



## I MODELLI METEOROLOGICI DI SUPPORTO ALLA MODELLISTICA DISPERSIVA

# ***MODELLI METEOROLOGICI DIAGNOSTICI***

**Roberta De Maria<sup>1</sup>, Silvia Trini Castelli<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale, Piemonte

<sup>2</sup>Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, Consiglio Nazionale delle Ricerche

# *I DATI METEOROLOGICI NELLA MODELLISTICA DI DISPERSIONE*

- Il primo passo per la stima modellistica delle concentrazioni degli inquinanti in aria è la descrizione delle condizioni meteorologiche nel dominio di calcolo
- La scelta del modello dispersivo dipende dalla scala spaziale del problema, dalla morfologia del sito, dalle caratteristiche delle sorgenti inquinanti → da tale scelta consegue il livello di dettaglio richiesto nella descrizione meteorologica dell'area di studio

# I MODELLI METEOROLOGICI

- Permettono di ricostruire l'evoluzione spazio-temporale delle variabili che descrivono il fluido atmosferico
- Utilizzi: valutare l'evoluzione delle condizioni meteorologiche (*weather forecast*), come pre-processor per i modelli di dispersione

## SCALE DI APPLICAZIONE

- **Modelli a scala globale** → ricostruzione della circolazione sull'intero pianeta, bassa risoluzione
- **Modelli ad area limitata (LAM)** → domini sull'ordine dei migliaia di km, BC da modelli a scala globale
- **Modelli a scala regionale e locale** → scale spaziali di decine/centinaia di km, ricostruiscono le influenze locali del flusso atmosferico (effetti orografici, presenza interfacce eterogenee)

# I MODELLI METEOROLOGICI

## PROGNOSTICI

- Evoluzione nel tempo e nello spazio dei fenomeni atmosferici descritta attraverso l'integrazione di un sistema di equazioni differenziali dipendenti dal tempo, basate sui principi della fluidodinamica e della termodinamica;
- Sistema risolto numericamente su un grigliato tridimensionale;
- Richiede condizioni iniziali e al contorno che definiscono lo stato dell'atmosfera, rispettivamente, all'istante  $t_0$  e durante tutta la simulazione.

## DIAGNOSTICI

- A partire da un numero sufficiente di misure al suolo e in quota, tenendo conto delle caratteristiche orografiche del sito, ricostruiscono i campi meteorologici tridimensionali su un grigliato predefinito;
- Derivano il loro nome dal fatto di essere in grado di generare un campo di vento stazionario attraverso l'imposizione di alcuni vincoli fisici;
- Nel calcolo vengono usate equazioni indipendenti dal tempo, risolte numericamente su un grigliato tridimensionale.

# I MODELLI A CONSERVAZIONE DI MASSA

Se il vincolo fisico imposto è quello della conservazione della massa (viene solamente risolta l'equazione di continuità), il modello è detto **mass-consistent**.

Permettono la ricostruzione del campo di vento 3D su orografia complessa basandosi su:

1. Interpolazione/estrapolazione di misure sperimentali
2. Aggiustamento del campo interpolato per consentire il rispetto del principio di conservazione della massa → ipotesi di fluido incomprimibile

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

**Legge di conservazione della massa**

# I MODELLI A CONSERVAZIONE DI MASSA

Necessitano di:

- un elevato numero di misure al suolo (solitamente su base oraria)
- profilo verticale delle principali variabili medie (vento e temperatura) in alcuni punti del dominio

Usati per la ricostruzione di:

- campo tridimensionale di vento
- campo tridimensionale di variabili scalari quali temperatura e umidità

Sono:

- più semplici e richiedono tempi di calcolo inferiori rispetto ai modelli prognostici
- utilizzati prevalentemente per la predisposizione dell'input dei modelli di dispersione

Fra i modelli *mass-consistent* più utilizzati vi sono **CALMET** (Scire et al., 2000) e **MINERVE/SWIFT** (Aria Technologies)

# 1. RICOSTRUZIONE DEL CAMPO DI VENTO

## ANALISI OGGETTIVA

A partire dalle misure di vento  $(u', v', w')$  all'istante  $t$  viene ricostruito il **campo di vento iniziale** attraverso tecniche interpolative, in modo tale che in ogni punto griglia del dominio sia noto il valore interpolato del campo  $(u_0, v_0, w_0)$ .

Il campo così ottenuto **non rispetta la condizione di non divergenza**.

Le tecniche di interpolazione possono operare su base bidimensionale o tridimensionale, pesare le misure sull'inverso del quadrato della distanza o attraverso misure più complesse.

La scelta della tecnica interpolativa dipende dal numero e disposizione dei punti di misura all'interno del dominio.

E' la fase più critica ai fini della capacità del campo di vento costruito di riprodurre le caratteristiche del flusso atmosferico.



# INTERPOLAZIONE ORIZZONTALE

## CRESSMAN 2D: INTERPOLAZIONE PESATA SULLA DISTANZA

Le componenti del vento interpolate nel punto griglia (x,y) del dominio sono date da:

$$U_i(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^{NMSUR} U_i(x_k, y_k) P_k(x, y)}{\sum_{k=1}^{NMSUR} P_k(x, y)} \quad i = 1, 2$$

$NMSUR$       numero di stazioni  
 $P_k(x, y)$       peso associato alla postazione di misura

$$P_k(x, y) = \frac{1}{r_k^2} \quad r_k = \frac{R_k}{P_h} \quad R_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$$

dove:

$R_k$  distanza del punto griglia (x,y) dalla stazione situata in  $(x_k, y_k)$

$P_h$  "raggio di influenza orizzontale" della stazione → definito in base al territorio e al numero e distribuzione dei dati disponibili



# INTERPOLAZIONE ORIZZONTALE

## MACLAIN: TRIANGOLAZIONE

Metodo che richiede una rete con almeno tre stazioni al suolo non allineate

Il dominio viene interamente ricoperto con triangoli (non sovrapposti, il più possibile equilateri, che coprono l'intero dominio di calcolo) i cui vertici corrispondono alla localizzazione delle stazioni di misura.

Tutti i punti griglia sono contenuti in uno dei triangoli (per costruzione), il valore interpolato sul punto griglia si ottiene con:

$$U_i(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^{k=3} \Phi_k(x_k, y_k) d_k}{\sum_{k=1}^{k=3} d_k} \quad i=1,2$$

$d_k$ : distanza del punto griglia dal lato  $k$ -esimo del triangolo che contiene il punto stesso

$\Phi_k$ : generalmente valore misurato nella  $k$ -esima stazione (o funzione parabolica sui valori dei vertici del triangolo)



# INTERPOLAZIONE 3D

## GRESSMAN 3D: INTERPOLAZIONE PESATA SULLA DISTANZA

$$U_i(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^{NMSUR} U_i(x_k, y_k) P_k(x, y)}{\sum_{k=1}^{NMSUR} P_k(x, y)} \quad i = 1, 2$$

$NMSUR$   
 $P_k(x, y)$

numero di stazioni  
peso associato alla postazione di  
misura

$$P_k(x, y) = \frac{1}{r_k^2} \quad r_k = \frac{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}{P_h^2} + \frac{(z - z_k)^2}{P_v^2}$$

dove

$P_h$  “raggio di influenza orizzontale”

$P_v$  “raggio di influenza verticale”



## 2. AGGIUSTAMENTO DEL CAMPO DI VENTO

### AGGIUSTAMENTO

A partire dal campo di vento iniziale  $(u_0, v_0, w_0)$ , si cerca un nuovo campo di vento  $(u, v, w)$  che:

- minimizzi la distanza dai valori interpolati
- rispetti la legge di conservazione della massa  $\Rightarrow$  **campo di vento non divergente**.

