



# Gli elementi essenziali della modellistica numerica per la qualità dell'aria

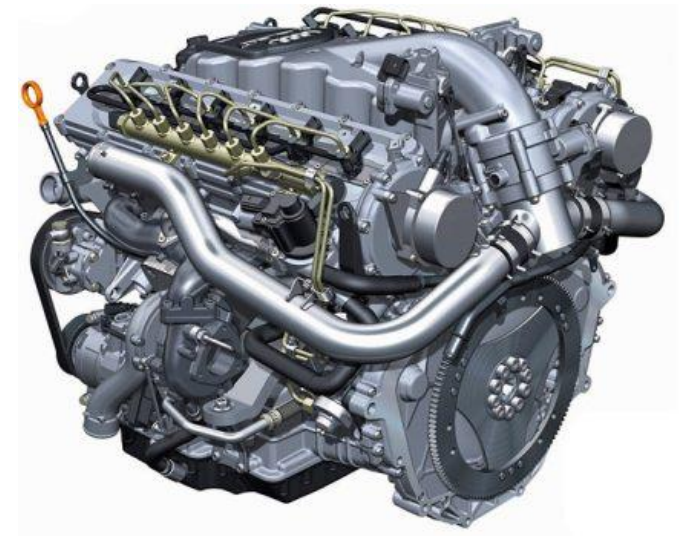
Il ruolo della modellistica numerica  
nella valutazione e nella previsione dell'inquinamento atmosferico  
a scala regionale e sub-regionale

Palmanova (UD), 26 e 27 febbraio 2013

ARPA FVG – CRMA  
Centro Regionale di Modellistica Ambientale  
[crma@arpa.fvg.it](mailto:crma@arpa.fvg.it)



# Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria



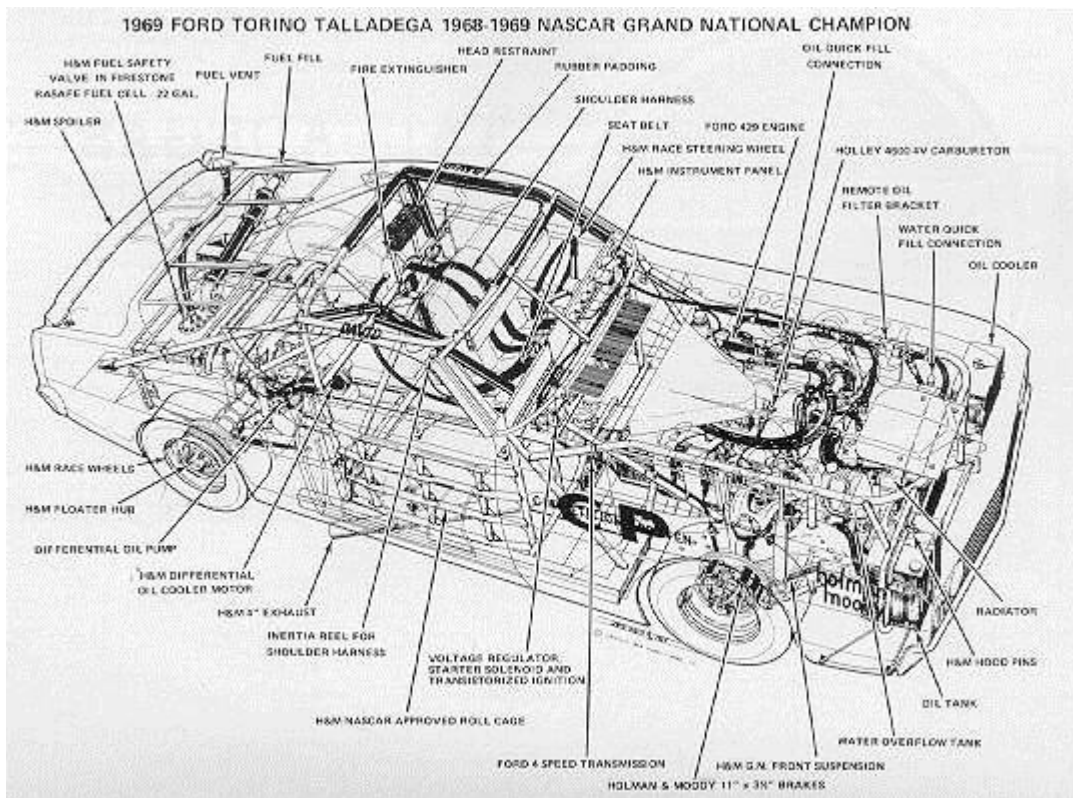
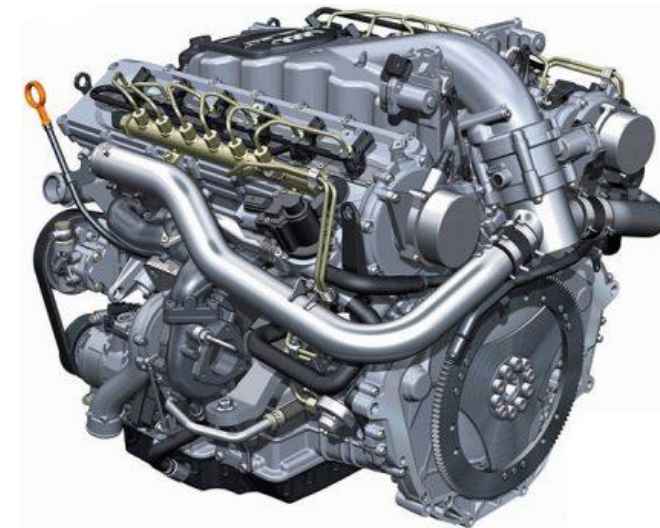
Il «modello numerico» è il motore.

Bisogna progettare, costruire ed assemblare tutto il resto...  
... dalla frizione al pilota!



Il «modello numerico» è il motore.

Bisogna progettare, costruire ed assemblare tutto il resto...  
... dalla frizione al pilota!



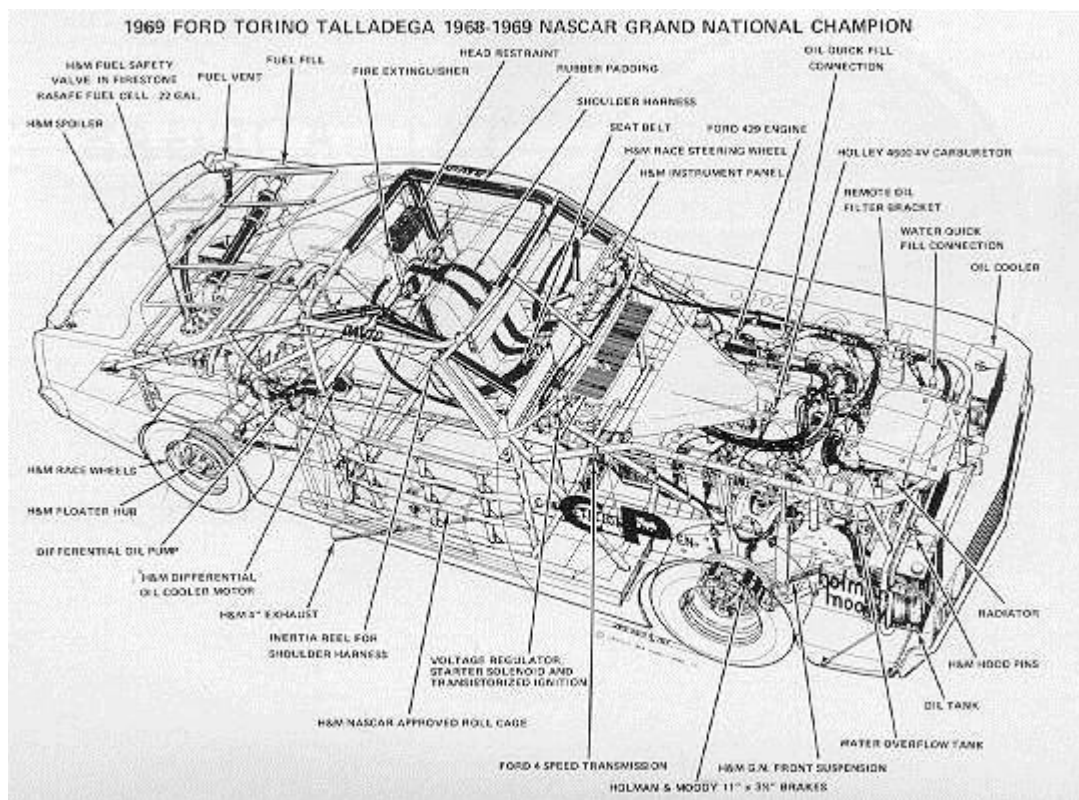


Il «modello numerico» è il motore.

Bisogna progettare, costruire ed assemblare tutto il resto...  
... dalla frizione al pilota!

