unità di superficie	g/(cm ² -s)	6,90E-14
Caratterizzazione dell'aria indoor			
L_{crack}	Spessore delle fondazioni/muri	cm	15
η	Frazione areale di fratture	adim.	0,01
ER	Tasso di ricambio di aria indoor (Residenziale)	1/giorno	12
ER	Tasso di ricambio di aria indoor (Ind/Comm)	1/giorno	20
Z_{crack}	Profondità delle fondazioni	cm	15
K_v	Permeabilità del suolo al flusso di vapore	cm ²	1,00E-08
Δp	Differenza di pressione tra indoor e outdoor	g/(cm*s ²)	0
μ_{air}	Viscosità del vapore	g/(cm*s)	1,81E-04
τ	Tempo medio di durata del flusso di vapore	anno	30

Criteria metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati (APAT, 2005)

3. COSTRUZIONE DEL MODELLO CONCETTUALE

3.3 Vie di migrazione: Criteria 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. Nell'analisi di rischio questo aspetto assume notevole rilevanza dovuta al fatto che una sottostima o sovrastima dei fattori di trasporto porta a valori del rischio e dei limiti di bonifica rispettivamente troppo bassi o troppo alti.

Calcolo della concentrazione al punto di esposizione

Assegnata la concentrazione in sorgente, si calcola quella la concentrazione nel punto di esposizione attraverso la seguente relazione:

dove con FT viene indicata l'attenuazione che interviene tra la sorgente e il punto di esposizione, $C_{pos} = FT \cdot C_s$ tiene conto dei fenomeni di attenuazione e dei contaminanti. Questo termine, in funzione del tipo di analisi scelta, potrà essere espressione della migrazione verso bersagli di tipo on-site nel caso di livello 1 o verso bersagli di tipo on-site e off-site nel caso di analisi di livello 2.

Occorre osservare che, riferendoci in questo studio ad 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.

Criteri metodologici per l'applicazione dell'analisi assoluta di rischio ai siti contaminati (APAT, 2005)

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

3.3.1 Lisciviazione e dispersione in falda

3.3.1a Calcolo del fattore di lisciviazione

3.3.1b Modello di dispersione in falda

3.2.2 Volatilizzazione in aria outdoor (ambienti aperti)

3.3.2a Volatil. vapori/emissione polveri suolo superficiale

3.3.2b Volatilizzazione di vapori da suolo profondo

3.3.2c Volatilizzazione di vapori da falda

3.3.2d Dispersione in aria outdoor

3.3.3 Volatilizzazione in aria indoor (ambienti chiusi)

3.3.3a Volatilizzazione di vapori da suolo / polveri suolo sup.le

3.3.3b Volatilizzazione di vapori da falda

3.3.4 Migrazione dall'acqua di falda all'acqua superficiale

STANDARD

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 ”.

SOFTWARE

RBCA Tool Kit ver. 1.2

BP-RISC ver. 4.0

ROME ver. 02

GIUDITTA ver.2.0

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;

VFss = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale;

VF samb = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo;

VFwamb = fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda;

PEF = emissione di particolato outdoor da suolo superficiale;

PEFin = emissione di particolato indoor da suolo superficiale;

VFsesp = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo;

VFwesp = fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda;

RDF = fattore di migrazione dall'acqua di falda all'acqua superficiale.

Ipotesi di base

In generale, le principali assunzioni, su cui si basano le equazioni riportate nel seguito, 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 suoli 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)

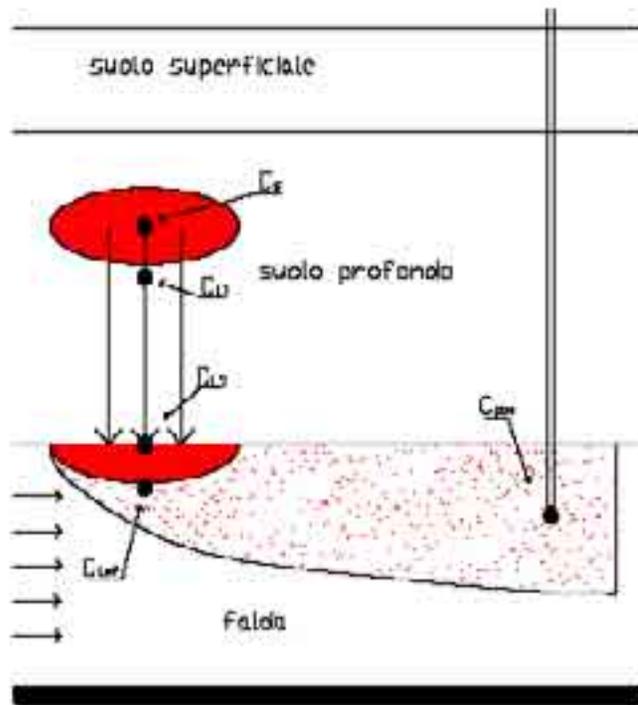


Fig. 4.2

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 a causa dell'infiltrazione d'acqua nello strato insaturo di suolo ed alla successiva diluizione nell'acquifero superficiale. Quindi, tale fattore rappresenta il rapporto tra la concentrazione nella sorgente (C_s) e quella che si avrà nella falda (C_{Lmf}):

$$LF = \frac{C_{Lmf}}{C_s} \left[\frac{\frac{mg}{l - H_2O}}{Kg - suolo} \right]$$

$$LF = \frac{\rho_s}{(\theta_w + \rho_s k_s + H\theta_a) \cdot \left(1 + \frac{V_{gw} \cdot \delta_{gw}}{I_{gf} \cdot W}\right)} \cdot \frac{d_s}{L_F} = \frac{k_{ws} \cdot SAM}{LDF} = \frac{C_{L1}}{C_s} \cdot \frac{C'_{L1}}{C_{L1}} \cdot \frac{C_{Lmf}}{C'_{L1}}$$

Fattore di lisciviazione in falda (LF)

1. Coefficiente di partizione suolo-acqua:

$$k_{sw} = \frac{C_{L1}}{C_s} = \left[\frac{mg / L - H_2O}{mg / kg - suolo} \right] = \frac{\rho_s}{\theta_w + k_s \rho_s + H\theta_a}$$

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):

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

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

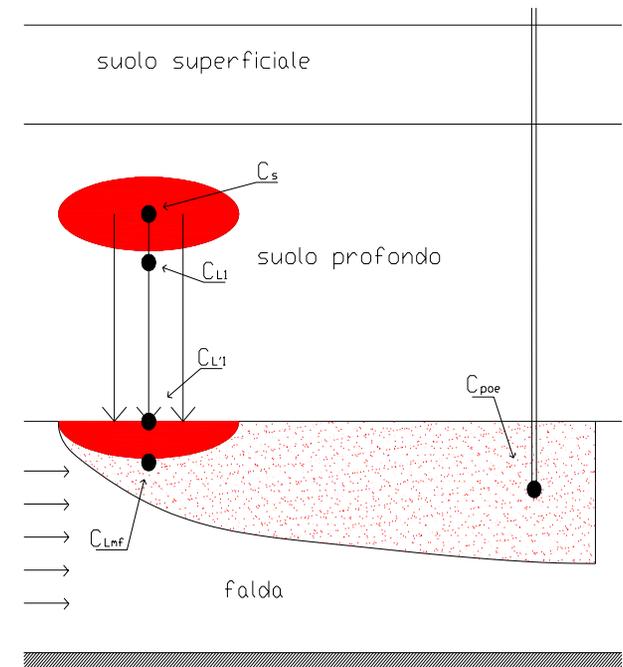


Fig. 4.2

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.