# AGGIUSTAMENTO

Soppressione della divergenza presente nel campo interpolato attraverso la minimizzazione del seguente funzionale:

$$J(u,v,w,\lambda) = \int_{\Omega} \left[ \alpha_1^2 (u - u_o)^2 + \alpha_1^2 (v - v_o)^2 + \alpha_2^2 (w - w_o)^2 + \lambda \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] d\Omega$$

Le equazioni di Eulero-Lagrange ottenute ponendo  $\delta J=0$  esprimono il campo di vento aggiustato come:

$$u = u_o + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad v = v_o + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \quad w = w_o + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z}$$

Utilizzando l'equazione di continuità, si ottiene l'equazione per  $\lambda$ :

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2} \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2\alpha_1^2 \left( \frac{\partial u_o}{\partial x} + \frac{\partial v_o}{\partial y} + \frac{\partial w_o}{\partial z} \right) \quad \text{che deve essere risolta numericamente}$$

### 3. RICOSTRUZIONE CAMPI DI TEMPERATURA E UMIDITA'

I campi di temperatura ed umidità vengono ricostruiti a partire dalle misure di temperatura ed umidità all'istante  $t$  attraverso tecniche interpolative, in modo tale che in ogni punto griglia del dominio sia noto il valore interpolato del campo per la variabile corrispondente.

Le tecniche interpolative sono analoghe a quelle adottate nel caso dei dati anemologici.



# IL DOMINIO DI CALCOLO

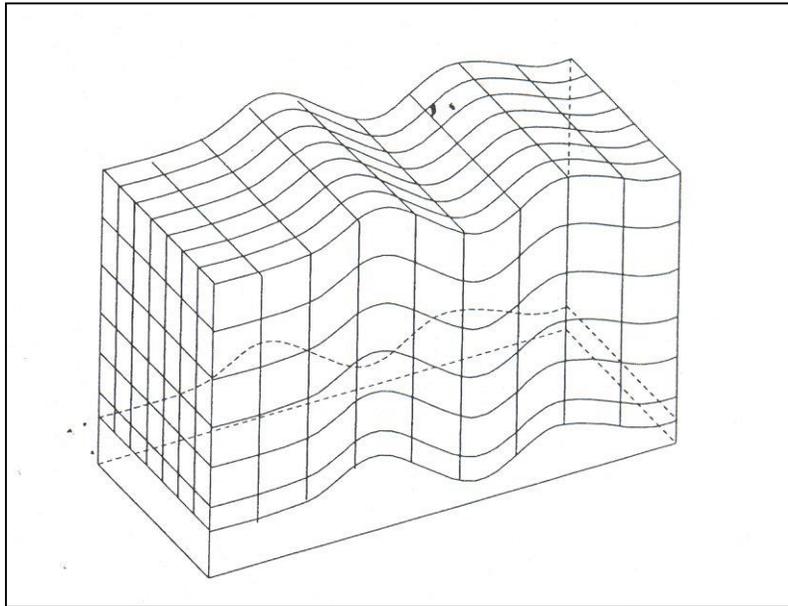
E' costituito da un parallelepipedo avente dimensioni orizzontali da ricoprire l'area di studio e verticali che si estendono dal suolo ad un'altezza  $H$ , solitamente superiore alla massima estensione verticale del PBL

Generalmente vengono utilizzate le **coordinate terrain-following**, con risoluzione maggiore al suolo e minore in quota



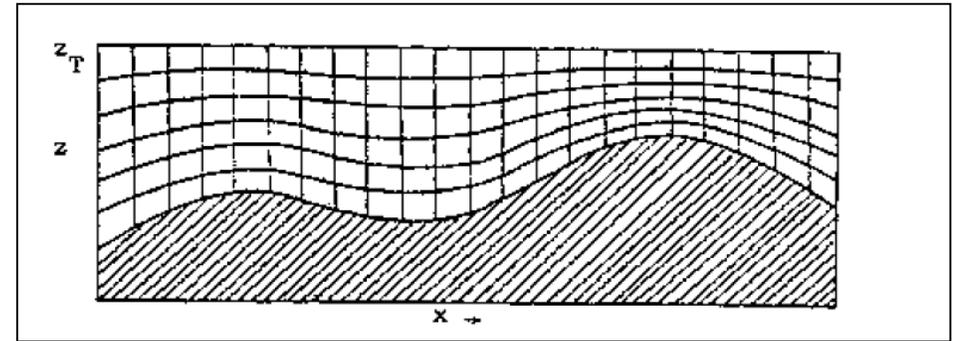
# IL SISTEMA DI COORDINATE

## Coordinate terrain-following



*top variabile*

$$Z(x, y) = z - h(x, y)$$



*σ top costante*

$$\sigma = \frac{z - z_g}{H - z_g}$$

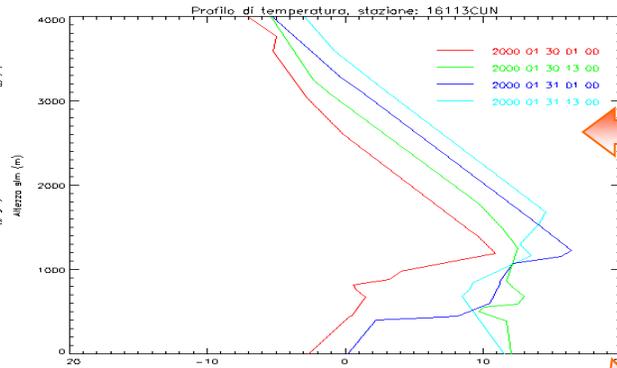
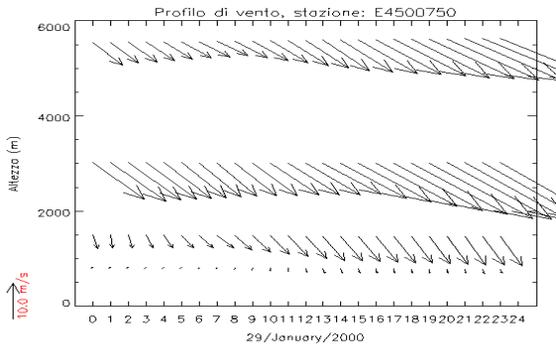
H = altezza massima