**Attenzione: questa fase non è tipica delle PPAA!!**

(la realizzazione dello strumento che servirà per fornire un servizio)

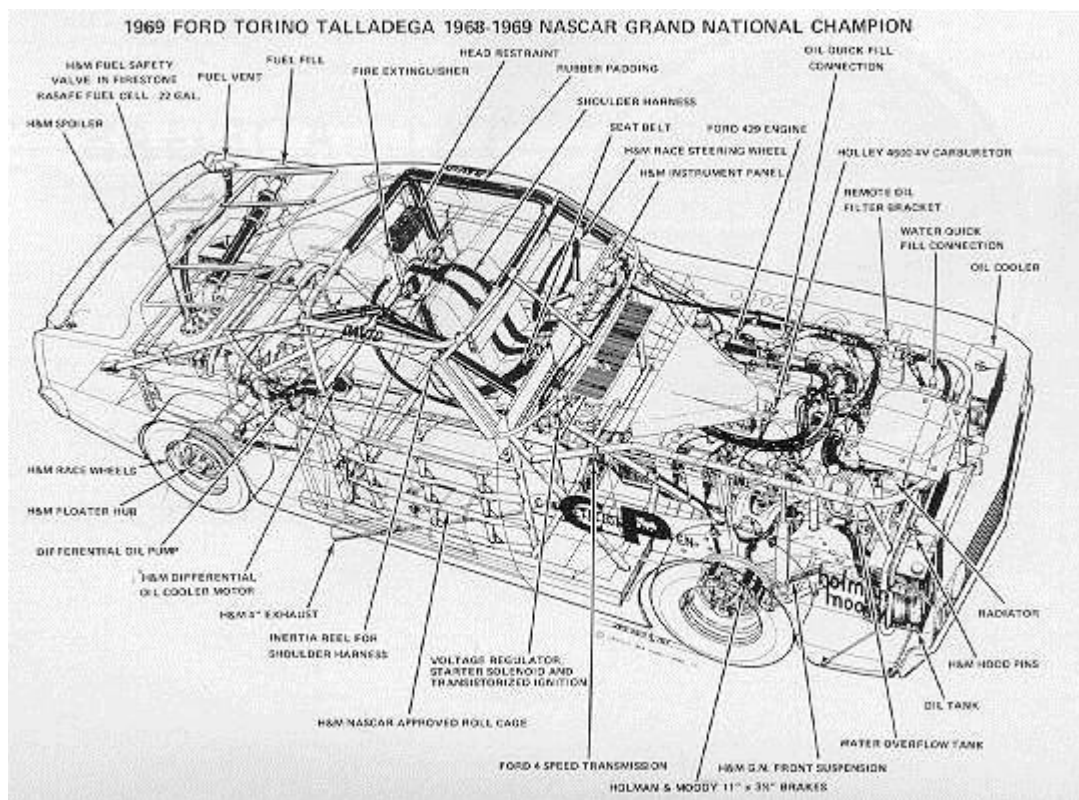


Il «modello numerico» è il motore.

Bisogna progettare, costruire ed assemblare tutto il resto...  
... dalla frizione al pilota!

**Attenzione: questa fase non è tipica delle PPAA!!**

(la realizzazione dello strumento che servirà per fornire un servizio)



In verità vi troverete necessariamente a costruire pezzi di macchina mentre già la state guidando...!!!

DPSIR.

Classificazione dei modelli. Applicazioni tipiche.

Esecuzione dei modelli: file di controllo e dati.

Catene operative per la simulazione della qualità dell'aria: dati in ingresso ai modelli a griglia.

Valutazione di specifiche sorgenti: dati in ingresso a modelli gaussiani ed a puff.

Determinanti meteorologici e pressioni emissive per simulare lo stato dell'aria ambiente.

Conclusioni.

Risorse.

Approfondimento: il Planetary Boundary Layer





# Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria



# DPSIR





# DPSIR

## **Determinanti:**

meteorologia, orografia, uso del suolo



# DPSIR

## **Determinanti:**

meteorologia, orografia, uso del suolo

## **Pressioni:**

emissioni in atmosfera

## DPSIR

### **Determinanti:**

meteorologia, orografia, uso del suolo

### **Pressioni:**

emissioni in atmosfera

### **Stato (S e $\Delta S$ ):**

output dei modelli, condizioni iniziali ed al contorno, misure di QA

## DPSIR

### **Determinanti:**

meteorologia, orografia, uso del suolo

### **Pressioni:**

emissioni in atmosfera

### **Stato (S e $\Delta S$ ):**

output dei modelli, condizioni iniziali ed al contorno, misure di QA

### **Impatto (su salute ed ecosistemi):**

in genere non viene stimato...

(analisi di rischio, epidemiologia, ecc.)



## DPSIR

### **Determinanti:**

meteorologia, orografia, uso del suolo

### **Pressioni:**

emissioni in atmosfera

### **Stato (S e $\Delta S$ ):**

output dei modelli, condizioni iniziali ed al contorno, misure di QA

**Impatto** (su salute ed ecosistemi):  
in genere non viene stimato...  
(analisi di rischio, epidemiologia, ecc.)



In generale ci si confronta con gli indicatori ed i limiti previsti dalla Normativa

## DPSIR

### **Determinanti:**

meteorologia, orografia, uso del suolo

### **Pressioni:**

emissioni in atmosfera

### **Stato (S e $\Delta S$ ):**

output dei modelli, condizioni iniziali ed al contorno, misure di QA

### **Impatto** (su salute ed ecosistemi):

in genere non viene stimato...  
(analisi di rischio, epidemiologia, ecc.)

In generale ci si confronta  
con gli indicatori ed i limiti  
previsti dalla Normativa



### **Risposte:**

Piani (risanamento, mantenimento, azione), autorizzazioni (VIA, emissioni atmosfera, unica)



# DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

Rispetto alle misure:

# DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

Rispetto alle misure:

- esplorare le **dinamiche** dell'inquinamento, alterando le Pressioni  
=> individuare nessi di causa-effetto



## DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

Rispetto alle misure:

- esplorare le **dinamiche** dell'inquinamento, alterando le Pressioni  
=> individuare nessi di causa-effetto
- eseguire analisi di **scenario**, alterando le Pressioni  
(es: Studi di Impatto Ambientale, scenari al 2020, ecc.)  
=> strumenti per articolare le Risposte

## DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

Rispetto alle misure:

- esplorare le **dinamiche** dell'inquinamento, alterando le Pressioni  
=> individuare nessi di causa-effetto
- eseguire analisi di **scenario**, alterando le Pressioni  
(es: Studi di Impatto Ambientale, scenari al 2020, ecc.)  
=> strumenti per articolare le Risposte
- stimare la Qualità dell'Aria (Stato) «**ovunque**»  
=> DLgs 155/2010

## DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

Rispetto alle misure:

- esplorare le **dinamiche** dell'inquinamento, alterando le Pressioni  
=> individuare nessi di causa-effetto
- eseguire analisi di **scenario**, alterando le Pressioni  
(es: Studi di Impatto Ambientale, scenari al 2020, ecc.)  
=> strumenti per articolare le Risposte
- stimare la Qualità dell'Aria (Stato) «**ovunque**»  
=> DLgs 155/2010
- effettuare **previsioni** («prognosi»)  
=> DLgs 155/2010

# DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

esplorare le **dinamiche** dell'inquinamento, alterando le Pressioni

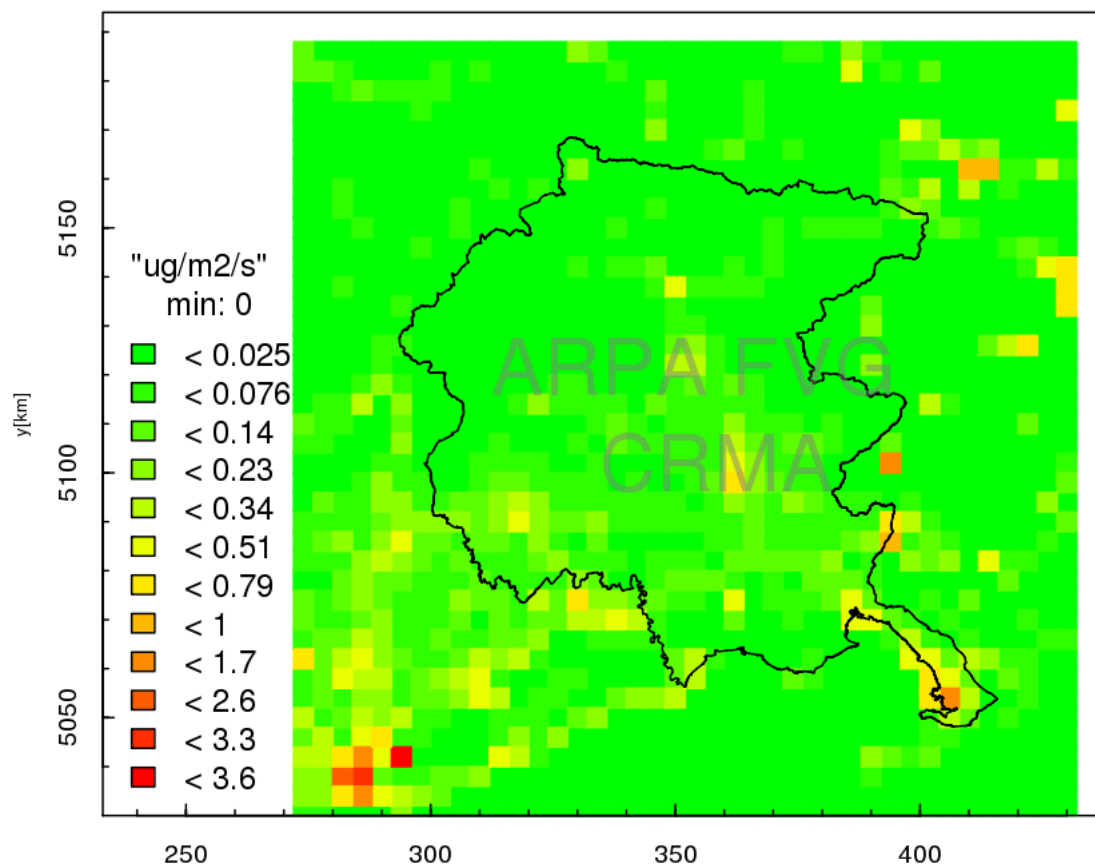
=> individuare nessi di causa-effetto

CASO STUDIO:

