Roma 5 aprile 2018

Note Introduttive alla Dispersione degli Inquinanti in Aria

Roberto Sozzi

ARPALAZIO

Per studiare riferirsi a:

La Micrometeorologia e la Dispersione degli Inquinanti in Aria

Roberto Sozzi

APAT – CTN/ACE (2003)

Lo si trova nella Zona Didattica del Centro regionale della Qualità dell'Aria di ARPA Lazio

ARPALAZIO

La stima della distribuzione spazio-temporale della concentrazione delle diverse sostanze inquinanti schematicamente comporta i seguenti passi logici:

1.Individuazione delle possibili sorgenti potenzialmente inquinanti (centri abitati, strade, impianti industriali, ecc.)

2.Individuazione delle sostanze emesse da ciascuna sorgente

3.Loro quantificazione e modulazione temporale

4.Modalità di emissione (velocità di emissione, temperatura e portata)

A questo punto sappiamo:

- **Cosa viene emesso**
- **Dove**
- **Come**

Una volta emesse, le sostanze inquinanti **sono inglobate** nelle masse d'aria in movimento nella Bassa Troposfera e vengono:

1.Trasportate dal moto medio delle masse d'aria

2.Diffuse dalla turbolenza tipica di questa parte di troposfera

3.Vengono in contatto con la superficie terrestre e quindi **catturate** con processi chimico-fisici (*deposizione secca*)

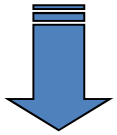
4.Vengono catturate dalla pioggia e quindi **depositate** al suolo (*deposizione umida*)

5.Reagiscono chimicamente tra loro (*chimica dell'atmosfera*)

Processi complessi che richiedono conoscenze approfondite di

- **Fluidodinamica**
- **Meteorologia della parte bassa della Troposfera**
- **Chimica dell'atmosfera**

Il **punto di partenza** per la quantificazione realistica dell'inquinamento atmosferico

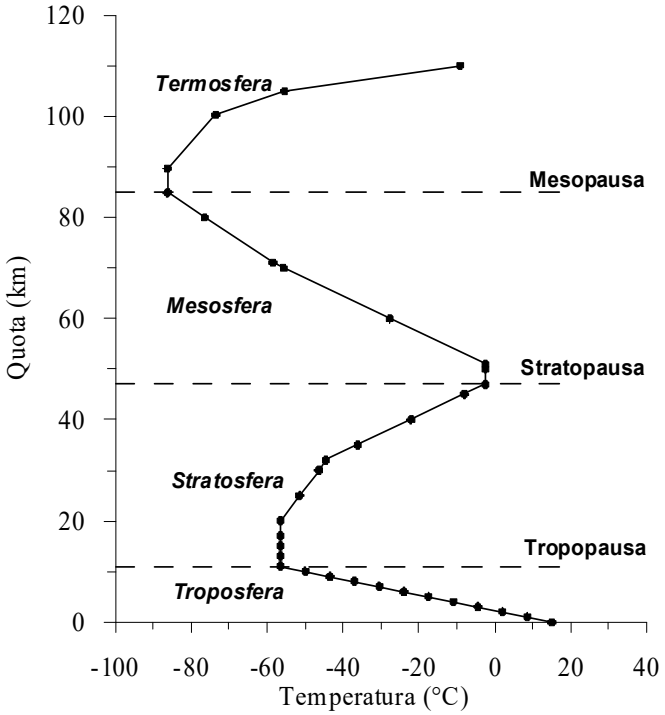


Conoscenza approfondita della parte bassa della Troposfera dove hanno luogo normalmente i processi di dispersione degli inquinanti emessi dalle varie sorgenti, il loro impoverimento e la loro reattività chimica

Prima tratteremo la Fisica dei Bassi Strati della Troposfera

Poi la Dispersione degli Inquinanti in Aria

Troposfera → parte dell'**Atmosfera** (involucro gassoso che circonda l'intero globo terrestre)



Stratificazione tipica

La **Troposfera** è la parte più bassa dell'atmosfera a diretto contatto con la superficie terrestre.

Ai fini dello studio dell'inquinamento atmosferico, siamo interessati solo ad una porzione di essa, quella a più diretto contato col suolo.

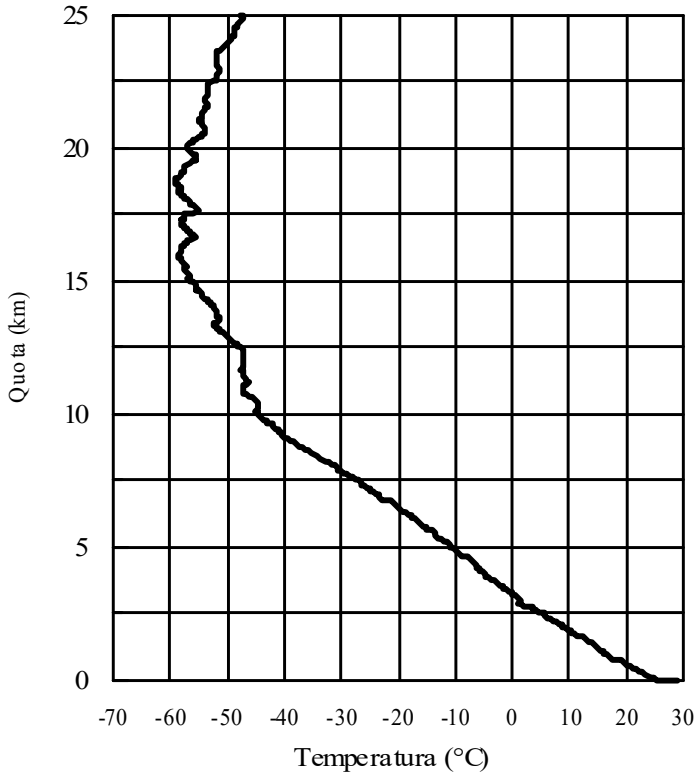
Questo strato di Troposfera si estende
dal suolo fino ad una quota che varia durante il giorno e
da giorno a giorno

(estensione massima di 1 – 2 km nelle ore diurne e soleggiate).

Possiede caratteristiche fisiche e chimiche nettamente distinte dal resto della troposfera.

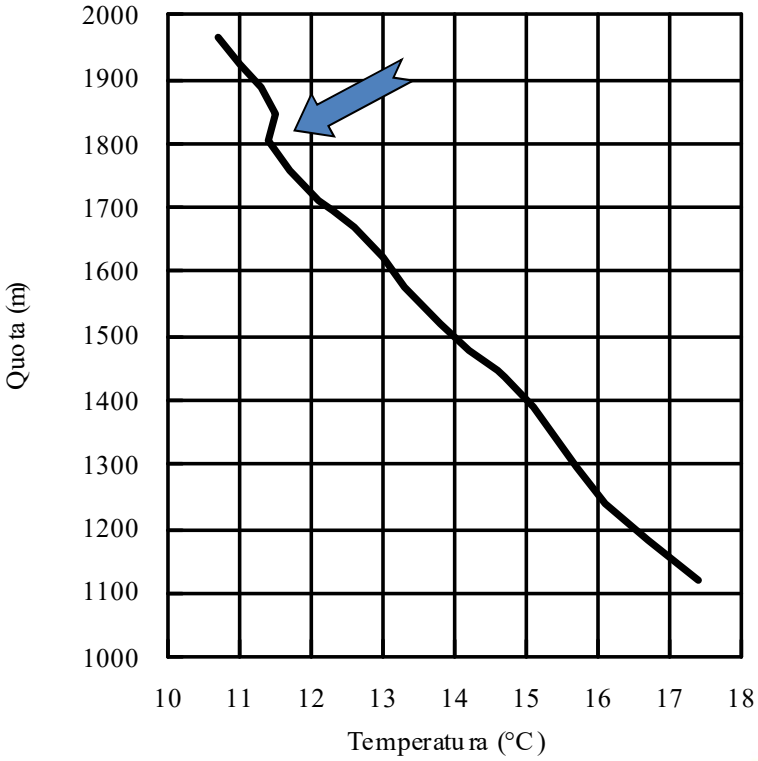
Prende il nome di:

Planetary Boundary Layer (PBL)
Strato Limite Planetario
Atmospheric Boundary Layer



Profilo verticale di temperatura nella Troposfera

Individuazione preliminare del PBL



ARPALAZIO

Consideriamo una generica porzione d'aria (Particella) in un punto P(x,y,z) dello spazio

La particella si muove ⇒ Velocità della Particella

Velocità della particella ⇒ Vento (Vettore)

Come ogni vettore, anche il vento è descritto dalla sue **tre componenti** rispetto agli assi del sistema di riferimento:

⇒ V_x oppure ***u*** componente rispetto all'asse x

⇒ V_y oppure ***v*** componente rispetto all'asse y

⇒ V_z oppure ***w*** componente verticale (che spesso viene trascurata)

Velocità del vento

Direzione di Provenienza del Vento (0° : da N; 90° : da E; 180° : da S; 270° : da W)

Sistema di riferimento

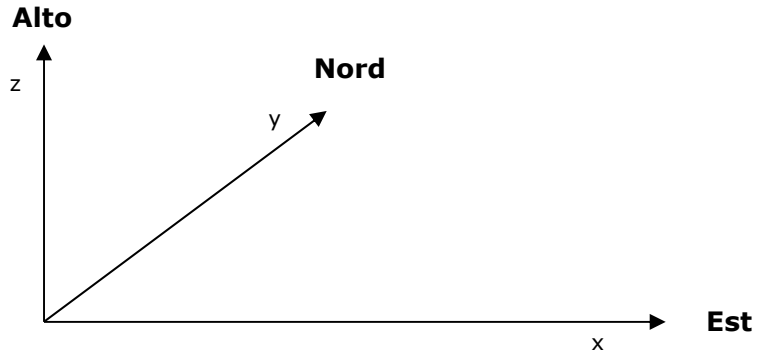
⇓

A differenza della Meteorologia a grande scala, nello studio del *PBL* si usa un Sistema di riferimento Cartesiano Ortogonale

⇓

Asse x diretto in direzione **W–E** (positivo verso E)

- **Asse y** diretto in direzione **S-N** (positivo verso N)
- **Asse z** diretto **Basso-Alto** (positivo verso l'alto)



Composizione tipica dell'Aria Secca

Componente	*Simbolo*	*Peso Molecolare*	*Concentrazione (% in volume)*
Azoto	N_2	28.01	**78.084**
Ossigeno	O_2	32.00	**20.946**
Argon	Ar	39.95	**0.934**
Biossido di Carbonio	CO_2	44.01	0.030
Neon	Ne	20.18	2.821 10^{-3}
Elio	He	4.00	0.524 10^{-3}
Metano	CH_4	16.04	0.150 10^{-3}
Kripton	Kr	83.80	0.114 10^{-3}
Idrogeno	H_2	2.02	0.050 10^{-3}
Xeno	Xe	132.30	0.009 10^{-3}
Ozono	O_3	48.00	0.007 10^{-3}
Ammoniaca	NH_3	16.04	0.001 10^{-3}
Iodio	I_2	253.81	0.001 10^{-3}
Biossido di Azoto	NO_2	46.01	0.0001 10^{-3}
Biossido di Zolfo	SO_2	64.06	0.00002 10^{-3}
Monossido di Azoto	NO	30.00	0.00002 10^{-3}
Acido Solfidrico	H_2S	34.08	0.00002 10^{-3}
Monossido di Carbonio	CO	28.01	tracce

Nell'aria è sempre presente dell'**acqua** soprattutto allo stato gassoso (vapor d'acqua) ⇒ **Aria Umida.**

Contenuto di vapor d'acqua

- **Tensione di vapore *e*** (pressione parziale di vapor d'acqua, mb).
  Massimo valore tensione di saturazione = pressione di saturazione e_s.
- **Umidità relativa** *RH (%)*: $100\, e/e_s$
- **Umidità assoluta** *a*: massa di acqua in 1 m^3 di aria
- **Umidità specifica** *q*: grammi di acqua per grammo di aria umida
- **Rapporto di mescolanza** *r*: grammi acqua per grammo di aria secca

Aria umida = gas perfetto, rispetta l'equazione di stato

$$p = R_d \cdot \rho \cdot T_v$$

T_v è la **temperatura virtuale**

$$T_v = T(1 + 0.608q)$$

Temperatura Potenziale e stabilità statica

Conseguenza del Primo Principio della Termodinamica applicato ad una particella in movimento adiabatico in aria.