$z_g$  = quota di riferimento orografica

# DATI INPUT PER MODELLI A CONSERVAZIONE DI MASSA

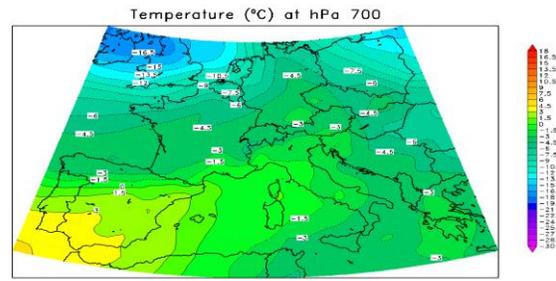
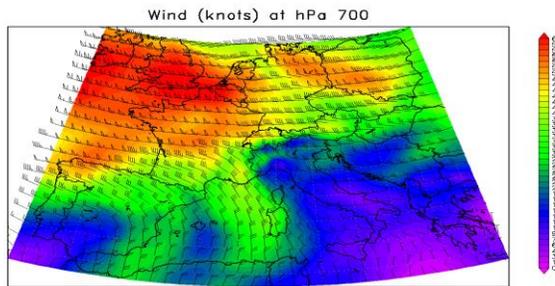


**DATI METEOROLOGICI AL SUOLO:**  
Velocità e direzione vento  
Temperatura  
Umidità  
Pressione

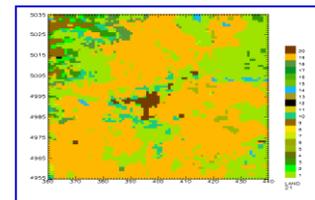
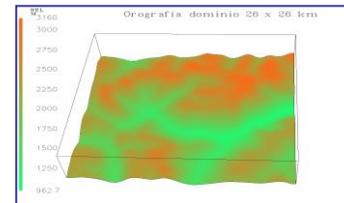


**DATI METEOROLOGICI IN QUOTA:**  
Profili di velocità e direzione vento,  
temperatura, umidità da

- misure
- modelli meteorologici a scala maggiore



**OROGRAFIA E USO DEL SUOLO:**  
Digital Elevation Model  
Corine Land Cover





# DATI METEOROLOGICI

I dati meteorologici devono essere rappresentativi di una determinata zona, pertanto è fondamentale che il sito di posizionamento della stazione di misura e l'esposizione dei sensori siano conformi ai criteri stabiliti dal [WMO \(World Meteorological Organization\)](#)

## REGOLE GENERALI

- **luoghi liberi da ostacoli** di qualunque tipo su tutti e quattro i lati (muri, alberi, cespugli...)
- posizionata su un **terreno pianeggiante**
- il terreno sotto gli strumenti deve essere dotato di suolo erboso con una altezza massima di pochi cm e privo di foglie secche
- la stazione deve essere **il più possibile rappresentativa del luogo di studio** → evitare zone soggette ad accumuli locali di aria fredda, zone soggette ad allagamenti temporanei, fontane e zone irrigate
- gli strumenti devono essere **puliti e periodicamente tarati**



# MISURE ANEMOMETRICHE

- l'anemometro deve essere posizionato ad una altezza di **10 m dal suolo**
- il sito deve essere pianeggiante con asperità circostanti inferiori a 0.03 m
- l'anemometro deve essere posizionato ad una distanza dall'ostacolo più vicino pari ad almeno **dieci volte l'altezza di quest'ultimo**

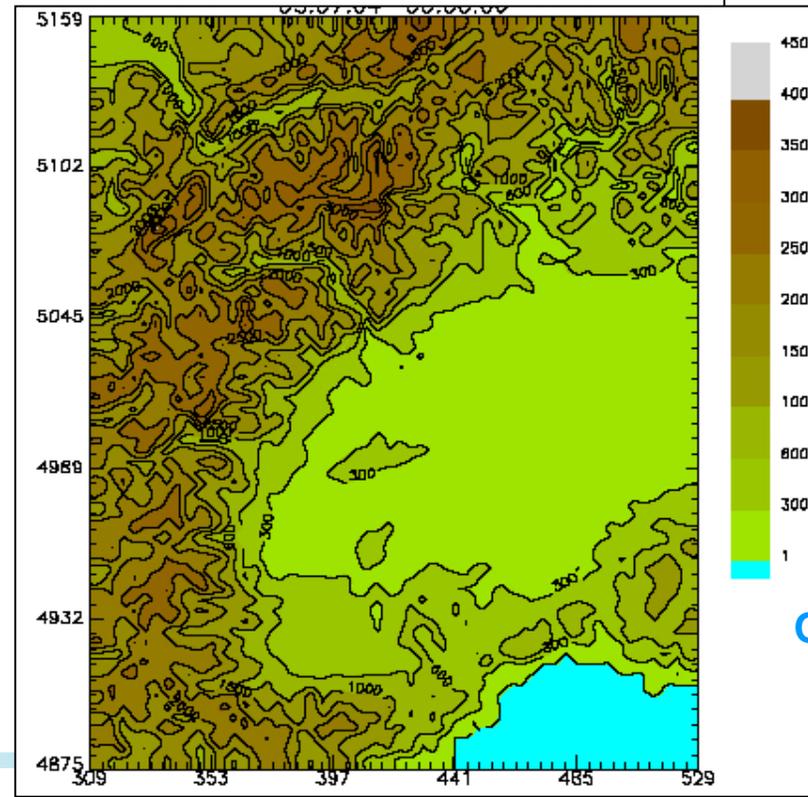
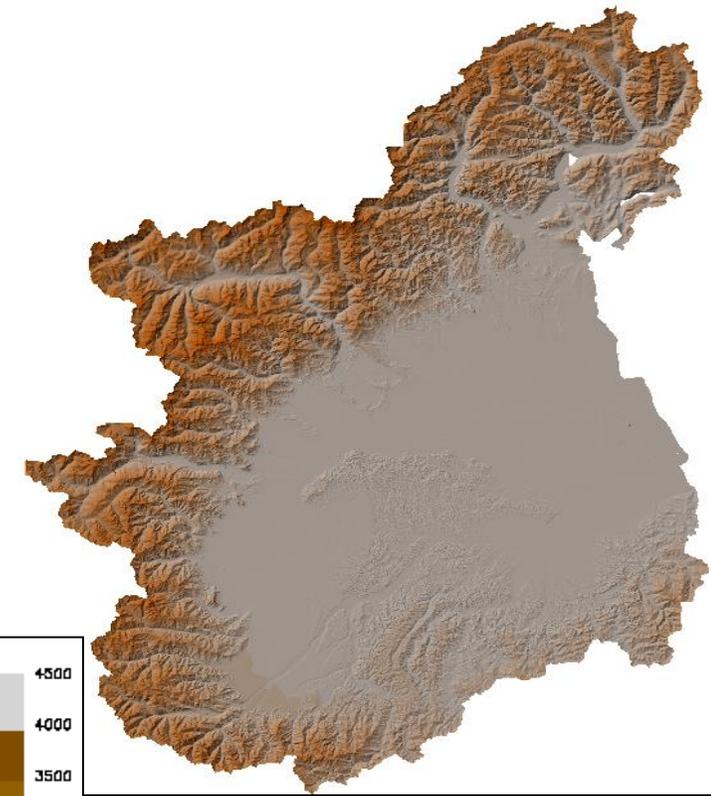
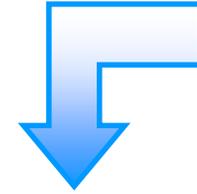