Tab. B.4 - Software esaminati: calcolo del Fattore di lisciviazione (LF)

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0
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 $C_s(\text{falda})$ e la concentrazione al punto di esposizione $C_{POE}(\text{falda})$ situato a distanza x dalla sorgente nel verso di flusso:

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

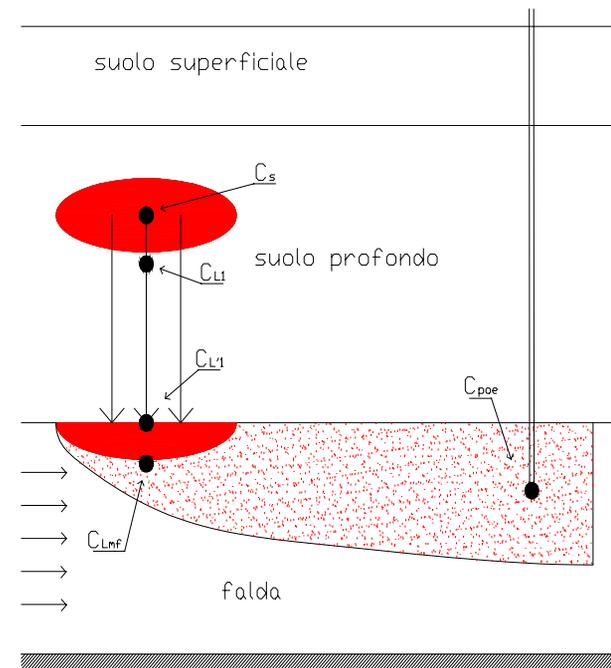
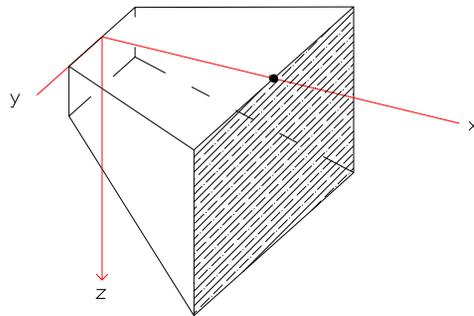


Fig. 4.2

Fattore di attenuazione in falda (DAF)

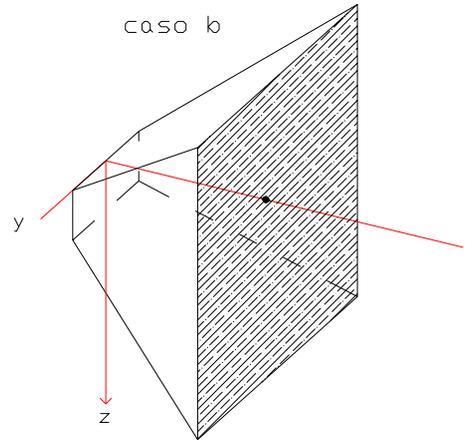
Caso 2 – DAF(2)

caso a



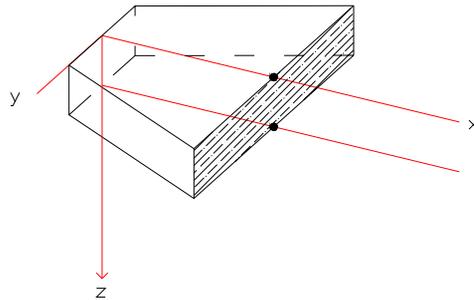
Caso 1 – DAF(1)

caso b



Caso 3 – DAF(3)

caso c



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)

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{S_d}{4\sqrt{\alpha_z x}}\right) \right]$$

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

Caso 2 - DAF(2)

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right) \right]$$

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)

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right]$$

Se l'acquifero è interessato in tutto il suo spessore dalla contaminazione, condizione possibile quanto minore è lo spessore dell'acquifero, non potrà esserci dispersione verticale, per cui l'equazione sopra riportata diventa:

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 :

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

quando l'altezza della sorgente di contaminazione in falda S_d ($= \delta_{gw}$) è inferiore allo spessore della falda da .

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

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)

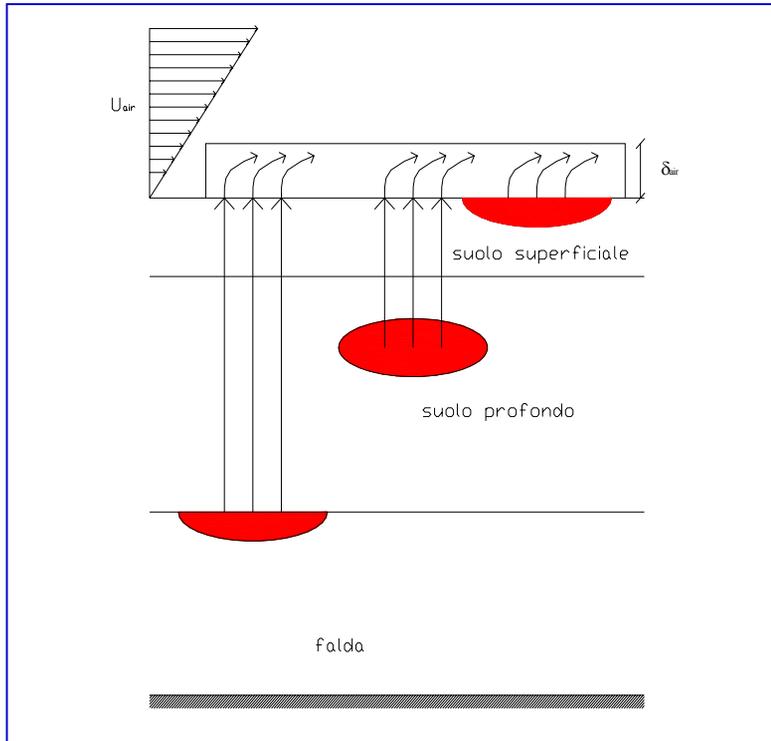
Tab. C.1- Testi di riferimento: calcolo del Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF)

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

Tab. C.4- Software esaminati: calcolo del Fattore di attenuazione laterale in falda (DAF)

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0
DAF(1)	X	X	X	X
DAF(2)				
DAF(3)				

FATTORI DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR



hp.

SORGENTE DI CONTAMINAZIONE:

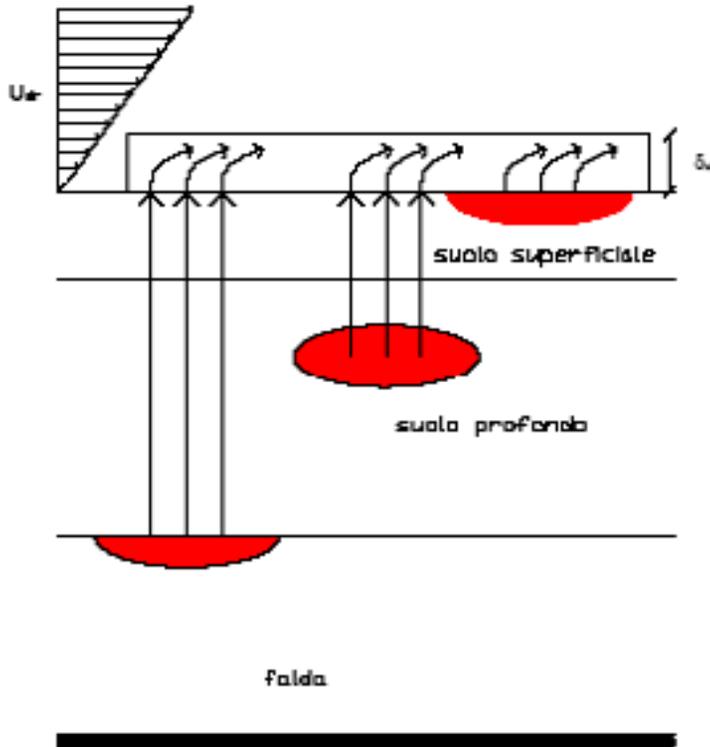
- a) suolo superficiale (SS)
- b) suolo profondo (SP)
- c) falda (GW)