*Se **T** è la temperatura della particella in un punto del PBL a pressione **p** e la si trasporta adiabaticamente alla pressione di riferimento **p_0** (es. 1000 mb) la sua temperatura diventa θ.*

$\theta \Rightarrow$ ***Temperatura potenziale***

Relazione esatta tra θ e T:

$$\vartheta = T\left[\frac{1000}{p}\right]^{R/C_p}$$

Relazione approssimata tra θ e T:

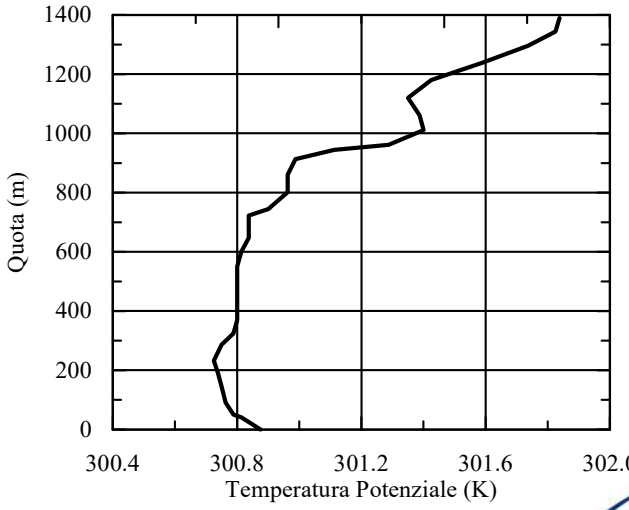
$$\vartheta \cong T + 0.0098 \cdot z$$

Relazione tra il gradiente verticale di *T* e di θ

$$\frac{d\vartheta}{dz} = \frac{dT}{dz} + 0.0098$$

ad un gradiente di temperatura di –0.0098 K/m corrisponde un gradiente di temperatura potenziale di 0 K/m

La temperatura potenziale *può* essere considerata come una **nuova definizione di temperatura** che applicata al profilo verticale di temperatura (relativo a un'ora diurna e soleggiata) visto in precedenza, si ottiene sorprendentemente ciò che appare nella figura



Prima non si notava alcunché di particolare, **ora** si nota chiaramente una **porzione di atmosfera** in cui possono essere individuati ***tre strati*** corrispondenti a zone con diversi gradienti verticali di temperatura potenziale.

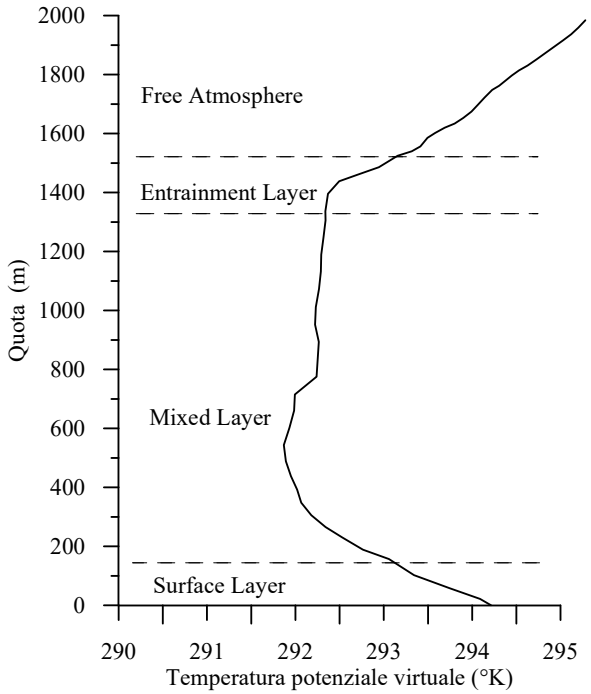
Nelle ore diurne con soleggiamento (cui si riferisce il profilo termico precedente), si nota:

- una zona vicino al suolo ($d\theta/dz$ negativo) $\Rightarrow$ ***Strato Superficiale SL***
- una zona intermedia ($d\theta/dz$ circa nullo) $\Rightarrow$ ***Strato Rimescolato ML***
- un'altra zona ($d\theta/dz$ molto positivo) $\Rightarrow$ ***Strato di Entrainment EL***
- una zona superiore ($d\theta/dz$ positivo, ma inferiore alla precedente, che continua con gradiente circa uguale fino alla sommità della troposfera) $\Rightarrow$ ***Atmosfera Libera***

Dalle relazioni precedenti si ha che:

- se $dT/dz < -0.0098$ (K/m), $d\theta/dz < 0$
- se $dT/dz = -0.0098$ (K/m), $d\theta/dz = 0$
- se $dT/dz > -0.0098$ (K/m), $d\theta/dz > 0$

Profilo verticale di temperatura potenziale in una tipica situazione diurna e soleggiata



ARPALAZIO

Se si ha una struttura del PBL come quella della figura precedente
(gradiente temperatura potenziale positivo in SL, nullo in ML, positivo in EL)

Se si **rilascia** al suolo una **particella** con una componente verticale positiva della velocità, essa:

⇒ abbandona il ***SL*** senza ritornare, accelerando,

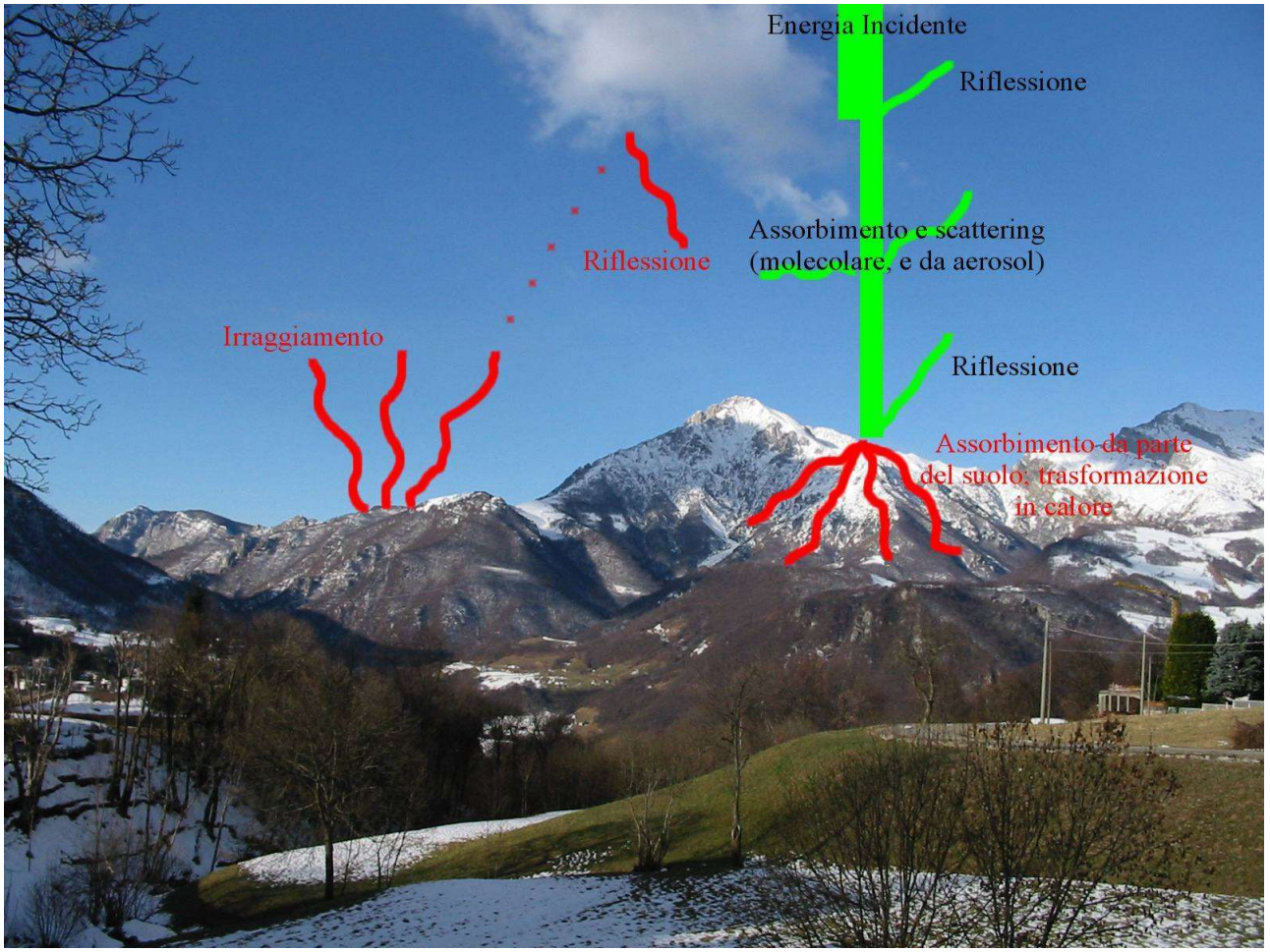
⇒ attraversa indisturbata il ***ML***,

⇒ si blocca nel ***EL*** e ridiscende garantendo la conservazione della massa.

Il *PBL* è una vera e propria trappola per le particelle emesse al suo interno ed in particolare per quelle emesse al suolo.

Chi è il motore dell'Atmosfera e del PBL, cioè la causa prima dei moti delle masse d'aria ed, in ultima analisi, della vita sulla Terra?

Il Sole


Energia Incidente
Riflessione
Assorbimento e scattering
(molecolare, e da aerosol)
Riflessione
Irraggiamento
Riflessione
Assorbimento da parte
del suolo, trasformazione
in calore

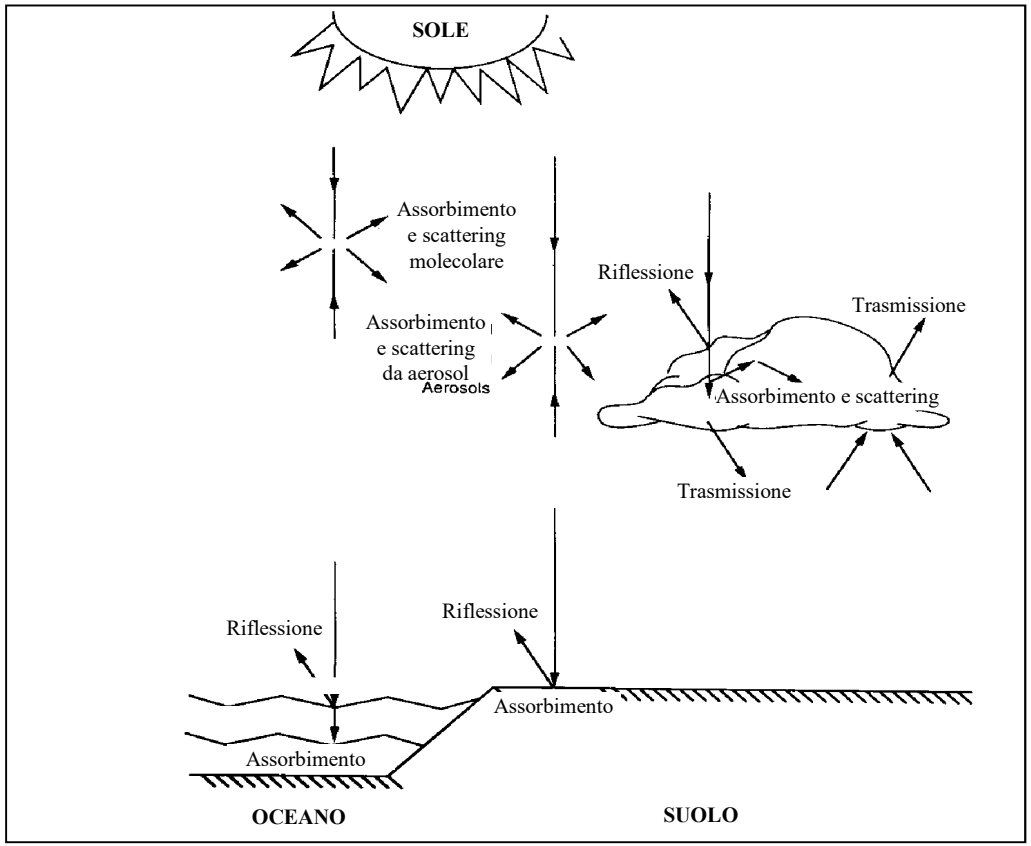
Radiazione Solare incidente ⇒ **Radiazione Globale Rg**

Radiazione riflessa dal suolo ⇒ **Albedo = -αRg**

(α = coefficiente di albedo)

Energia solare trasferita al suolo:

E = (1-α) Rg



ARPALAZIO

Ci sono **due reazioni** del sistema fisico al trasferimento di radiazione solare:

⇒ L'**atmosfera** (corpo caldo) ⇒ emette radiazione all'infrarosso **I↓** verso la superficie terrestre

⇒ Il **suolo** (corpo caldo) ⇒ emette radiazione infrarossa **I↑** verso l'atmosfera

Questi due contributi energetici sono ad *onda lunga*.