**POSIZIONAMENTI  
NON IDONEI...**



# OROGRAFIA

- **Digital Elevation Model** ⇒ ad ogni punto di un grigliato regolare è assegnata una quota
- ricavato da immagini satellitari, foto aeree
  
- l'orografia alla risoluzione necessaria per il modello si ricava a partire da DEM ad elevata risoluzione

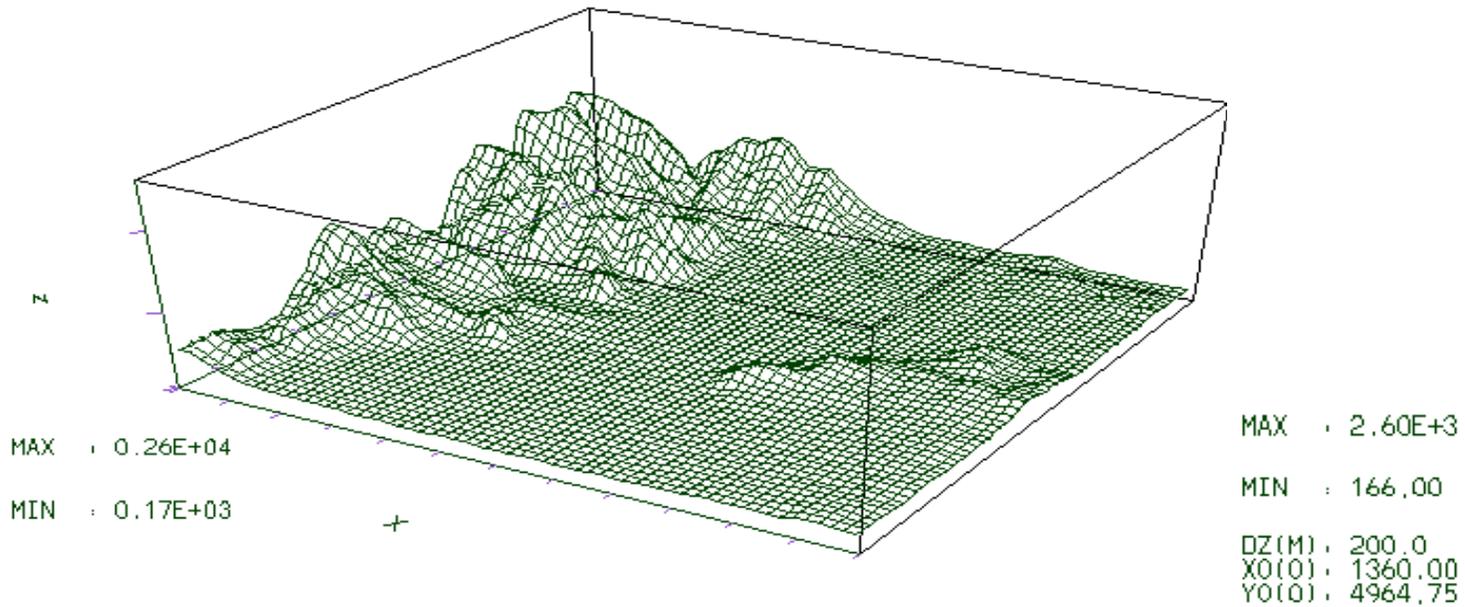


DEM 100 m risoluzione

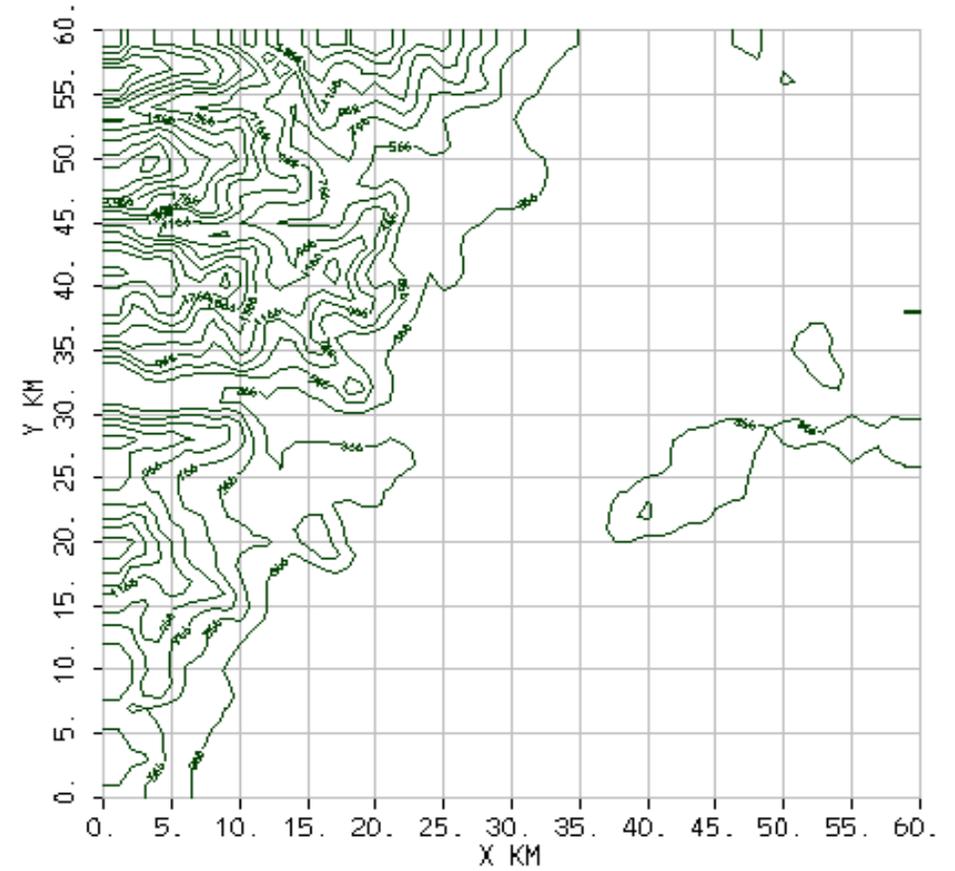
Orografia a 4 km di risoluzione



# OROGRAFIA



Rappresentazione 3D



Rappresentazione 2D

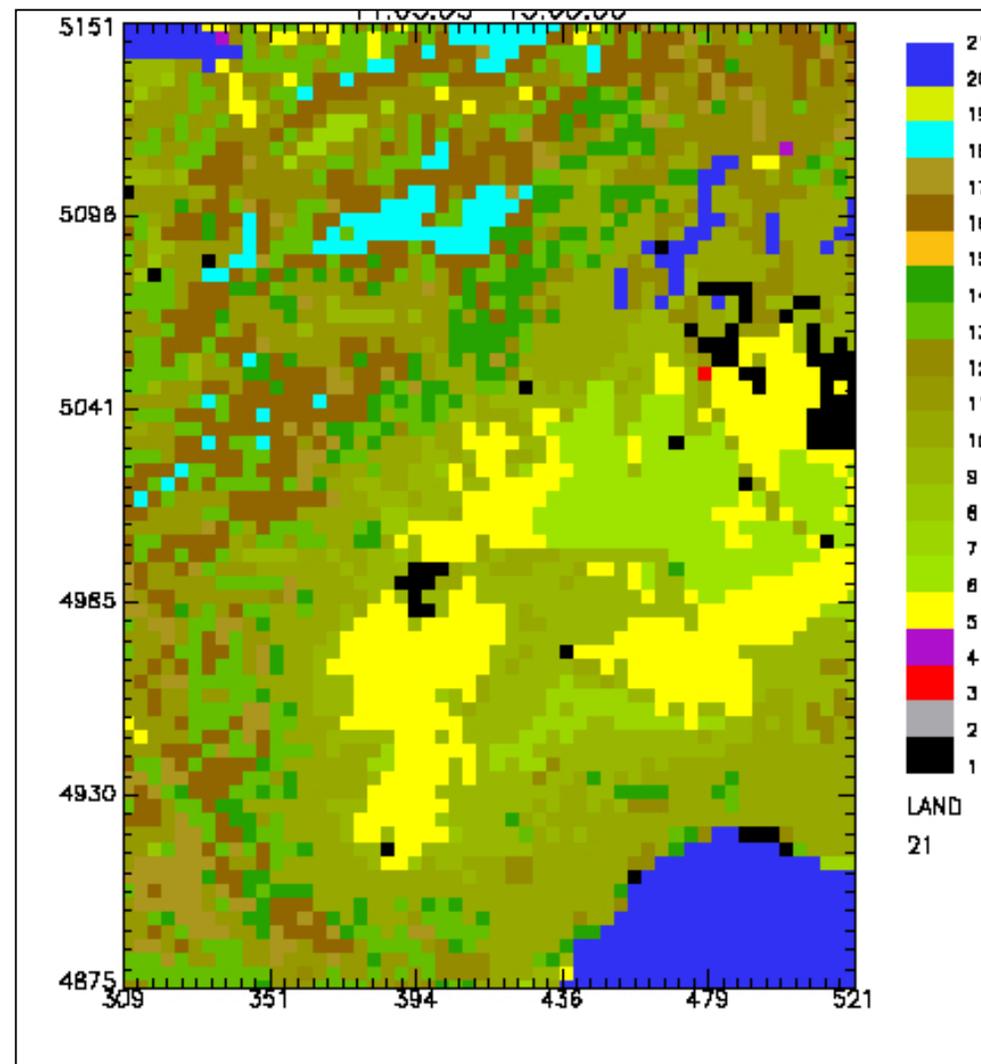
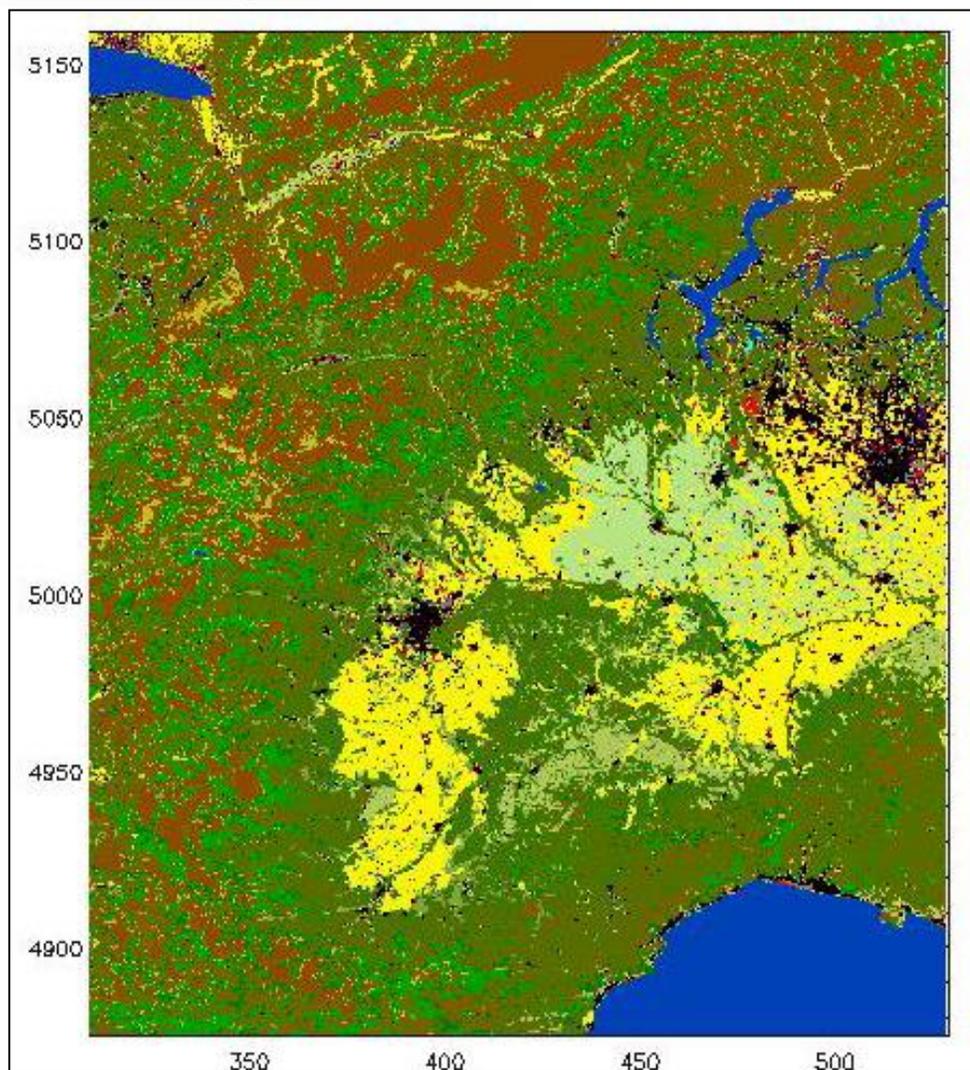


# USO DEL SUOLO

- Rappresenta lo stato attuale di utilizzo del territorio
- esistono vari tipi di classificazione (USGS, Corine Land Cover, etc)
- ricavato da immagini satellitari, foto aeree, informazioni locali
- a partire da database ad elevata risoluzione si ricava l'uso del suolo alla risoluzione necessaria per il modello (classe prevalente nella cella, percentuale delle varie classi nella cella)
- attraverso opportune tabelle di conversione permette di stimare **l'ALTEZZA DI RUGOSITA'  $z_0$** , usata nella ricostruzione del campo di vento per correggere la velocità del vento in prossimità del suolo ( $z_0 =$  altezza alla quale la velocità del vento si annulla)



