

ROSELECTRA

Appendice 4.C

**DESCRIZIONE DELLA MODELLISTICA MATEMATICA PER IL
CALCOLO PREVISIONALE DELLE RICADUTE:
II CODICE DIMULA**

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		2 di 17

INDICE

1. CENNI SULLA DISPERSIONE ATMOSFERICA	3
1.1. MODELLI MATEMATICI PER LA DIFFUSIONE ATMOSFERICA DEGLI INQUINANTI..	4
1.1.1. CODICE DIMULA-ENEA: BREVE DESCRIZIONE	4
1.1.2. MODELLI MATEMATICI	5
1.1.3. MODELLO PER SORGENTI PUNTIFORMI	5
1.1.4. MODELLO IN PRESENZA DI CALMA DI VENTO.....	7
1.1.5. MODELLO PER SORGENTI AREALI.	7
1.1.6. MODELLO IN PRESENZA DI CALMA DI VENTO.....	8
1.1.7. MODELLI PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI DISPERSIONE DEL SOVRALZO TERMICO DELLE SORGENTI	10
1.1.8. TIPO DI SORGENTE	13
1.1.9. FENOMENI DI DEPOSIZIONE.....	13
1.1.10. TRASFORMAZIONI CHIMICHE E FOTOCHIMICHE	14
1.1.11. PRESENZA DI RILIEVI	14
1.1.12. TEMPO DI CAMPIONAMENTO.....	14
1.1.13. GRADIENTE VERTICALE DELLA COMPONENTE ORIZZONTALE DEL VENTO...	15
1.1.14. SCALA SPAZIALE	15
1.1.15. DATI DI INPUT	15
1.1.16. DATI DI OUTPUT	17
1.1.17. CONVALIDE DEL CODICE DIMULA.....	17

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		3 di 17

1. CENNI SULLA DISPERSIONE ATMOSFERICA

Dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico, al di là delle considerazioni di carattere globale, quello che interessa maggiormente è la diffusione degli inquinanti su scala locale, cioè per distanze dell'ordine di qualche decina di chilometri dalla sorgente emittente e per uno spessore dell'atmosfera dell'ordine di 1000 ÷ 1500 metri, che va sotto il nome di strato limite.

Il comportamento degli inquinanti emessi nell'atmosfera in seguito ad un qualunque processo industriale, è strettamente correlato con i parametri di sorgente, con le condizioni meteorologiche e con le caratteristiche fisico ambientali, del territorio su cui è insediata la sorgente stessa.

Nell'ipotesi di un camino, i principali parametri di sorgente sono:

- altezza geometrica e diametro interno della bocca del camino;
- velocità e temperatura dei fumi in uscita
- quantità di inquinanti emessi nell'unità di tempo.

Per le condizioni meteorologiche si enumerano:

- il gradiente termico verticale;
- l'intensità, la direzione e la struttura verticale del vento;
- lo stato del cielo;
- l'intensità della radiazione solare.

Questi assieme alle caratteristiche fisico-ambientali del territorio, quali l'orografia del terreno e la posizione e dimensione di eventuali ostacoli (naturali e/o artificiali), determinano il tipo e l'intensità dei moti turbolenti dell'atmosfera, che in ultima analisi realizzano il processo della dispersione (trasporto, diffusione e deposito).

Lo studio del processo di trasporto e della diffusione degli inquinanti nell'atmosfera, riveste una grande importanza per la valutazione dei valori di

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		4 di 17

concentrazione degli inquinanti, emessi ad esempio da un camino, in aria e/o sul suolo, al fine di realizzare opportuni programmi di controllo ambientale del territorio.

La schematizzazione del processo di trasporto e della diffusione dei fumi emessi da un camino nell'atmosfera, più rispondente per applicazioni pratiche, si articola in due fasi:

- 1) fase aerodinamica o di risalita dei fumi, strettamente dipendente dai parametri di sorgente;
- 2) fase meteorologica, strettamente dipendente dalle condizioni climatiche del territorio;

Tali fasi sono descritte con modelli matematici che consentono il calcolo della distribuzione degli inquinanti nell'atmosfera.

1.1. MODELLI MATEMATICI PER LA DIFFUSIONE ATMOSFERICA DEGLI INQUINANTI

1.1.1. CODICE DIMULA-ENEA: BREVE DESCRIZIONE

Il DIMULA consente di calcolare la concentrazione in aria, al livello del suolo, dovuta all'emissione di inquinanti sia da sorgenti puntiformi che da sorgenti areali (una generica sorgente areale viene simulata come l'unione di più sorgenti areali circolari). Il dominio di calcolo è un rettangolo, entro cui si considera un grigliato pure a formato rettangolare (di cui sono note le caratteristiche orografiche e topografiche); in ogni griglia il codice calcola le concentrazioni ai vertici.