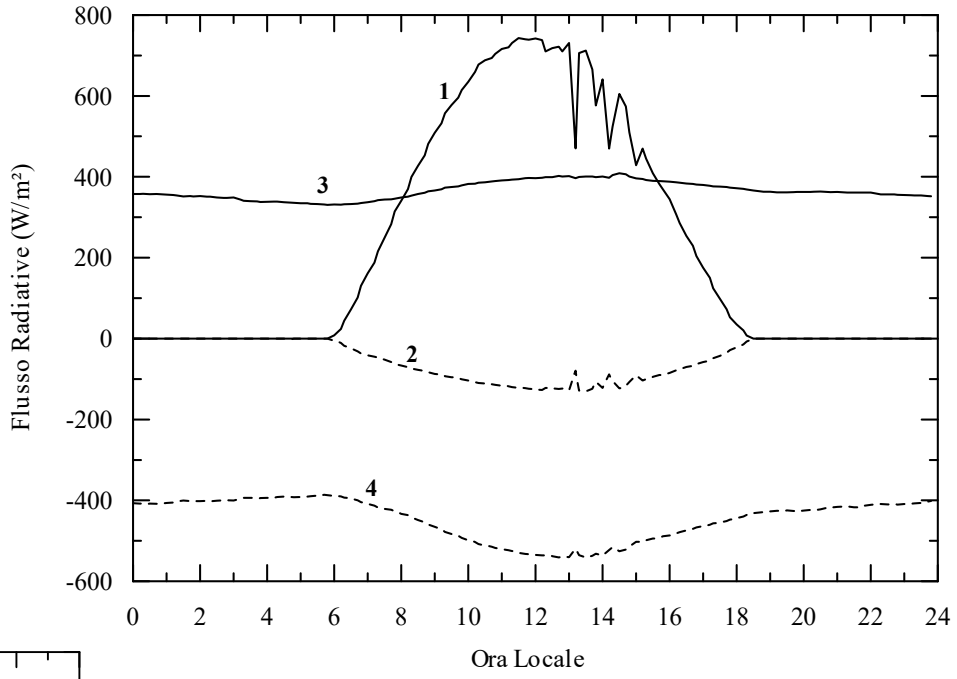
Legge di Stefan-Boltzmann

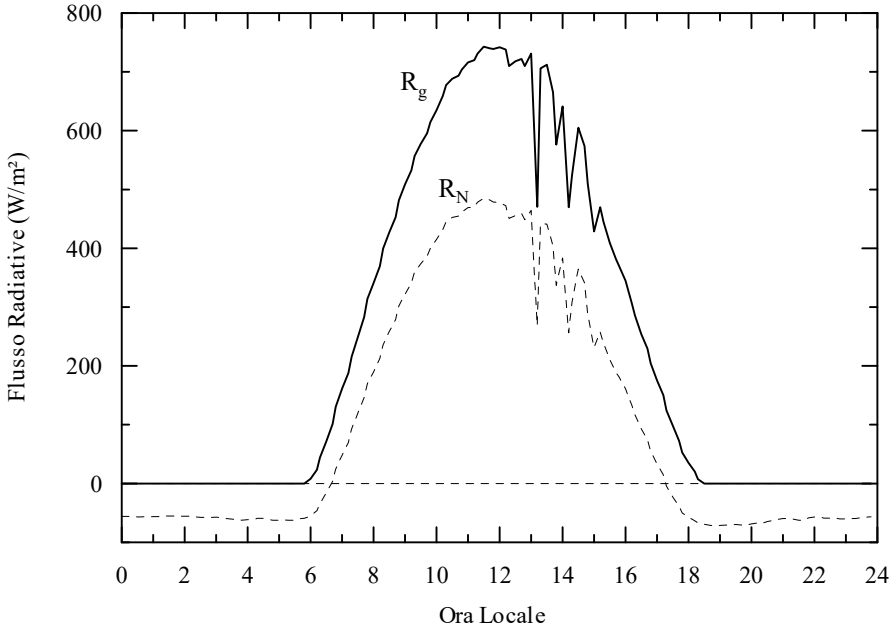
$$I = \sigma T^4$$

La quantità di **energia disponibile al suolo** (**Radiazione Netta**) è pari a:

$$\mathbf{R_N = (1-\alpha)\ Rg + I\downarrow - I\uparrow}$$

1 Radiazione solare globale
2 Albedo
3 Infrarosso dal cielo
4 infrarosso terrestre





Nelle ore diurne (dopo l'alba e prima del tramonto) l'energia disponibile all'interfaccia aria-suolo è positiva, mentre nelle ore notturne è negativa.

ARPALAZIO

Sistema radiometrico

Radiazione infrarossa dall'atmosfera

R_G

Temperatura della struttura per correzione misure infrarosso

Radiazione infrarossa dal suolo

αR_G

A fronte di questa **disponibilità energetica** si ha che:

⇒ Una parte di energia disponibile viene trasmessa per conduzione al suolo

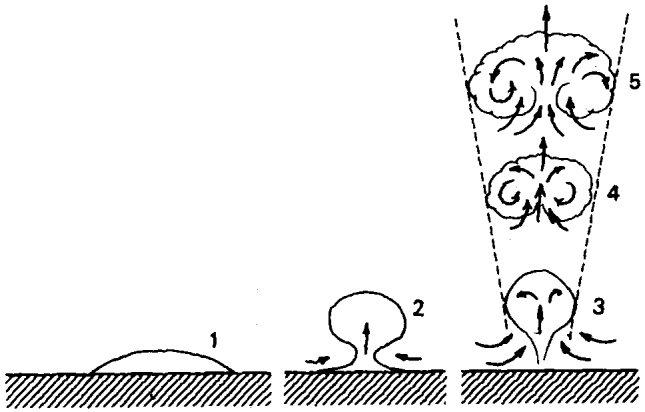
(***Flusso di Calore nel suolo G***)

⇒ una parte viene usata per evaporare l'acqua presente nel suolo e nella vegetazione

(***Flusso Turbolento di Calore Latente H_E***)

⇒ il resto viene emessa dal suolo e trasmessa ai primi millimetri d'aria e si trasforma in *movimenti irregolari* delle masse d'aria del PBL

(***Flusso Turbolento di Calore sensibile H_0***)



Meccanismo *a bolle* di Oke per il trasferimento di H_0 all'aria del PBL

L'aria che passa sopra la *superficie terrestre* **scambia energia** ed altera le proprie caratteristiche fisiche:

⇒ riceve dal suolo H_0 e H_E e queste sono le ***sorgenti*** di ***energia convettiva***.

⇒ a causa della rugosità del suolo, perde energia per *attrito* (***perdita di energia meccanica***). Si genera quindi, come per tutti i fluidi turbolenti in moto su una superficie rugosa, una **turbolenza meccanica**.

⇒ nelle **ore diurne** quando $R_N>0$ l'energia persa per attrito è quasi sempre minore di quella acquisita per convezione (***Situazioni convettive***)

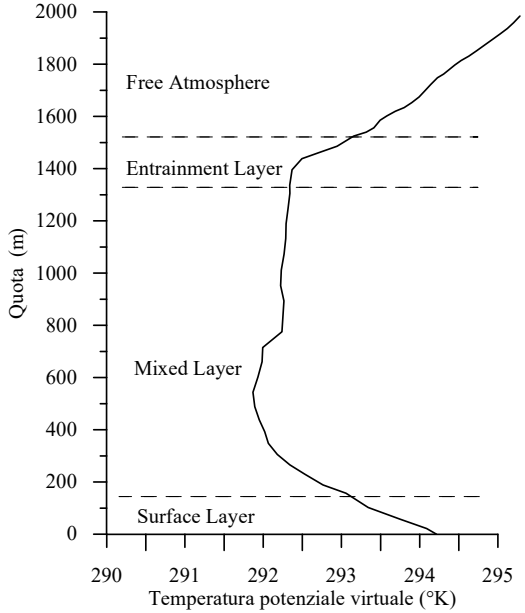
⇒ nelle **ore notturne** (Rn<0), c'è solo una perdita globale di energia (***Situazioni Stabili***).

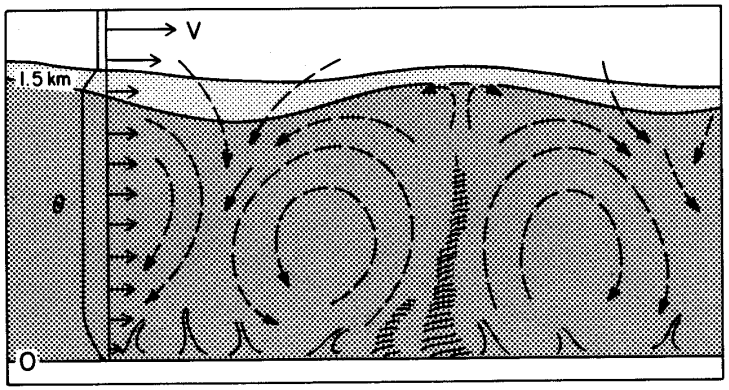
⇒ ***lo stato del PBL è differente di giorno e di notte***

⇒ ***anche il modo con cui si disperdono gli inquinanti è diverso nei due casi***

Situazioni Convettive

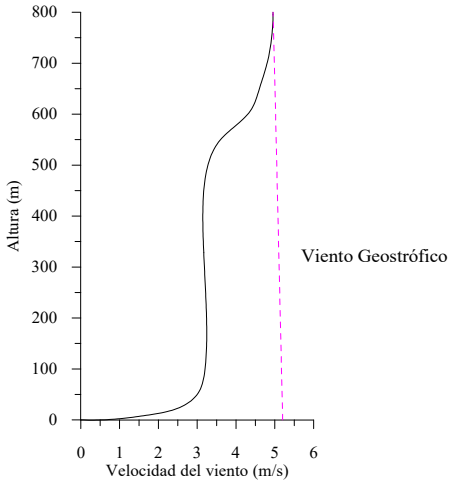
Profilo di temperatura potenziale ⇒





⇐ ***Struttura dei vortici turbolenti***

Profilo della velocità del vento ⇒

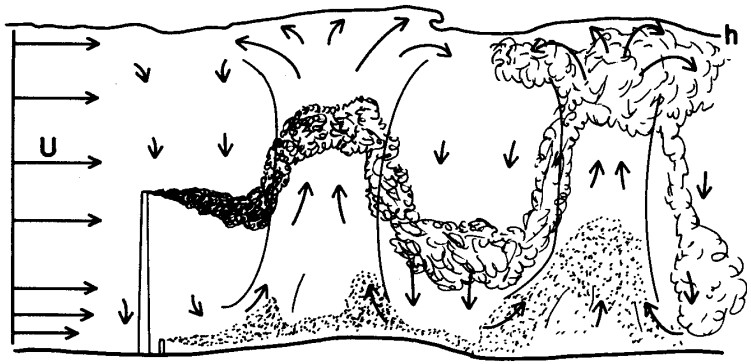


ARPALAZIO

Si vengono ad instaurare:

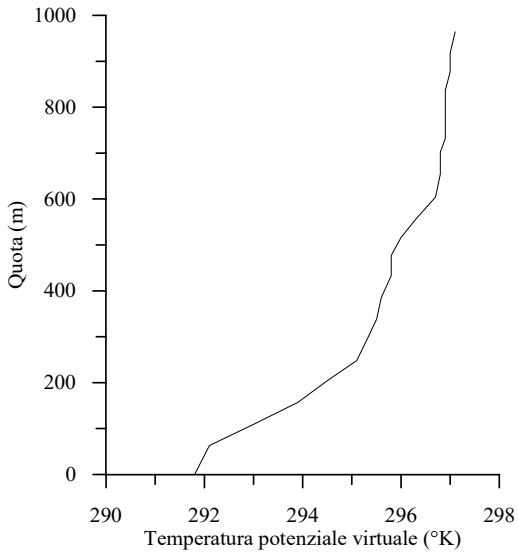
⇒ un **flusso ascendente di aria** (***up-draft***)
⇒ un **flusso discendente di aria (down-draft**)

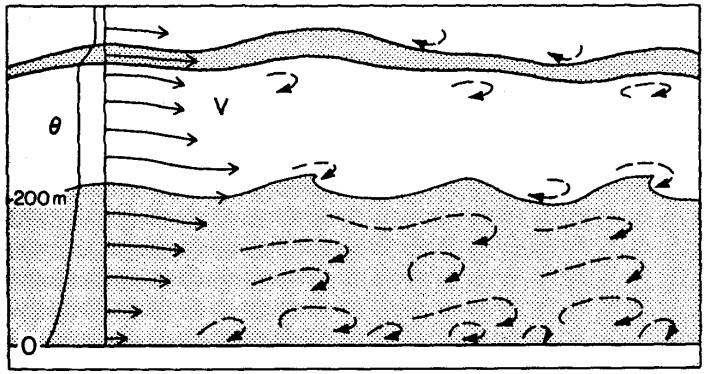
Gli inquinanti emessi vengono catturati dai flussi ascendenti e discendenti e presentano pennacchi caratteristici.