# USO DEL SUOLO



# USO DEL SUOLO

Table 4-45  
 Default CALMET Land Use Categories and Associated Geophysical Parameters  
 Based on the U.S. Geological Survey Land Use Classification System  
 (14-Category System)

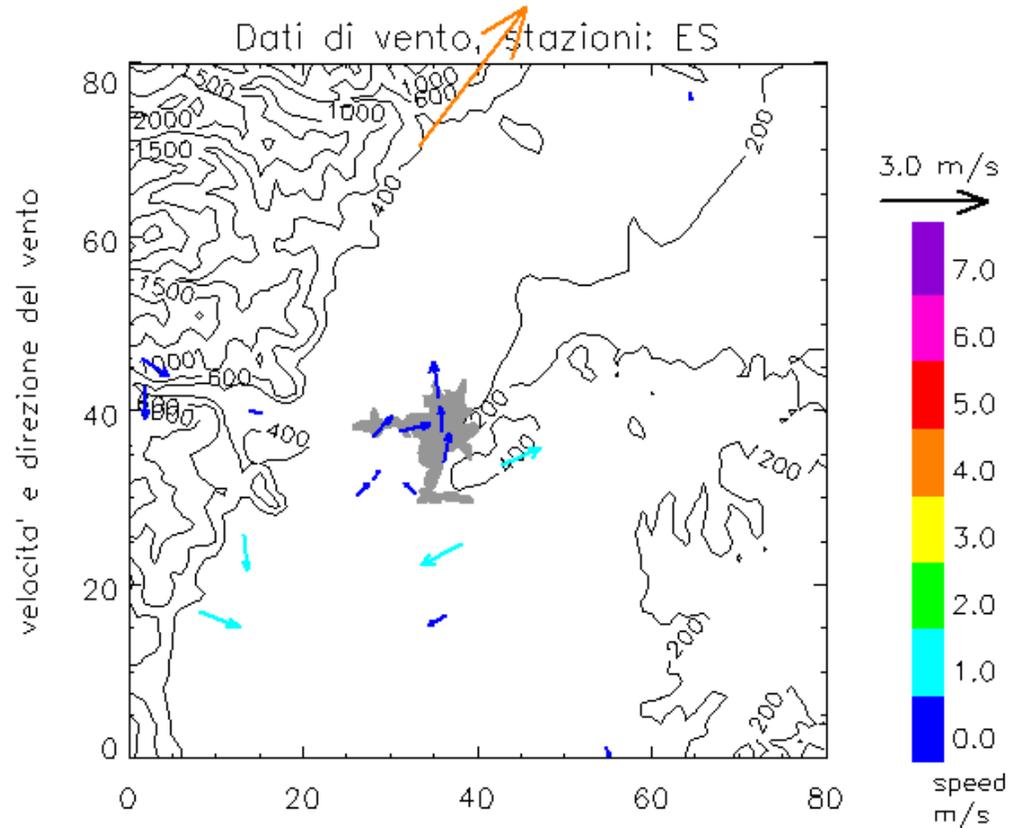
<u>Land Use Type</u>	<u>Description</u>	<u>Surface Roughness (m)</u>	<u>Albedo</u>	<u>Bowen Ratio</u>	<u>Soil Heat Flux Parameter</u>	<u>Anthropogenic Heat Flux (W/m<sup>2</sup>)</u>	<u>Leaf Area Index</u>
10	Urban or Built-up Land	1.0	0.18	1.5	.25	0.0	0.2
20	Agricultural Land - Unirrigated	0.25	0.15	1.0	.15	0.0	3.0
-20*	Agricultural Land - Irrigated	0.25	0.15	0.5	.15	0.0	3.0
30	Rangeland	0.05	0.25	1.0	.15	0.0	0.5
40	Forest Land	1.0	0.10	1.0	.15	0.0	7.0
51	Small Water Body	0.001	0.10	0.0	1.0	0.0	0.0
54	Bays and Estuaries	0.001	0.10	0.0	1.0	0.0	0.0
55	Large Water Body	0.001	0.10	0.0	1.0	0.0	0.0
60	Wetland	1.0	0.10	0.5	.25	0.0	2.0
61	Forested Wetland	1.0	0.1	0.5	0.25	0.0	2.0
62	Nonforested Wetland	0.2	0.1	0.1	0.25	0.0	1.0
70	Barren Land	0.05	0.30	1.0	.15	0.0	0.05
80	Tundra	.20	0.30	0.5	.15	0.0	0.0
90	Perennial Snow or Ice	.20	0.70	0.5	.15	0.0	0.0

