

APPENDICE C**FATTORE DI ATTENUAZIONE LATERALE IN FALDA (DAF)**

Per il calcolo del DAF la gran parte dei testi di riferimento si basano sul “modello di Domenico” [Domenico e Schwartz, 1998]. Si è quindi ritenuto opportuno prima descrivere tale modello, per poi passare all’analisi di quanto proposto dai testi e software presi in esame.

C.1 Modello Domenico di dispersione in falda.

Una delle soluzioni analitiche più utilizzate è la soluzione di Domenico, questa fornisce la distribuzione delle concentrazioni in un dominio spaziale tridimensionale, in regime variabile, per effetto dell’ emissione continua di un contaminante attraverso una sorgente areale, costituita da un piano perpendicolare alla direzione del flusso della falda idrica, avente dimensioni trasversale S_w e verticale $S_d (= \delta_{gw})$.

Considerando che la dispersione avvenga nella direzione longitudinale (x), lungo le due direzioni trasversali (-y, +y) e verticali (-z, +z), la distribuzione delle concentrazioni è data dalla seguente equazione:

$$\frac{C(x,y,z,t)}{C_0} = \frac{1}{8} \cdot \exp\left(\frac{x}{2\alpha_x} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right]\right) \cdot \operatorname{erfc}\left[\frac{R_i \cdot x - v_e \cdot t \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}}{2 \cdot \sqrt{\alpha_x v_e R_i t}}\right] \cdot \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{y + 0.5S_w}{2\sqrt{\alpha_y x}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y - 0.5S_w}{2\sqrt{\alpha_y x}}\right] \right\} \cdot \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{z + S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{z - S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right] \right\} \quad (C.1)$$

Dove la funzione $\operatorname{erf}(x)$, definita come, è tabulata in Tabella C.5 al termine della presente appendice:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

mentre $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$

Come si può osservare la variabile tempo compare solamente all’interno della funzione erfc ; quando l’argomento di tale funzione raggiunge il valore -2, la funzione erfc

raggiunge il suo asintoto di valore 2 e si ottiene la soluzione stazionaria, nota come “equazione di Domenico” [Domenico e Schwartz, 1998].

$$\frac{C(x,y,z)}{C_0} = \frac{1}{4} \cdot \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y+0.5S_w}{2\sqrt{\alpha_y x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-0.5S_w}{2\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{z+S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{z-S_d}{2\sqrt{\alpha_z x}}\right) \right] \quad (C.2)$$

dove $C(x,y,z)$ è la concentrazione nel punto di coordinate x, y, z (**punto di conformità**); C_0 è la concentrazione in falda alla sorgente; λ è il coefficiente di biodegradazione del primo ordine; R è il fattore di ritardo dovuto all’assorbimento del contaminante su matrice solida; S_w è la larghezza della sorgente nella direzione y perpendicolare al flusso, $S_d (= \delta_{gw})$ è l’ampiezza della sorgente nella direzione z perpendicolare al flusso, e R è il

fattore di ritardo
$$R = 1 + k_s \frac{\rho_s}{\theta_T}$$

Le principali ipotesi su cui si basa tale equazione sono stato stazionario ($t \rightarrow \infty$), emissione continua, concentrazione rappresentativa alla sorgente costante, sorgente di dimensioni finite, dispersione nelle tre direzioni dello spazio x, y, z , e convezione solo lungo la direzione di flusso x (velocità di trasporto unidirezionale e costante).

Il valore di concentrazione più elevato si avrà ovviamente lungo l’asse x ; pertanto ponendo $y = z = 0$ nella equazione C.2 e tenendo conto del fatto che $\operatorname{erf}(-B) = -\operatorname{erf}(B)$, si ottiene l’equazione semplificata che consente di calcolare la concentrazione $C(x)$ lungo l’asse longitudinale di flusso:

Caso 1 - DAF(1)

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{S_d}{4\sqrt{\alpha_z x}}\right) \right] \quad (C.3)$$

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

Caso 2 - DAF(2)

Se si ipotizza una dispersione lungo z solo nella direzione positiva, l’equazione diventa :

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

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.