Le emissioni diffuse di NO<sub>x</sub> da 4 celle vengono spente

Si valuta la riduzione percentuale della concentrazione media annuale di NO<sub>2</sub> rispetto al «caso base»

deNO





# DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

esplorare le **dinamiche** dell'inquinamento, alterando le Pressioni

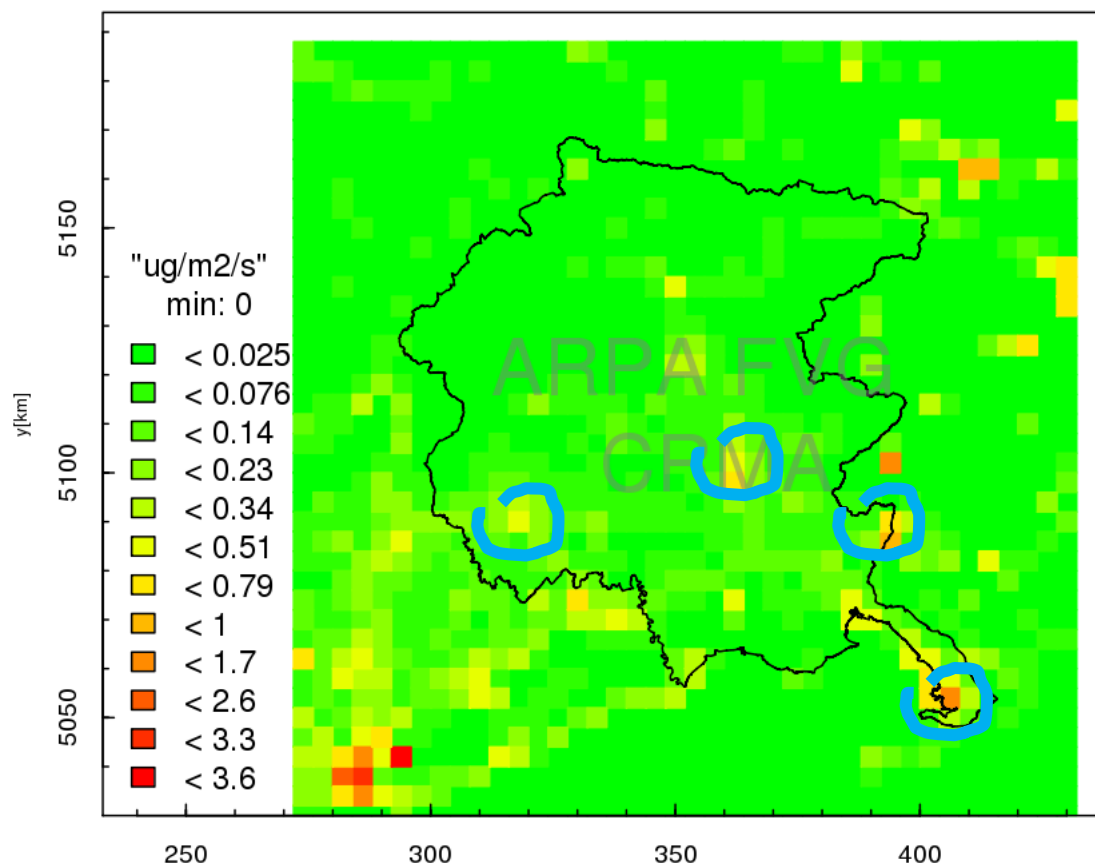
=> individuare nessi di causa-effetto

CASO STUDIO:

Le emissioni diffuse di NO<sub>x</sub> da 4 celle vengono spente

Si valuta la riduzione percentuale della concentrazione media annuale di NO<sub>2</sub> rispetto al «caso base»

deNO



# DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

esplorare le **dinamiche** dell'inquinamento, alterando le Pressioni

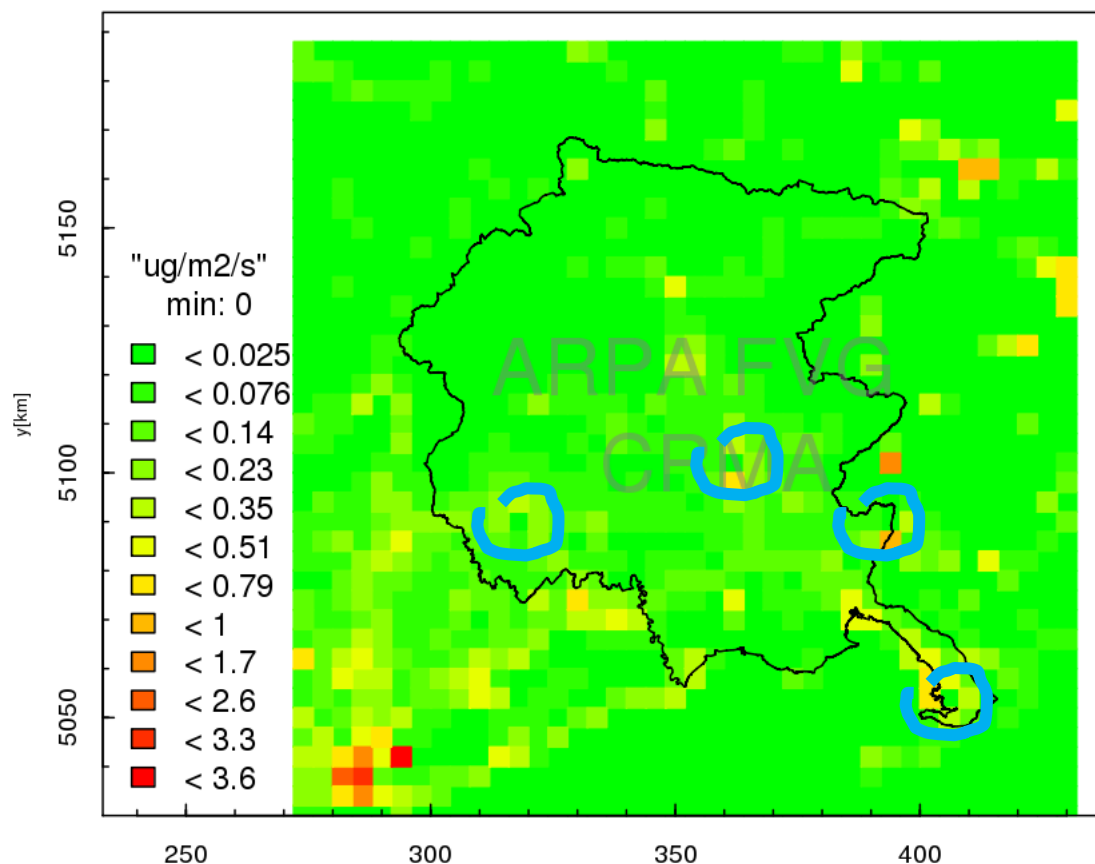
=> individuare nessi di causa-effetto

CASO STUDIO:

Le emissioni diffuse di NO<sub>x</sub> da 4 celle vengono spente

Si valuta la riduzione percentuale della concentrazione media annuale di NO<sub>2</sub> rispetto al «caso base»