MODALITA' DI ESPOSIZIONE:

- Inalazione in ambienti aperti (OUTDOOR)

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

Fattori di volatilizzazione outdoor da SS (VF_{ss})



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):

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

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Superficiale

$$VF_{ss}(1) = \frac{2W' \rho_s}{U_{air} \delta_{air}} \cdot \sqrt{\frac{D_s^{eff} H}{\pi \tau (\vartheta_w + k_s \rho_s + H \vartheta_a)}} \cdot 10^3 \quad (D.1)$$

$$VF_{ss}(2) = \frac{W' \rho_s d}{U_{air} \delta_{air} \tau} \cdot 10^3$$

$$D_s^{eff} = D_a \frac{\vartheta_a^{3.33}}{\vartheta_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{\vartheta_w^{3.33}}{\vartheta_e^2}$$

(D.2)

$$VF_{ss}(3) = \frac{H \rho}{U_{air} W' \delta_{air} \cdot [\theta_{as} H + k_s \rho_s + \theta_{ws}]} \cdot A' \cdot D_s^{eff} \cdot \frac{1}{L_s} \cdot 10^3 \quad (D.4)$$

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

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Superficiale

Tab. D.1- Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (VF_{ss})

	ASTM E-1739-95	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG (*)	RAGS (*)
VFss(1)	X	X	X			
VFss(2)	X	X	X			
VFss(3)				X		
VFss(4)					X	X

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

Tabella D.4 – Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo superficiale (VF_{ss})

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0
VFss(1)	X	X		X
VFss(2)	X	X		X
VFss(3)			X	
VFss(4)				

FATTORI DI VOLATILIZZAZIONE OUTDOOR

STIMA MEDIANTE CONFRONTO DI

EQUAZIONI ANALITICHE

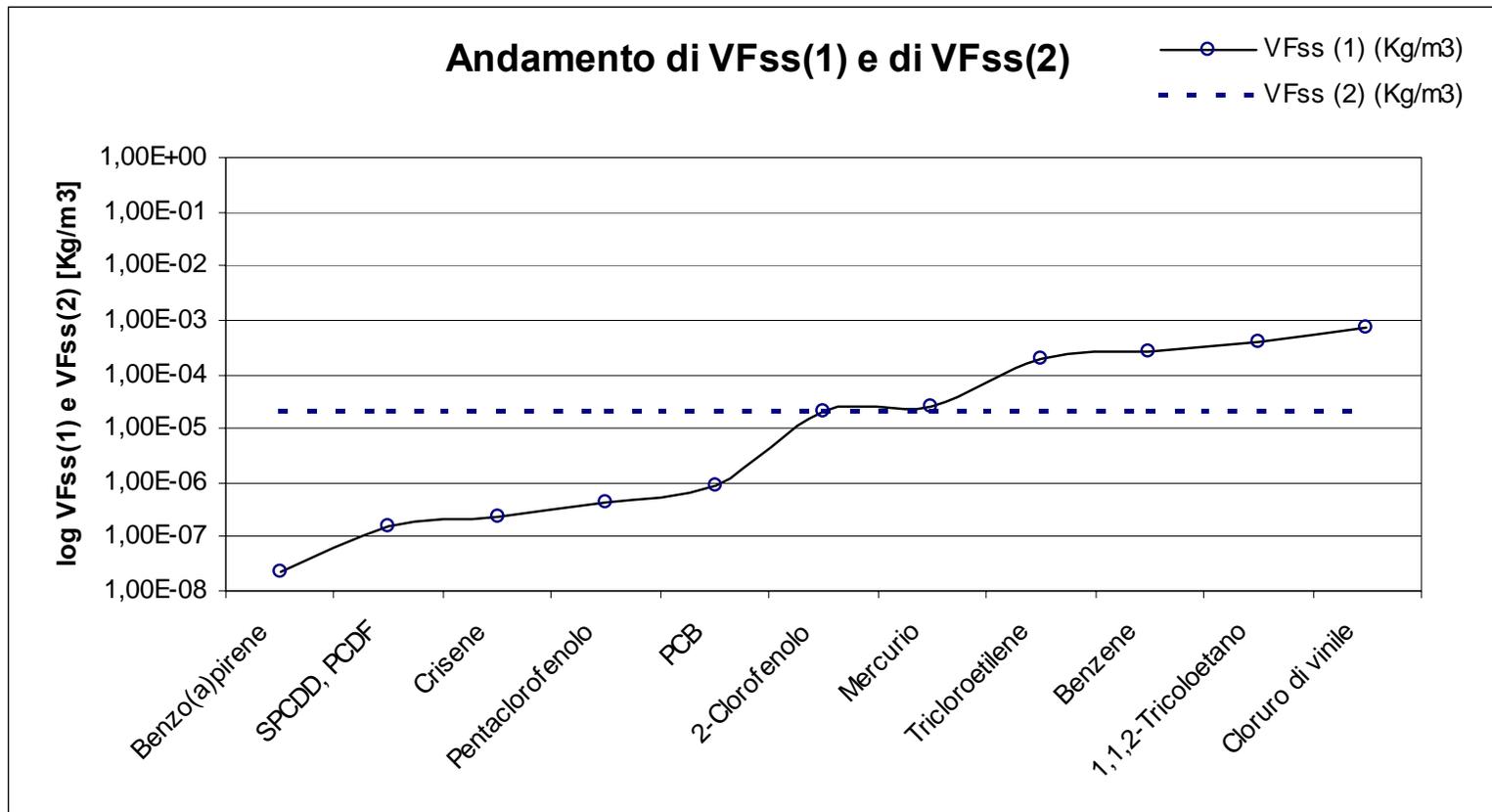
Sostanze chimiche selezionate per l'analisi (DM 471/99):

+ VOLATILI

Specie chimica	n.	Costante di Henry	D_{air}
		adim.	cm ² /s
Cloruro di vinile	1	1,09E+00	1,06E-01
1,1,2-Tricloroetano	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
Σ PCDD, PCDF	10	1,35E-03	1,00E-01
Benzo(a)pirene	11	4,63E-05	4,30E-02

