Modelli di Dispersione degli Inquinanti in Aria

2011

Parte 2

Modelli di dispersione di Tipo Stazionario

dott. Roberto Sozzi
dott. Andrea Bolignano

ARPALAZIO

I fondamenti teorici della teoria lagrangiana ed euleriana

base per tutte le famiglie di modelli che vengono operativamente impiegati per la simulazione della dispersione degli inquinanti in aria.

Prima categoria: i modelli stazionari

Tali modelli trattano l'evoluzione del fenomeno come una sequenza di stati stazionari

Modelli Gaussiani Plume
Modelli Stazionari Ibridi

ARPALAZIO

Modello gaussiano Plume

Deriva dalla soluzione base plume dell'equazione euleriana della dispersione di un inquinante in aria che ne costituisce lo **scheletro**, su cui però è stato **aggiunto** un **apparato sostanzialmente semiempirico**.

E' stato il primo tipo di modello impiegato per scopi applicativi ed ingegneristici.

Può essere applicato per stime di prima approssimazione quando:

⇒ il suolo è <u>privo di orografia significativa</u>,

⇒ le sorgenti sono <u>ciminiere abbastanza elevate</u> che emettono in modo pressoché **continuo** inquinanti poco reattivi,

⇒ i parametri meteorologici e micrometeorologici presentano una <u>variazione temporale abbastanza lenta</u>,

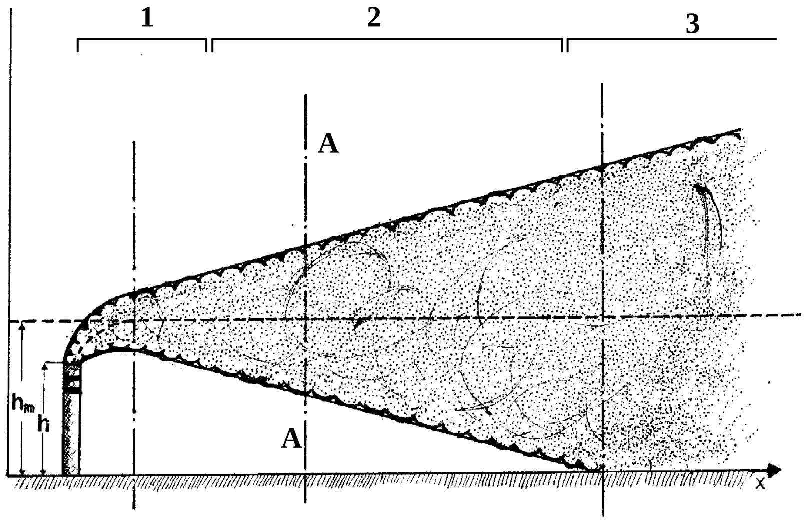
⇒ il *PBL* è in condizioni <u>quasi adiabatiche</u>

ARPALAZIO

ARPALAZIO

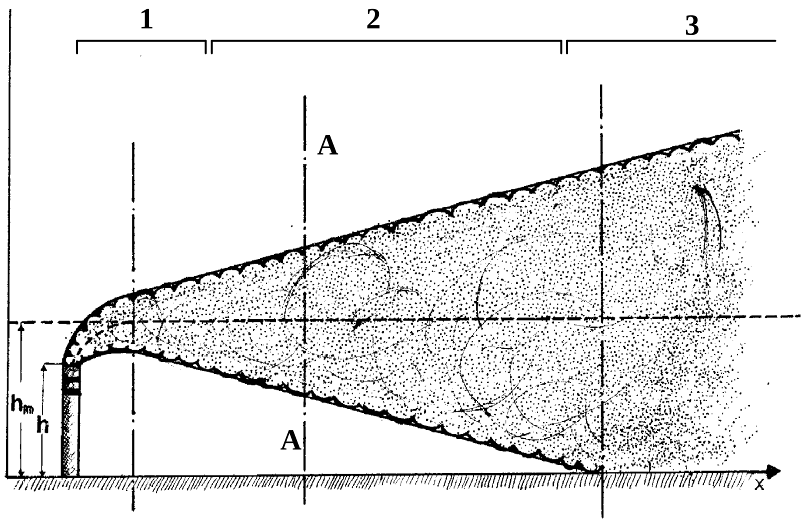
Fotografia, integrata in un'ora, di un *plume* di una ciminiera elevata con tasso di emissione Q (g/s).

Tre Zone Distinte



Zona 1 (zona ascensionale).

Il *plume* <u>esce verticale</u> dalla sorgente per piegarsi sottovento con baricentro orizzontale. Se h è l'<u>*altezza fisica*</u> del camino e h_m è la *quota del baricentro del plume*, si definisce ***plume rise***: $\Delta \mathbf{h} = \boldsymbol{h_m - h}$



Zona 2 (dispersione senza interazione col suolo).

Dopo il livellamento,il *plume* si **dilata** (più o meno a seconda della turbolenza senza raggiungere il suolo).

Zona 3 (interazione col suolo).

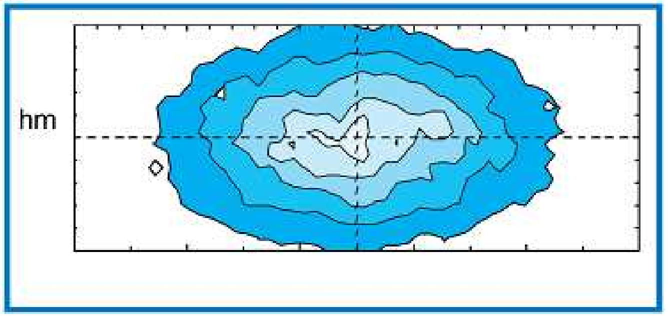
La parte bassa del *plume* giunge al suolo dove subisce una **riflessione totale o parziale** a seconda del tipo di suolo e di inquinante.

Iniziamo considerando la Zona 2

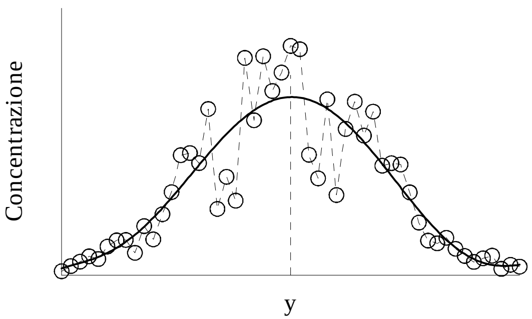
Sezione trasversale del plume ad una distanza x dalla sorgente.

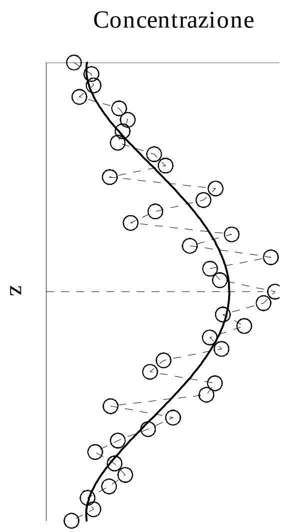
⇒ ***La concentrazione è più elevata in corrispondenza del baricentro del plume***

⇒ ***diminuisce rapidamente con la distanza trasversale dal baricentro*.**



Se si evidenzia la distribuzione trasversale e verticale della concentrazione alla distanza *x* si ottiene:





***Ci sono tutti gli elementi per la costruzione di un modello semiempirico*.**

Un possibile Modello Semiempirico è:

$$\mathbf{C(x,y,z) = \mathit{K\, f_y\, f_z}}$$

dove:

⇒ **f_y =** funzione simmetrica a campana nella coordinata y**.** La **scelta naturale** è una **funzione gaussiana con valor medio nullo** e deviazione standard σ_y;

⇒ ***f_z*** è anch’essa una *funzione simmetrica* **a campana**. Anche in questo caso la **scelta naturale** è una **gaussiana** a valor medio h_m e standard deviation σ_z**;**

⇒ ***K*** è una **costante** da determinare.

In sostanza il **modello semiempirico** è:

$$C(x,y,z) = K \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z-h_m)^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

Determinazione K $\Rightarrow$ **legge di conservazione della massa.**
Se U è la velocità media del vento (costante in orizzontale e verticale), si ha:

Se indichiamo con Φ il flusso lungo la direzione x attraverso la superficie infinitesima dxdy :

$$d\Phi = C(x, y, z) \cdot U \cdot dy \cdot dz$$

$$Q = \int_A C(x, y, z) \cdot U \cdot dydz$$

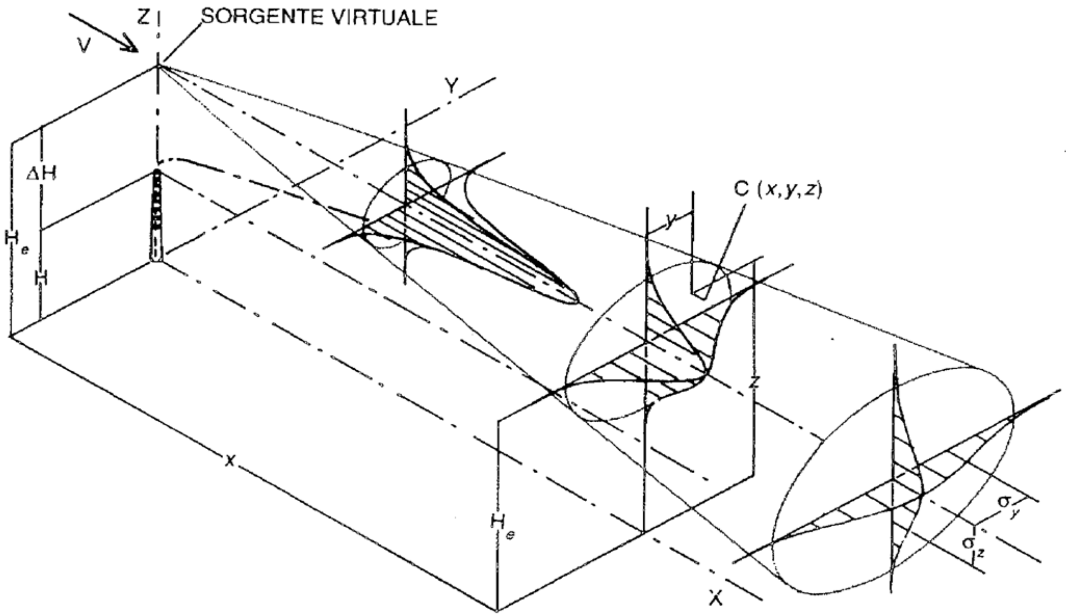
$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\alpha x^2} dx = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}}$$

$$\boxed{K = Q/U}$$

ottenendo in modo definitivo la **forma base del Modello Gaussiano Stazionario:**

$$\boxed{K = Q/U}$$

$$\boxed{C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\overline{\overline{U}}} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \exp\left[-\frac{(z-h_m)^2}{2\sigma_z^2}\right]}$$