deNO



# DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

esplorare le **dinamiche** dell'inquinamento, alterando le Pressioni

=> individuare nessi di causa-effetto

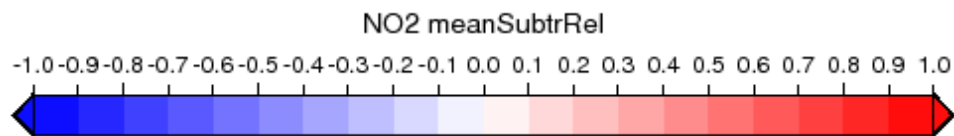
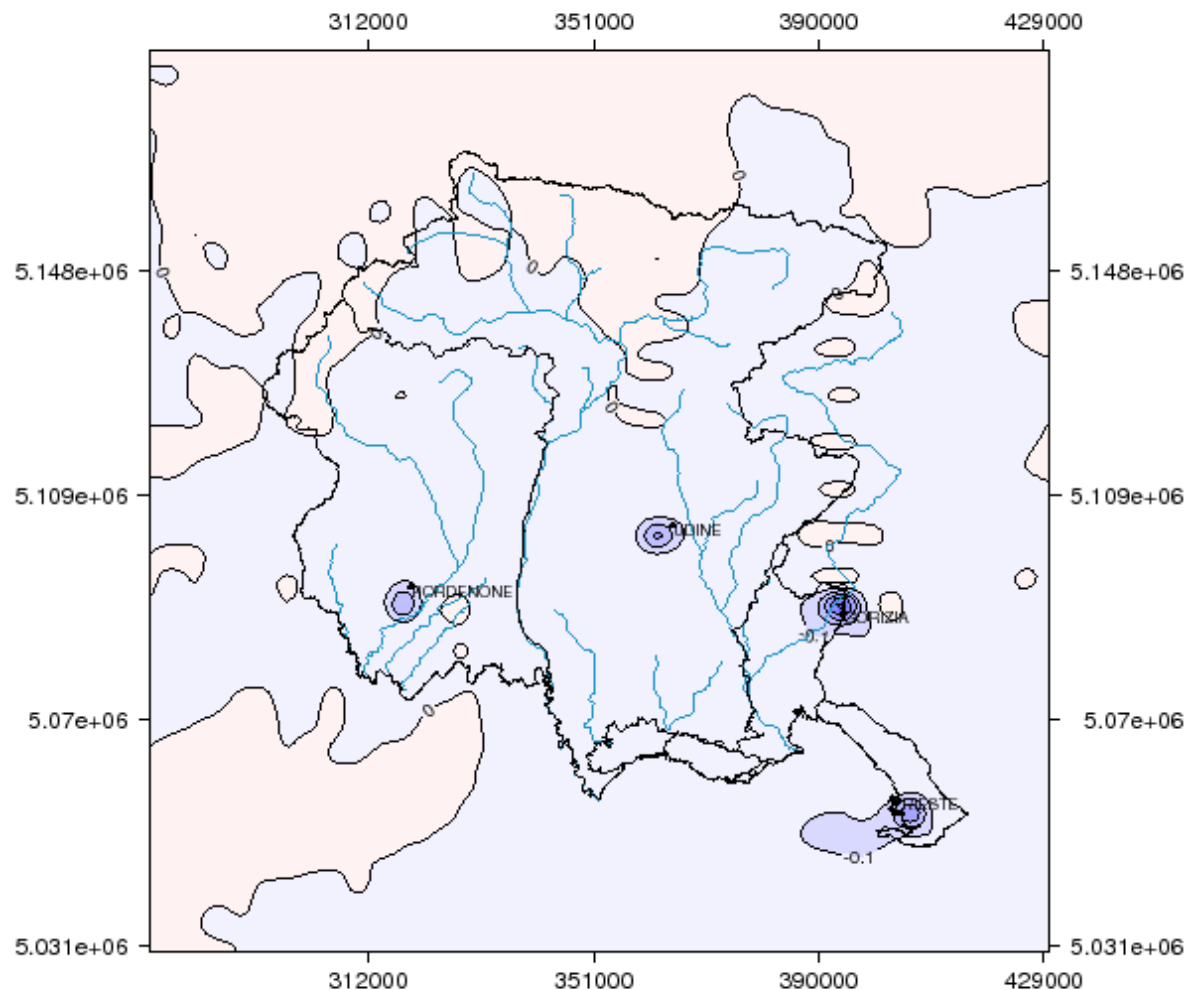
CASO STUDIO:

Le emissioni diffuse di NOx da 4 celle vengono spente

Si valuta la riduzione percentuale della concentrazione media annuale di NO2 rispetto al «caso base»

NO2 meanSubtrRel field 01A291B0B1\_2005

FARM Output: date=20050101-20050131, tempo 000



## DPSIR: valutazione dello Stato con modelli

eseguire analisi di **scenario**, alterando le Pressioni  
 (es: Studi di Impatto Ambientale, scenari al 2020, ecc.)