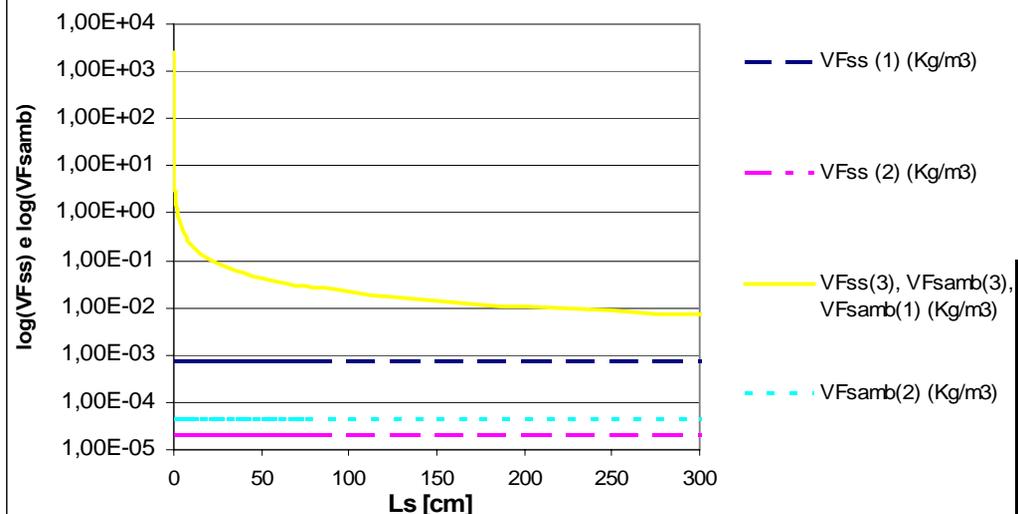
- VOLATILI

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Superficiale



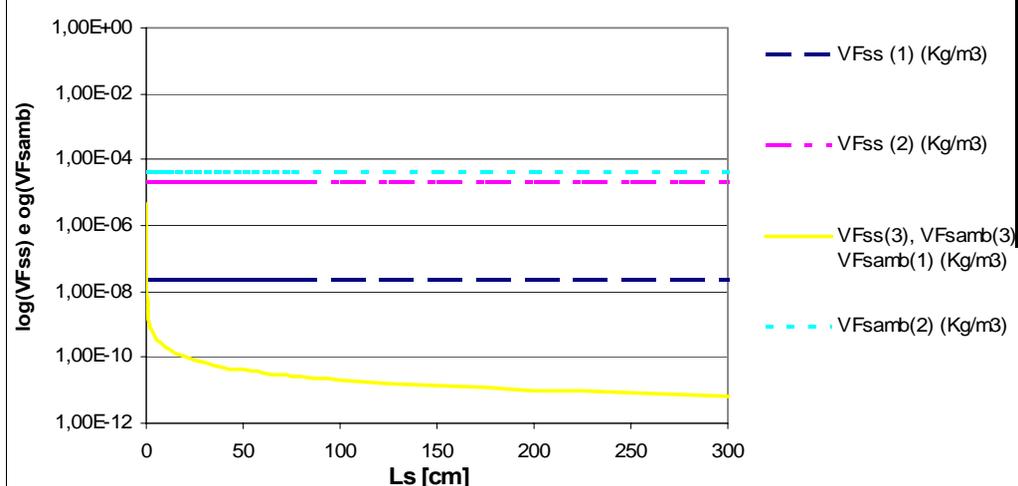
Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Superficiale

CLORURO DI VINILE



L _s (cm)	VFss(3)		
	Mercurio	Benzene	Benzo(a)pirene
0	∞	∞	∞
0,005	4,11E-01	3,78E+01	3,74E-07
0,01	2,10E-01	2,01E+01	1,95E-07
0,025	8,54E-02	8,37E+00	8,00E-08
0,05	4,29E-02	4,24E+00	4,04E-08
0,1	2,15E-02	2,13E+00	2,03E-08
0,5	4,31E-03	4,29E-01	4,07E-09
0,75	2,87E-03	2,86E-01	2,71E-09
0,85	2,53E-03	2,53E-01	2,40E-09
1	2,15E-03	2,15E-01	2,04E-09

BENZO(a)PIRENE



Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Superficiale

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

- Escludere l'utilizzo dell'equazione $VF_{ss}(2)$ poiché per i composti volatili comporta una forte approssimazione, restituendo, in tal caso, un valore che non dipende dalla specie chimica esaminata.
- Escludere l'utilizzo dell'equazione $VF_{ss}(3)$ 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 $VF_{ss}(1)$, risultano essere estremamente conservativi per i composti molto volatili, e poco conservativi per i composti meno volatili. Inoltre, l'utilizzo della equazione $VF_{ss}(3)$ 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, l'equazione $VF_{ss}(1)$ per tutte le specie chimiche indipendentemente dalla loro volatilità.

Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da SP (VFamb)

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):

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

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Profondo

$$VF_{samb}(1) = \frac{H\rho_s}{(\varrho_w + k_s\rho_s + H\varrho_a) \cdot \left(1 + \frac{U_{air}\delta_{air}L_s}{D_s^{eff}W'}\right)} \cdot 10^3 \quad (D.8)$$

$$VF_{samb}(2) = \frac{W'\rho_s d_s}{U_{air}\delta_{air}\tau} \cdot 10^3 \quad (D.9)$$

$$VF_{samb}(3) = \frac{H\rho}{U_{air}W'\delta_{air} \cdot [\theta_{as}H + k_s\rho_s + \theta_{ws}]} \cdot A \cdot D_s^{eff} \cdot \frac{1}{L_s} \cdot 10^3 \quad (D.10)$$

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

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Profondo

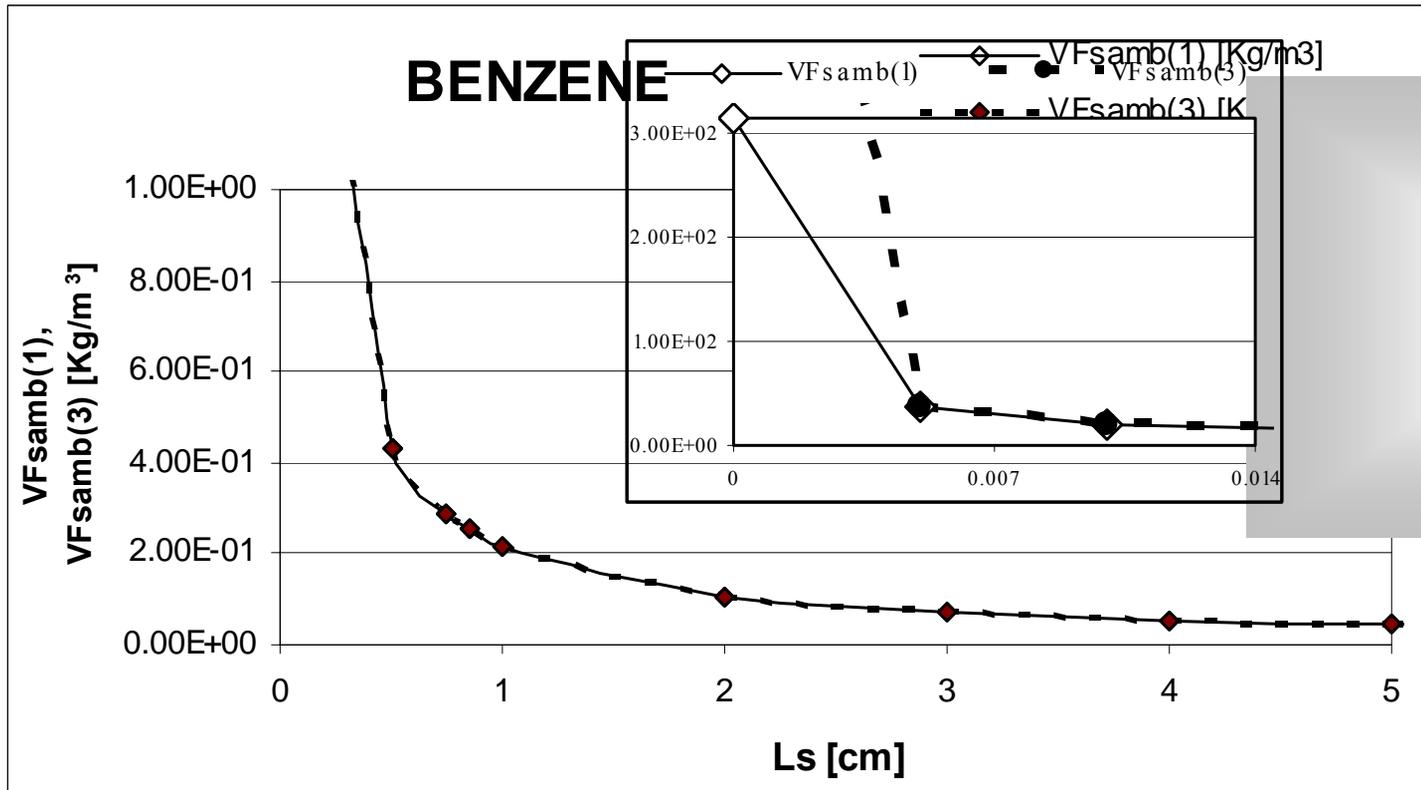
Tab. D.5 - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (VF_{Samb})