\* Negative values indicate "irrigated" land use

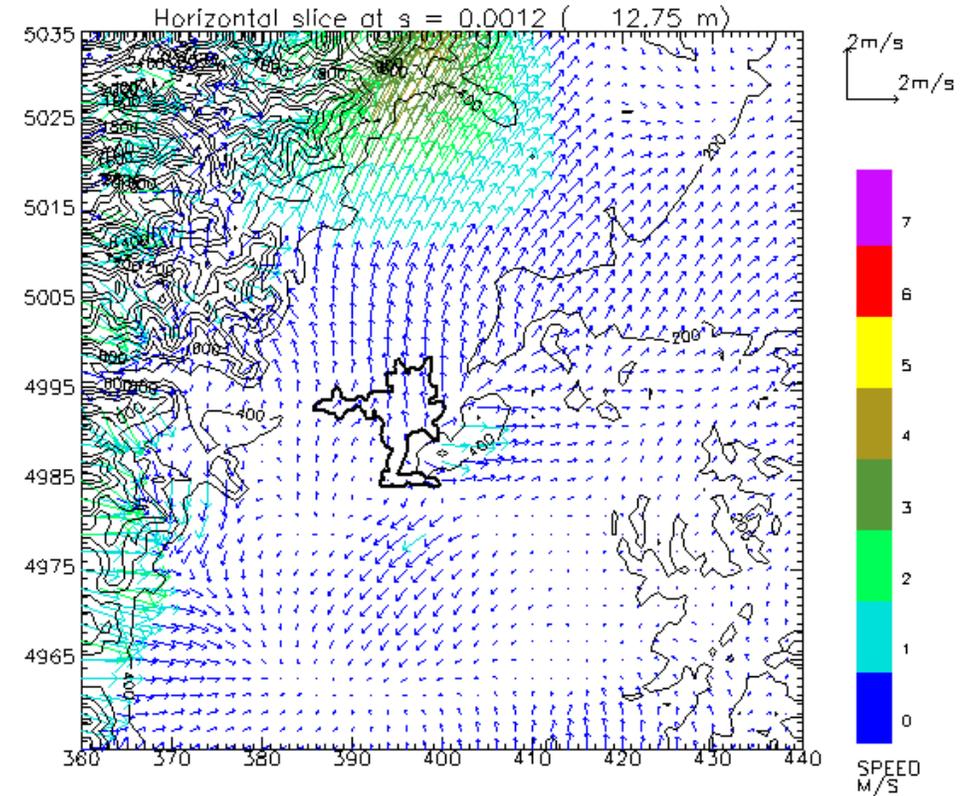
$z_0$

# DALLE MISURE SPARSE AL CAMPO DI VENTO...

## MISURE



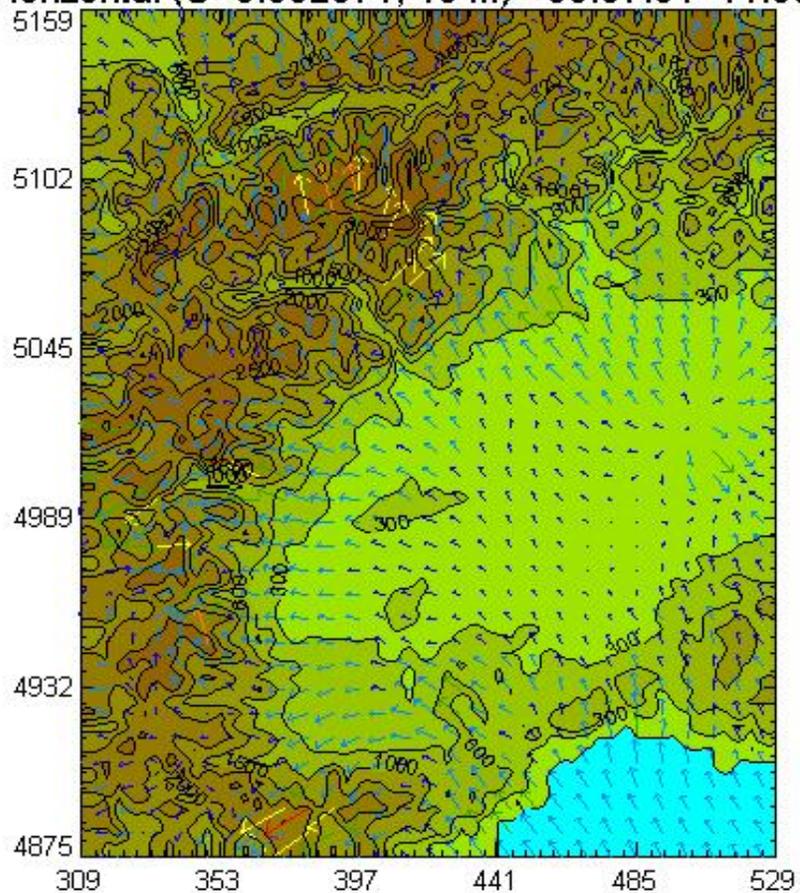
## CAMPO DI VENTO





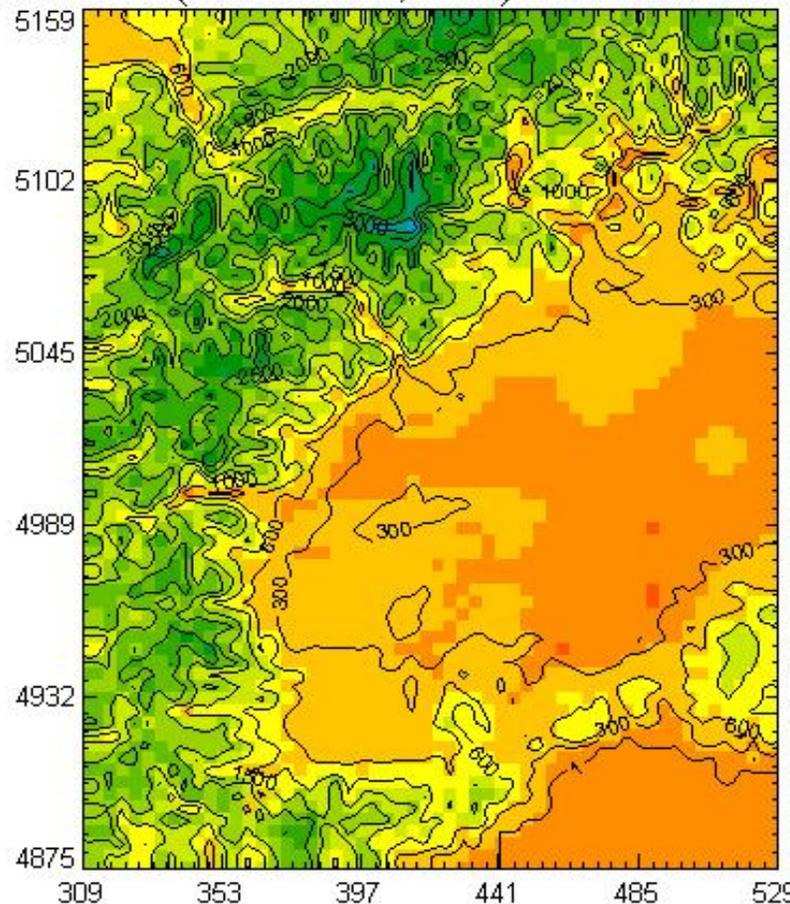
# OUTPUT MODELLI METEOROLOGICI 3D

Horizontal (S=0.002874, 10 m) - 05.07.04 11:00:00



VENTO

Horizontal (S=0.002874, 10 m) - 05.07.04 11:00:00



TEMPERATURA

CAMPI 3D





# PRINCIPALI ELEMENTI DI CRITICITA'

Prevalentemente legati ai dati meteorologici in input al modello:

**Osservazioni insufficienti** (dal punto di vista spaziale e/o temporale)

- Insufficiente copertura del territorio della rete di osservazioni
- Buchi nella serie temporale dei dati → estrapolazione dati per riempire i buchi

**Osservazioni qualitativamente non adeguate**

- Errori strumentali, di taratura, manutenzione...  
(Le osservazioni possono contenere errori o essere inutilizzabili anche se validate)
- Dati non rappresentativi (nonostante le specifiche di WMO), sovrapposizione di osservazioni discordanti

**E' NECESSARIO IL CONTROLLO DI QUALITA' PRIMA DELL'UTILIZZO DEI DATI**

# PROGNOSTICI VS. DIAGNOSTICI

- Basandosi su leggi fisiche, garantiscono la consistenza dei campi meteorologici. 😊
- La continuità temporale dei campi è assicurata perché implicita nella soluzione delle equazioni differenziali. 😊
- Risolvono, attraverso una serie di griglie innestate e con risoluzione sempre più fine, circolazioni atmosferiche sia sulla mesoscala (perturbazioni) che sulla scala locale. 😊
- Complessità elevata. 😞
- Alto costo computazionale. 😞
- Sensibilità alle IC e BC quindi alle incertezze legate ai dati di input (possibile divergenza tra le previsioni del modello e le osservazioni). 😞
- Necessari piccoli cluster per la simulazione di periodi lunghi a risoluzioni spaziali elevate (1 km). 😞
- Sistema operativo: LINUX con supporto per il calcolo parallelo 😞

- Sono semplici (considerano un numero limitato di leggi fisiche) e veloci. 😊
- Basso costo computazionale. 😊
- Basati su misure sperimentali. 😊
- Dipendono fortemente dalla qualità e dalla densità delle osservazioni. 😞
- Il completamento delle informazioni nelle zone/istanti dove le misure sono assenti poggia esclusivamente su metodi interpolativi. 😞
- La continuità temporale dei campi non è assicurata, ma dipende dalla continuità dei dati di misura. 😞
- Un PC di nuova generazione è sufficiente sia per simulazioni di episodi che per simulazioni di lungo periodo. 😊
- Simulazioni su qualsiasi sistema operativo 😊

**PROGNOSTICI**

**DIAGNOSTICI**



# PRE-PROCESSORI METEO PER LA RICOSTRUZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DEL PBL

I parametri del PBL, che descrivono le caratteristiche turbolente dell'atmosfera, vengono ricostruiti in modalità diagnostica grazie ad opportuni preprocessori meteorologici che utilizzano relazioni basate sulla Teoria della Similarità.