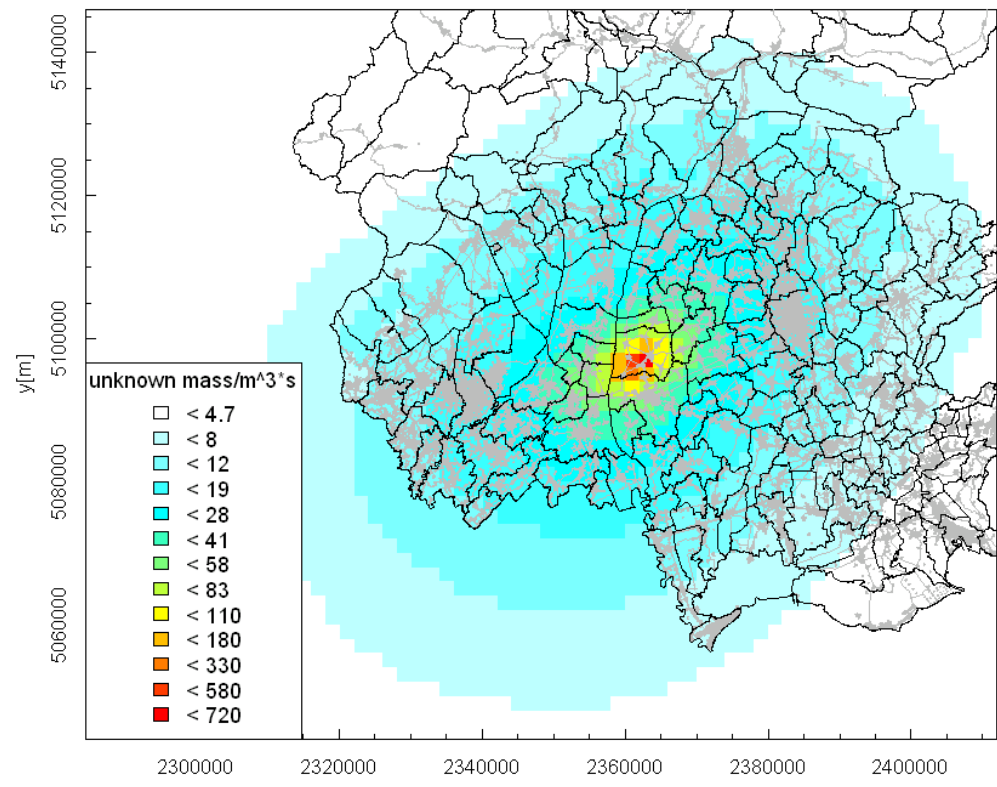
=> strumenti per articolare le Risposte



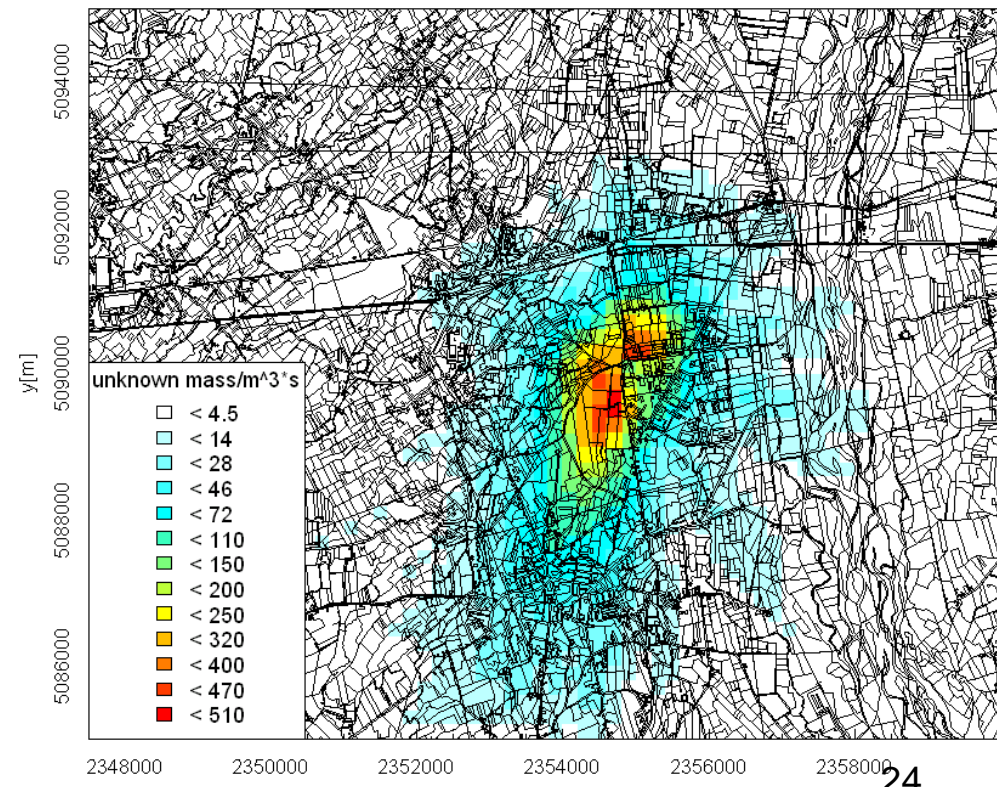
UNKNOWN



UNKNOWN



D:/CALMET/data/outputs/CALPUFF\_OUT/sedegliano\_dioxine\_upper.dat



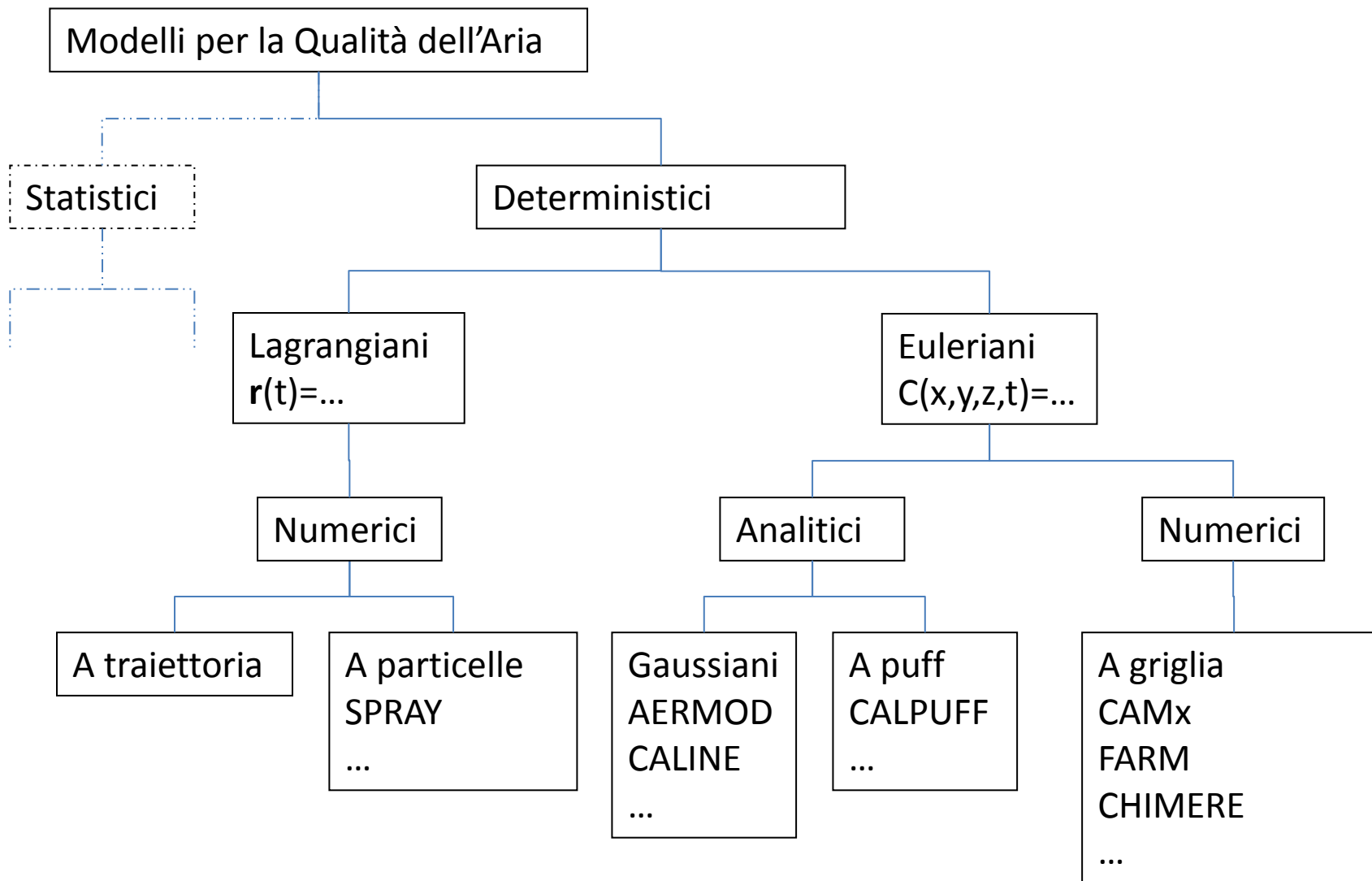
D:/CALMET/data/outputs/CALPUFF\_OUT/superamenti\_san\_vito\_tagliamento.dat





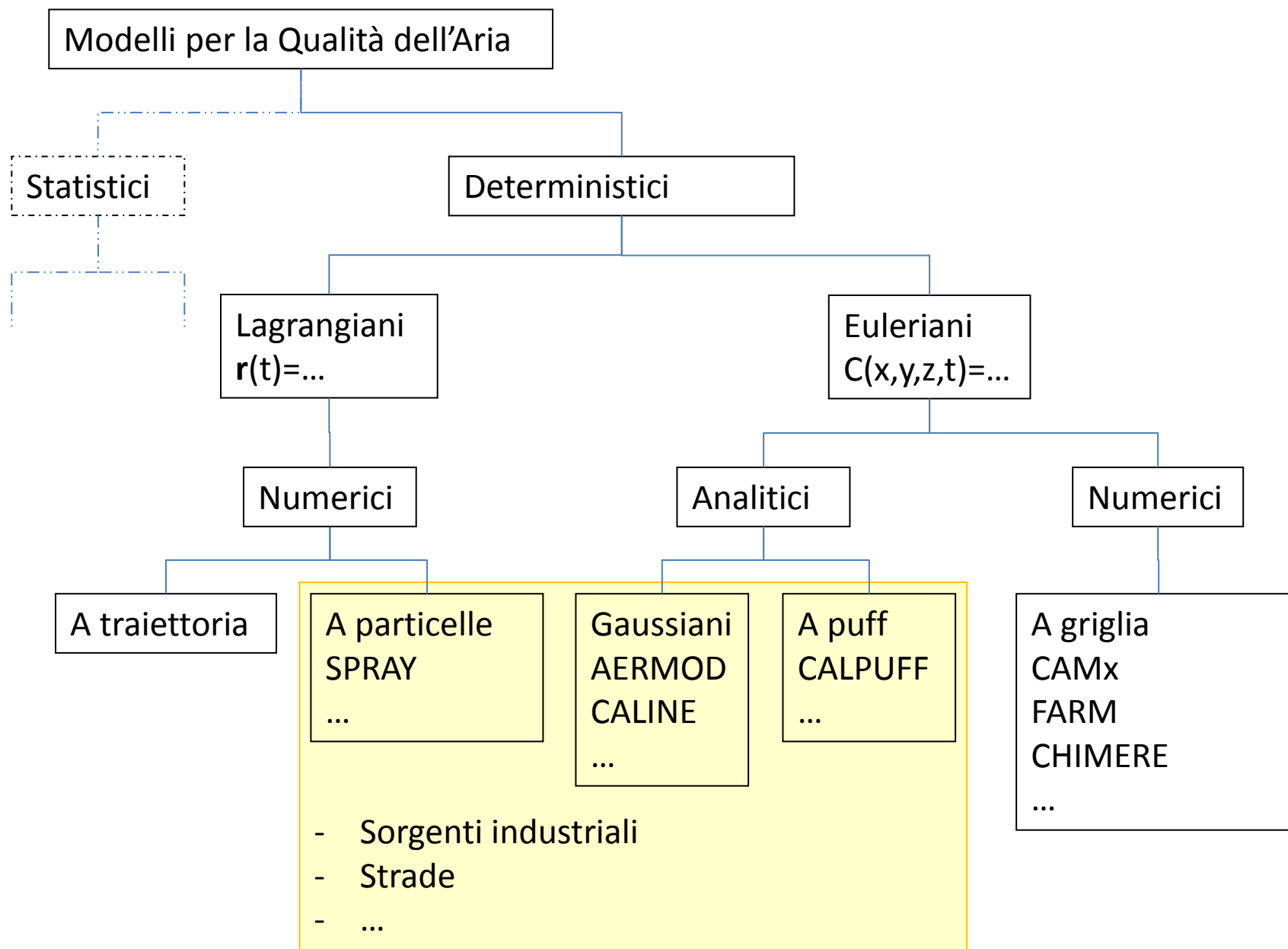
# Classificazione dei modelli. Applicazioni tipiche.

## Tassonomia dei modelli per la Qualità dell'Aria e loro applicazioni tipiche



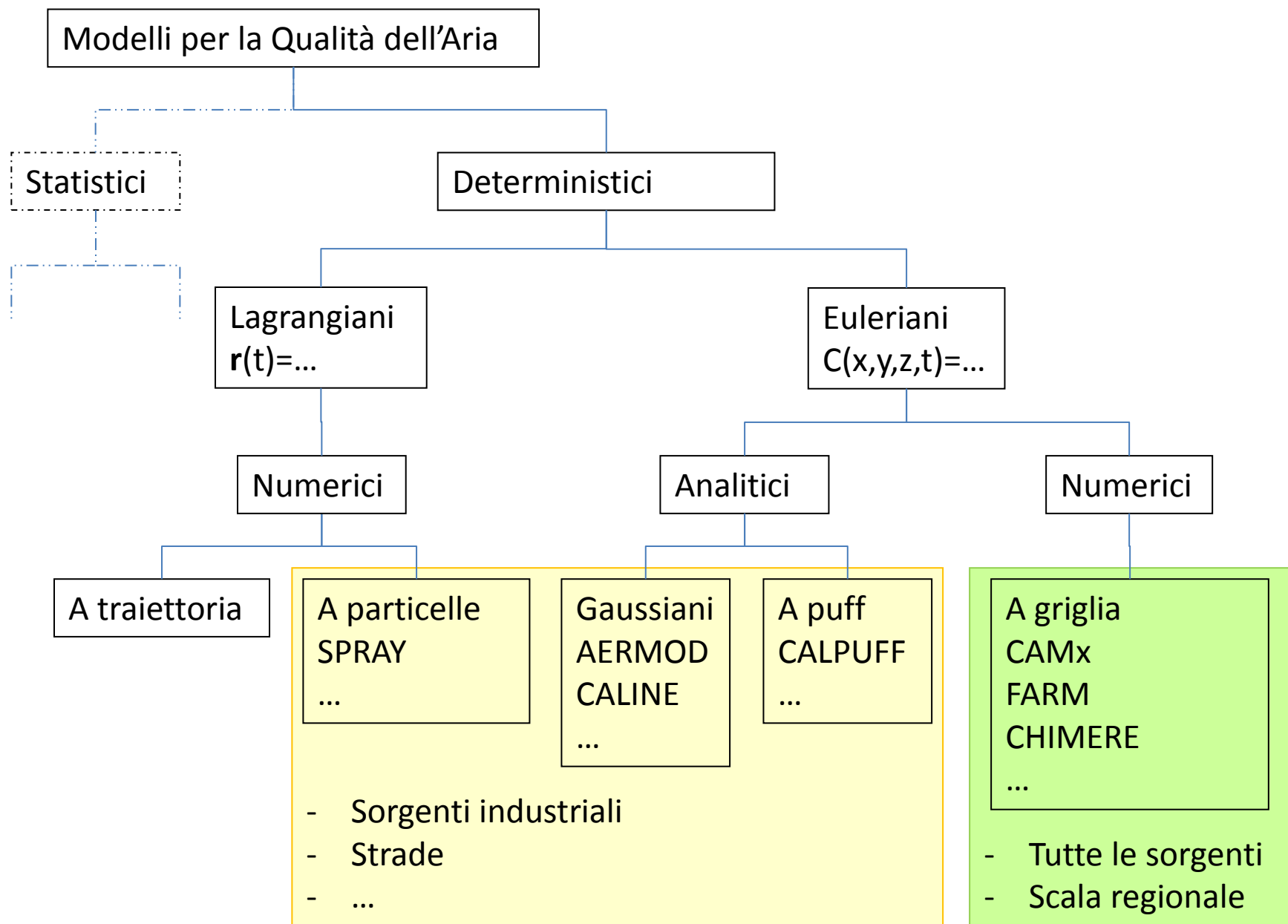
# Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

## Tassonomia dei modelli per la Qualità dell'Aria e loro applicazioni tipiche



# Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

## Tassonomia dei modelli per la Qualità dell'Aria e loro applicazioni tipiche



## Applicazioni tipiche

CTM: modello {chimico, fotochimico, Euleriano, completo, a griglia} di trasporto e diffusione

CAMx, CHIMERE, FARM...