	ASTM E-1739-95	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report n.2/97	EPA - SSG	RAGS
VF _{samb} (1)	X	X	X			
VF _{samb} (2)			X			
VF _{samb} (3)				X		
VF _{samb} (4)					X	X

Tabella D.6 – Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (VF_{samb})

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0
VF _{samb} (1)	X	X		X
VF _{samb} (2)	X			
VF _{samb} (3)			X	

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Profondo

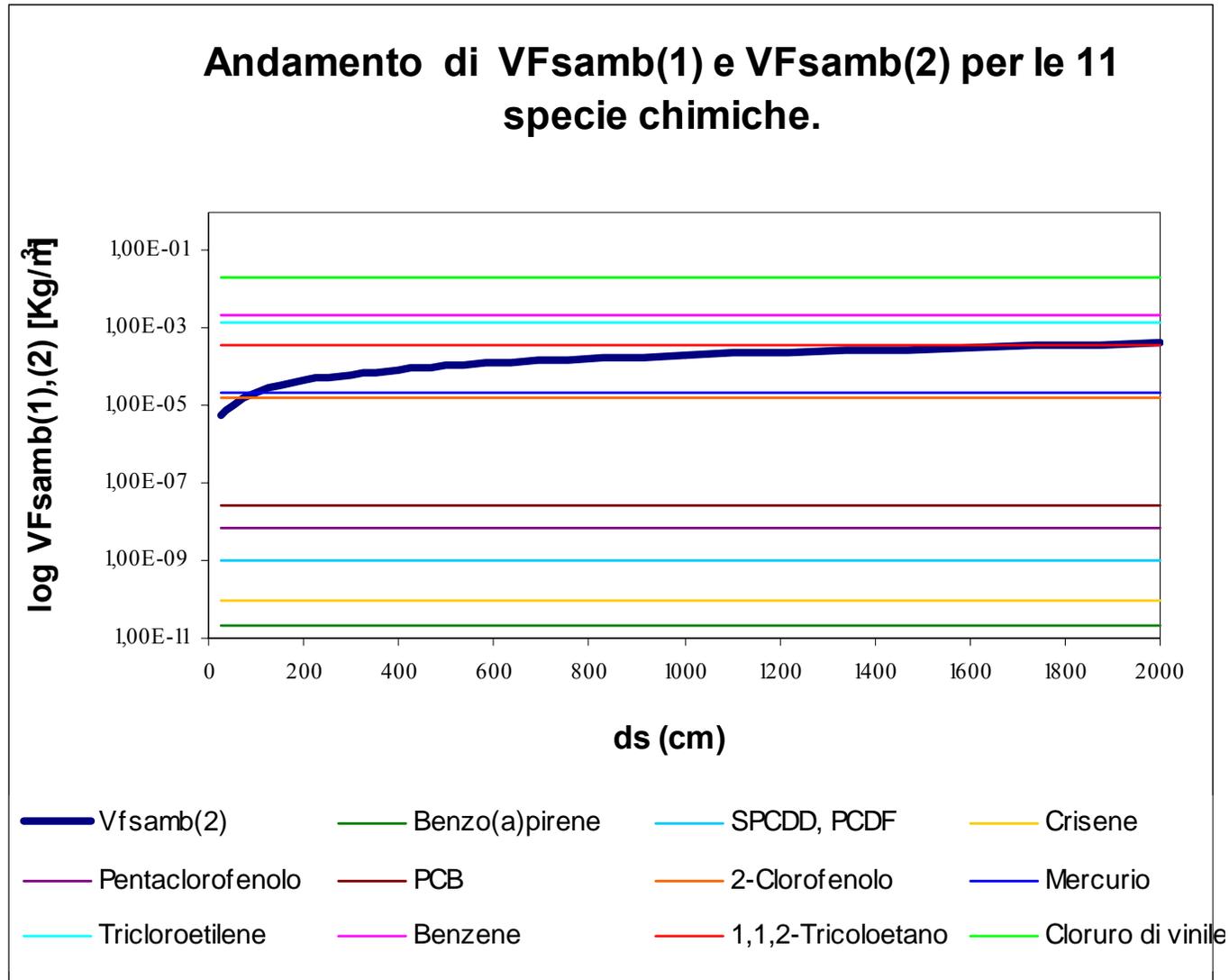


Confronto tra VF_{samb(1)} e VF_{samb(3)}

Per $L_s \rightarrow 0$, infatti, si ha che:

$$VF_{samb}(1) = \frac{H\rho_s}{(g_w + k_s\rho_s + Hg_a)} \cdot 10^3 \quad e \quad VF_{samb}(3) = \infty.$$

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Profondo



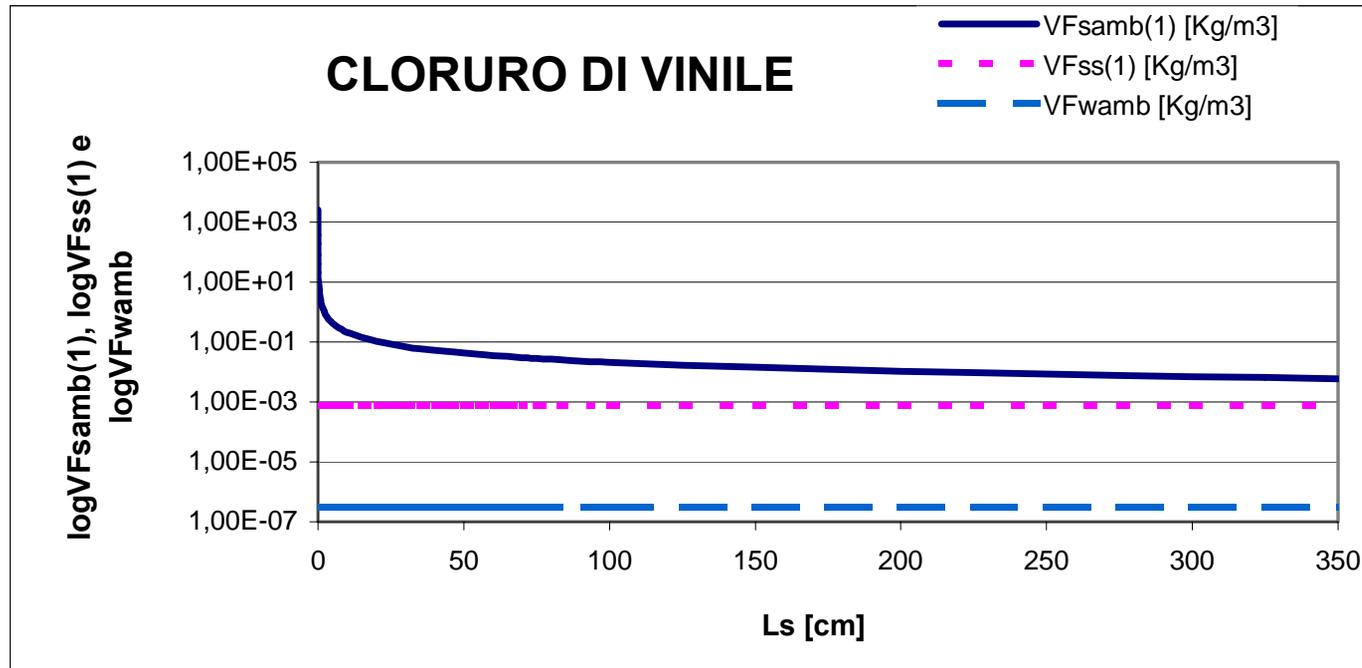
d_s : spessore della sorgente nel suolo profondo (insaturo)

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Profondo

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

- Escludere l'utilizzo dell'equazione $VF_{samb}(2)$ poiché l'applicazione della equazione $VF_{samb}(2)$ per i composti volatili comporta una forte approssimazione, restituendo un valore che non dipende sia dalla specie chimica esaminata, sia alla profondità del top della sorgente di contaminazione rispetto al piano campagna L_s .
- Selezionare, quindi, l'equazione $VF_{semp}(1)$, oppure l'equazione $VF_{semp}(3)$ poiché, se pur simili ma non uguali, forniscono per il suolo profondo ($L_s \geq 1m$) gli stessi valori. Tra le due si preferisce la $VF_{semp}(1)$ per uniformità con le scelte effettuate per gli altri fattori di trasporto.