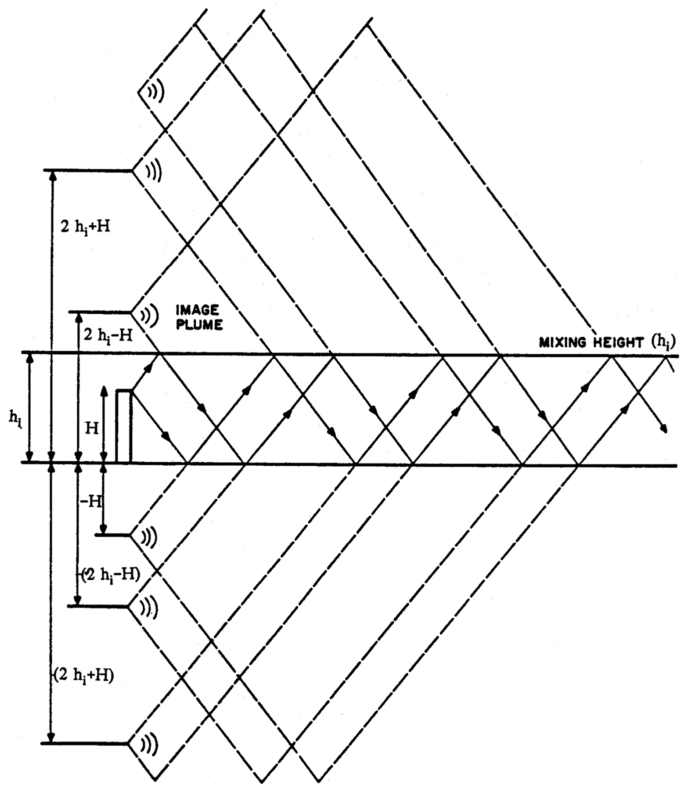


ARPALAZIO

Consideriamo ora la Zona 3

In questa zona il *plume* interagisce col suolo e, nelle situazioni convettive, con la sommità del PBL (quota di rimescolamento)

Ipotesi = riflessione totale del plume al suolo e alla quota di rimescolamento.



ARPALAZIO

Se si tiene conto delle riflessioni multiple, si ha la **forma completa del Modello Gaussiano Stazionario**

$$C(x,y,z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot f_z$$

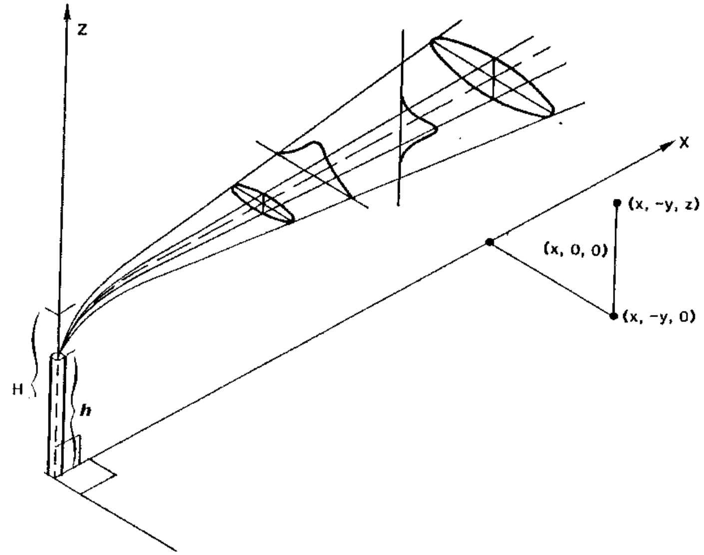
$$f_z = \sum_{j=0,\pm1,\pm2,\ldots} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+2jz_i-h_m}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+2jz_i+h_m}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

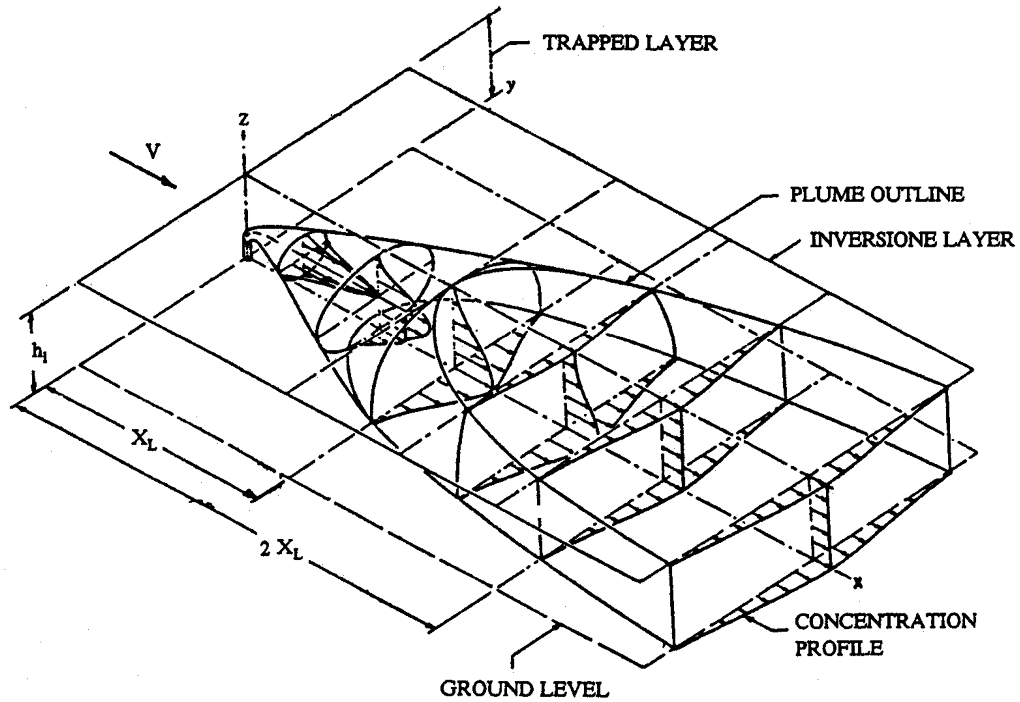
formula che, una volta noto:

- il tasso di emissione Q (g/s)
- le coordinate (*x,y,z*) del punto dove si vuol conoscere la concentrazione (*punto ricettore*)
- la velocità del vento U (m/s) supposta costante in orizzontale e verticale
- le standard deviation σ_y e σ_z
- la quota di livellamento del *plume* h_m

consente di **determinare** (con i limiti sottolineati) la **concentrazione dell'inquinate in esame nel punto ricettore**.

Sistema di Coordinate adottato.





Semplificazioni più usate:

⇒ concentrazione ***solo al livello del suolo***

⇒ si ***trascurano tutte le riflessioni tranne quella al suolo***.

$$C(x,y,0) \cong \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma^2 y}\right] \cdot \exp\left[-\frac{h_m^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

Ulteriore semplificazione: ***concentrazione al suolo e sottovento alla sorgente.***

$$C(x,y,0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z U} \cdot \exp\left[-\frac{h_m^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

Sovrapposizione degli effetti ⇒ *in un punto ricettore la concentrazione è la somma dei contributi dovuti a tutte le sorgenti presenti in quel punto.*

ARPALAZIO

Nota: **valendo la sovrapposizione degli effetti, è quasi sempre impossibile discriminare l'effetto di una sorgente dalle altre impiegando solo misure di concentrazione al suolo.**

Determinazione dei parametri di dispersione

Nel modello gaussiano plume i fumi emessi da una sorgente punto vengono:

$\Rightarrow$ **trasportati dal vento nella direzione sottovento**

$\Rightarrow$ **dispersi in senso trasversale (y) e questa dispersione, di tipo gaussiano, è regolata dal parametro σ_y**

$\Rightarrow$ **dispersi in senso verticale (z) e questa dispersione, di tipo gaussiano, è regolata dal parametro σ_z**

$\Downarrow$

σ_y e σ_z $\Rightarrow$ Parametri di dispersione del modello gaussiano

In questi due parametri si vengono a riassumere tutte le interazioni che i fumi hanno con la turbolenza del PBL:

***- nella fase di emissione** e*

*- **nella fase di dispersione in atmosfera***

ARPALAZIO

⇒ **Interazione iniziale con l’atmosfera all’emissione**.

All’emissione, **i fumi, diretti verso l’alto, vengono in contatto con una massa d’aria che si muove in orizzontale**. Sia il fluido emesso che la massa d’aria in movimento sono in regime altamente turbolento.

Questa **complessa interazione** viene normalmente **riassunta** in **un valore iniziale dei parametri di dispersione dipendenti dalle condizioni di emissioni ed indicati come**:

$$\sigma_{yb} \text{ e } \sigma_{zb}$$

Il fenomeno è estremamente complesso, ma si è visto che una **relazione semiempirica** efficiente è la seguente, dipendente dal valore assunto dal *plume rise* Δh che, come si vedrà, dipende dalle condizione di emissione dei fumi (diametro interno del camino, velocità e temperatura media dei fumi)

$$\boxed{\sigma_{yb}(x) = \sigma_{zb}(x) = \frac{\Delta h(x)}{3.5}}$$

⇒ Interazione con la turbolenza dell'atmosfera

Questa è l'interazione più importante e studiata e dipende dal livello di turbolenza del *PBL*. Per un modello gaussiano *plume*, ciò è riassunto nei due parametri di dispersione σ_{yt} e σ_{zt}.

In **pratica**, il modello assume dei parametri di dispersione derivanti dalla relazione

$$\sigma_y^2(x) = \sigma_{yb}^2(x) + \sigma_{yt}^2(x)$$
$$\sigma_z^2(x) = \sigma_{zb}^2(x) + \sigma_{zt}^2(x)$$

La determinazione dei parametri di dispersione σ_{yt} e σ_{zt} può essere condotta seguendo due metodi:

⇒ **Metodo Moderno: i due parametri sono *funzione dei parametri che caratterizzano la turbolenza del PBL* (u_*, H_0, L, z_i)**

⇒ **Metodo Antico : i due parametri sono espressi in funzione della *Categoria di Stabilità Atmosferica***

Metodo Moderno

⇒ ***Parametro di dispersione trasversale***

$$\sigma_y = t \cdot \left(\frac{0.25 w_*^2}{1 + 0.9 x\, w_* / (z_i U)} + u_*^2 \right)^{1/2}$$

NB: questa relazione si può usare anche in condizioni stabili, ponendo w$_*$ a zero.