Situazioni Stabili

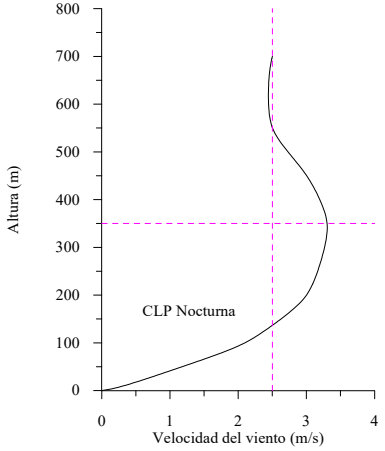
Profilo di temperatura potenziale ⇒



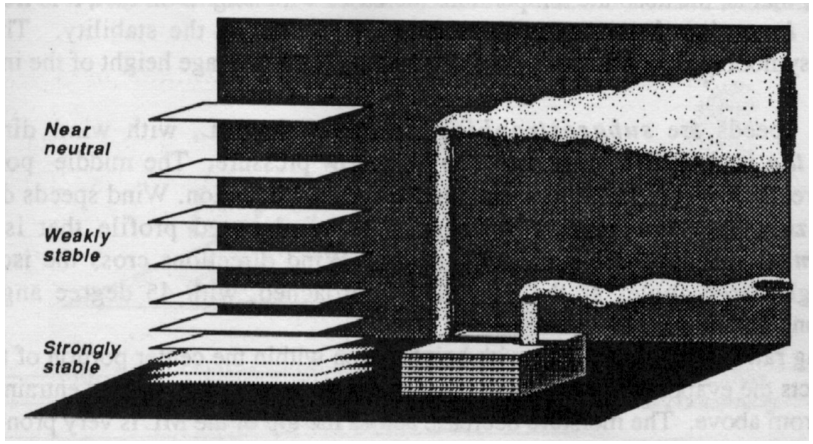


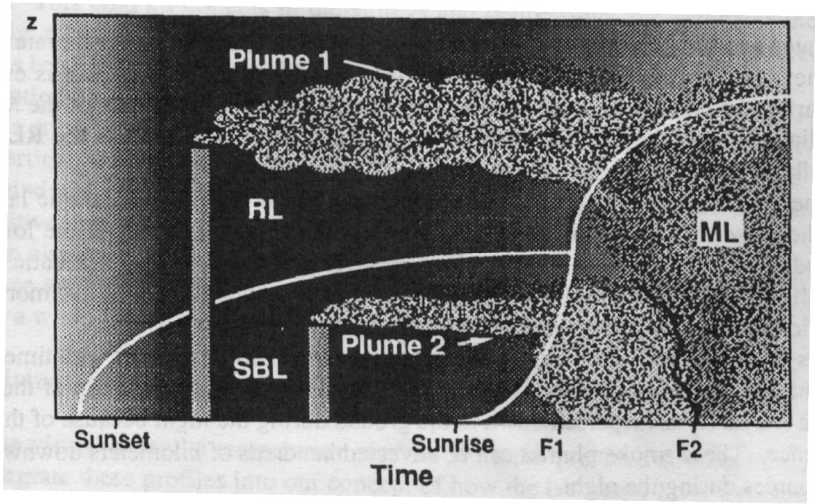
⇐ ***Struttura dei vortici turbolenti***

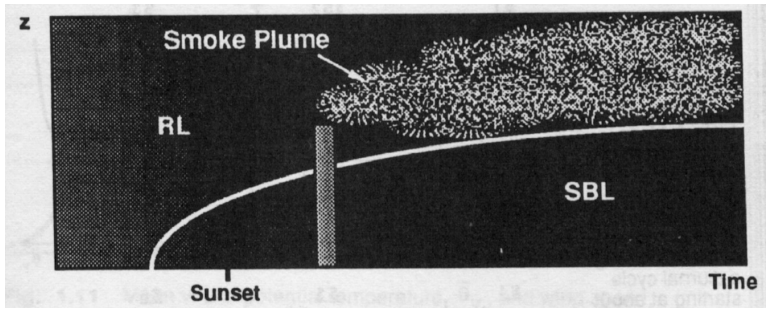
Profilo verticale del vento ⇒



ARPALAZIO


Near
neutral
Weakly
stable
Strongly
stable


z
Plume 1
RL
ML
SBL
Plume 2
Sunset
Sunrise
F1
F2
Time


z
Smoke Plume
RL
SBL
Sunset
Time

Estensione verticale del PBL ⇒ **Altezza di Rimescolamento** (secondo la nomenclatura usata nei modelli di dispersione degli inquinanti)

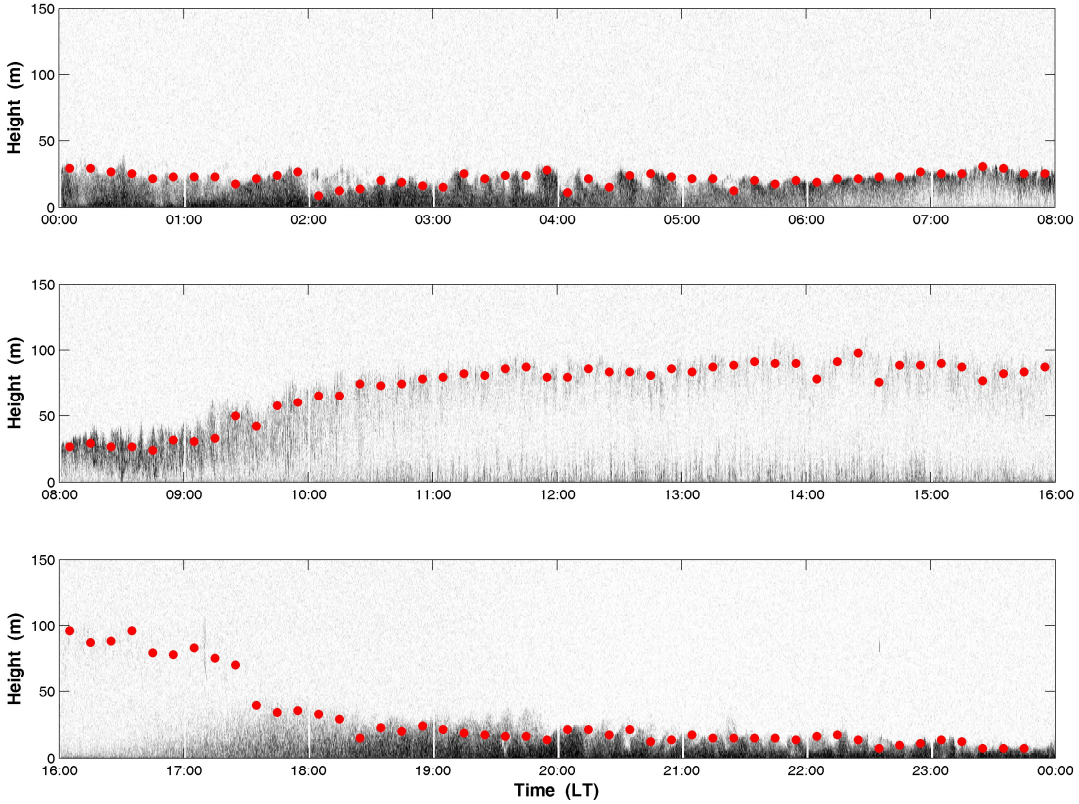
Presenta un'**evoluzione diurna** caratteristica:

⇒ è **minima** nelle prime ore della mattina (dovuta soltanto alla turbolenza meccanica)

⇒ **aumenta** con l'arrivo di energia solare fino al tramonto ed in particolare in modo proporzionale all'integrale nel tempo del Flusso Turbolento di calore sensibile.

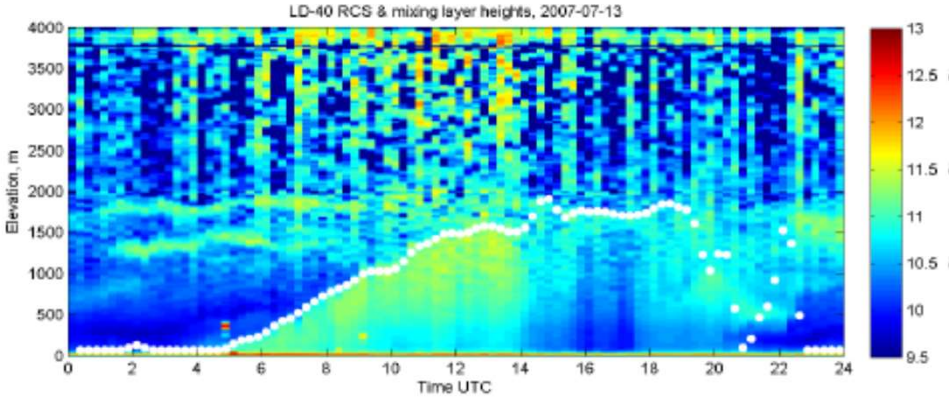
⇒ **decade** molto rapidamente al tramonto con il venir meno dell'apporto energetico solare.

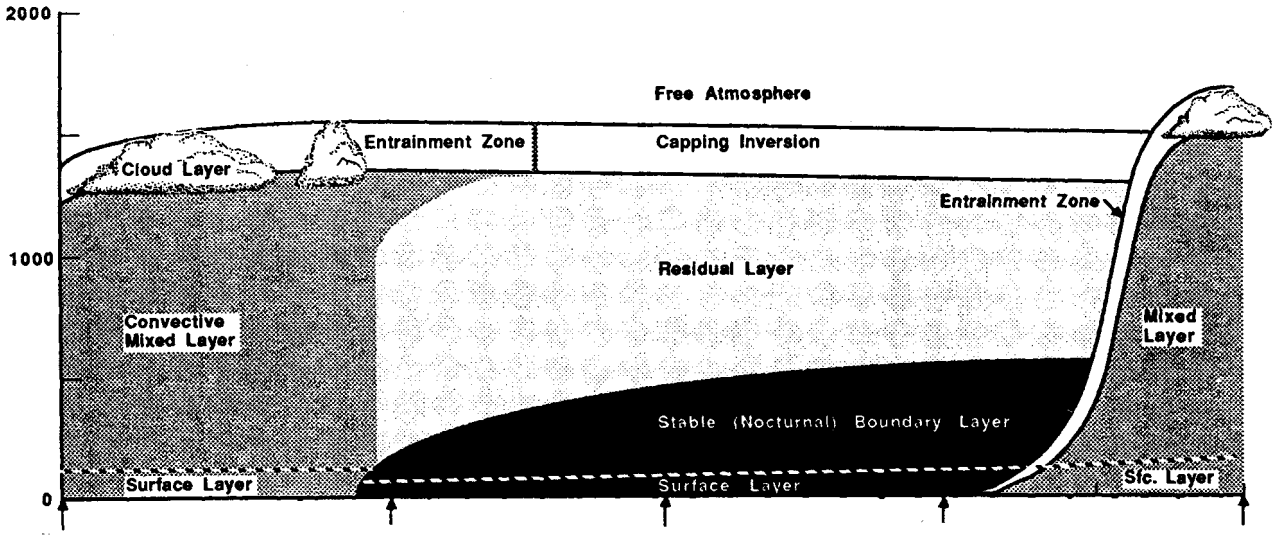
Intensità dell'eco di ritorno SODAR – Antartide, Base di Dome C



ARPALAZIO

Backscattering LIDAR – Medie Latitudini





ARPALAZIO

La Turbolenza del PBL

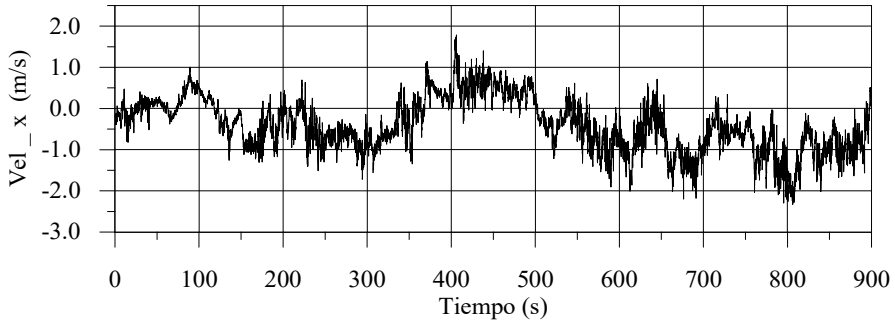
Se si misurano le tre componenti del vento e la temperatura con sensori a risposta rapida si vede che:

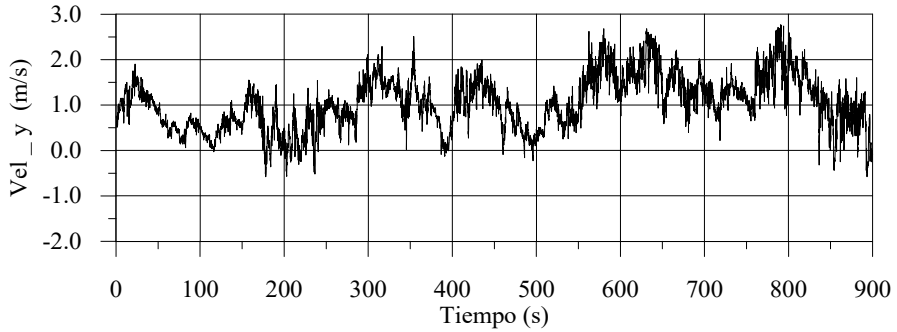
Le variabili presentano un andamento abbastanza regolare cui si sovrappongono irregolarità elevate che paiono "rumore" con caratteristiche di un segnale casuale.