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo 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 si propone di porre $VF_{samb} = VF_{ss}$

Volatilizzazione in ambienti aperti / Suolo Profondo

A valle delle considerazioni sopra esposte, si ritiene opportuno stimare il fattore di volatilizzazione da suolo profondo in ambienti aperti, adottando le equazioni VF_{ss}(1) e VF_{samb}(1) (\cong VF_{samb}(3)):

$$VF_{ss}(1) = \frac{2W' \rho_s}{U_{air} \delta_{air}} \cdot \sqrt{\frac{D_s^{eff} H}{\pi \tau (\mathcal{G}_w + k_s \rho_s + H \mathcal{G}_a)}} \cdot 10^3 \quad (D.11)$$

$$VF_{samb}(1) = \frac{H \rho_s}{(\mathcal{G}_w + k_s \rho_s + H \mathcal{G}_a) \cdot \left(1 + \frac{U_{air} \delta_{air} L_s}{D_s^{eff} W'} \right)} \cdot 10^3 \quad (D.12)$$

calcolando entrambe e selezionando, come risultato, il minore tra i due.

Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF_{wamb})

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:

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

Volatilizzazione in ambienti aperti / Falda

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

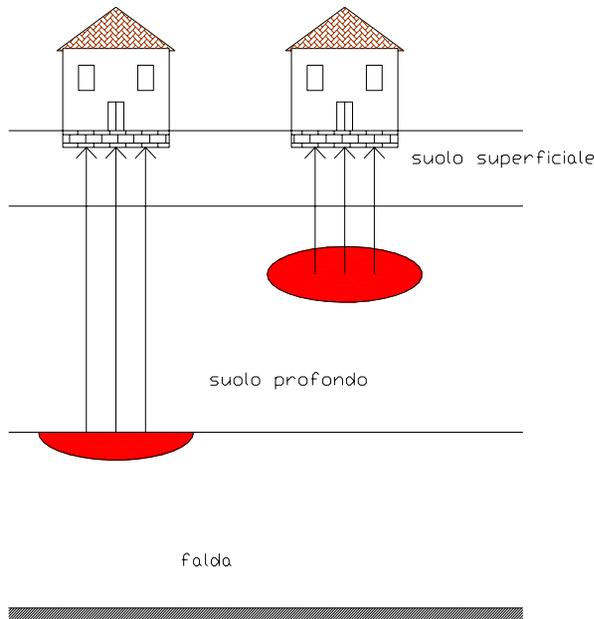
Tab. D.7 - Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF_{wamb})

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

Tab. D.8 - Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF_{wamb})

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0
VFwamb	X	X	X	X

FATTORI DI VOLATILIZZAZIONE INDOOR



SORGENTE DI CONTAMINAZIONE:

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

MODALITA' DI ESPOSIZIONE:

Inalazione in ambienti confinati (INDOOR)

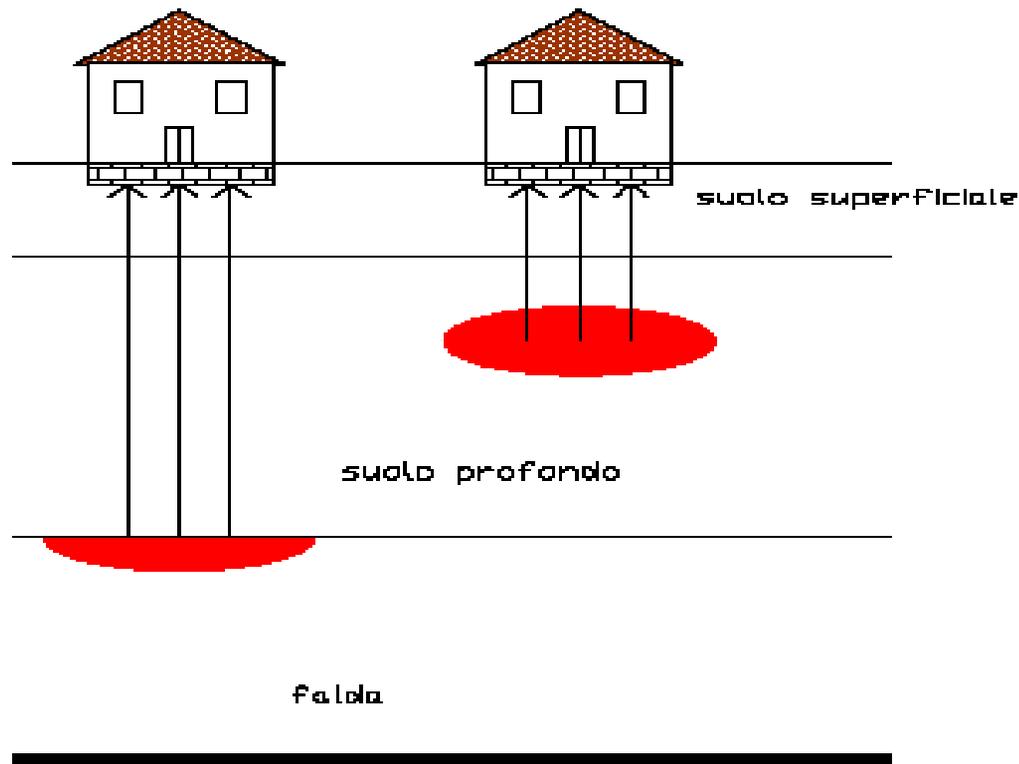
hp.

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

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VF_{sest})

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).

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



Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VFsesp)

Modello di Jonson-Ettinger.