Le principali grandezze ricostruite, utilizzate dai modelli dispersivi (es. gaussiani di nuova generazione, lagrangiani ed euleriani 3D) sono:

- **velocità di attrito  $u^*$**   $\Rightarrow$  forzante meccanica
- **flusso di calore sensibile  $H_0$**   $\Rightarrow$  forzante convettiva
- altezza di rimescolamento  **$H_{mix}$**
- **lunghezza di Monin-Obukhov  $L$**   $\Rightarrow$  quota alla quale si ha bilancio fra turbolenza meccanica e termica
- **velocità di scala convettiva  $w^*$**   $\Rightarrow$  velocità ascensionale dei vortici nello strato rimescolato

Fra i pre-processor più utilizzati per i modelli 3D vi sono **CALMET** (Scire et al., 2000) e **SURFPRO** (AriaNet 2002)

# PREPROCESSORI METEOROLOGICI PER LA RICOSTRUZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DEL PBL

I modelli dispersivi di tipo gaussiano di prima generazione utilizzano invece un parametro sintetico, la **categoria di stabilità atmosferica**, che in 6 classi (A – F) tenta di raggruppare tutte le possibili configurazioni del PBL.

Le categorie di stabilità atmosferica sono ricavabili da misure di intensità del vento e radiazione solare.

CLASSI STABILITA' secondo PASQUILL	
A	Molto instabile
B	Moderatamente instabile
C	Leggermente instabile
D	Neutro
E	Leggermente stabile
F	Stabile

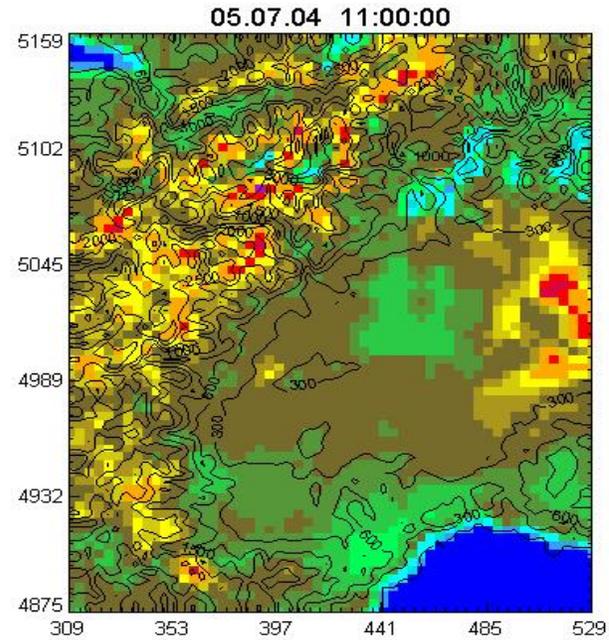
Vento (m/s)	Radiazione Solare Globale (W/m <sup>2</sup> )					
	>700	700÷540	540÷400	400÷270	270÷140	<140
<2	A	A	B	B	C	D
2 ÷ 3	A	B	B	B	C	D
3 ÷ 4	B	B	B	C	C	D
4 ÷ 5	B	B	C	C	D	D
5 ÷ 6	C	C	C	C	D	D
>6	C	C	D	D	D	D

Tab. 2.12: determinazione della Categoria di Stabilità Atmosferica nelle ore diurne.

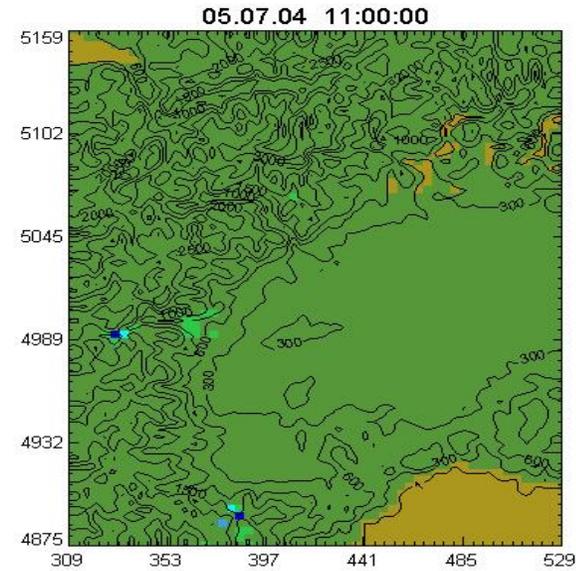
Vento (m/s)	Radiazione Netta (W/m <sup>2</sup> )		
	> -20	-20 ÷ -40	< -40
< 2	D	F	F
2 ÷ 3	D	E	F
3 ÷ 5	D	D	E
5 ÷ 6	D	D	D
> 6	D	D	D

Tab. 2.13: determinazione della Categoria di Stabilità Atmosferica nelle ore notturne.

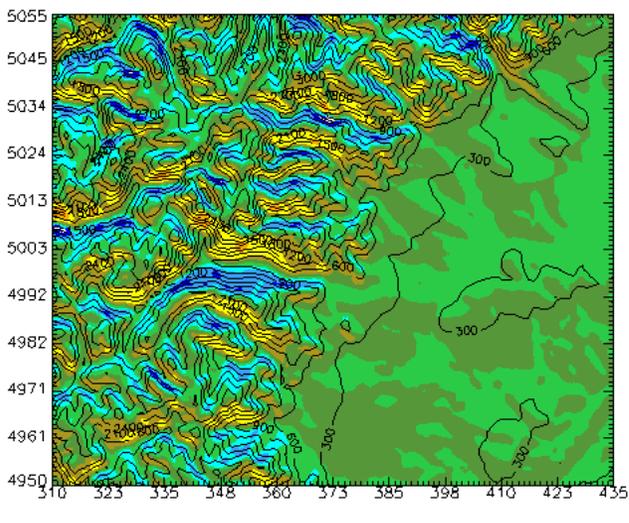
# OUTPUT PRE-PROCESSORE DIAGNOSTICO



## ALTEZZA RIMESCOLAMENTO



## LUNGHEZZA M-O



## RADIAZIONE SOLARE

## CLASSI STABILITA' PASQUILL