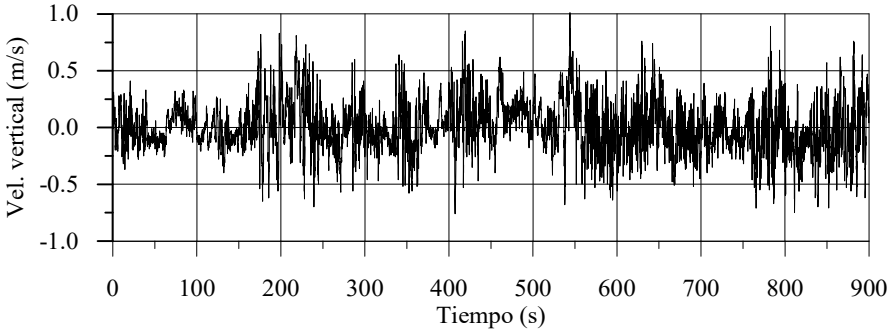
Segnale = andamento medio regolare + fluttuazioni irregolari (*turbolente*)

Caratteristica esteriore rilevante della turbolenza nel PBL ed in tutti i fluidi turbolenti di interesse geofisico.

La quantificazione della Turbolenza deve essere necessariamente dedotta dall'***analisi delle fluttuazioni (irregolarità)*** contenute nel segnale.

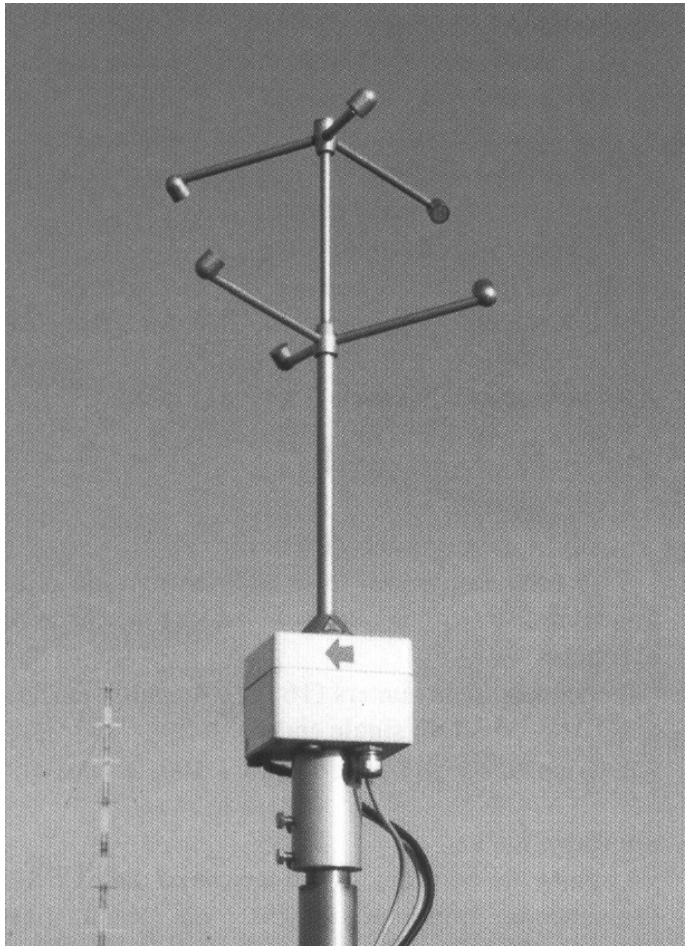

Vel _ x (m/s)
2.0
1.0
0.0
-1.0
-2.0
-3.0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
Tiempo (s)


Vel _ y (m/s)
3.0
2.0
1.0
0.0
-1.0
-2.0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
Tiempo (s)


Vel. vertical (m/s)
1.0
0.5
0.0
-0.5
-1.0
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
Tiempo (s)

ARPALAZIO

Anemometro Sonico Triassiale



E’ anche un termometro ed è l’unico sensore in grado di misurare direttamente i parametri che caratterizzano la turbolenza atmosferica

Ipotesi di Reynolds

Ogni segnale meteorologico è la sovrapposizione di un andamento medio regolare e di fluttuazioni turbolente apparentemente casuali aventi media nulla.

$$A(t) = \overline{A} + A'(t)$$

Un esempio è la componente *u* del vento:

$$u(t) = \overline{u} + u'(t)$$

Indicatori statistici di turbolenza del PBL

⇒ **standard deviation** che, per la componente *u* del vento, è:

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(u_i - \bar{u}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(u'\right)^2}$$

Il quadrato della deviazione standard è la **varianza.**

⇒ dalla varianza delle tre componenti del vento, è calcolabile l'**energia cinetica turbolenta** (energia posseduta dall'aria a causa della turbolenza presente) definita come:

$$TKE = \frac{1}{2}\left\{\sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2\right\}$$

Tra due variabili si può definire la covarianza.

Considerando, per esempio,
la temperatura potenziale θ e la componente *w* del vento:

$$\overline{w'\theta'} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{\left(\theta-\bar{\theta}\right)\cdot\left(w-\bar{w}\right)\right\} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\{\theta' w'\right\}$$

Si può dimostrare che:

la covarianza tra una delle componenti del vento ed una variabile scalare (temperatura e umidità) rappresenta (a meno di una costante)

il flusso turbolento della variabile scalare nella direzione della componente del vento.

Flusso Turbolento di Calore Sensibile

$$H_0 = \rho C_p \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} w'\theta'$$

$\partial\theta/\partial z < 0$	$\Rightarrow$	$H_0 > 0$	$\Rightarrow$ Situazione Convettiva
$\partial\theta/\partial z = 0$	$\Rightarrow$	$H_0 = 0$	$\Rightarrow$ Situazione Adiabatica
$\partial\theta/\partial z > 0$	$\Rightarrow$	$H_0 < 0$	$\Rightarrow$ Situazione Stabile

Flusso Turbolento di Calore Latente

$$H_E = \overline{w'q'}$$

Covarianze tra le componenti u e v del vento e la componente w

(a meno di una costante)

sforzo di taglio orizzontale dovuto all'*attrito* delle masse d'aria sulla superficie terrestre.

In particolare lo **sforzo di taglio** è dato da:

$$\tau = \rho \cdot u_*^2$$

dove $\boldsymbol{u_*}$ (***friction* velocity**) è la velocità di scala definita come:

$$u_*^2 = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} u'_i\, w'_i\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v'_i\, w'_i\right)^2\right]}$$

Parametri che caratterizzano la turbolenza del PBL

⇒**Forzante Convettiva**: ***Flusso Turbolento Calore Sensibile***

$$H_0 = \rho \cdot C_p \cdot \overline{w'\theta'}$$

⇒**Forzante Meccanica**: ***Friction velocity***

$$u_* = \sqrt[4]{\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2}$$

⇒ **Altezza di Rimescolamento z_i**

Parametri Accessori

Temperatura di Scala T_*

$$T_* = -\overline{w'\theta'} / u_*$$

Lunghezza di Monin-Obukhov

$$L = -\frac{\overline{T}}{kg}\frac{u_*^3}{\overline{w'\theta'}}$$

Velocità convettiva di scala

$$w_* = \left(\frac{g}{T}\frac{H_0}{\rho C_p} z_i\right)^{1/3}$$

ARPALAZIO

RIASSUMENDO

Condizioni Convettive:

$u_* > 0$ $H_0>0$ $T_*<0$ $L<0$

Condizioni Adiabatiche:

$u_*>0$ $H_0 =0$ $T_*=0$ $L \rightarrow \pm\infty$

Condizioni Stabili:

$u_*>0$ $H_0<0$ $T_*>0$ $L>0$

Modello Matematico del PBL

Legge di Conservazione della Massa

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{v}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{w}}{\partial z}=0$$

Legge di conservazione della Quantità di Moto

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t}+u\frac{\partial \overline{u}}{\partial x}+v\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}+w\frac{\partial \overline{u}}{\partial z}=f_c v-\left\{\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}\right\}$$

$$\frac{\partial \overline{v}}{\partial t}+u\frac{\partial \overline{v}}{\partial x}+v\frac{\partial \overline{v}}{\partial y}+w\frac{\partial \overline{v}}{\partial z}=-f_c u-\left\{\frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{v'v'}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z}\right\}$$

$$\frac{\partial \overline{w}}{\partial t}+u\frac{\partial \overline{w}}{\partial x}+v\frac{\partial \overline{w}}{\partial y}+w\frac{\partial \overline{w}}{\partial z}=-g-\left\{\frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x}+\frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y}+\frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z}\right\}$$

La presenza dell'ultimo termine implica che la *turbolenza deve sempre essere considerata*, anche quando si sia interessati soltanto alle variabili medie.

Ciò sottolinea il fatto che il valore medio di una componente del vento non dipende solo dal valore medio delle altre, ma anche dalla loro covarianza.

Legge di Conservazione dell'Entalpia

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + u\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} + v\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} + w\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = -\left\{\frac{\partial \overline{\theta' u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\theta' v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{\theta' w'}}{\partial z}\right\} + Source/Sink$$

Legge di Conservazione del vapor d'acqua

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + u\frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + v\frac{\partial \bar{q}}{\partial y} + w\frac{\partial \bar{q}}{\partial z} = -\left\{\frac{\partial \overline{q' u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{q' v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{q' w'}}{\partial z}\right\} + Source/Sink$$

Legge dei Gas Perfetti

$$p = \rho R \bar{T}$$

Trascurando per semplicità l'equazione del vapor d'acqua nel modello le variabili sono:

$$\begin{bmatrix} \bar{p}, & \bar{\rho}, & \bar{\theta} \\ \bar{u}, & \bar{v}, & \bar{w}, \\ \overline{u'u'}, & \overline{v'v'}, & \overline{w'w'}, \\ \overline{u'v'}, & \overline{u'w'}, & \overline{v'w'}, \\ \overline{u'\theta'}, & \overline{v'\theta'}, & \overline{w'\theta'} \end{bmatrix}$$

ARPALAZIO

Le variabili sono 15, le equazioni sono sempre 6

⇓

il sistema di equazioni non è chiuso.

Mancando equazioni, bisogna individuare relazioni semiempiriche che esprimono le variabili in eccesso (varianze e covarianze) in funzione delle variabili medie.

Schemi di Chiusura

Il modo più semplice per *esprimere le variabili in eccesso* (varianze delle componenti del vento e covarianze tra temperatura e singole componenti del vento) è la Chiusura di Tipo K:

$$\overline{w'F'} = -K_F \frac{\partial \bar{F}}{\partial z}$$

K_F Coefficiente di diffusività turbolenta

$$\overline{v'w'} = -K_m \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \qquad \overline{u'w'} = -K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \qquad \overline{w'\theta'} = -K_k \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}$$

Ipotesi di base

⇓

Flusso/covarianza verticale/orizzontale di una variabile proporzionale al gradiente locale verticale/orizzontale della variabile stessa.

Coefficiente di proporzionalità = Diffusività turbolenta

Alcuni esempi:

⇒ **Condizioni Stabili**:

$$K_m(z) = k u_* z \cdot (1 - z/h)^{1.5} / (1 + 4.7 z/L)$$

⇒ **Condizioni Convettive**:

$$K_m(z) = 2.5 w_* z_i (1 - z/z_i)(z/z_i)^{1.5}$$

Molte sono le *relazioni semiempiriche* che esprimono i vari coefficienti *K* (coefficienti di diffusività turbolenta).

Tutte sono dipendenti dai parametri che caratterizzano la turbolenza del PBL, cioè:

⇒ u_*
⇒ H_0
⇒ z_i
⇒ w_*

Un Modello Matematico di PBL può ottenere una soluzione solo per via numerica e può essere impiegato in almeno due maniere distinte:

Maniera ricostruttiva: ricostruzione della distribuzione spaziale e temporale dei campi meteorologici e di turbolenza in un dominio spaziale limitato e in un periodo limitato, ma passato, per cui si dispone di misure realizzate al suolo e/o in quota.

Questo impiego è spesso dettato dall'esigenza di analizzare situazioni passate per comprendere meglio i fenomeni che hanno avuto luogo.

Maniera predittiva: si prevede la distribuzione spaziale dei campi meteorologici e di turbolenza nell'immediato futuro (+24, +48, +72 ore).

Ovviamente si conoscono solo le misure al suolo e/o in quota al tempo t_0, inizio della previsione.

I modelli Globali, operando con continuità, sono sempre in grado di fornire (a bassa risoluzione) la distribuzione spaziale e temporale delle variabili meteorologiche sia per periodi passati che per l'immediato futuro e quindi possono fornire, previa opportuno processing, le necessarie condizioni iniziali ed al contorno.

Classe di stabilità atmosferica.