Previsione della Qualità dell'Aria

Dominio: ~ regionale

Tempi: ~ 1 - 5 giorni

Valutazione della Qualità dell'Aria

Dominio: ~ regionale

Tempi: ~ 1 – 5 anni  
(indicatori ex DLGS 155/2010)

Vi sono modelli meteorologici (es: WRF-Chem) che gestiscono il trasporto, la diffusione e la trasformazione chimica degli inquinanti congiuntamente allo sviluppo dei campi meteorologici (modelli on-line)

## Applicazioni tipiche

Valutazione di specifiche sorgenti: AERMOD, CALPUFF, ISC3, DIMULA, SPRAY...

Tempi: ~ 1 anno

oppure:

~ 1 giorno condizioni critiche

Dominio: variabile

In generale:

- richiedono meno sforzo dei CTM
- non sono strettamente nei compiti di un'ARPA/APPA...  
(per le VIA/Emissioni in Atmosfera, compete ai proponenti...)
- in ARPA/APPA servono per la valutazione di situazioni critiche o per «run archetipici»

In ARPA FVG, esperienza molto positiva nel fornire i **dati meteo** di ingresso e le concentrazioni di **fondo** per la loro esecuzione ai proponenti VIA!!!

(la parte più difficile)



## Applicazioni tipiche

Valutazione di specifiche sorgenti: AERMOD, CALPUFF, ISC3, DIMULA, SPRAY...

Una buona strategia generale:

fornire SERVIZI e DATI usando i pezzi della catena modellistica man mano che sono pronti!

- Inventario
- Input meteo ai modelli
- Campi di fondo della Qualità dell'Aria
- ...





## Esecuzione dei modelli: file di controllo e dati

## Esecuzione dei modelli numerici: file di controllo e dati

File di **inizializzazione** (.ini, .dat...):

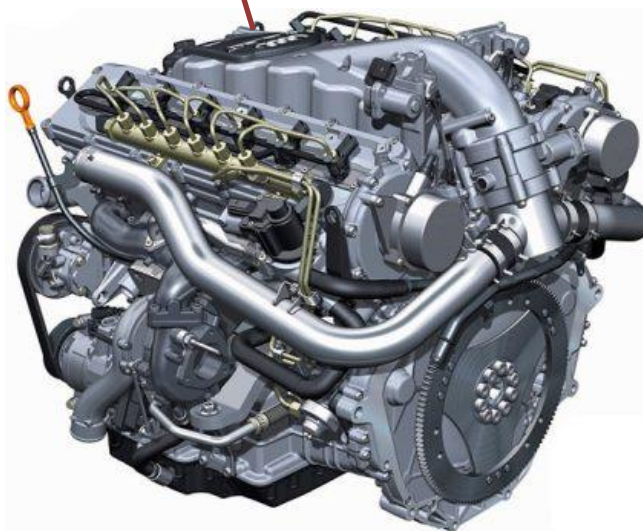
- Path e formato degli altri file
- Definizione del dominio della simulazione
- Definizione dei tempi
- ...



## Esecuzione dei modelli numerici: file di controllo e dati

File di **inizializzazione** (.ini, .dat...):

- Path e formato degli altri file
- Definizione del dominio della simulazione
- Definizione dei tempi
- ...



```

CALPUFF Operational Run
(ARPA FVG - CRMA)
Regional Center for Environmental Modeling
----- Run title (3 lines) -----

                                CALPUFF MODEL CONTROL FILE
                                -----

-----
INPUT GROUP: 0 -- Input and Output File Names
-----
Default Name  Type      File Name
-----  ---  -----
CALMET.DAT   input  ! METDAT =$CALMETFILE !
or
ISCMET.DAT   input  * ISCDAT =          *
or
PLMMET.DAT   input  * PLMDAT =          *
or
PROFILE.DAT  input  * PRFDAT =          *
SURFACE.DAT  input  * SFCDAT =          *
RESTARTB.DAT input  $TRUE_RESTIN

-----
CALPUFF.LST  output ! PUFLST =./calpuff.lst !
CONC.DAT     output ! CONDAT =$CONCFIL !
DFLX.DAT     output * DFDAT =          *
WFLX.DAT     output * WFDAT =          *
DFLX.DAT     output $TRUE_DRYDATA
WFLX.DAT     output $TRUE_WETDATA
...
    
```

## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

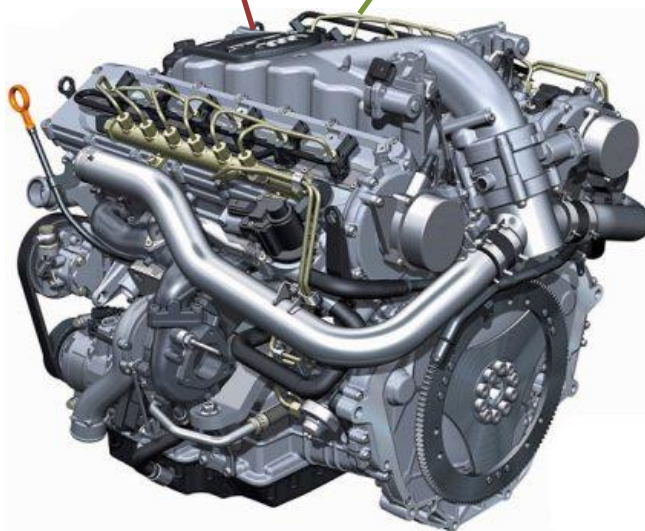
Esecuzione dei modelli numerici: file di controllo e dati

File di **inizializzazione** (.ini, .dat...):

- Path e formato degli altri file
- Definizione del dominio della simulazione
- Definizione dei tempi
- ...

**Dati «fissi»:**

- Orografia
- Edifici
- Costanti delle reazioni chimiche
- ...



## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

Esecuzione dei modelli numerici: file di controllo e dati

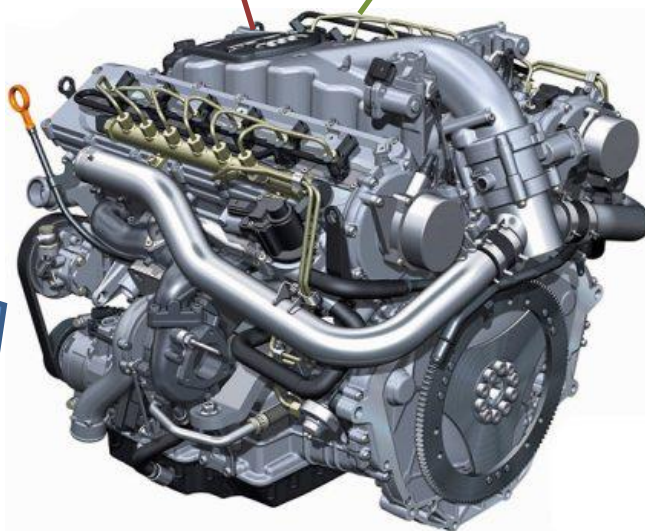
File di **inizializzazione** (.ini, .dat...):

- Path e formato degli altri file
- Definizione del dominio della simulazione
- Definizione dei tempi
- ...

**Dati «fissi»:**

- Orografia
- Edifici
- Costanti delle reazioni chimiche
- ...

Dati di input





## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

Esecuzione dei modelli numerici: file di controllo e dati

File di **inizializzazione** (.ini, .dat...):

- Path e formato degli altri file
- Definizione del dominio della simulazione
- Definizione dei tempi
- ...

**Dati «fissi»:**

- Orografia
- Edifici
- Costanti delle reazioni chimiche
- ...



Dati di input



Dimenticare: Excel, «Salva come: CSV (MS-DOS) (\*.csv) », ...

Questa non è una buona **CATENA MODELLISTICA!**



# Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

Esecuzione dei modelli numerici: file di controllo e dati

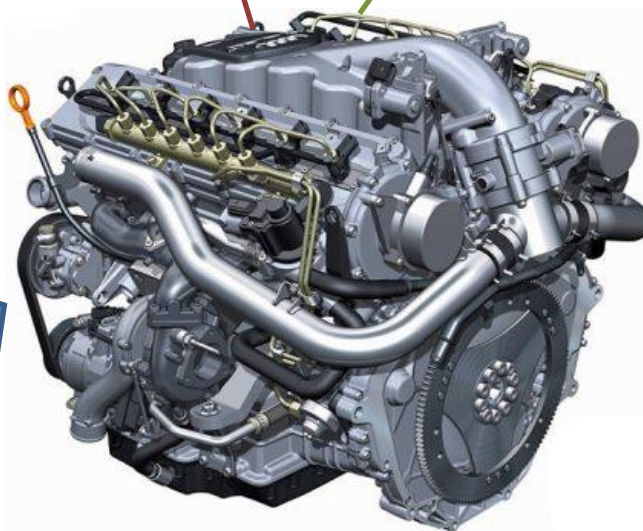
File di **inizializzazione** (.ini, .dat...):

- Path e formato degli altri file
- Definizione del dominio della simulazione
- Definizione dei tempi
- ...