⇒ ***Parametro di dispersione verticale***

Situazioni Convettive:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zm}^2 + \sigma_{zc}^2$$

$$\sigma_{zm}^2 = \sigma_{zmu}^2 = 1.2 u_*^2 t^2 \exp\left[-0.6 t\, u_* / h_m\right] \qquad \text{per} \quad t u_* / h_m < 1$$

$$\sigma_{zm}^2 = \sigma_{zmu}^2 = 1.2 u_*^2 t^2 \exp\left[-0.6\right] \qquad \text{per} \quad t u_* / h_m \geq 1$$

$$\sigma^2{}_{zc} = 0.33 w_*^2 t^2$$

Situazioni Stabili:

$$\sigma_z^2 = \sigma_{zmu}^2 / \left(1 + 1.11 t\, u_* / L\right)$$

N.B. t=U/x

ARPALAZIO

Metodo Antico

La turbolenza è descritta in ***modo bulk*** dalle ***Classi di Stabilità Atmosferica*****.** Sono state impiegate diverse parametrizzazioni semiempiriche derivanti da *campagne sperimentali* ormai molto antiche.

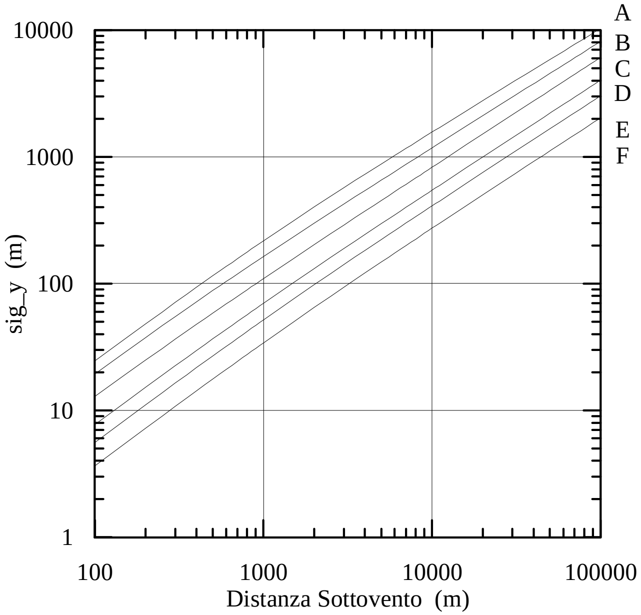
⇒ **Relazioni Pasquill-Gifford.**

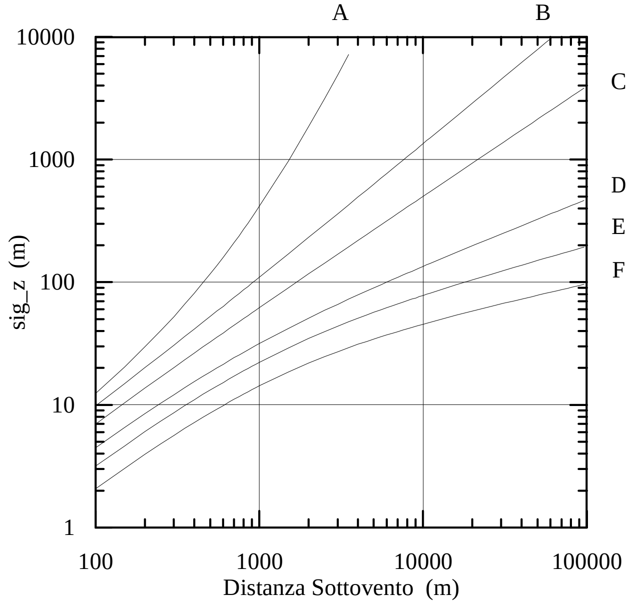
- derivano dalla campagna di Prairie Grass
- con emissioni al suolo
- con suolo piano, non urbanizzato e a bassa rugosità
- con tempo di mediazione 10 minuti
- fino a distanze sottovento inferiori a 1000 m.

$$\sigma_y(x) = \frac{k_1 x}{[1 + (x/k_2)]^{k_3}}$$

$$\sigma_z(x) = \frac{k_4 x}{[1 + (x/k_2)]^{k_5}}$$

Classe di Stabilita'	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
A	0.2500	927	0.189	0.1020	-1.918
B	0.2020	370	0.162	0.0962	-0.101
C	0.1340	283	0.134	0.0722	0.102
D	0.0787	707	0.135	0.0475	0.465
E	0.0566	1070	0.137	0.0335	0.624
F	0.0370	1170	0.134	0.0220	0.700





ARPALAZIO

⇒ Relazioni di Briggs.

Tali relazioni derivano da un vasto numero di dati sperimentali disponibili sia per emissioni in quota che per emissioni al suolo.

La **Relazione Generale** è:

$$\boxed{\sigma = ax(1+bx)^c}$$

che vale sia per la dispersione orizzontale che per la dispersione verticale.

Briggs ha considerato **due situazioni tipiche**:

1. **Situazione Rurale**: relativa ad un terreno con rugosità superficiale bassa e a ciminiere elevate;
2. **Situazione Urbana**: relativa ad un terreno con rugosità superficiale elevata ed emissioni a bassa quota.

I coefficienti della relazione sono differenti per le due situazioni

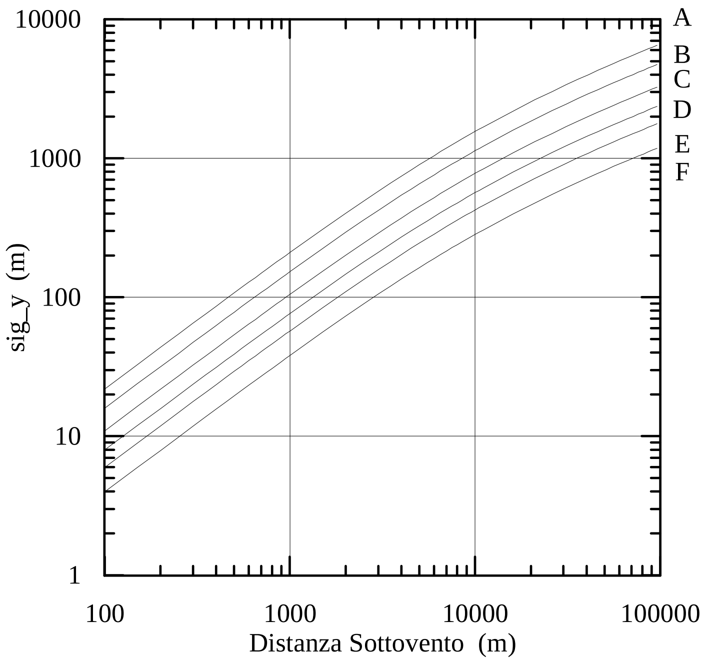
Coefficienti per la Dispersione Trasversale.

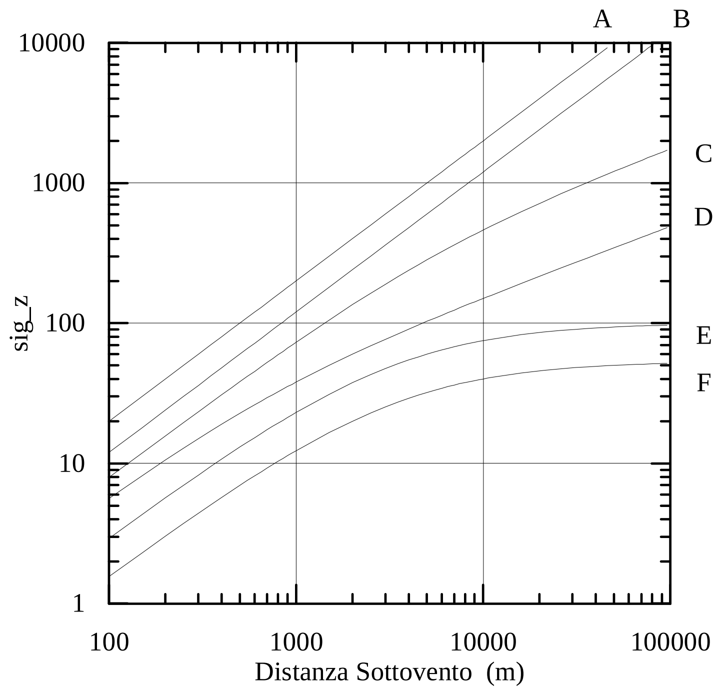
	Schema Rurale			*Schema Urbano*		
Classe di stabilita'	a	b	c	a	b	c
A	0.22	0.0001	-0.5	0.32	0.0004	-0.5
B	0.16	0.0001	-0.5	0.32	0.0004	-0.5
C	0.11	0.0001	-0.5	0.22	0.0004	-0.5
D	0.08	0.0001	-0.5	0.16	0.0004	-0.5
E	0.06	0.0001	-0.5	0.11	0.0004	-0.5
F	0.04	0.0001	-0.5	0.11	0.0004	-0.5

Coefficienti per la Dispersione Verticale.