Tradizionalmente tutta la variabilità della struttura del *PBL* era condensata in 6 classi differenti:

Categoria A(1): **situazioni *diurna* molto convettive con vento basso e forte insolazione**

Categoria B(2): **situazione *diurna* mediamente convettiva con vento moderato e media insolazione**

Categoria C(3): **situazione *diurna* con vento forte e insolazione bassa**

Categoria D(4): **situazione *diurna* e *notturna* con vento molto forte, insolazione praticamente nulla e copertura del cielo**

Categoria E(5): **situazione *notturna* con vento elevato e media copertura del cielo**

Categoria F(6): **situazione *notturna* con vento molto debole e assenza di nubi.**

Determinazione pratica delle categorie di stabilità.

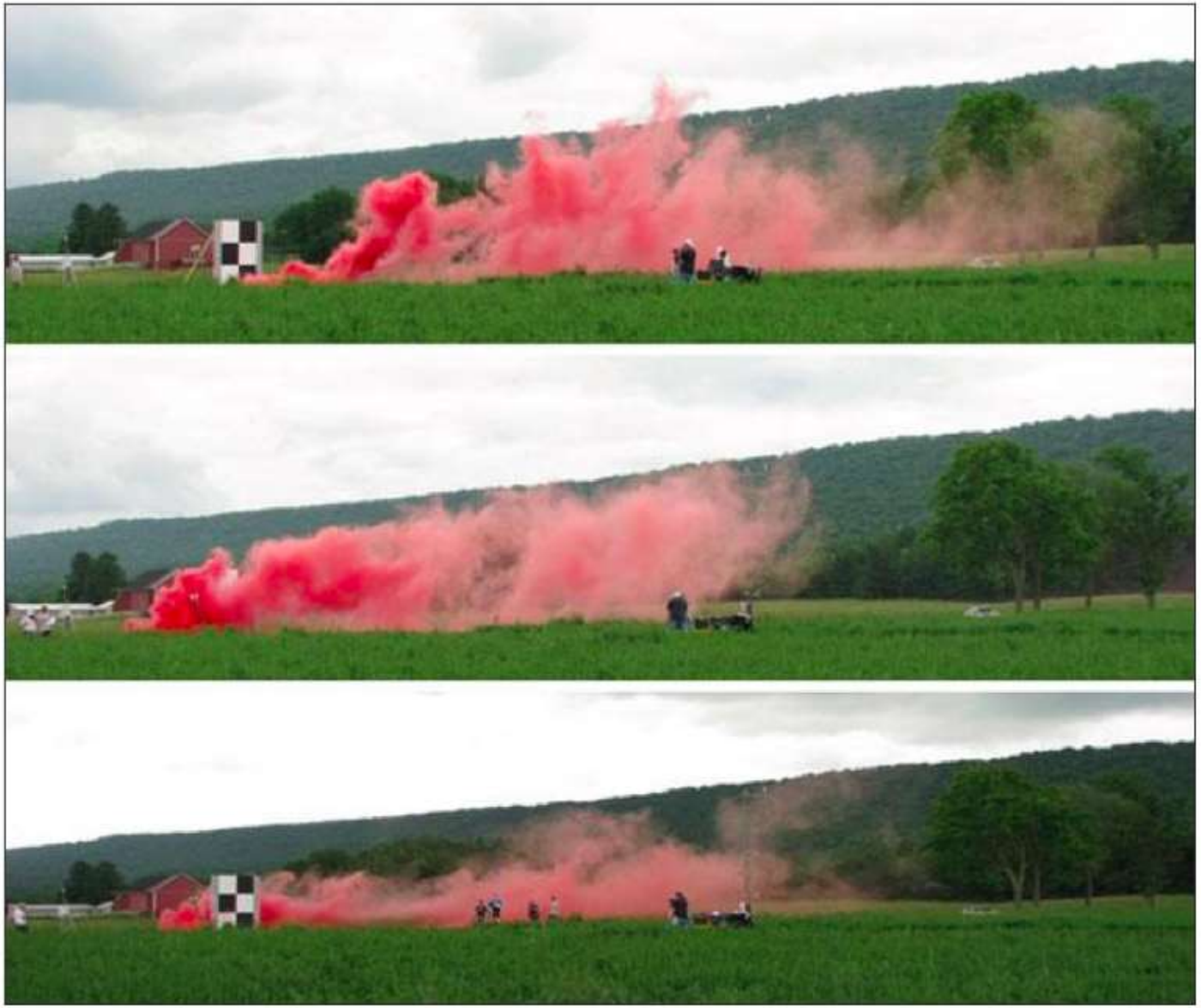
Vento (m/s)	Radiazione Solare Globale (W/m^2)					
	>700	700÷540	540÷400	400÷270	270÷140	<140
<2	A	A	B	B	C	D
2 ÷ 3	A	B	B	B	C	D
3 ÷ 4	B	B	B	C	C	D
4 ÷ 5	B	B	C	C	D	D
5 ÷ 6	C	C	C	C	D	D
>6	C	C	D	D	D	D

schema per la determinazione della Categoria di Stabilità Atmosferica nelle ore diurne.

Vento (m/s)	Radiazione Netta (W/m^2)		
	> -20	-20 ÷ -40	< -40
< 2	D	F	F
2 ÷ 3	D	E	F
3 ÷ 5	D	D	E
5 ÷ 6	D	D	D
> 6	D	D	D

schema per la determinazione della Categoria di Stabilità Atmosferica nelle ore notturne.

Modelli di dispersione di Tipo Stazionario



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 privo di orografia significativa,

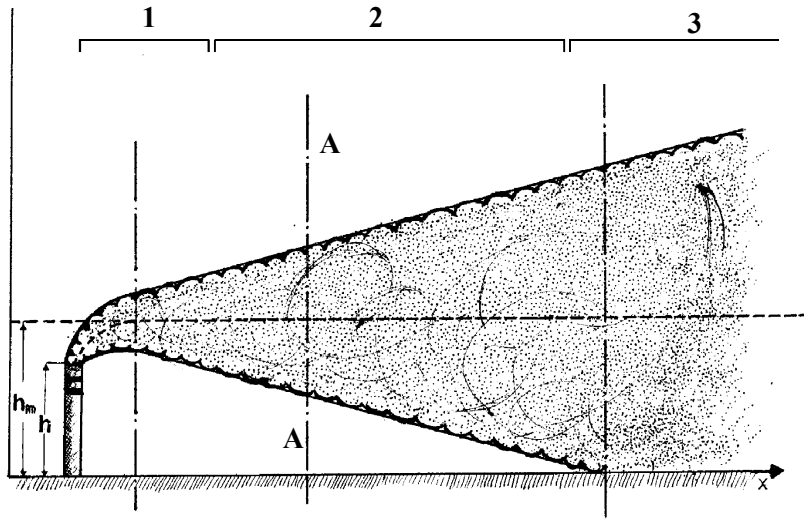
⇒ le sorgenti sono ciminiere abbastanza elevate che emettono in modo pressoché **continuo** inquinanti poco reattivi,

⇒ i parametri meteorologici e micrometeorologici presentano una variazione temporale abbastanza lenta,

⇒ il *PBL* è in condizioni quasi adiabatiche

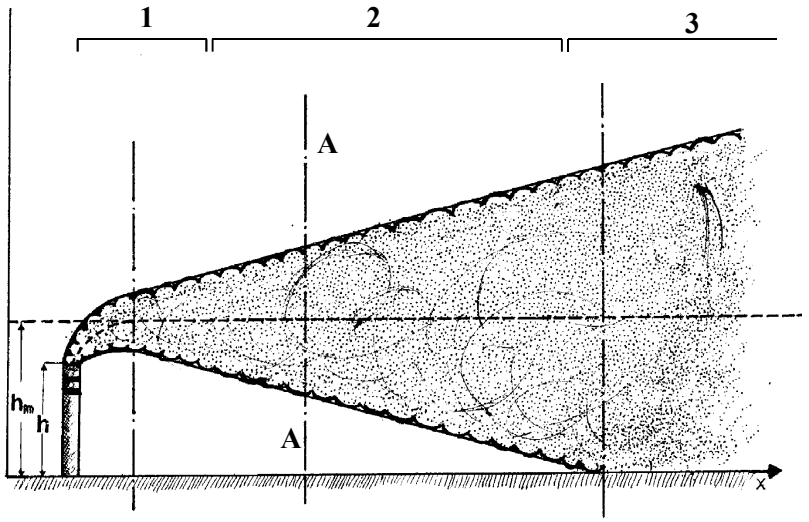
Fotografia, integrata in un'ora, di un *plume* di una ciminiera elevata con tasso di emissione Q (g/s).

Tre Zone Distinte



Zona 1 (zona ascensionale).

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



Zona 2 (dispersione senza interazione col suolo).

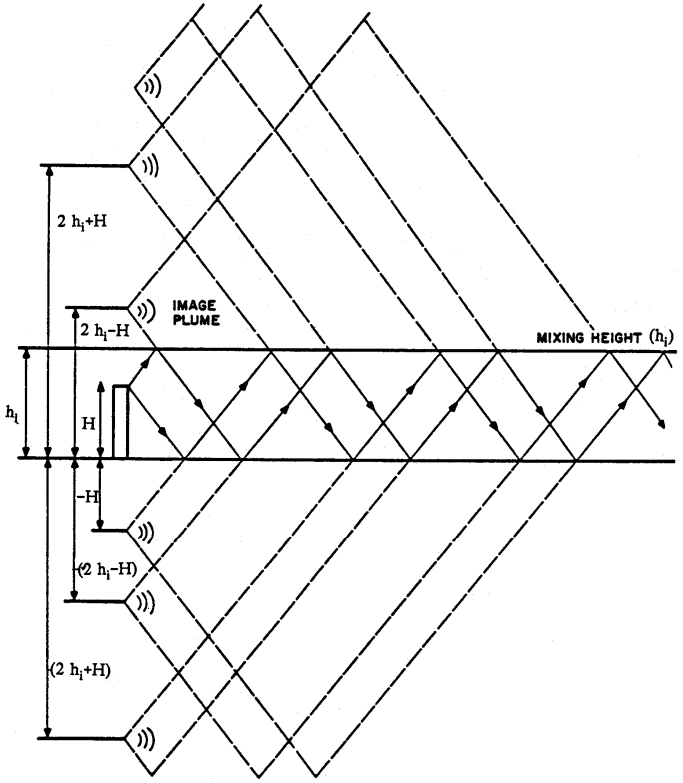
Dopo il livellamento,il *plume* si **dilata** (più o meno a seconda della turbolenza senza raggiungere il suolo).

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.

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**

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

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

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**.

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.***

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

⇒ **trasportati dal vento nella direzione sottovento**

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

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

σ_y e σ_z ⇒ 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 sia nella fase di emissione che nella fase di dispersione in atmosfera

Modelli Euleriani

Il Modello Euleriano

Il modello Euleriano è un **modello differenziale** basato sulle **equazioni della fluidodinamica** che descrivono il *PBL,* in cui si tiene conto:

- del bilancio di massa dell'aria nel suo complesso,
- del bilancio della quantità di moto
- del bilancio dell'entalpia
- del bilancio dell'umidità
- della legge dei gas
- del bilancio di ciascuna specie inquinante presente in aria.

Nelle equazioni di bilancio delle specie inquinanti presenti si vengono a trovare *due termini importanti*:

- un **termine di sorgente** che rappresenta l'introduzione di inquinante nel dominio di calcolo,

- un **termine** che rappresenta i **processi di deposizione** le **reazioni chimiche** che hanno luogo nel *PBL*.

In linea di principio, il modello euleriano non distingue tra meteorologia e dispersione degli inquinanti

Esempio Monodimensionale per una specie chimica

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + f\bar{v} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} - f\bar{u} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{1}{\rho C_p}\frac{\partial \overline{R_n}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{\theta'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} = -\frac{\partial \overline{q'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -\bar{u}\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{w'C'}}{\partial z} + S$$

Modello Euleriano di tipo K

Tra le possibili relazioni di chiusura, sicuramente la più utilizzata è la chiusura di tipo K:

in un punto dello spazio, il flusso della specie in una direzione coordinata risulta proporzionale (attraverso il coefficiente di diffusività turbolenta relativo a quella direzione) al gradiente della concentrazione media della sostanza in quella direzione.