Esistono le seguenti versioni:

- Short term versione puntuale
- Short term versione a settori
- Climatologica con e senza topografia

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		5 di 17

La versione short-term calcolano la concentrazione in aria a livello del suolo mediata su qualche decina di minuti.

La versione climatologica, con e senza topografia, calcola la concentrazione su tempi lunghi mese-stagione-anno.

1.1.2. MODELLI MATEMATICI (*)

Le ipotesi semplificative che stanno alla base del modello sono le seguenti:

- Linearità: si assume sempre valido il principio di sovrapposizione degli effetti.
- Stazionarietà: nel codice non compare mai la variabile tempo.
- Omogeneità delle condizioni atmosferiche e del suolo (direzione e velocità del vento indipendenti dallo spazio e dal tempo, classe di stabilità costanti su tutto il percorso del rilascio.

La struttura dei modelli matematici per la simulazione della dispersione atmosferica degli inquinanti, utilizzati nel codice DIMULA, sono di tipo gaussiano. Questa scelta è dettata sia da motivi di semplicità sia dalla considerazione che fornendo dati di ingresso, meteorologici e di emissione, realistici per il territorio in esame, si hanno risultati estremamente attendibili.

I modelli che qui si descrivono, sono suddivisi per tipo di sorgente.

1.1.3. MODELLO PER SORGENTI PUNTIFORMI

Il calcolo della concentrazione si effettua con la relazione (1) che è già mediata all'interno del settore che identifica la direzione del vento, supponendo una

(*) Si forniscono qui gli elementi indispensabili per la comprensione delle principali caratteristiche del codice. Per maggiori dettagli si rimanda al "manuale d'uso del codice dimula".

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		6 di 17

distribuzione orizzontale uniforme all'interno del settore che identifica la direzione del vento:

$$C(x,y,z) = \frac{nQ}{2\pi\sqrt{2\pi}u\sigma_z} \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

- $C(x,y,z)$: concentrazione dell'inquinante in aria;
 Q : emissione nell'unità di tempo (costante);
 u : velocità media del vento all'altezza H ;
 σ_y : parametro di dispersione laterale (dim. lunghezza)
 σ_z : parametro di dispersione laterale (dim. verticale)
 x : distanza sottovento dal punto di emissione;
 y,z : distanza laterale dal centro del pennacchio e altezza dal livello del suolo del punto nel quale si calcola la concentrazione;
 H : altezza finale del pennacchio sul livello del suolo.
 n : numero di settori

Se il punto di coordinate (x,y,z) è esterno al settore di appartenenza della direzione del vento:

$$C(x,y,z) = 0. \quad (2)$$

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		7 di 17

1.1.4. MODELLO IN PRESENZA DI CALMA DI VENTO

Assenza di inversione in quota:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi r} \cdot \left[\frac{1}{u_d K_z r + u_d^2 (z - h)^2} + \frac{1}{u_d K_z r + u_d^2 (z + h)^2} \right] \quad (3)$$

Presenza di inversione:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2(2\pi) \cdot \alpha r L} \quad (4)$$

con:

$r = (x^2 + y^2)$ distanza dal punto ricevitore-sorgente nel piano x-y

u_d : rateo di diffusione (L/T)

K_z : coefficiente di diffusione turbolenta lungo l'asse z (L²/T)

α : costante (L/T)

1.1.5. MODELLO PER SORGENTI AREALI.

L'idea è quella di simulare una generica sorgente areale con un insieme opportunamente scelto di sorgenti areali "semplici", di forma circolare, ognuna di queste con emissione uniforme. La bontà della simulazione di una sorgente areale generica con tale metodo è affidata all'esperienza dell'utente, il quale dovrà cercare un compromesso tra l'economicità e il realismo.

In tal modo si considera una sorgente virtuale puntiforme arretrata di $R/\sin(\pi/n)$ rispetto al centro del cerchio che costituisce la sorgente areale elementare.

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		8 di 17

Il valore della concentrazione nel punto di coordinate (x,y,z) è espresso da:

$$C(x, y, z) = \frac{nQ}{\left[\pi \sqrt{2\pi} u \sigma_z \frac{x+R}{\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \right]} \cdot \exp \left[-\frac{\left(\frac{z}{\sigma_z}\right)^2}{2} \right] \quad (5)$$

se il punto di coordinate (x,y,z) è interno al settore di appartenenza della direzione del vento;

$$C(x, y, z) = 0 \quad (6)$$

se il punto di coordinate (x,y,z) è esterno a detto settore.

Il codice è in grado di tener conto dell'eventuale presenza di edifici introducendo un fattore correttivo per il calcolo delle standard deviation verticale σ_z ; per maggiori dettagli si rimanda al "manuale d'uso del codice".