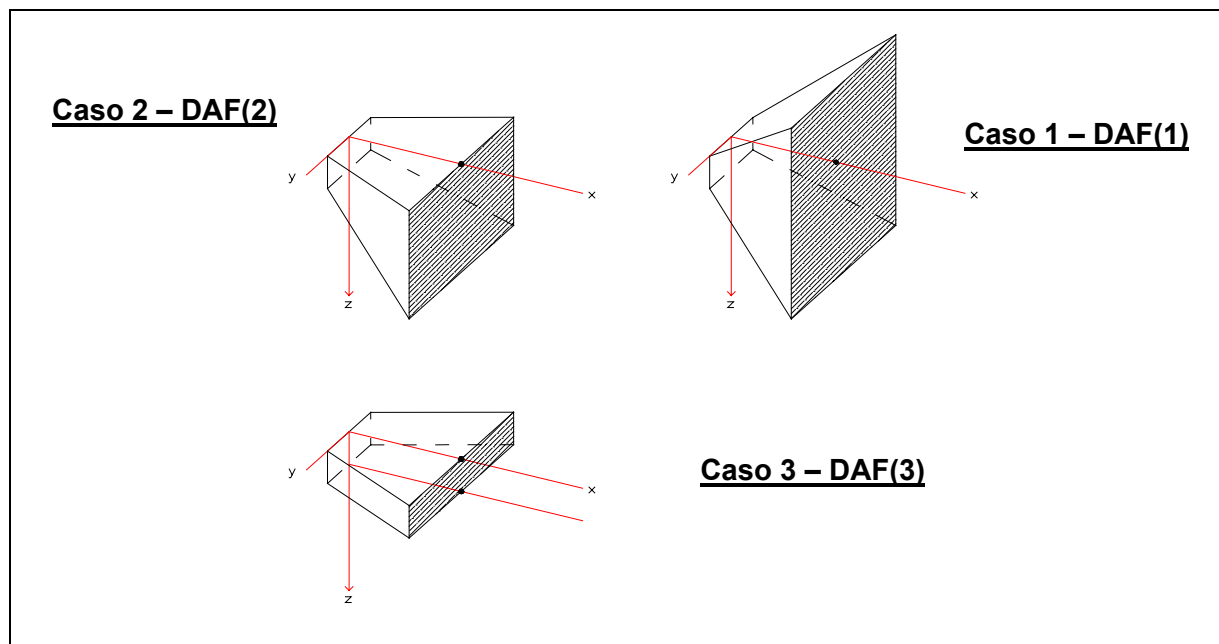
Caso 3 - DAF(3)

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:

$$\frac{C(x)}{C_0} = \exp\left[\frac{x}{2\alpha_x} \cdot \left(1 - \sqrt{1 + \frac{4\lambda_i \alpha_x R_i}{v_e}}\right)\right] \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}}\right) \right] \quad (C.5)$$

In figura C.1 si riportano i tre casi sopra esposti.

Fig. C.1 – Fenomeno di dispersione in falda



Si ritiene opportuno sottolineare che DAF indica 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:

$$DAF = \frac{C_{s(falda)}}{C_{POE(falda)}} \left[\frac{\frac{mg}{l - H_2O}}{\frac{mg}{l - H_2O}} \right] \quad (C.6)$$

C.2 Analisi delle equazioni (TESTI DI RIFERIMENTO)

Nel calcolo del fattore di attenuazione laterale in falda (DAF) i due standard ASTM E-1739-95, PS-104-98, E 2081-00 e il Manuale UNICHIM N.196/1 propongono l'utilizzo della equazione corrispondente al CASO 2 – DAF(2) (dispersione solo lungo la direzione positiva dell'asse z). Come detto in precedenza, tale scelta è motivata considerando il piano di falda un limite superiore nella direzione z, e la sorgente posizionata al limite del piano di falda.

Il Manuale UNICHIM n. 196/1 propone, oltre al DAF(2), anche il DAF(1), da selezionare in funzione della tipologia di contaminati e il DAF(3), nel caso di spessore della sorgente di contaminazione in falda uguale allo spessore della falda.

I documenti EPA-SSG propongono l'utilizzo dell' "equazione di Domenico" DAF(1), ponendo $\lambda=0$. Inoltre, per il DAF tali documenti assumono un valore di default pari a 20, calcolato per $W = S_w = 4500 \text{ cm}$, $\delta_{gw} = 200 \text{ cm}$ e punto di conformità posto ad una distanza di 100 m.

Concawe n.2/97, pur prendendo in esame tale via di migrazione, propone l'utilizzo non di equazioni analitiche, ma di una serie di modelli numerici (caratteristici di un livello 3 di analisi) di cui fornisce una descrizione sintetica. Infine, i RAGS non tengono conto di tale via di migrazione.

Si riporta nella Tabella C.1 una sintesi dei criteri di calcolo del fattore di attenuazione naturale in falda (DAF) per ciascuno dei testi adottati quale riferimento di base.

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			

Le tre forme dell'equazione di Domenico, DAF(1), DAF(2) e DAF(3), sono state applicate per quattro composti (Benzene, 1,1,2,2-tetracloroetano, Benzo(a)pirene e Arsenico), rappresentativi dei 94 elencati nella tabella 1 dell'allegato 1 al D.M. 471/99, rispettivamente ponendo $\lambda = 0$ e $\lambda \neq 0$. Tali sostanze sono state selezionate in relazione al loro diverso grado di solubilità e volatilità, e al loro diverso valore di k_{oc} e di λ . In tabella C.2 sono riportati i valori dei principali parametri chimico-fisici dei contaminati in esame, che entrano in gioco nel calcolo del DAF, e il corrispondente valore del fattore di ritardo R. Per i parametri sito-specifici di input sono stati utilizzati i valori di default corrispondenti ad un livello 1 di analisi (Tab. 3.2.18).