Per esempio, nel caso monodimensionale, tra il flusso turbolento verticale di sostanza ed il gradiente della concentrazione media della stessa vale la relazione

$$\overline{w'C'} = -K_{zz}\frac{\partial \overline{C}}{\partial z}$$

K_{zz} = coefficiente di diffusività turbolenta in direzione z

Utilizzando questa chiusura, il **sistema complessivo di equazioni** si separa in **due modelli indipendenti**:

- **un modello prognostico di PBL per la ricostruzione dei campi meteorologici medi e dei principali indicatori della turbolenza**
- **un modello di dispersione (Modello Euleriano K) costituito dalle sole equazioni di bilancio di massa delle differenti specie inquinanti che, come unica informazione meteorologica, richiede il campo medio del vento ai vari istanti di interesse.**

Equazione di un generico inquinante *k* che costituisce il modello di dispersione (si trascura il trasporto lungo la verticale):

Reazioni chimiche dipendenti dalla concentrazione media delle specie chimiche presenti

$$\frac{\partial \overline{C_k}}{\partial t} + \left(\overline{u}\frac{\partial \overline{C_k}}{\partial x} + \overline{v}\frac{\partial \overline{C_k}}{\partial y} + \overline{w}\frac{\partial \overline{C_k}}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial \overline{C_k}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial \overline{C_k}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial \overline{C_k}}{\partial z} \right) + S + R(\overline{C_1}, \overline{C_2}, .., \overline{C_N})$$

S = termine di sorgente

Se, però, si è interessati alla Chimica dell'Atmosfera e quindi, oltre al trasporto ed alla diffusione turbolenta delle specie inquinanti, si vogliono trattare anche le reazioni chimiche che hanno luogo tra tali sostanze

Il problema si complica.

⇒ **Si devono individuare le specie chimiche che si vogliono considerare. Sia N il numero di tali sostanze**

<u>Per esempio</u>: si vogliono considerare gli Ossidi di Azoto ed una loro chimica semplificata.

<u>Specie coinvolte</u>:

NO, NO_2

O_3 e O_2

⇒ **Si dovranno considerare N equazioni di conservazione, una per ognuna delle specie chimiche considerate, visto che siamo interessati alla loro evoluzione nello spazio e nel tempo.**

⇒ **Per ognuna di queste equazioni dovranno essere note le condizioni iniziali ed al contorno.**

⇒ **Ognuna di esse dovrà essere opportunamente approssimata alle differenze finite e trasformata in un problema algebrico risolubile da parte di un computer.**

Nell'esempio:

Le sostanze considerate sono 4, tuttavia l'Ossigeno presente in aria non varierà apprezzabilmente nell'atmosfera vista la sua abbondanza e quindi possiamo ritenerlo costante.

Quindi le sostanze cui siamo interessati sono 3: NO, NO_2 e O_3.

⇒ **Si considerano le reazioni chimiche che coinvolgono le sostanze considerate. Sia M il numero di tali reazioni.**

Nell'esempio:

$NO+O_3 \rightarrow NO_2+O_2$	Costante di reazione k_1
$O+O_2 \rightarrow O_3$	Costante di reazione k_2
$NO_2+h\nu \rightarrow NO+O$	Costante di reazione J
$NO_2+O \rightarrow NO+O_2$	Costante di reazione k_3

⇒ **Per ogni sostanza chimica si scrive la corrispondente equazione differenziale ordinaria che ne esprime quantitativamente la cinetica.**

Nell'esempio: le sostanze di cui si è interessati sono 3 e le rispettive equazioni che ne esprimono il tasso di variazione nel tempo dovuto alle reazioni chimiche sono:

$$\frac{d[NO]}{dt} = J[NO_2] + k_3[NO_2]\cdot[O] - k_1[NO]\cdot[O_3]$$
$$\frac{d[NO_2]}{dt} = k_1[NO]\cdot[O_3] - J[NO_2] - k_3\cdot[NO_2]\cdot[O]$$
$$\frac{d[O_3]}{dt} = k_2[O_2]\cdot[O] - k_1[NO]\cdot[O_3]$$

Modello Lagrangiano a Particelle

Considerazione Preliminare

Aria del PBL

Visione macroscopica → **fluido continuo** il cui **stato** presenta spiccate caratteristiche pseudo-casuali (**turbolenza**) evidenti nelle irregolarità delle misure delle principali variabili che lo descrivono. Tali irregolarità sono ben *descritte* adottando un **punto di vista statistico**.

Visione microscopica → **insieme di molecole** di varie specie chimiche in **continuo movimento caotico** (*pseudo-casuale*) nello *spazio* e nel t*empo*.
Il loro movimento non può essere seguito nel dettaglio, molecola per molecola, ma il **risultato collettivo** *del loro evolvere nello spazio e nel tempo* può essere **catturato** in un punto **P**(*x,y,z*) e ad un istante *t* da una *misura* (euleriana) fatta in quel punto.

Elementi di base di un Modello Lagrangiano a Particelle (LPM)

Particelle $\Rightarrow$ l'emissione di molecole in **P**(x_0,y_0,z_0;t_0) è **simulata** con l'introduzione in **P** di un **numero rilevante** di **entità astratte** (**particelle**), cioè di ***porzioni piccole ed elementare di sostanza inquinante.*** Si ha che:

- ogni particella ha un **volume irrilevante**
- ad ogni particella emessa viene attribuita una **massa** **Q** di sostanza inquinante
- **conserva la propria massa** (nessuna reazione chimica o di impoverimento per deposizione)
- ha in **P**(x_0,y_0,z_0;t_0) una **propria velocità iniziale**
- continua il proprio moto negli istanti successivi a t_0 descrivendo una **traiettoria nello spazio e nel tempo**
- le particelle **non interagiscono tra loro**
- le particelle interagiscono *in qualche modo* **con l'ambiente circostante** variando la propria traiettoria istante dopo istante

Aria del PBL $\Rightarrow$ viene **ancora** descritta come un **fluido continuo in moto turbolento**.

La sue **caratteristiche** sono quelle descritte dalla Micrometeorologia e tale **descrizione** è di **tipo** strettamente **euleriano**, cioè in ogni punto **P**(*x,y,z;t*) il fluido possiede:

- un **vettore velocità media** e un **valore medio** per le altre grandezze macroscopiche che ne definiscono lo **stato medio**
- i **momenti di vario ordine** relativi alle variabili di interesse (varianze delle componenti della velocità, covarianze tra componenti della velocità e tra queste e la temperatura)
- in qualche modo **influenza** la traiettoria di ogni singola particella

Obiettivo del modello

Descrizione ad ogni istante $t>t_0$ della traiettoria di ogni singola particella

Le caratteristiche macroscopiche del fluido in cui sono immesse le particelle sono quelle di un fenomeno stocastico

Ipotesi Principe di un LPM

Il movimento di ogni singola particella è la realizzazione di un processo stocastico continuo

Processo stocastico

⇒ Un **processo fisico** (es. il movimento di un punto) che ***evolve nello spazio e nel tempo*** a partire da un ***punto iniziale*** **P**(x_0,y_0,z_0;t_0) in modo casuale, con ben precise caratteristiche statistiche.

⇒ Se lo **stesso processo** (es. il movimento della stessa particella) ***potesse ripetersi un'infinità di altre volte nelle stesse condizioni*** (e per la Statistica ciò è possibile), la sua evoluzione avrebbe **infinite realizzazioni** a priori **diverse**.

⇒ Ogni singola **particella** evolve nello spazio-tempo seguendo le leggi di un **processo stocastico.**

⇒ La **non interazione** ipotizzata per le particelle comporta che i vari **processi stocastici** siano tra loro **indipendenti** .

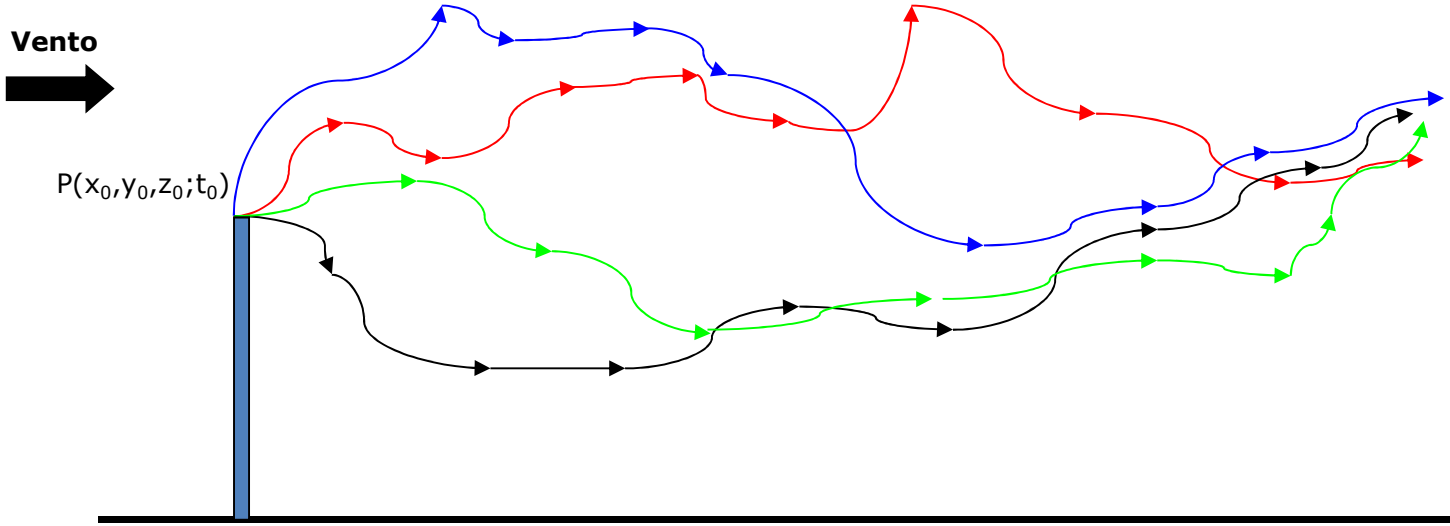
Logica del LPM

⇒ Le particelle vengono emesse insieme da $P(x_0,y_0,z_0;t_0)$

⇒ Ogni particella segue nel tempo una **realizzazione** di traiettoria

⇒ La traiettoria di ogni particella è a priori diversa

⇒ LPM segue ogni singola traiettoria



LPM segue la traiettoria di ogni singola particella

⇒ Ad un istante **t** considera un punto **P**(*x,y,z;t*)

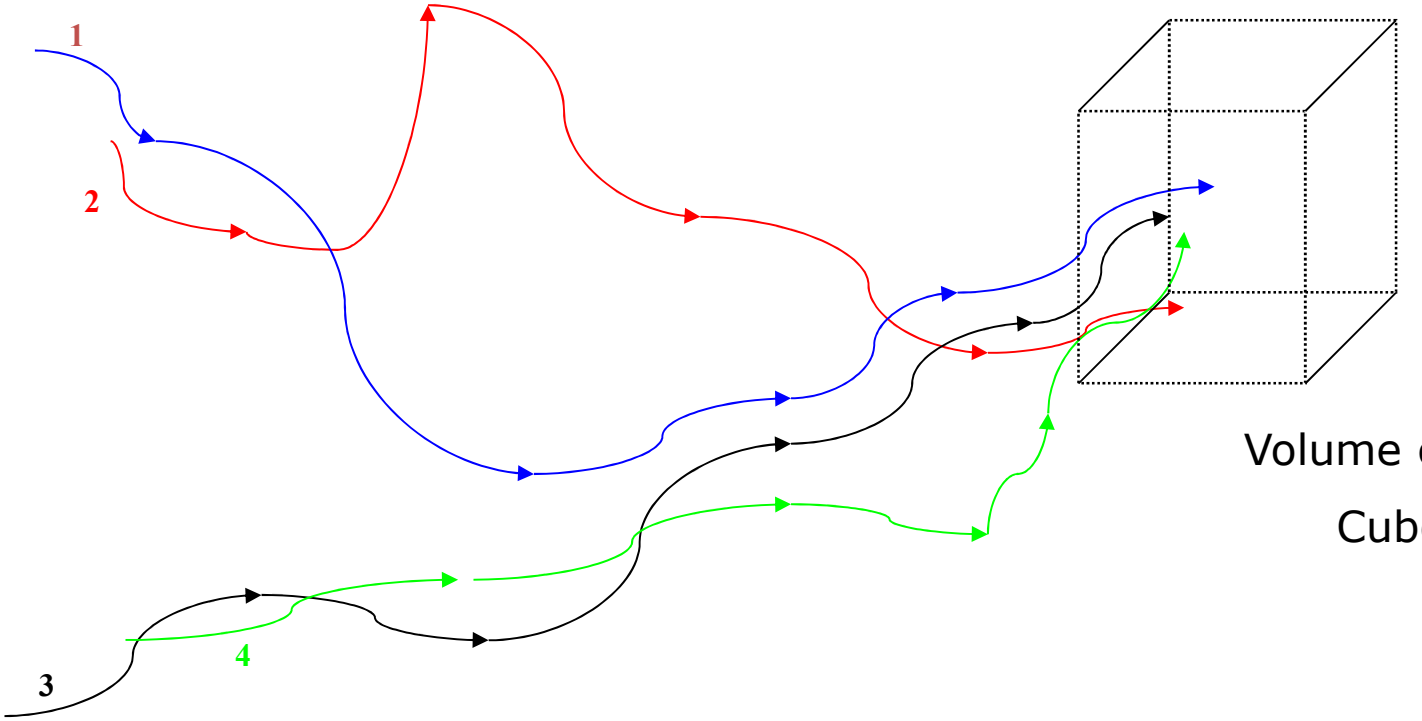
⇒ Individua, centrato su P, un piccolo volume di spazio (es. un cubo) → **volume di campionamento V**