1.1.6. MODELLO IN PRESENZA DI CALMA DI VENTO

Anche per le sorgenti areali il codice è in grado di effettuare il calcolo delle concentrazioni in assenza di vento con e senza inversioni termiche.

Le formulazioni sono:

Assenza di inversione in quota:

$$C(x, y, z) = \frac{3Q}{4\pi r} \cdot \left(\frac{1}{A1} + \frac{1}{A2} \right) \quad \text{per } r > R \quad (7)$$

Presenza di inversione in quota:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2(2\pi) \cdot \alpha r L} \quad \text{per } r < R \quad (8)$$

con:

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		9 di 17

$$A1 = u_d k_z r + u_d^2 (z - z_a)^2 \quad (9)$$

$$A2 = u_d k_z r + u_d^2 (z + z_a)^2 \quad (10)$$

z_a: quota media a cui si trova la sorgente areale

R : raggio medio della sorgente areale

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		10 di 17

1.1.7. MODELLI PER IL CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI DISPERSIONE DEL SOVRALZO TERMICO DELLE SORGENTI

A) Calcolo coefficienti di dispersione

La letteratura relativa all'applicazione dei modelli gaussiani adottati per il calcolo delle ricadute, riporta valori ed andamento dei coefficienti di dispersione derivanti a modelli empirici o semiempirici non sempre direttamente applicabili a territori complessi, se non in prima approssimazione.

Le formulazioni codificate sono:

- modello del CONCAWE
- modello di BRIGGS

valide per territori pressoché pianeggianti.

Per territori ad orografia complessa esiste la necessità di stimare i parametri di dispersione mediante leggi meno empiriche e più fisiche che tengano conto il più esplicitamente possibile della parametrizzazione del planetary boundary layer (PBL)^(*).

B) Calcolo del sovrizzo termico delle sorgenti

Per il calcolo delle altezze di sovrizzo termico delle sorgenti si è scelto, tra i vari modelli attualmente esistenti, quello maggiormente noto ed usato di Briggs.

La ragione per la quale si è preferito il modello di Briggs alle altre formulazioni è dovuta al principio sul quale esse si basano. Il modello di Briggs utilizza la "legge dei 2/3" attraverso la quale si dimostra che l'altezza massima delle effluente è direttamente

(*) E' stata effettuata la parametrizzazione diretta delle standard deviation per il comprensorio della Val di Cornia (colline metallifere)

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		11 di 17

proporzionale alla potenza 2/3ma della distanza sottovento dalla sorgente, il che offre la migliore corrispondenza sperimentale dei dati.

L'entità del sovrizzo termico di una sorgente dipende dalle caratteristiche di emissione quali:

- a) diametro e sezione allo sbocco;
- b) velocità e temperatura dell'effluente;
- c) densità dell'effluente;

e dalle condizioni meteorologiche.

Per le classi di stabilità A-B-C-D l'innalzamento termico è espresso da:

$$\delta H = \frac{1,6F_s \cdot (3,5 \cdot X^*)^{\frac{2}{3}}}{u} \quad (\text{m}) \quad (11)$$

Per le classi E ed F il δH è dato dal minore tra i valori calcolati con le relazioni:

$$\delta H1 = 5 \cdot \left[F_s \cdot S^{-0,375} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{m}) \quad (12)$$

$$\delta H2 = 2,6 \cdot \left[\frac{F_s}{u \cdot S} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{m}) \quad (13)$$

con F_s fattore di stabilità espresso da:

$$F_s = g \cdot V_e \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{T_E - T_A}{T_E} \right) \quad (\text{m}^4/\text{s}^3) \quad (14)$$

e

$$X^* = 14 \cdot F_s^{\frac{5}{8}} \quad \text{per } F_s \leq 55 \quad (15)$$

$$X^* = 34 \cdot F_s^{\frac{2}{5}} \quad \text{per } F_s > 55 \quad (16)$$

S parametro di stabilità espresso da:

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		12 di 17

$$S = \frac{g}{T_A} \cdot \frac{\delta\phi}{\delta z} \quad (\text{sec}^{-2}) \quad (17)$$

$\frac{\delta\phi}{\delta z}$ gradiente verticale della temperatura potenziale (°K/m) posto uguale a :

0.02 °K/m per la categoria E

0.04 °K/m per la categoria F

D	diametro allo sbocco del camino	(m)
g	accelerazione di gravità	(m/s ²)
Ve	velocità di emissione	(m/s)
T _E	temperatura aria emissioni	(°K)
T _A	temperatura aria ambiente	(°K)

Le relazioni sopra illustrate sono valide nell'ipotesi che il rapporto tra la velocità del vento alla quota di emissione (altezza geometrica del camino) data dalla relazione:

$$u(z) = u_o \cdot \left(\frac{z}{z_o} \right)^p \quad (18)$$

con l'esponente p che assume i valori:

CATEGORIA	P
A	0.53
B	0.40
C	0.33
D	0.23
E	0.16
FG	0.33

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		13 di 17

e la velocità di emissione dell'effluente sia $a = 1.5$, il che esclude il verificarsi del fenomeno denominato "down-wash". In caso contrario i valori del sovrizzo termico calcolati con le precedenti relazioni devono essere diminuiti del fattore:

$$C = 3 \cdot \left[1,5 - \frac{V_e}{u(z)} \right] \cdot D \quad (19)$$

1.1.8. TIPO DI SORGENTE

Il codice, come già detto è multisorgente per sorgenti puntiformi e areali.