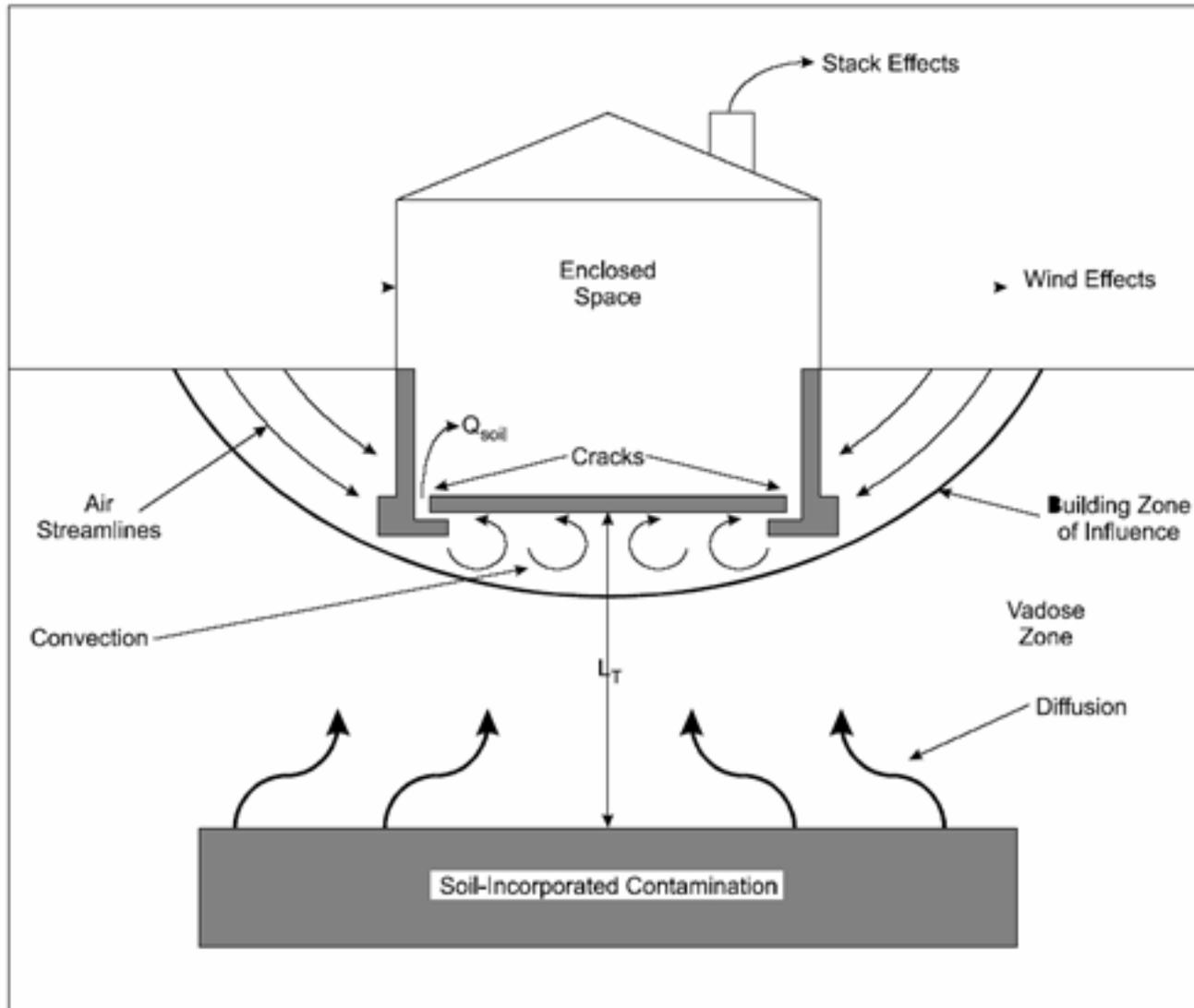
Il modello di Johnson-Ettinger è un modello analitico monodimensionale, che descrive il meccanismo di trasporto di una specie chimica dal suolo o dalla falda in ambienti indoor secondo modalità diffusive e convettive.

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 (ΔP) tra indoor e outdoor .

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VFsesp)



Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VF_{sest})

Tutti i testi adottati quali standard di riferimento propongono, per il calcolo di VF_{sest}, l'equazione valida ipotizzando $Q_s = 0$ (quindi $\Delta P = 0$), che tiene conto del contributo diffusivo e trascura quello convettivo:

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

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 $\Delta P > 0$):

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

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

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VF_{seep})

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:

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

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

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

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VFsesp)

Tabella F.1 – Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VFsesp)

	ASTM E-1739-95	PS 104-98	UNICHIM n.196/1 2002	Concawe report 1997	EPA - 2003 (*)	RAGS
VFsesp(1)	X	X	X	X	X	--
VFsesp(2)		X	X		X	
VFsesp(3)			X		X	
VFsesp(4)					X	
(*) EPA-EQM 2003 "User's guide for evaluating subsurface vapour intrusion into building"						

Tabella F.4 – Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VFsesp)

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0
VFsesp(1)	X	X	X	X
VFsesp(2)	X	X		X
VFsesp(3)	X			
VFsesp(4)				

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VF_{sesp})

Le quattro equazioni individuate ($VF_{sesp}(1)$, $VF_{sesp}(2)$, $VF_{sesp}(3)$ e $VF_{sesp}(4)$), utili per il calcolo del fattore di volatilizzazione indoor da suolo, sono state poste a confronto e sono stati analizzati i diversi output al fine di selezionare quella o quelle ritenute più idonee per l'applicazione dell'analisi di rischio di livello 2.

Si ricorda che nei testi di riferimento (ed anche nei software esaminati, come riportato nel paragrafo F.2.2) nei quali sono proposte le due equazioni $VF_{sesp}(1)$ (o $VF_{sesp}(2)$) e $VF_{sesp}(3)$, si richiede il calcolo di entrambe e la selezione di quella che restituisce il valore minore. A valle di quanto detto, dalla analisi dei grafici risulta che:

- l'equazione $VF_{sesp}(2)$ fornisce, come è ovvio, valori sempre più conservativi rispetto a $VF_{sesp}(1)$;

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VF_{sesp})

- per le sostanze molto volatili risulta $VF_{sesp}(1) > VF_{sesp}(3)$ (anche di diversi ordini di grandezza); mentre, per le sostanze poco volatili si ha $VF_{sesp}(1) < VF_{sesp}(3)$, quindi per le sostanze volatili $VF_{sesp}(1)$ è molto conservativo rispetto a $VF_{sesp}(3)$;
- l'assenza della equazione $VF_{sesp}(4)$ dalla quasi totalità dei testi presi come riferimento è giustificata dal fatto che questa non viene mai utilizzata. Infatti, per le sostanze molto volatili si seleziona sempre la $VF_{sesp}(3)$ (perché $\tau > \tau_d$); mentre, per le sostanze poco volatili si seleziona sempre la $VF_{sesp}(1)$ (o $VF_{sesp}(2)$);
- inoltre, nel caso di sostanze molto volatili, essendo VF calcolato a mezzo della $VF_{sesp}(3)$, il fattore di volatilizzazione indoor da suolo risulta essere indipendente sia dal tipo di contaminante considerato, sia dalla frazione areale di fratture h . Quindi, secondo la $VF_{sesp}(3)$, a un edificio con una pavimentazione completamente impermeabile e ad un edificio privo di pavimentazione corrisponde lo stesso fattore di volatilizzazione.

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor (VFsesp)

$$VF_{sesp} = \frac{\frac{H\rho_s}{(\mathcal{G}_w + k_s\rho_s + H\mathcal{G}_a)} \cdot \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER}}{1 + \frac{D_s^{eff}}{L_T L_b ER} + \frac{D_s^{eff} L_{crack}}{D_{crack}^{eff} L_T \eta}} \cdot 10^3 \quad (3.3.28)$$

dove D_s^{eff} è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso la zona vadosa e D_{crack}^{eff} è il coefficiente di diffusione effettiva attraverso le fenditure delle fondazioni):

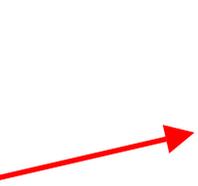
$$D_s^{eff} \left[\frac{cm^2}{s} \right] = D_a \cdot \frac{\mathcal{G}_a^{3.33}}{\mathcal{G}_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{\mathcal{G}_w^{3.33}}{\mathcal{G}_e^2} \quad (3.3.29)$$

$$D_{crack}^{eff} \left[\frac{cm^2}{s} \right] = D_a \cdot \frac{\mathcal{G}_{acrack}^{3.33}}{\mathcal{G}_e^2} + \frac{D_w}{H} \cdot \frac{\mathcal{G}_{wcrack}^{3.33}}{\mathcal{G}_e^2} \quad (3.3.30)$$

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (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 e Ettinger nel 1991 [Johnson-Ettinger ,1991] valida ipotizzando $Q_s = 0$ (quindi $\Delta P = 0$), che tiene conto del contributo diffusivo e trascura quello convettivo:

SELEZIONATA 

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

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (VFwesp)

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

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

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

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

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

Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (VFwesp)

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 di vapori indoor da falda (VFwesp)

Tabella F.5 – Testi di riferimento: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (VFwesp)

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

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

Tabella F.6 – Software esaminati: calcolo del Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (VFwesp)

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0
VFwesp(1)	X	X	X	X
VFwesp(2)	X			X

Capitolo 3.3 Fattori di trasporto

Si evidenzia che le equazioni per il calcolo dei fattori di volatilizzazione, in ambienti aperti (outdoor) e chiusi (indoor) rappresentano la capacità attuale di descrizione matematica dei fenomeni nell'ambito di applicazione di un Livello 2 di Analisi di Rischio. Laddove l'applicazione di tali equazioni determini un valore di rischio non accettabile per la via di esposizione inalazione di vapori outdoor e/o indoor, dovranno essere eventualmente previste campagne di indagini (misure di soil-gas, campionamenti dell'aria indoor e outdoor) allo scopo di verificare i risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello di analisi di rischio; il piano delle indagini e dei monitoraggi dovrà essere concordato con le Autorità di Controllo. 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).