**Dati «fissi»:**

- Orografia
- Edifici
- Costanti delle reazioni chimiche
- ...



Dati di input



Dimenticare: Excel, «Salva come: CSV (MS-DOS) (\*.csv) », ...

Questa non è una buona **CATENA MODELLISTICA!**





## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

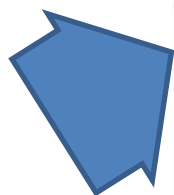
Esecuzione dei modelli numerici: file di controllo e dati

File di **inizializzazione** (.ini, .dat...):

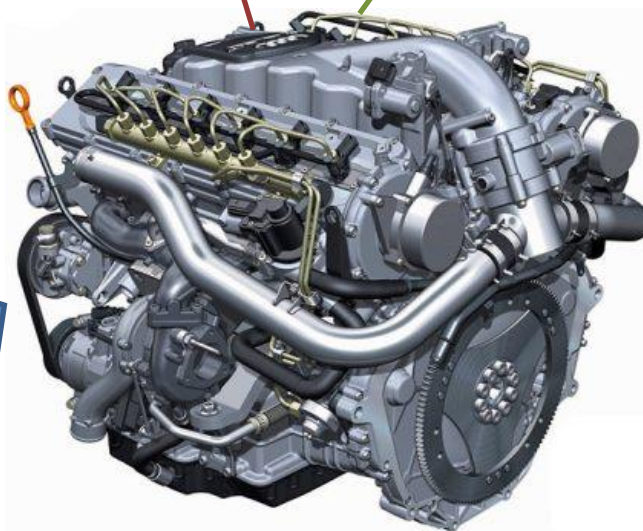
- Path e formato degli altri file
- Definizione del dominio della simulazione
- Definizione dei tempi
- ...

**Dati «fissi»:**

- Orografia
- Edifici
- Costanti delle reazioni chimiche
- ...



Dati di input



**PARTITE SEMPRE DA UN «RUN» CHE GIRA E SOSTITUIRE UN «PEZZO» ALLA VOLTA**

- se scaricate un modello gratuito, C'E' sempre un Caso Studio nel «pacchetto»
- se acquistate, inserite nel contratto l'esecuzione di almeno un Caso Studio di vostro interesse!!!



Catene **operative** di **previsione** della **Qualità dell'Aria**:  
dati in ingresso ai **modelli a griglia**

## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

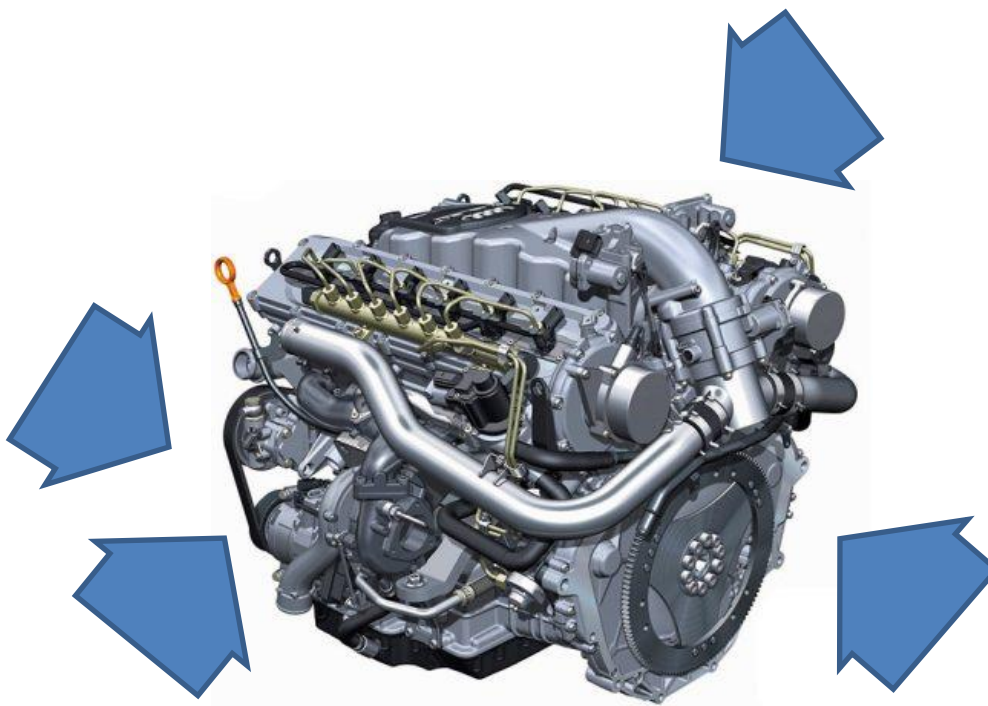
Catene operative di previsione della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

$\Delta t \sim 1h$

$N_t \Delta t \sim +12h, \dots, +120h$

$\Delta s \sim 1 \div 10 \text{ km}$

$N_s \Delta s \sim 100 \div 1000 \text{ km}$



**Dati da fornire in PROGNOSI**

## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

Catene operative di previsione della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

$\Delta t \sim 1h$

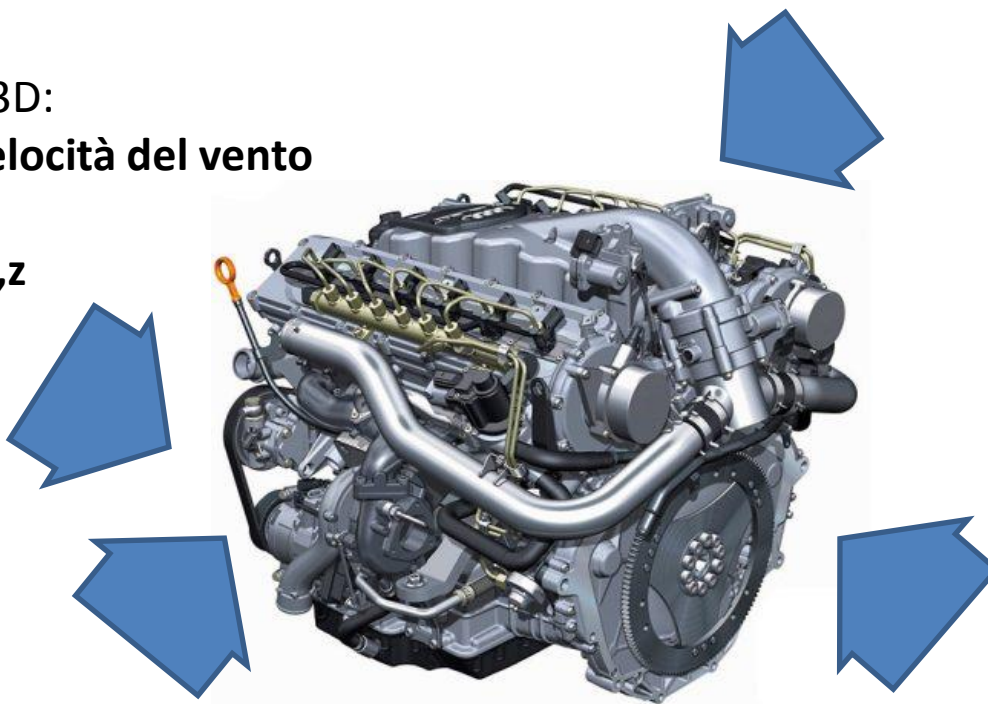
$N_t \Delta t \sim +12h, \dots, +120h$

$\Delta s \sim 1 \div 10 \text{ km}$

$N_s \Delta s \sim 100 \div 1000 \text{ km}$

Campi «meteo» 3D:

- **Direzione e velocità del vento**
- **Temperatura**
- **Diffusività x,y,z**
- Umidità
- Pressione



**Dati da fornire in PROGNOSI**

## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

Catene operative di previsione della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

$\Delta t \sim 1h$

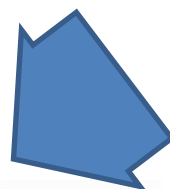
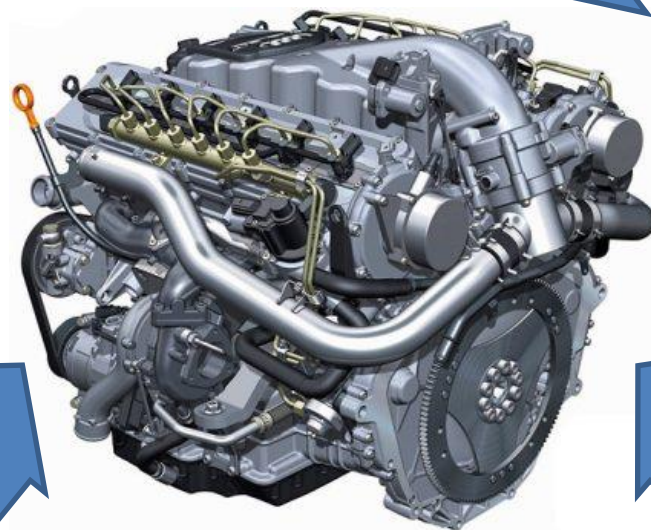
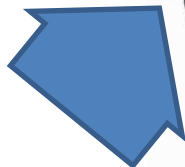
$N_t \Delta t \sim +12h, \dots, +120h$

$\Delta s \sim 1 \div 10 \text{ km}$

$N_s \Delta s \sim 100 \div 1000 \text{ km}$

Campi «meteo» 3D:

- **Direzione e velocità del vento**
- **Temperatura**
- **Diffusività x,y,z**
- Umidità
- Pressione



Campi «meteo» 2D:

- Copertura nuvolosa  
(base, top, water content...)
- Precipitazioni
- Albedo
- Colonna di Ozono  
(previsione dettagliata dei meccanismi di fotolisi, deposizione umida...)