1.1.9. FENOMENI DI DEPOSIZIONE

La versione climatologica del DIMULA consente di effettuare i calcoli di ricaduta tenendo conto dei fenomeni di deposizione umida.

L'algorithmo utilizzato introduce il coefficiente di wash-out espresso da:

$$\Gamma = CR \quad (20)$$

dove :

C: costante che dipende dal tipo di inquinante $\left(\frac{s-1}{\frac{mm}{h}} \right)^{-1}$

R: intensità di pioggia (mm/h)

Il valore di concentrazione è espresso da:

$$C(x,y,z): \quad C_0(x,y,z) \cdot e^{-\frac{\Gamma x}{u}} \quad (21)$$

$C_0(x,y,z)$: Concentrazioni in assenza di deposito umido

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		14 di 17

1.1.10. TRASFORMAZIONI CHIMICHE E FOTOCHIMICHE

Non se ne tiene conto

1.1.11. PRESENZA DI RILIEVI

Se ne tiene conto introducendo un valore medio di altezza per ogni griglia del territorio e considerando esplicitamente, nei modelli di dispersione, anche la coordinata z che normalmente è posta uguale a zero.

Nell'uso di tale formulazioni è necessaria un'estrema attenzione nel valutare i risultati che si ottengono, in quanto si tratta di una forzatura del modello gaussiano, valido essenzialmente per terreni pianeggianti.

1.1.12. TEMPO DI CAMPIONAMENTO

Non viene introdotta alcuna correzione in quanto i dati di input vengono definiti per i periodi di tempo di interesse.

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		15 di 17

1.1.13. GRADIENTE VERTICALE DELLA COMPONENTE ORIZZONTALE DEL VENTO

La formulazione adottata è:

$$\mu(z) = \mu(z_0) \left(\frac{z}{z_0} \right)^p \quad (22)$$

con l'esponente p che assume i valori (5) :

Categoria	p
A	0.53
B	0.40
C	0.33
D	0.23
E	0.16
F	0.33

1.1.14. SCALA SPAZIALE

Il codice consente simulazioni su scala locale: qualche decina di chilometri.

1.1.15. DATI DI INPUT

a) Dati meteorologici

Per tutte le versioni i dati meteorologici consistono in informazioni sulla stabilità atmosferica e sulla velocità e direzione del vento definiti sulla base temporale di interesse.

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		16 di 17

Per le versioni short term viene fornito un singolo valore della velocità e della direzione del vento assieme alle altre caratteristiche meteorologiche inerenti le caratteristiche diffusive (categorie di Pasquill).

Per le versioni climatologiche i dati meteo vengono forniti tramite la "joint frequency function" (matrici climatologiche) sul periodo di interesse.

	Descrizione della modellistica matematica per il calcolo previsionale delle ricadute Il codice DIMULA	APPENDICE 4.C
		17 di 17

b) Dati per le sorgenti

I dati richiesti riguardano le caratteristiche geometriche delle singole sorgenti e chimico-fisiche, quali: entità delle emissioni, temperatura e velocità di emissione (nel caso di sorgenti convogliate).

Inoltre ogni sorgente dovrà essere esattamente individuata rispetto ad un sistema di assi cartesiani assoluto i cui assi sono paralleli ai lati del reticolo (rettangolare o quadrato) di interesse.

c) Dati per i ricettori

Non si richiedono dati di input.

I ricettori restano individuati allorché si definisce il dominio rettangolare di interesse rispetto al sistema di riferimento assoluto ed il passo di griglia secondo il quale si intende suddividere il dominio stesso.

I ricettori sono quindi costituiti dai vertici delle singole celle.

1.1.16. DATI DI OUTPUT

Gli output consistono in tabelle che riportano i valori di ricaduta calcolati per ogni vertice delle griglie prima definite, per le singole sorgenti e per l'insieme di esse.

1.1.17. CONVALIDE DEL CODICE DIMULA

Il codice DIMULA è stato utilizzato per la valutazione previsionale delle ricadute nell'ambito di vari progetti.

Tra questi sicuramente la più significativa applicazione è stata:

La valutazione dell'impatto ambientale derivante dall'uso del carbone nella centrale termoelettrica di Torre del Sale (Piombino-Li).