	Schema Rurale			*Schema Urbano*		
Classe di stabilita'	a	b	c	a	b	c
A	0.200	0	1	0.24	0.00100	0.5
B	0.120	0	1	0.24	0.00100	0.5
C	0.080	0.0002	-0.5	0.20	0	1
D	0.060	0.0015	-0.5	0.14	0.0003	-0.5
E	0.030	0.0003	-1.0	0.08	0.00015	-0.5
F	0.016	0.0003	-1.0	0.08	0.00015	-0.5

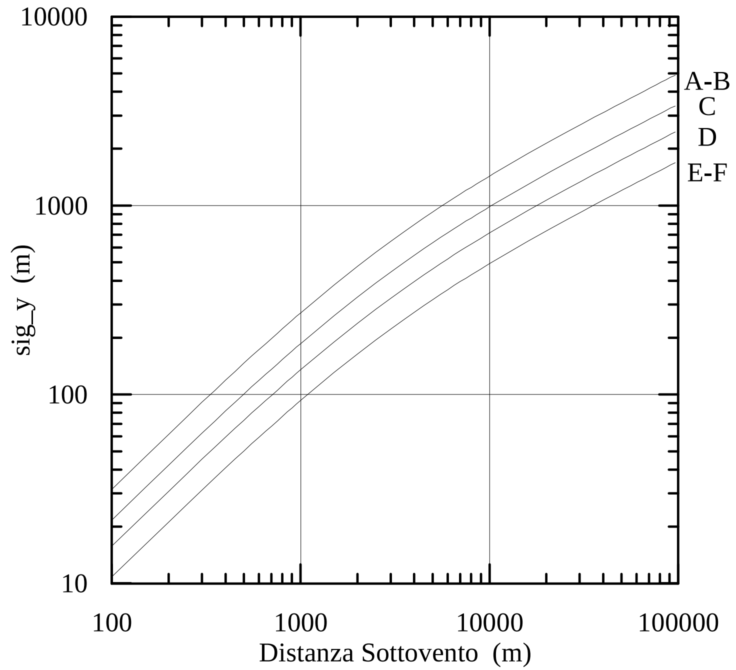
Schema Rurale

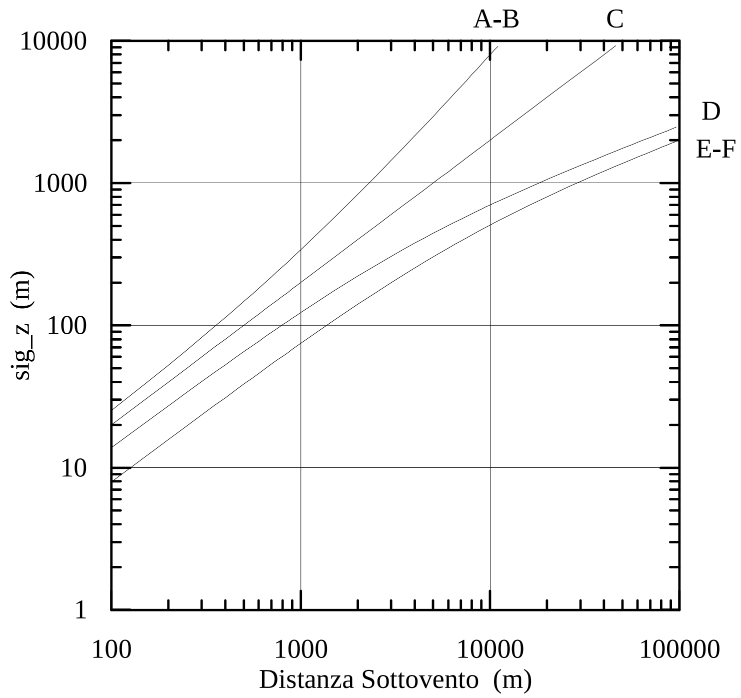




ARPALAZIO

Schema Urbano





Innalzamento del Pennacchio

All'**emissione**, i fumi caldi salgono verticalmente con aumento progressivo della sezione trasversale a causa dell'inglobamento progressivo di aria esterna;

Successivamente il *plume* si piega in direzione sottovento, perdendo progressivamente la propria individualità (quantità di moto e galleggiamento)

Al termine il *plume* presenta un baricentro che procede orizzontale sottovento (altezza efficace del *plume*).

In pratica, ad **una distanza sottovento *x*** l'altezza del baricentro del *plume* risulta pari a:

$$\boxed{h_m(x) = h + \Delta h(x)}$$

h = altezza fisica del camino,

Δh = innalzamento del *plume, plume rise,* (variabile con *x*)

I Parametri che definiscono il *plume rise* *sono*:

⇒ **Condizioni di emissione**:

- **velocità di emissione dei fumi w_0**
- **temperatura dei fumi T_0**

Nota: questi parametri dovrebbero sempre comparire in un inventario delle emissioni e dovrebbero essere sempre rilevati e registrati quando tali emissioni vengono controllate direttamente.

⇒ **Parametri meteorologici:**

- **velocità del vento *U***
- **temperatura dell'aria T_a**
- **Stabilità del *PBL*.**

Potenzialità Ascensionale del plume (Galleggiamento) (*Buoyancy Flux*):

$$\boxed{F_b = w_0 r_0^2 g \frac{T_0 - T_a}{T_0}}$$

Deflessione del plume all'emissione
(***stack-tip downwash***)

In situazioni di vento teso e quando la velocità di emissione dei fumi è relativamente bassa, il pennacchio nel punto di emissione viene trascinato verso il basso. Questo fenomeno ha luogo quando:

$$w_0 < 1.5\ U$$

Il ***plume*** all'emissione **subisce**, quindi, **un abbassamento** tale per cui l'**altezza di emissione effettiva** risulta pari a:

$$\boxed{h' = h - 4r_0\left(1.5 - \frac{w_0}{U}\right)}$$

Determinazione del plume rise.

⇒ ***Ad una distanza x >*** **x_{max} il *plume* raggiunge una quota di livellamento del plume ed Plume Rise all'equilibrio è pari a:**

Situazioni Convettive

$$\Delta h = \begin{cases} 21.425\, F_0^{3/4} / U & \text{a} \quad x_{max} = 49 F_b^{5/8} \quad \text{se} \quad F_0 < 55 \\ 38.710\, F_0^{3/5} / U & \text{a} \quad x_{max} = 119 F_b^{5/8} \quad \text{se} \quad F_0 \geq 55 \end{cases}$$

Situazioni Stabili

$$\Delta h_{max} = 2.6 \left(\frac{F_b}{UN} \right)^{1/3} \quad \text{a} \quad x_{max} = 2.0715 \frac{U}{N}$$

$$N = \sqrt{\left(\frac{g}{T_a} \cdot \frac{d\theta}{dz} \right)}$$

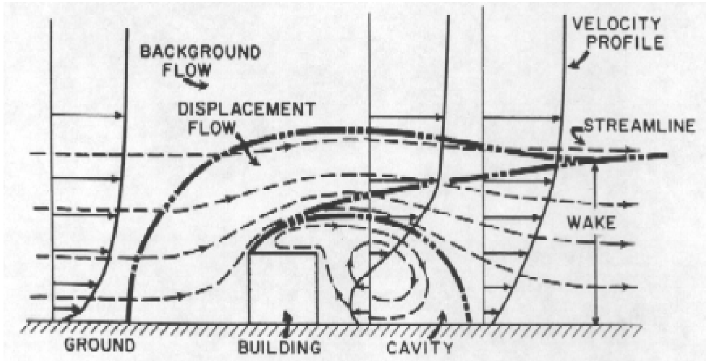
⇒ **A distanze intermedie x<x_{max}, il *plume rise* è dato da:**

$$\Delta h(x) = 1.6 \frac{F_b^{1/3} x^{2/3}}{U}$$

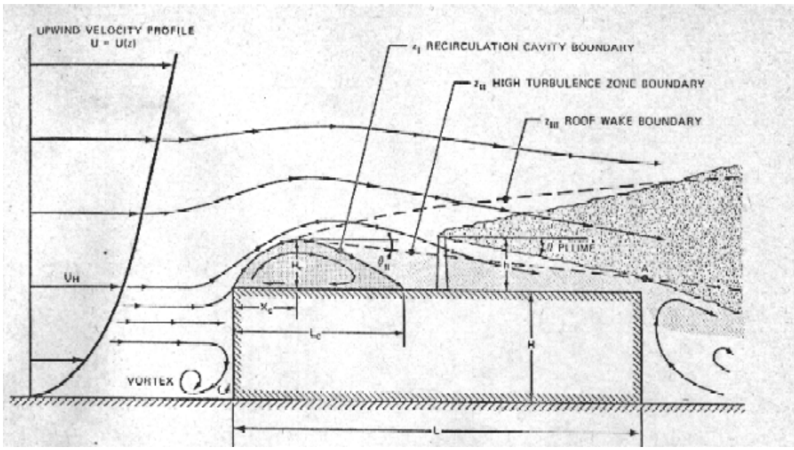
<u>Perturbazioni indotte dagli edifici</u>.

Il modello presentato presuppone l'assenza di ostacoli al suolo.

Ostacolo tipico ⇒ Presenza di un edificio.



Perturbazione dell'emissione da un edificio.



ARPALAZIO

Caratteristiche della perturbazione:

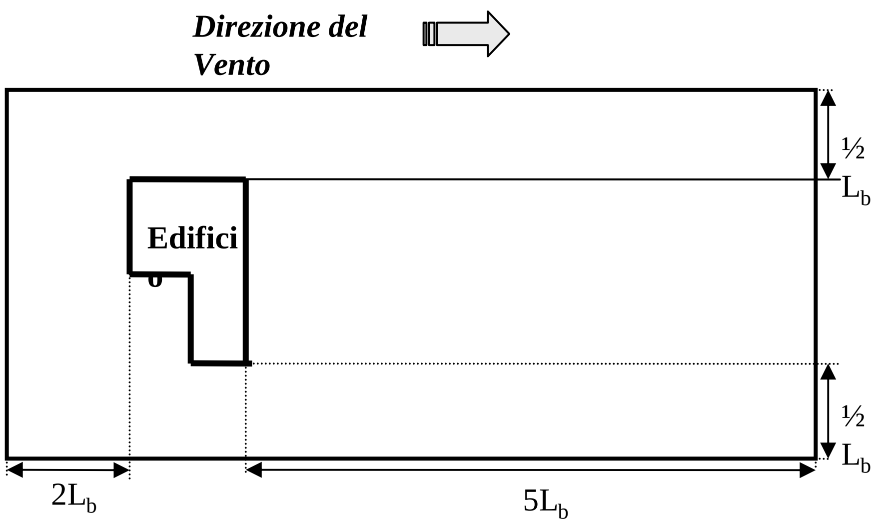
- Una zona di stagnazione
- Una zona di ricircolazione
- Una cavità turbolenta
- Una scia turbolenta.

Consideriamo un edificio con:

- Altezza h_b
- Dimensione trasversale alla direzione del vento W

Sia: $L_b = \mathrm{MIN}(h_b, W)$

Rettangolo Critico.



Si consideri un **camino** con un *plume* il cui **baricentro all'equilibrio sia pari a H_e** (calcolato senza tener conto della presenza dell'edificio).