Tab. C.2 – Fattore di ritardo e proprietà chimico-fisiche delle specie chimiche indice

Specie chimica	λ_i [1/d]	R [adim.]	H [adim.]	K_{oc} [cm ³ /g]	k_s [cm ³ /g]
BENZENE	9,60E-04	3,77E+00	2,28E-01	6,20E+01	6,20E-01
1,1,2,2-tetracloroetano	1,50E-02	4,53E+00	1,41E-02	7,90E+01	7,90E-01
benzo(a)pirene	6,50E-04	4,34E+04	4,63E-05	9,69E+05	9,69E+03
arsenico	0,00E+00	1,26E+02	0,00E+00	2,80E+01	2,80E+01

I risultati di tale applicazione sono riassunti nella tabella C.3.

Tab. C.3 - Valori del DAF per $\lambda=0$ e $\lambda \neq 0$, per le specie chimiche indice

$\lambda \neq 0$	DAF(1)	DAF(2)	DAF(3)
Benzene	3.61E+01	1.84E+01	5.72E+00
1,1,2,2-tetracloroetano	2.16E+05	1.10E+05	3.42E+04
benzo(a)pirene	2.69E+120	1.37E+120	4.26E+119
arsenico	1.44E+01	7.33E+00	2.28E+00
$\lambda=0$	1.44E+01	7.33E+00	2.28E+00

Dalla analisi di tali risultati, emergono le seguenti considerazioni:

- Come era evidente prevedere, ponendo $\lambda=0$, si ottengono valori di DAF(1) DAF(2) e DAF(3) che sono indipendenti dall'inquinante considerato. Infatti il DAF assume la forma:

$$\frac{C(x)}{C_0} = \left[\operatorname{erf} \left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y x}} \right) \right] \cdot \left[\operatorname{erf} \left(\frac{S_d}{4\sqrt{\alpha_z x}} \right) \right] \quad (\lambda = 0) \quad (C.7)$$

- L'equazione DAF(3), non considerando la dispersione lungo l'asse z, fornisce un valore molto più conservativo rispetto alle equazioni DAF(1) e DAF(2)

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

- Escludere l'utilizzo dell'equazione DAF(1) poiché, considerando la dispersione lungo tutte le direzioni, restituisce dei valori poco conservativi.
- Applicare l'equazione DAF(2), che considera la dispersione lungo gli assi x, y e nella direzione positiva dell'asse z, quando l'altezza della sorgente di contaminazione in falda $S_d (= \delta_{gw})$ è inferiore allo spessore della falda d_a .
- Applicare l'equazione DAF(3) nei casi in cui tutto lo spessore dell'acquifero è interessato dalla contaminazione (cosa che può facilmente accadere nei casi di piccoli spessori della falda).

In riferimento al coefficiente di degradazione del primo ordine λ , si ritiene opportuno:

- per una analisi di livello 1, porre come valore di default $\lambda=0$;
- per una analisi di livello 2, è possibile porre $\lambda \neq 0$, a discrezione dell'Ente di Controllo, solo se sono disponibili le risultanze di test specifici di laboratorio e/o di campo che consentano di verificare la reale situazione di biodegradazione sito-specifica. Altrimenti va adottato il valore di default $\lambda=0$.

C.3 Analisi delle equazioni (SOFTWARE)

Tutti i software esaminati (GIUDITTA ver. 3.0, ROME ver. 2.1 e RBCA Toolkit ver. 1.2 e RISC ver. 4.0) adottano l'equazione DAF(2) che considera la dispersione lungo gli assi x, y e nella direzione positiva dell'asse z.

Si riporta in Tabella C.4 una sintesi dei criteri di calcolo del fattore di attenuazione laterale in falda (DAF) per ciascuno dei software presi in esame.

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
F(2)				
F(3)				

Tab. C.5: Funzione errore ($\text{erf}(x)$)

η	$\text{erf}(\eta)$	η	$\text{erf}(\eta)$
0.00	0.0000	1.55	0.9718
0.05	0.0564	1.60	0.9764
0.10	0.1125	1.65	0.9804
0.15	0.1680	1.70	0.9839
0.20	0.2227	1.75	0.9868
0.25	0.2763	1.80	0.9891
0.30	0.3286	1.85	0.9911
0.35	0.3798	1.90	0.9929
0.40	0.4284	1.95	0.9942
0.45	0.4755	2.00	0.9953
0.50	0.5205	2.05	0.9963
0.55	0.5633	2.10	0.9971
0.60	0.6039	2.15	0.9977
0.65	0.6420	2.20	0.9981
0.70	0.6784	2.25	0.9985
0.75	0.7118	2.30	0.9989
0.80	0.7421	2.35	0.9991
0.85	0.7713	2.40	0.9993
0.90	0.7969	2.45	0.9995
0.95	0.8215	2.50	0.9996
1.00	0.8427	2.55	0.9997
1.05	0.8630	2.60	0.9998
1.10	0.8802	2.65	0.9998
1.15	0.8961	2.70	0.9999
1.20	0.9103	2.75	0.9999
1.25	0.9233	2.80	0.9999
1.30	0.9340	2.85	0.9999
1.35	0.9441	2.90	1.0000
1.40	0.9526	2.95	1.0000
1.45	0.9597	3.00	1.0000
1.50	0.9663		