⇒ Individua **quali particelle** si trovano all'istante *t* **entro** il volume di campionamento

⇒ Siano **N** le **particelle presenti**, ognuna contenente una **quantità Q_i** di **sostanza inquinante**

⇒ Si definisce **concentrazione** nel punto **P** all'istante **t**

$$C(x,,y,z;t) = \frac{\sum_{i=1}^{N} Q_i}{V}$$



Volume campionamento

Cubo lato 10 m

Particella 1 → Q_1 = 5 mg/m^3

Particella 1 → Q_2 = 10 mg/m^3

Particella 1 → Q_3 = 7 mg/m^3

Particella 1 → Q_4 = 20 mg/m^3

$$C(x,y,z;t) = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}{V} = \frac{5+10+7+20}{10 \cdot 10 \cdot 10} \cdot \frac{mg}{m^3} = 42 \mu g / m_3$$

LPM considera come processo stocastico

⇒ **non** la posizione nel tempo di una singola particella

⇒ **m**a **la sua velocità nel tempo.**

Traiettoria nello **Spazio delle Fasi** **$(x,y,z,u_p,v_p,w_p;t)$**

Ogni singola componente della velocità è un processo stocastico

NB. **Per semplicità**, si ipotizzi che **non ci siano interdipendenze** tra le varie componenti della velocità della particella che considereremo **processi stocastici distinti e indipendenti.**

Modellizzazione di una generica componente (es. u_p) della velocità di una particella

Processo stocastico u_p

$$u_p(x,y,z;t) = \overline{u_p}(x,y,z;t) + u_p'(x,y,z;t)$$

Ipotesi A

La particella si trova *immersa* nell'aria e, in media, viene **trascinata** dal **moto medio** dell'atmosfera

Componente Deterministica

$$\overline{u_p} = \bar{u}$$

$\bar{u}$ = velocità media eureliana dell'aria

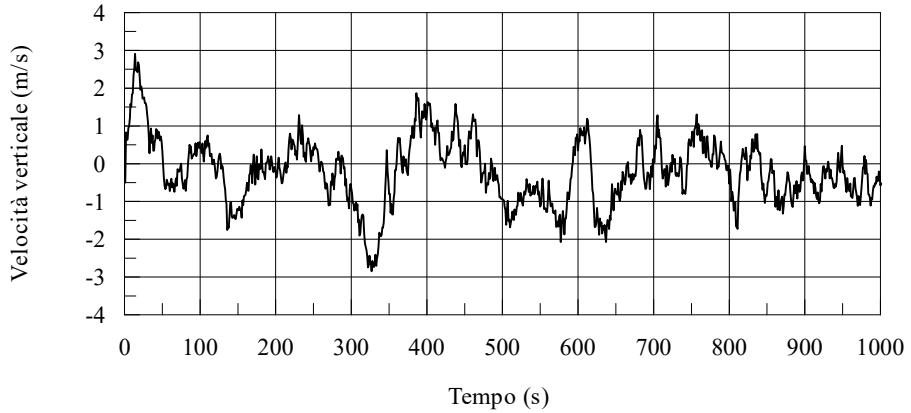
Ipotesi B

La fluttuazione è **propria** della particella e dipende:

- dalla sua storia passata
- dal livello di turbolenza propria dell'aria circostante

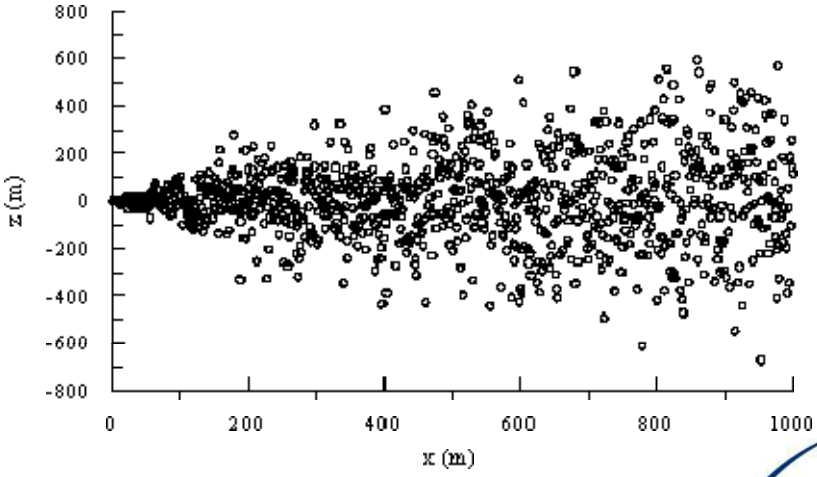
Componente Stocastica

Risultatati della Simulazione Monte Carlo



Andamento nel tempo della velocità verticale della particella

Distribuzione delle particelle nello spazio bidimensionale (x,z)



Commento

Il modello descrive effettivamente un processo di diffusione. Se si riuscisse a porre in relazione a_w e b_w alla turbolenza del PBL, sarebbe possibile ottenere un modello di dispersione utilizzabile

Le Aree
Costiere e Portuali

ARPALAZIO

25/08/2011 18:26

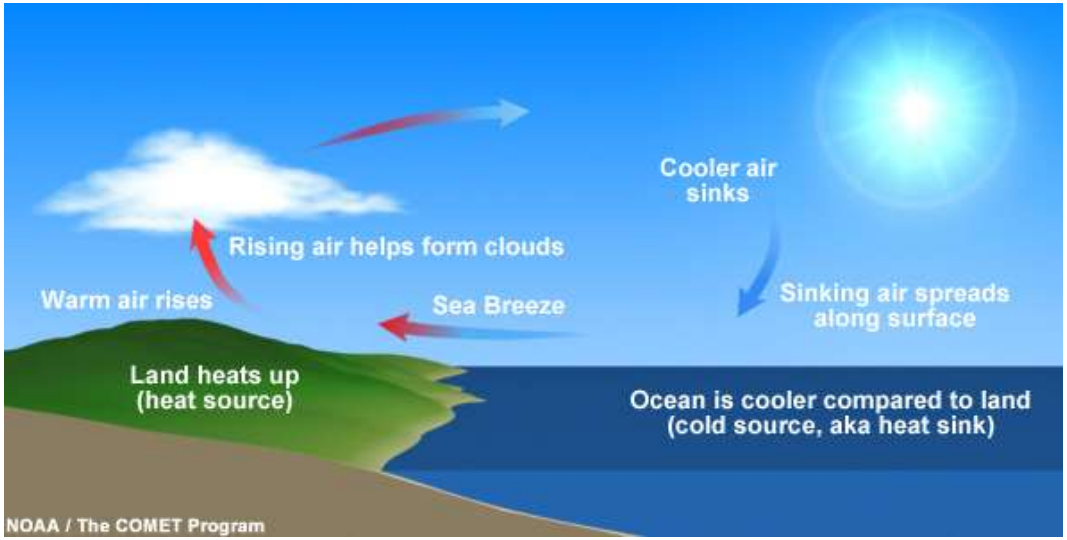
Peculiarità delle Aree Costiere

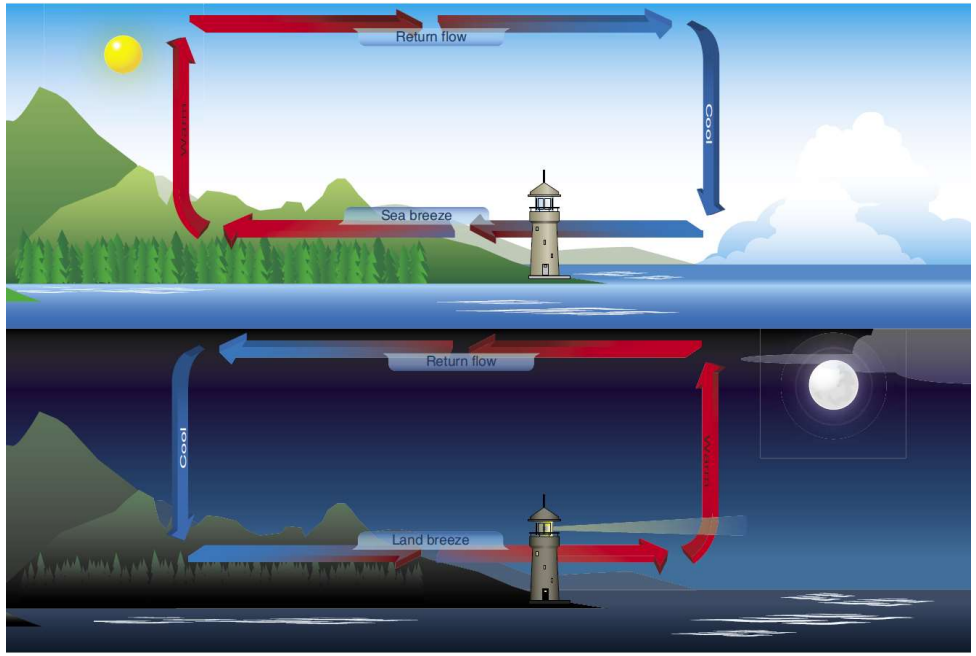
Le aree Costiere sono caratterizzate dal fatto che esse costituiscono l'interfaccia tra la terra ed il mare, due sistemi fisici che presentano caratteristiche termiche e meccaniche differenti.

In corrispondenza di questa interfaccia il PBL in qualche modo si deforma per consentire alle masse d'aria provenienti da un sistema fisico di adattarsi alle caratteristiche dell'altro sistema fisico.

Ciò determina due fenomeni distinti ed interagenti:

- **Il regime di brezze**
- **Lo sviluppo del Thermal Internal Boundary Layer (TIBL)**



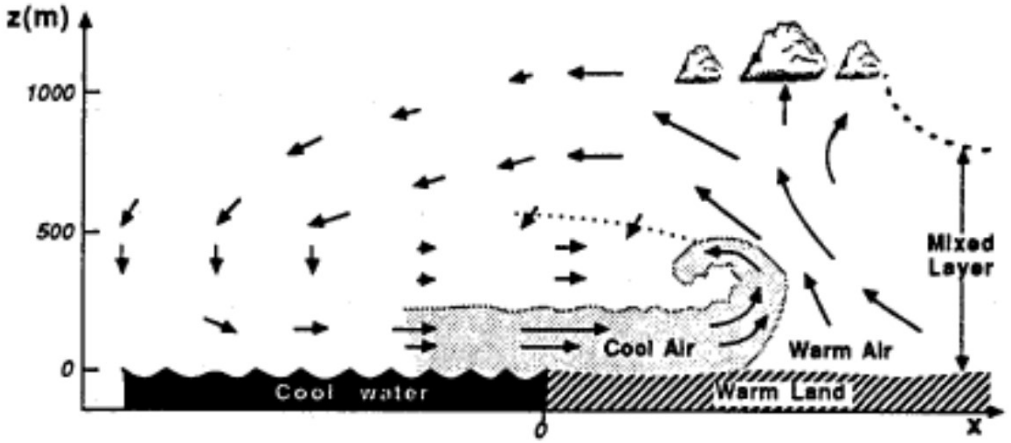


Brezza di Mare

Brezza di Terra

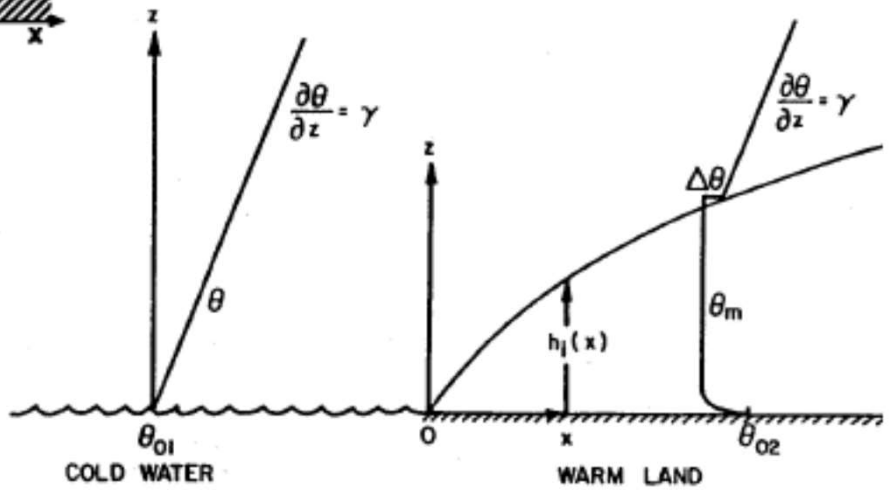
ARPALAZIO

Sviluppo del TIBL nelle zone costiere durante le ore diurne : superficie marina più fredda in corrispondenza di terraferma più calda



formazione del TIBL (Thermal Internal Boundary Layer)

- **sopra la superficie marina il profilo di temperatura è relativo ad una situazione stabile;**
- **sulla terraferma il profilo indica una situazione convettiva**



25/08/2011 18:26

Grazie per l’attenzione.

ARPALAZIO