CalEPA (2005), Guidance for the evaluation and mitigation of subsurface vapour intrusion to indoor air, Department of Toxic Substances Control, California Environmental Protection Agency, USA.

Emissione di particolato out/indoor da suolo superficiale

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.

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

Emissione di particolato out/indoor da suolo superficiale (PEF)

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

$$PEF = \frac{P_e W'}{U_{air} \delta_{air}} 10^3 \quad (3.3.37)$$

In caso di presenza di pavimentazione del suolo superficiale, si moltiplica in valore del PEF per la frazione areale di fratture η_{out} della superficie pavimentata.

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

$$PEF_{in} = PEF \times F_i \quad (3.3.38)$$

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

Attinenza dei software ai criteri metodologici

	RBCA Tool Kit ver. 1.2	BP-RISC ver. 4.0 (livello 1)	ROME ver. 2.1	GIUDITTA ver.3.0
<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 (VF_{ss})</i>	MEDIA	MEDIA	MEDIO/BASSA	MEDIA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da suolo profondo (VF_{Samb})</i>	MEDIA	MEDIA	MEDIA	MEDIA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori outdoor da falda (VF_{wamb})</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 (PEF_{in})</i>	-	-	MEDIA	MEDIA
<i>Fattore di dispersione in atmosfera (ADF)</i>	ALTA	ALTA	-	-
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da suolo (VF_{semp})</i>	MEDIO/BASSA	MEDIA	ALTA	MEDIA
<i>Fattore di volatilizzazione di vapori indoor da falda (VF_{wesp})</i>	MEDIA	ALTA	ALTA	MEDIA
<i>Fattore di diluizione da falda ad acque superficiali - fiume (RDF)</i>	ALTA	ALTA	ALTA	-
<i>Attinenza qualitativa complessiva</i>	MEDIA	ALTA	MEDIA	MEDIA

Analisi di Sensibilità

L'analisi di sensibilità è una tecnica comunemente usata nel campo della modellistica per valutare l'effetto della variabilità e dall'incertezza dei parametri che intervengono nelle procedure di calcolo sul risultato ottenuto dall'applicazione di un determinato modello matematico.

In questa appendice, lo strumento dell'analisi di sensibilità viene applicato nell'ambito dell'analisi di rischio con i seguenti obiettivi:

- Quantificare l'effetto della variazione dei diversi parametri sito-specifici e geometrici sul valore del rischio calcolato;
- Individuare una lista di parametri che debbono prioritariamente essere determinati mediante misure sito-specifiche;
- Fornire una indicazione su quale sia la scelta più conservativa per il valore di un determinato parametro, in presenza di un set di dati.

Analisi di Sensibilità

Tra i parametri, non sono stati considerati quelli di esposizione, il cui effetto sull'esposizione e quindi sul rischio è di tipo lineare, visto che compaiono esplicitamente nelle equazioni per il calcolo dell'esposizione stessa.

Per quanto attiene agli altri parametri (sito-specifici e geometrici) questi rientrano di fatto nel calcolo della concentrazione al punto di esposizione, nei quali entrano più propriamente come parametri per il calcolo dei fattori di trasporto.

Per questo motivo, lo studio di sensibilità presentato in questa appendice è stato focalizzato riferendosi esclusivamente alle equazioni relative al calcolo dei fattori di trasporto definite così come descritto nel Capitolo 3.3 del documento "Criteri Metodologici".

Classificazione dei parametri in funzione della sensibilità

Fattori di trasporto	W (cm)	Sw (cm)	dgw (cm)	Ksat (cm/s)	i	θ_T
VFss						Bassa
Pef						
VFsamb						Medio/Bassa
VFwamb						Medio/Bassa
VFsesp						Medio/Bassa
VFwesp						Medio/Bassa
LF	Alta		Alta	Alta	Media	Bassa
1/DAF		Alta		Alta	Alta	Bassa

Per definire la sensibilità si è effettuata la media dei valori ottenuti per ogni parametro rispetto al valore minimo, medio e massimo di oscillazione. In colore rosso sono stati evidenziati i parametri per i quali è disponibile il solo valore di sensibilità relativa/relativa.

Classificazione dei parametri in funzione della sensibilità

Fattori di trasporto	Vie di migrazione	Sensibilità
W (cm)	LF	Alta
Sw (cm)	1/DAF	Alta
dgw (cm)	LF	Alta
Ksat (cm/s)	LF, 1/DAF	Alta
i	LF, 1/DAF	Alta
θ_T	VFss, VFsamb, VFwamb, VFseps, VFwesp, LF, 1/DAF	Bassa
θ_w	VFss, VFsamb, VFwamb, VFseps, VFwesp, LF	Medio/Bassa
θ_{wcap}	VFwamb, VFwesp	Medio/Bassa
f_{oc}	VFss, VFsamb, VFseps, LF, 1/DAF	Alta
$\delta_{air}(cm)$	VFss, Pef, VFsamb, VFwamb	Alta
W'(cm)	VFss, Pef, VFsamb, VFwamb	Alta

Classificazione dei parametri in funzione della sensibilità

U_{air} (cm/s)	VF _{ss} , P _{ef} , VF _{samb} , V _f wamb	Alta
τ (anni)	VF _{ss}	Bassa
L_{crack} (cm)	VF _{se} sp, VF _w esp	Media
L_b (cm)	VF _{se} sp, VF _w esp	Media
ER (1/d)	VF _{se} sp, VF _w esp	Alta
η	VF _{se} sp, VF _w esp	Alta
θ_{wcrack}	VF _{se} sp, VF _w esp	Medio/Bassa
L_{GW} (cm)	VF _w amb, VF _w esp	Media
h_{cap} (cm)	VF _w amb, VF _w esp	Media
ρ_s (g/cm³)	VF _{ss} , VF _{samb} , VF _{se} sp, LF	Bassa
I_{ef} (cm/anno)	LF	Medio/Alta
L_s(cm)	VF _{samb} , VF _{se} sp, VF _w esp	Media
α_x (cm)	1/DAF	Alta

Criteria di selezione del valore dei parametri

Infine, con riferimento ad i criteri per la stima dei parametri sito-specifici esposti in precedenza, i risultati dell'analisi di sensibilità sono stati impiegati per definire se la scelta più conservativa per un dato parametro corrisponda al valore massimo o ad un opportuno UCL della media ovvero al valore minimo o ad un opportuno LCL della media.

Questa indicazione è fornita nella slide seguente, dove:

con il simbolo “>” si indica che il valore più conservativo è quello massimo o l'opportuno UCL della media di un determinato data set;

con il simbolo “<” si indica che il valore più conservativo è il minimo o l'opportuno LCL della media di un determinato data set.

Criterion di selezione del valore dei parametri

Tab. N. 9 Scelte più conservative

Fattori di trasporto	W (cm)	Sw (cm)	dgw (cm)	Ksat (cm/s)	i	θ_T	θ_w	θ_{wcap}	f_{oc}	$\delta_{air}(cm)$
VFss						>	<		<	<
Pef										<
VF samb						>	<		<	<
VFwamb						>	<	<		<
VFsesp						>	<		<	
VFwesp						>	<	<		
LF	>		<	<	<	<	<		<	
1/DAF		>		>	>	>			<	