Se il camino è **sottovento** all'edificio e

$$\boxed{H_e < h_s + 1.5 L_b}$$

è possibile una perturbazione del *plume* da parte dell'edificio. In particolare, detto:

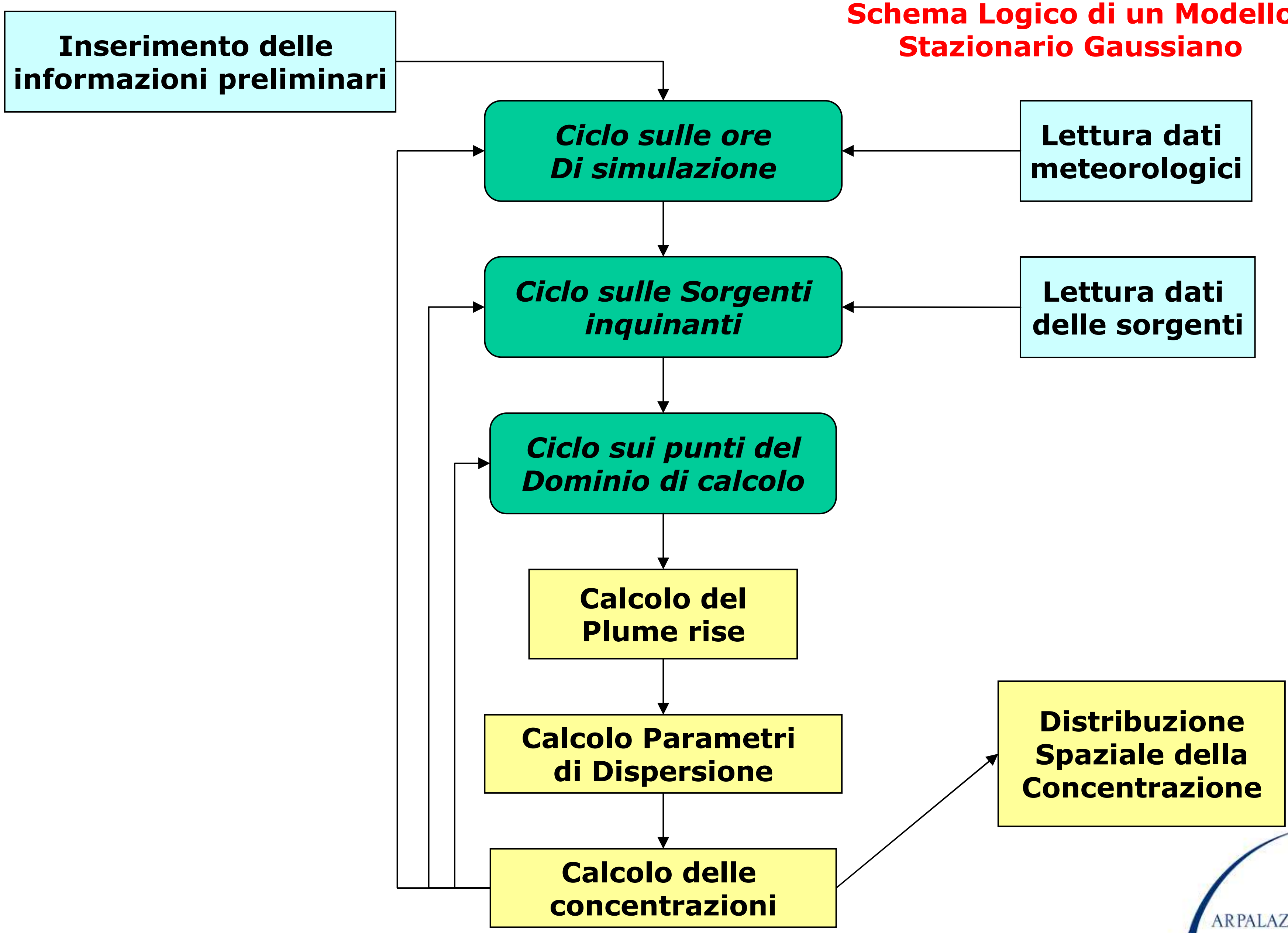
D = distanza tra camino ed edificio
h_b = altezza dell'edificio

$\Rightarrow$ $D < 3h_b$ $\rightarrow$ *plume* si trova in zona di ricircolazione e la sua modellizzazione ad oggi è problematica;

$\Rightarrow$ se $10h_b < D < 3h_b$, il *plume* risulta perturbato e ciò si può modellizzare con una modifica al plume rise ed ai parametri di dispersione;

$\Rightarrow$ se $D > 10h_b$, il *plume* risulta non perturbato

Schema Logico di un Modello Stazionario Gaussiano



ARPALAZIO

Sorgenti Non Puntuali.

Fin qui il modello gaussiano ha preso in considerazione solo **sorgenti punto** che simulano con notevole realismo le emissioni da **ciminiere industriali**. Nella pratica è necessario poter trattare anche **altri tipi di sorgenti** che emettono sostanze inquinanti.

⇒ **Sorgente Area:** porzione di piano che emette uniformemente (Es. emissioni diffuse da un impianto industriale, da un parco minerali, da una città in cui sia presente il riscaldamento invernale).

⇒ **Sorgente Linea**: segmento lineare di spazio che emette uniformemente (Es. un nastro trasportatore, una strada extraurbana).

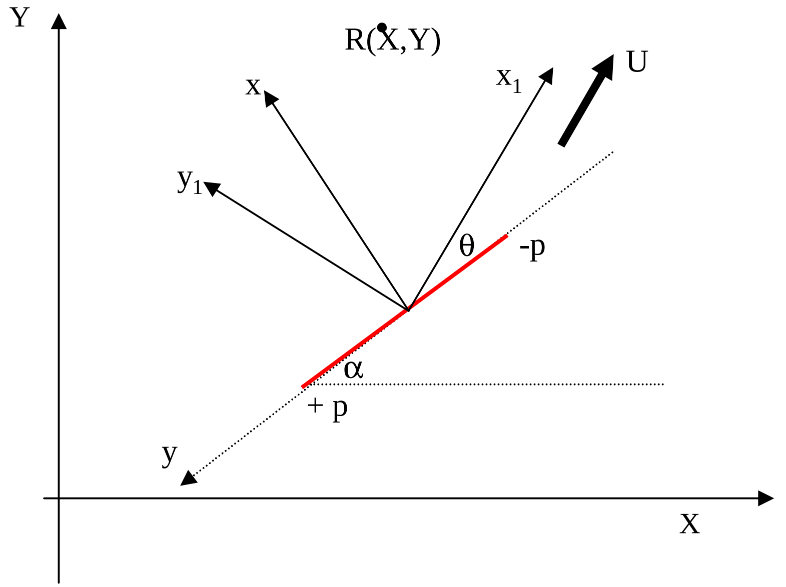
⇒ **Sorgente Volume**: volume di spazio che emette uniformemente (Es. impianto industriale chimico con notevole sviluppo in altezza).

In un Modello Gaussiano Stazionario, la procedura usata per modellizzare queste sorgenti, si basa sul principio di:

- **suddividere la sorgente in sorgenti tanto piccole da essere assimilabili a sorgenti puntuali;**

- **calcolare la concentrazione in ogni punto di interesse come somma delle concentrazioni dovute ad ogni singola sorgente puntuale in cui si è suddivisa la sorgente originaria.**

Sorgente Linea



$$C(X,Y)=\frac{Q}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{z_1}U_c}\cdot f_z\cdot\left[erf\left(\frac{\sin\theta(p-y)-x\cos\theta}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)+erf\left(\frac{\sin\theta(p+y)+x\cos\theta}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)\right]$$

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

$$f_z=\exp\left(-\frac{(z-H_s)^2}{2\sigma_z^2}\right)+\exp\left(-\frac{(z+H_s)^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

ARPALAZIO

Elementi da determinare:

- Parametri di dispersione σ_y e σ_z;
- Velocità del vento modificata U_c

NB: Q il tasso di emissione g/(ms); H_s quota di emissione.

Determinazione dei Parametri di Dispersione

In generale si ha: $\boxed{\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_a^2}}$

Tiene conto dell'effetto scia delle auto

$$\sigma_{0z} = 3.57 - 0.53 U_c$$

$$\sigma_{0y} = 2\sigma_{0z}$$

Tiene conto dell'effetto della turbolenza

$$\sigma_{ya} = 1000 \cdot \sin\xi / (2.15 \cos\xi)$$

$$\sigma_{za} = \begin{cases} 110.62 \cdot x^{0.93198} & \text{in condizioni convettive} \\ 86.49 \cdot x^{0.92332} & \text{in condizioni adiabatiche} \\ 61.141 \cdot x^{0.91465} & \text{in condizioni stabili} \end{cases}$$

$$\xi = \begin{cases} (18.333 - 1.8096 \ln(x)) / 57.2958 & \text{in situazioni convettive} \\ (14.333 - 1.7706 \ln(x)) / 57.2958 & \text{in situazioni adiabatiche} \\ (12.500 - 1.0857 \ln(x)) / 57.2958 & \text{in situazioni stabili} \end{cases}$$

Determinazione della velocità del Vento modificata.

Questo parametro dipende:

- dalla velocità del vento U
- dall'angolo θ tra il segmento stradale e la direzione del vento
- dalla stabilità atmosferica (espressa per es. con le Categorie di stabilità).

$$\boxed{U_c = U \cdot f(\theta) + U_0}$$

dove la funzione f(θ) è data da:

$$f(\theta) = \begin{cases} 0.2242 + 0.7758 \sin\theta & \text{nelle Categorie A, B, C, D} \\ 0.1466 + 0.8534 \sin\theta & \text{nelle categorie E, F} \end{cases}$$

Sorgente Volume.

Modo più semplice $\Rightarrow$ trattarla come <u>sorgente puntuale</u> con un *plume* avente una **dispersione iniziale**.

I parametri di dispersione trasversale e verticale all'origine saranno diversi da zero e pari a:

$$\sigma_{y0} = L/4.3 \qquad \sigma_{z0} = H/2.15$$

con L dimensione trasversale e H verticale.

Ad una generica distanza ***x*** il valore dei parametri di dispersione sarà quello relativo alle distanze x_y e x_z (rispettivamente per il parametro trasversale e verticale) date da:

$$x_y = x + x_{vy}$$
$$x_z = x + x_{vz}$$

dove x_{vy} e x_{vz} si ottengono risolvendo le equazioni:

$$\sigma_y(x_{vy}) = \sigma_{y0}$$
$$\sigma_z(x_{vz}) = \sigma_{z0}$$

IL MODELLO STAZIONARIO IBRIDO

Crisi del modello gaussiano e nascita del modello ibrido

Journal of Applied Meteorology vol. 28, pp.206-224 (1989)

Several regulatory models (*gaussian plume models*) were *tested* … with Kincaid, Illinois, and Bull Run, Tennessee tracer datasets …. for their performance in an "operational" or "regulatory" application, i.e., for their ability to predict ground-level concentrations (GLCs) for specific averaging time -1, 2, 24 h - without regard to the validity or accuracy of individual model components (plume rise, dispersion parameters, etc.).

When predicted and observed concentrations at the Kincaid site were *unpaired* in space and time, (such a model) predicted the maximun hourly averaged SO_2 GLC to within 30%-70%.

***When the concentrations were paired in space and time*, none *of the models predicted the concentration field* with any accuracy, i**.e. the correlation coefficients between observed and predicted concentrations were often negative.

S. Hanna

ARPALAZIO

US-EPA + American Meteorological Society (AMS)

⇓

Comitato AERMIC

obiettivo ⇒ costruzione di un modello che:

- fosse relativamente semplice e di tipo stazionario,
- capace di simulare realisticamente le situazioni convettive
- capace di utilizzare i parametri della turbolenza atmosferica
- capace di diventare "*regulatory*".

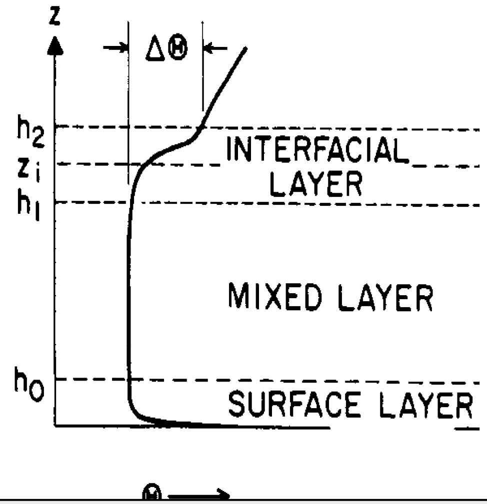
Dal Documento Finale:

“ AERMIC’s initial focus were on the regulatory models that are designed for estimating near-field impacts from a variety of industrial source types. *The basic approch in EPA’s present regulatory platform for near-field modeling has, with very few exceptions, remained fundamentallly unchanged since the beginning of the air programs some 20 years ago*. **<u>During this time, significant scientific advances have been made which have yet to be incorpored into the basic approach.</u>**

AERMIC, formed to make a major transformation in regulatory modeling, took a meaninful step toward this objective by selecting ISC3 for our initial efforts.

AERMIC chose a phased approach to updating the modular ISC3 model in the the **AER**MIC **MOD**EL (**AERMOD**). “

Struttura del PBL convettivo e variabili di controllo.



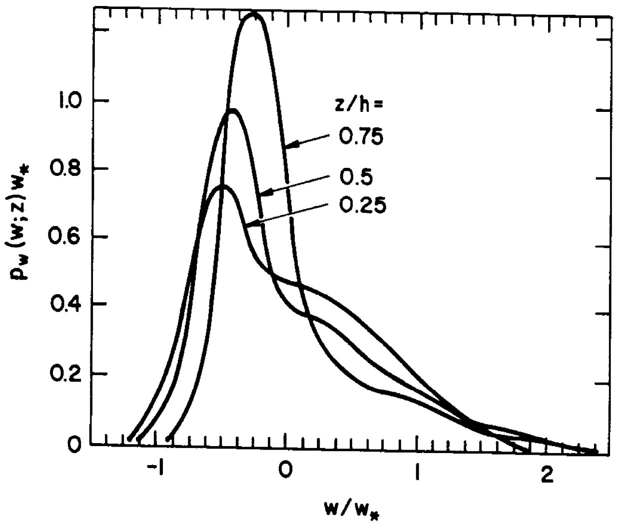
Parametri:

⇒ **Friction velocity** u_*

⇒ **Flusso Turbolento di calore Sensibile** H_0

⇒ **Lunghezza di Monin-Obukhov** L

⇒ **Altezza di Rimescolamento** z_i



⇒ **La velocità verticale più probabile è negativa**

⇒ **Nel *PBL* si stabilisce un'alternanza di di flussi verticali**:

→ **Updraft** (<u>più intensi ma meno estesi</u>)

→ **Downdraft** (<u>più estesi ma meno intensi</u>)

Caratteristica principale di una situazione convettiva

⇓

La distribuzione della componente verticale *w*

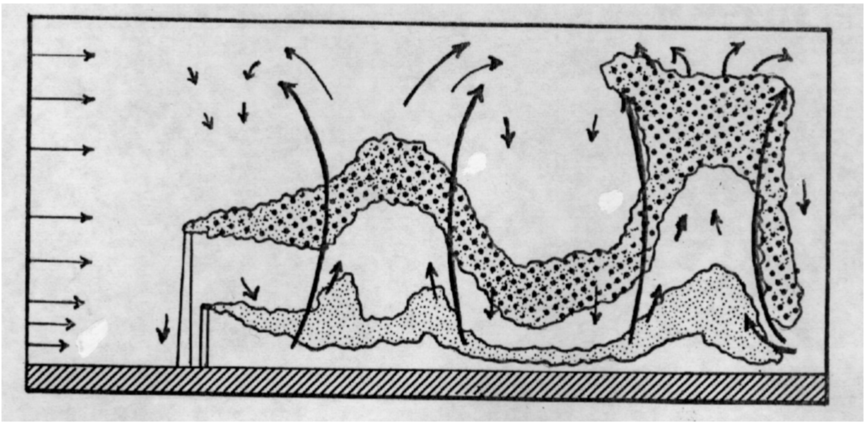
⇒ ***ha media nulla***,

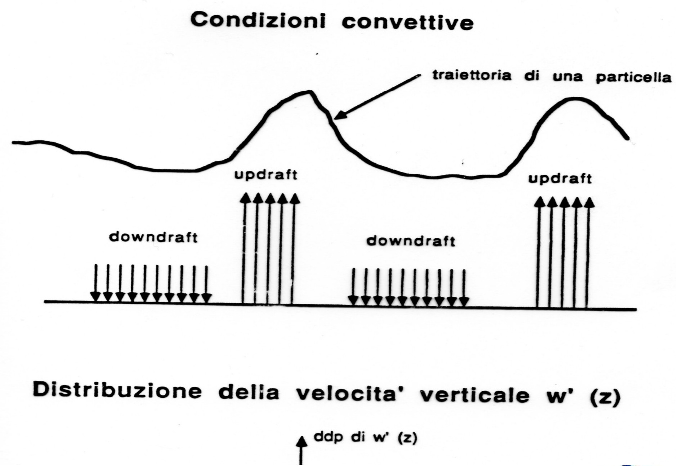
⇒ ***non è gaussiana***

⇒ ***non è simmetrica***.

Dato che **il modello gaussiano stazionario ipotizza per la componente w della velocità del vento una distribuzione gaussiana,** è evidente la ragione per cui tale **modello fallisce nelle situazioni convettive**.

Crisi del concetto di quota di livellamento del baricentro.





Esperimenti in Laboratorio (Willis e Deardorff, 1978)

Lo studio sperimentale di questi due ricercatori ha fornito le basi per lo sviluppo di tutte le teorie della dispersione degli inquinanti nelle situazioni convettive.

Questi risultati, ottenuti in laboratorio, sono stati completamente confermati da un'estesa campagna sperimentale condotta in situazioni reali presso i laboratori della N.O.A.A. a Bulder in Colorado (Campagna sperimentale CONDORS – 1983).

Per sintetizzare i vari risultati ottenuti sono state definite le variabili adimensionali seguenti

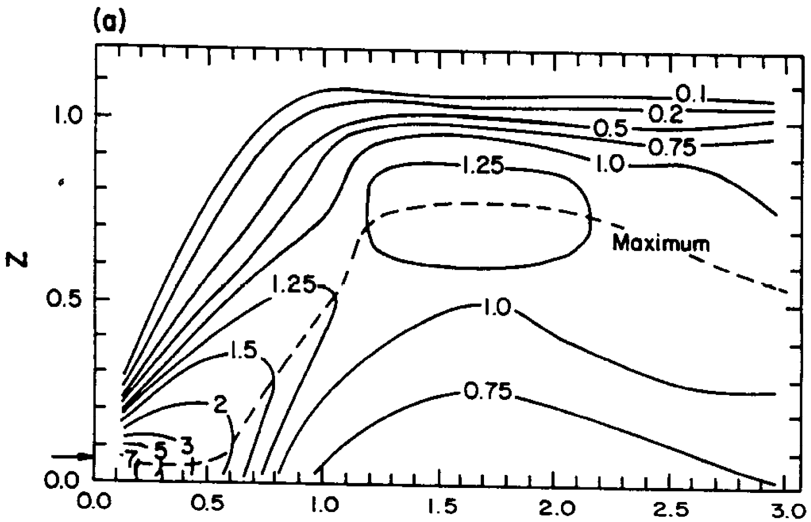
$$\text{Distanza Sottovento Adimensionale } X = \frac{x w_*}{z_i \overline{U}}$$

$$\text{Coordinata Verticale Adimensionale } Z = z/z_i$$

$$\text{Concentrazione Integrale trasversale } C_y = \int_{-\infty}^{+\infty} C(x, y, z)\, dy$$

ARPALAZIO

Emissioni entro il SL



La **maggior parte** dell'inquinante:

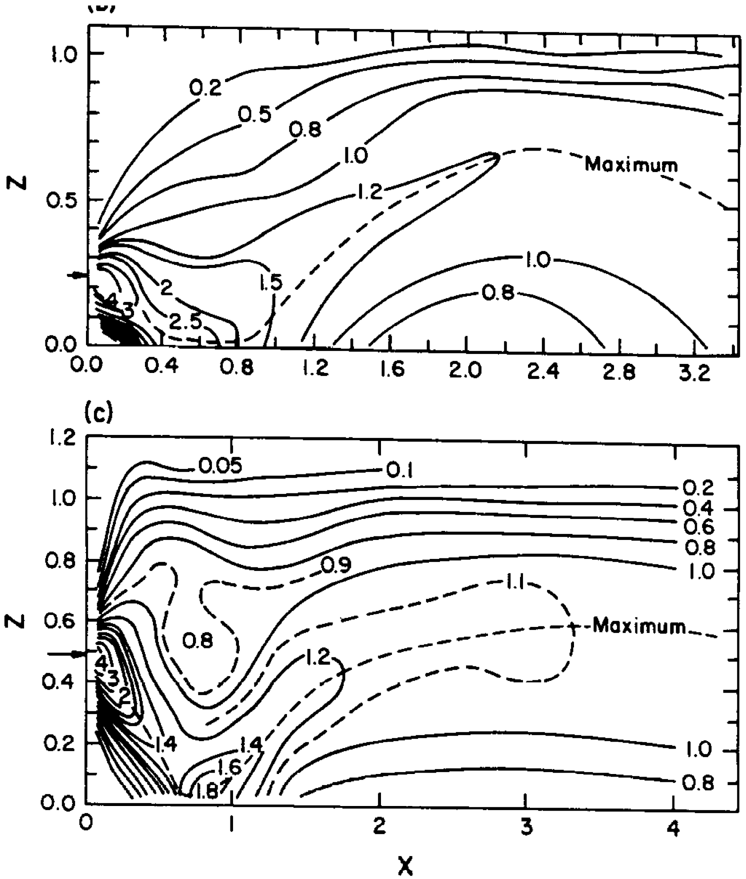
- **ristagna al suolo** ***a breve distanza dalla sorgente*** (a causa dei downdraft)
- finché viene **catturato** da **un updraft** (***lift-off***) salendo fino all'altezza di rimescolamento

Emissioni entro il ML

Il baricentro del plume:

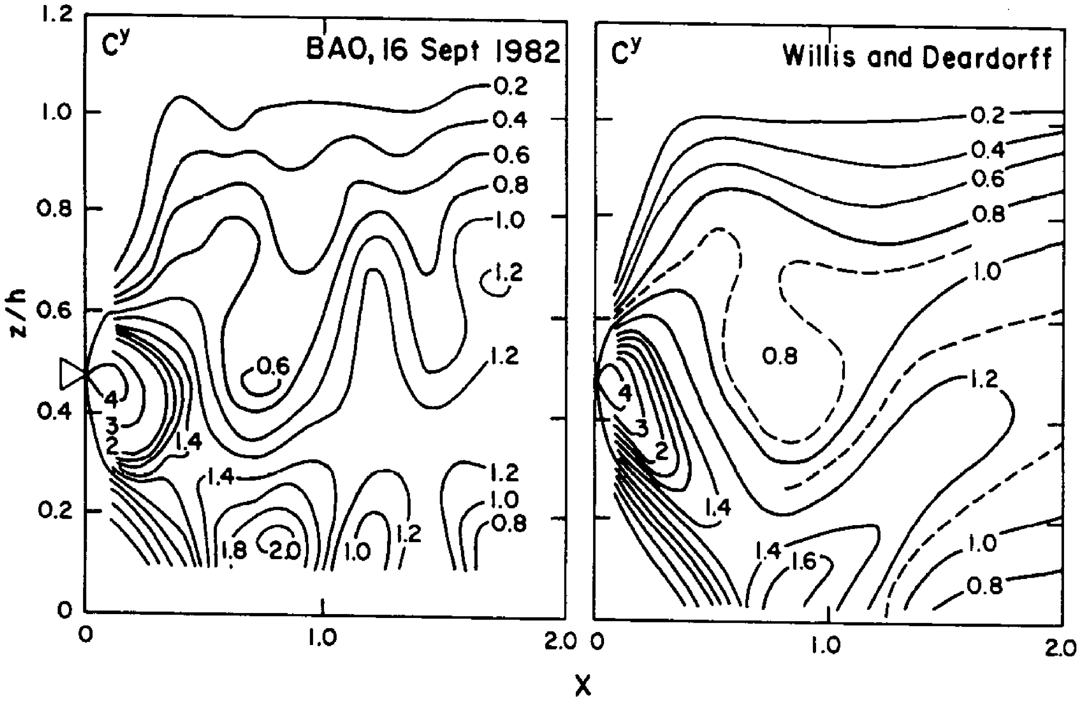
- **si abbassa al suolo a X ≈0.6 (il plume è catturato da un downdraft che è una struttura fortemente coerente)**

- **poi sale fino alla sommità del PBL (comportandosi come una normale emissione al suolo).**



Esperimenti in campo (campagna CONDORS - Briggs)

Risultati sostanzialmente coincidenti con quelli di laboratorio



ARPALAZIO

Struttura di un Modello Ibrido

A) Assenza di galleggiamento

Idee di base:

1) La vita media degli updraft e dei downdraft è molto grande;

2) se alla quota z_s è emessa una particella, essa resta intrappolata nella struttura incontrata all'emissione finché non giunge al suolo (*downdraft*) o all'altezza di rimescolamento (*updraft*);

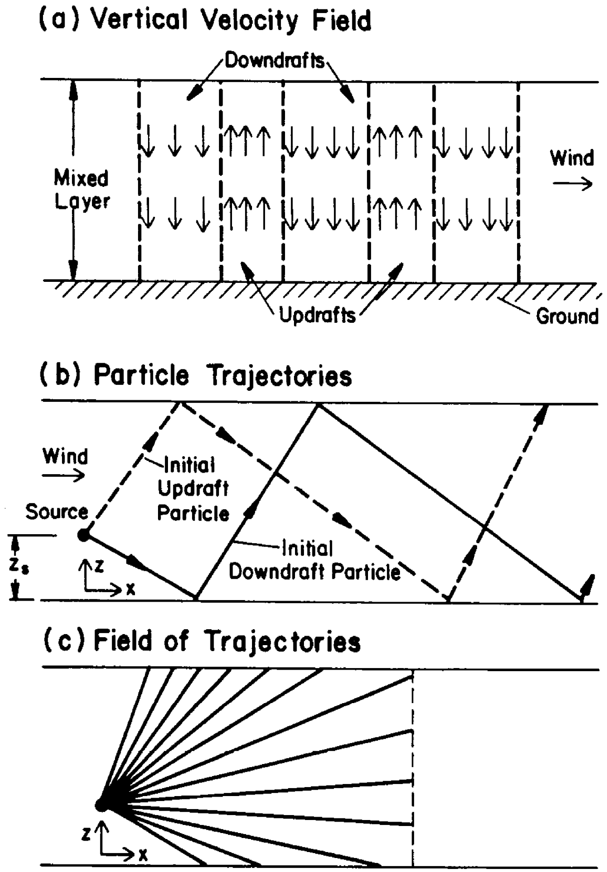
3) la particella si muove con una traiettoria rettilinea avente una pendenza (*positiva o negativa*) determinata dal valore e dal segno della velocità verticale della struttura coerente in cui è intrappolata;

4) una volta raggiunta una delle due frontiere, la particella inverte il moto riflettendosi tra di esse;

5) se dalla sorgente sono emesse contemporaneamente varie particelle, esse per ragioni statistiche non seguiranno la medesima traiettoria.

ARPALAZIO

Illustrazione schematica del campo di velocità del vento idealizzato e del movimento delle particelle.



Utilizzando un approccio probabilistico

La funzione di densità di probabilità che la componente verticale della velocità del vento possieda un valore *w* in un *PBL* convettivo in cui siano presenti *updraft* e *downdraft è data da una relazione del tipo:*

$$p_w(w) = \frac{F_1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1}\exp\left[\frac{-\left(w-\overline{w}_1\right)^2}{2\sigma_1^2}\right] + \frac{F_2}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}\exp\left[\frac{-\left(w-\overline{w}_2\right)^2}{2\sigma_2^2}\right]$$

Pedice 1 = downdraft, pedice 2 = updraft

- ⇒ **F_1 e F_2 rappresentano la percentuale volumetrica media rispettivamente dei downdraft e updraft**
- ⇒ **w_1 e w_2 rappresentano rispettivamente la velocità media discensionale ed ascensionale dei due tipi di strutture coerenti**
- ⇒ **σ_1 e σ_2 le rispettive deviazioni standard**

ARPALAZIO

Una delle parametrizzazioni proposte conduce ai valori seguenti:

$$F_1 = 0.6 \qquad F_2 = 0.4$$
$$\overline{w_1} = -0.35 w_* \qquad \overline{w_2} = 0.40 w_*$$
$$\sigma_1 = 0.26 w_* \qquad \sigma_2 = 0.48 w_*$$

tutti dipendenti dalla velocità convettiva di scala w_*, parametro principe nella descrizione della dispersione in un *PBL* convettivo.

Si può dimostrare che la concentrazione integrale trasversale C_y è data dalla relazione:

$$\boxed{C_y(x,z) = \frac{Q}{x} \cdot p_w\left((z - z_s)U/x\right)}$$

dove z_s è la <u>quota di emissione</u>.

La concentrazione in un generico punto di coordinate (*x,y,z*) è data dalla sovrapposizione di due contributi:

- ⇒ **un *plume diretto* che rappresenta l'effetto dovuto al trasporto diretto al suolo delle particelle catturate dai downdraft ed alla loro riflessione con il terreno**
- ⇒ **un *plume indiretto* dovuto al contributo derivante dalle particelle catturate dagli updraft che raggiungono la sommità del PBL e vengono da esso riflesse.**

Quindi si ha che:

$$\boxed{C_y(x,z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}U} \cdot (C_{dir} + C_{ind})}$$

dove la relazione per il *plume diretto* è:

$$C_{dir} = \sum_{j=1}^{2} \left\{ \frac{F_j}{\sigma_{zj}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp\left(\frac{-(z - \Psi_j - 2nz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2} \right) + \right. \right.$$
$$\left. \left. + \exp\left(\frac{-(z + \Psi_j + 2nz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2} \right) \right] \right\}$$

$$\sigma_{zj} = \sigma_j \cdot x/U$$

$$\Psi_j = z_s + \overline{w_j} \cdot x/U$$

e per il *plume indiretto* è:

$$C_{dir} = \sum_{j=1}^{2} \left\{ \frac{F_j}{\sigma_{zj}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\exp\left(\frac{-(z + \Psi_j - 2nz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2} \right) + \right. \right.$$
$$\left. \left. + \exp\left(\frac{-(z - \Psi_j + 2nz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2} \right) \right] \right\}$$

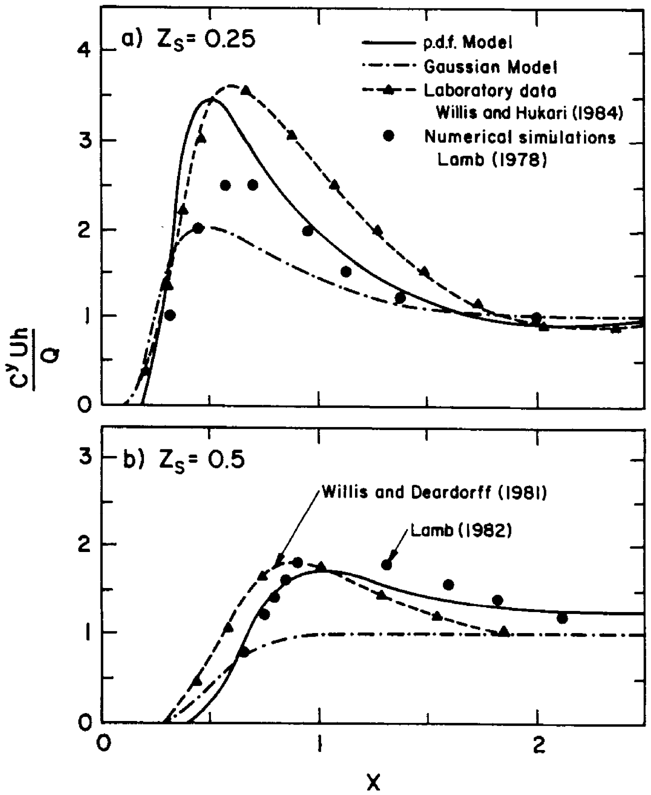
In definitiva si ha che:

$$\boxed{C(x,y,z) = C_y \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} \right]}$$

ARPALAZIO

Confronto tra C_y prodotta da:

- ⇒ **un modello gaussiano normale,**
- ⇒ **un modello ibrido,**
- ⇒ **le simulazioni numeriche ad alta risoluzione di Lamb e**
- ⇒ **i dati di laboratorio di Willis.**



$Z_s = z_s / z_i$

$X = x \cdot w_* / (U \cdot z_i)$

ARPALAZIO

Struttura di un Modello Ibrido

B) Presenza di galleggiamento

L'emissione di fumi caldi con una velocità verticale possiede un galleggiamento (*buoyancy*).

Anche in questo caso si ipotizza di usare le medesime relazioni per il *plume rise* Δh impiegate per i modelli gaussiani.

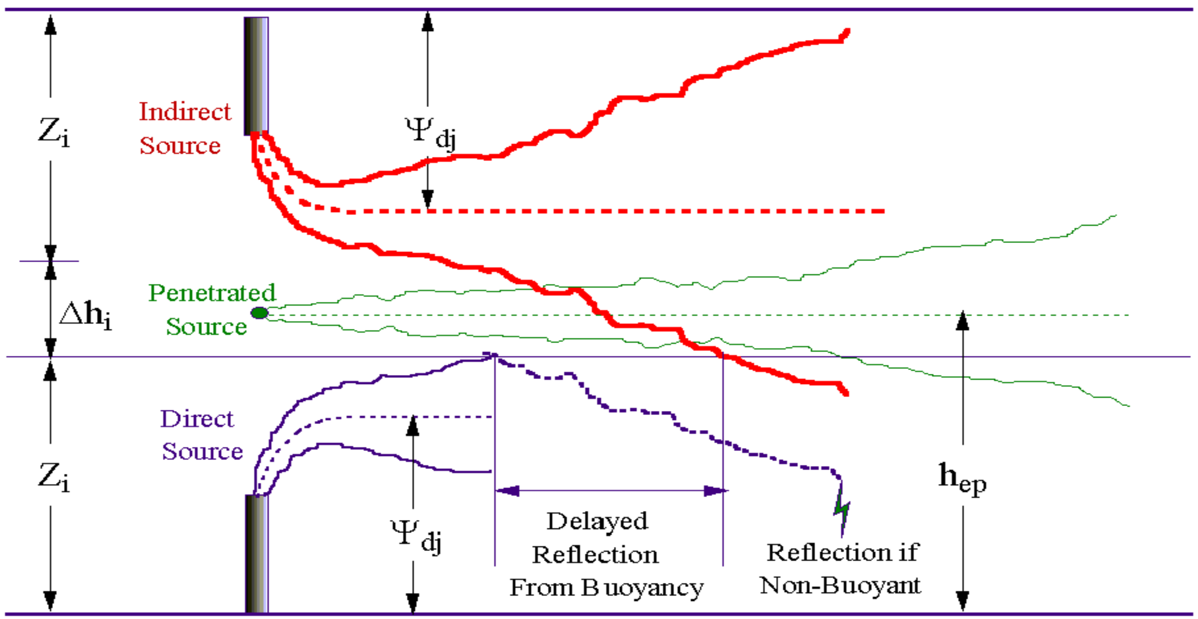
La situazione è complicata dal fatto che il galleggiamento può far sì che i fumi (totalmente o parzialmente) superino la sommità del PBL (penetrazione). E' possibile stimare il coefficiente f_p che rappresenta la frazione di plume intrappolato entro il PBL.

In sostanza la concentrazione in un punto (x,y,z) è data dalla sovrapposizione di:

- ⇒ **un *plume diretto* derivante dalle particelle catturate dai *downdraft* e poi riflesse al suolo**
- ⇒ **da un *plume indiretto* derivante dalle particelle intrappolate negli updraft e riflesse dalla sommità del PBL**
- ⇒ **da un *plume penetrato*, derivato dalla dispersione della porzione di plume che ha superato la barriera costituita dal top del PBL**

Pertanto si ha che:

$$C(x,y,z) = C_y(x,z) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$
$$C_y(x,z) = f_p \cdot \left[C_{y,Dir}(x,z) + C_{y,Ind}(x,z)\right] + \left(1 - f_p\right) \cdot C_{y,Pen}(x,z)$$



Il contributo del *plume diretto* è pari a:

$$C_{dir} = \sum_{j=1}^{2}\left\{\frac{F_j}{\sigma_{zj}}\cdot\sum_{n=0}^{\infty}\left[\exp\left(\frac{-\left(z-\Psi_{dj}-2nz_i\right)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right)+\exp\left(\frac{-\left(z+\Psi_{dj}+2nz_i\right)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right)\right]\right\}$$

$$\Psi_{dj} = z_s + \Delta h_d + \overline{w_j}\cdot x/U$$

Il contributo del *plume indiretto* è pari a:

$$C_{ind} = \sum_{j=1}^{2}\left\{\frac{F_j}{\sigma_{zj}}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\left[\exp\left(\frac{-\left(z+\Psi_{rj}-2nz_i\right)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right)+\exp\left(\frac{-\left(z-\Psi_{rj}+2nz_i\right)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right)\right]\right\}$$

$$\Psi_{rj} = h + \Delta h_r + \overline{w_j}\cdot x/\underline{u}$$

Il contributo del *plume penetrato* è pari a:

$$C_{ind} = \sum_{j=1}^{2}\left\{\frac{F_j}{\sigma_{zj}}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\exp\left(\frac{-\left(z-h_{ep}-2nz_{ieff}\right)^2}{2\sigma_{zp}^2}\right)+\exp\left(\frac{-\left(z+h_{ep}+2nz_{ieff}\right)^2}{2\sigma_{zp}^2}\right)\right]\right\}$$

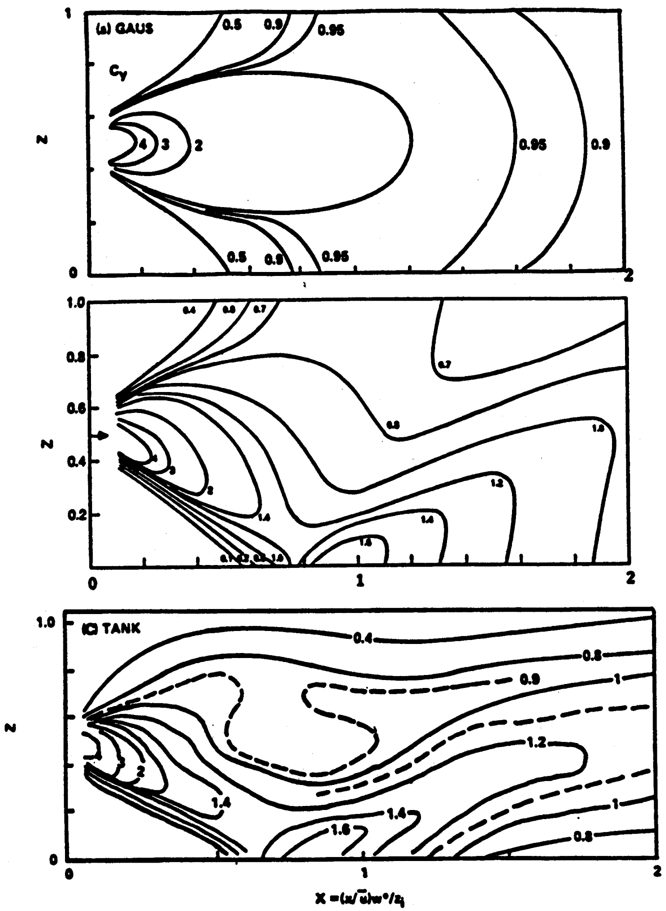
$$\Delta h_{eq} = \left\{2.6^3\left(\frac{F_0}{UN^2\Delta h_h^3}\right)+\left(2/3\right)^3\right\}^{1/3}\Delta h_h$$

$$h_{eq} = \frac{z_s+z_i}{2}+0.75\Delta h_{eq}$$

$$z_{ieff} = MX\left\{\left(h_{eq}+2.15\sigma_{zp}(x)\right); z_i\right\}$$

ARPALAZIO

Confronto tra le simulazioni di un modello gaussiano (in alto), di un modello ibrido (al centro) e i risultati ottenuti in water tank (in basso) da Perry et al. (1989)



Il meccanismo su cui si basa il modello ibrido è in grado di riprodurre in modo molto realistico la dispersione degli inquinanti nelle situazioni convettive.

Nelle situazioni stabili, invece, la dispersione degli inquinanti è ben riprodotta dal modello gaussiano.

Bibliografia Essenziale
Modelli Stazionari

R. Sozzi (2003): La Micrometeorologia e la Dispersione degli Inquinanti in Aria (APAT- CTN-ACE)

J.H. Seinfeld, S.N. Pandis (2006): Atmospheric Chemistry and Physics 2° Ed – J.Wiley&Sons

Approfondimenti:

FTM Nieuwstadt, H. van Dop ed. (1982): Turbulence and Air Pollution Modeling – Reidel Publishing Company

A. Venkatram, J.C. Wyngaard ed. (1988): Lectures on Air Pollution Modeling – American Meteorological Society