**Dati da fornire in PROGNOSE**



## Catene operative di previsione della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

$\Delta t \sim 1h$

$N_t \Delta t \sim +12h, \dots, +120h$

$\Delta s \sim 1 \div 10 \text{ km}$

$N_s \Delta s \sim 100 \div 1000 \text{ km}$

Campi «meteo» 3D:

- **Direzione e velocità del vento**
- **Temperatura**
- **Diffusività x,y,z**
- Umidità
- Pressione



Campi «meteo» 2D:

- Copertura nuvolosa  
(base, top, water content...)
- Precipitazioni
- Albedo
- Colonna di Ozono  
(previsione dettagliata dei meccanismi di fotolisi, deposizione umida...)

Campi «per ogni specie chimica»:

- Velocità di deposizione (2D)
- **Condizioni al contorno** (lateral e top)
- **Condizioni iniziali** (3D)
- **Emissioni diffuse** (~2D)

**Dati da fornire in PROGNOSE**

## Catene operative di previsione della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

$\Delta t \sim 1h$

$N_t \Delta t \sim +12h, \dots, +120h$

$\Delta s \sim 1 \div 10 \text{ km}$

$N_s \Delta s \sim 100 \div 1000 \text{ km}$

Campi «meteo» 3D:

- **Direzione e velocità del vento**
- **Temperatura**
- **Diffusività x,y,z**
- Umidità
- Pressione



Campi «meteo» 2D:

- Copertura nuvolosa  
(base, top, water content...)
- Precipitazioni
- Albedo
- Colonna di Ozono  
(previsione dettagliata dei meccanismi di fotolisi, deposizione umida...)

Dati «non grigliati»:

- **Emissioni puntuali**
- Emissioni lineari

Campi «per ogni specie chimica»:

- Velocità di deposizione (2D)
- **Condizioni al contorno** (lateral e top)
- **Condizioni iniziali** (3D)
- **Emissioni diffuse** (~2D)

**Dati da fornire in PROGNOSE**





Catene **operative** di **previsione** della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

**Prognosi** dei determinanti meteorologici:

WRF, MM5, RAMS... sono in grado di far **evolvere** la fisica dell'atmosfera  
(date le condizioni iniziali ed al **contorno**)

Catene **operative** di **previsione** della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

**Prognosi** dei determinanti meteorologici:

WRF, MM5, RAMS...

sono in grado di far **evolvere** la fisica dell'atmosfera  
(date le condizioni iniziali ed al **contorno**)



**c'è bisogno di un modello prognostico a scala più ampia!**

Catene **operative** di **previsione** della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

**Prognosi** dei determinanti meteorologici:

WRF, MM5, RAMS... sono in grado di far **evolvere** la fisica dell'atmosfera  
(date le condizioni iniziali ed al **contorno**)



**c'è bisogno di un modello prognostico a scala più ampia!**

**Diagnosi** dei determinanti meteorologici:

CALMET, MINERVE + SURFPRO,... sono in grado di:

- «**stimare parametricamente**» campi legati alla turbolenza
- «**interpolare/estrapolare**» i principali campi meteorologici (vento, temperatura)

Catene **operative** di **previsione** della **Qualità dell'Aria**: dati in ingresso ai **modelli a griglia**

**Prognosi** dei determinanti meteorologici:

WRF, MM5, RAMS... sono in grado di far **evolvere** la fisica dell'atmosfera  
(date le condizioni iniziali ed al **contorno**)



**c'è bisogno di un modello prognostico a scala più ampia!**

**Diagnosi** dei determinanti meteorologici:

CALMET, MINERVE + SURFPRO,... sono in grado di:

- «**stimare parametricamente**» campi legati alla turbolenza
- «**interpolare/estrapolare**» i principali campi meteorologici (vento, temperatura)



**Si può fare «finta prognosi»...**  
**... ma c'è bisogno di un modello prognostico a scala più ampia!**



Valutazione di **specifiche sorgenti**:  
dati in ingresso ai **modelli gaussiani e a puff**



## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria



Valutazione di **specifiche sorgenti**:

AERMOD, CALPUFF, ISC3, CALINE, DIMULA, SPRAY...

Rispettivi **pre-processor** meteorologici:

Punto (e *profilo*):

MPRM(ISC3), PCRAMMET(ISC3), MET(ADMS), ABLE(INFM Genova), AERMET(AERMOD)...

Dominio:

CALMET(CALPUFF), MINERVE+SURFPRO (SPRAY)...





## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria



Valutazione di **specifiche sorgenti**:

AERMOD, CALPUFF, ISC3, CALINE, DIMULA, SPRAY...

Rispettivi **pre-processor** meteorologici:

Punto (e *profilo*):

MPRM(ISC3), PCRAMMET(ISC3), MET(ADMS), ABLE(INFM Genova), AERMET(AERMOD)...

Dominio:

CALMET(CALPUFF), MINERVE+SURFPRO (SPRAY)...

**Questi pre-processor dovrebbero «accontentarsi» di poche misure...**

**Perché è invece così difficile fornire l'input meteorologico ai modelli?!!**



## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria



Valutazione di **specifiche sorgenti**:

AERMOD, CALPUFF, ISC3, CALINE, DIMULA, SPRAY...

Rispettivi **pre-processor** meteorologici:

Punto (e *profilo*):

MPRM(ISC3), PCRAMMET(ISC3), MET(ADMS), ABLE(INFM Genova), AERMET(AERMOD)...

Dominio:

CALMET(CALPUFF), MINERVE+SURFPRO (SPRAY)...

**Questi pre-processor dovrebbero «accontentarsi» di poche misure...**

**Perché è invece così difficile fornire l'input meteorologico ai modelli?!!**

1. Perché disponiamo di misure solo in pochi punti... es: cosa avviene in quota?

Valutazione di **specifiche sorgenti**:

AERMOD, CALPUFF, ISC3, CALINE, DIMULA, SPRAY...

Rispettivi **pre-processor** meteorologici:

Punto (e *profilo*):

MPRM(ISC3), PCRAMMET(ISC3), MET(ADMS), ABLE(INFM Genova), AERMET(AERMOD)...

Dominio:

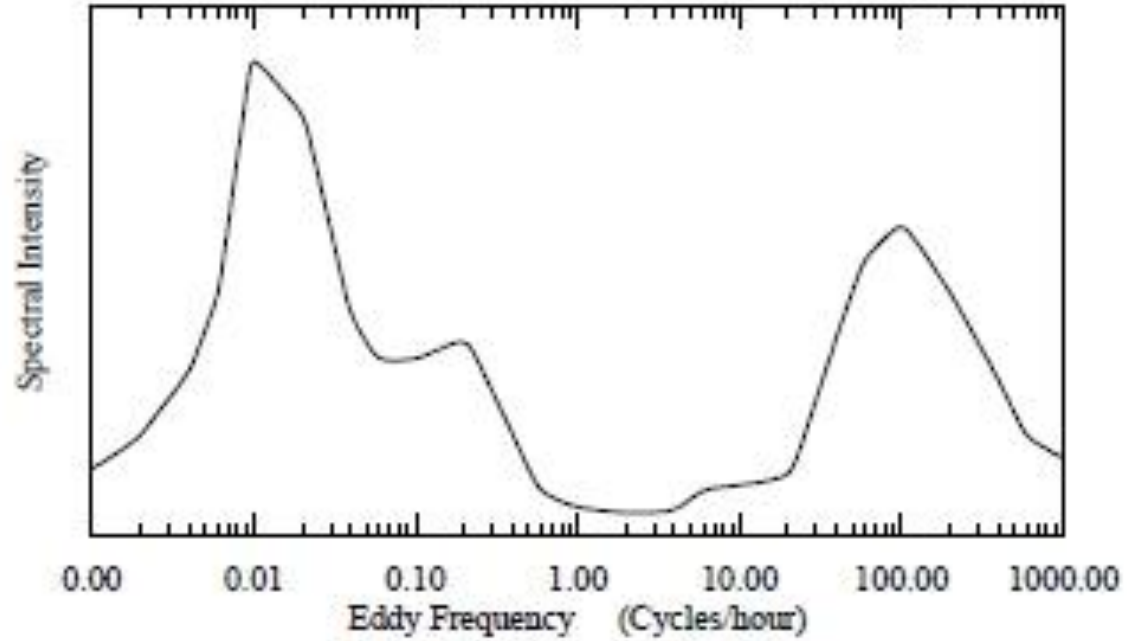
CALMET(CALPUFF), MINERVE+SURFPRO (SPRAY)...

**Questi pre-processor dovrebbero «accontentarsi» di poche misure...**

**Perché è invece così difficile fornire l'input meteorologico ai modelli?!!**

1. Perché disponiamo di misure solo in pochi punti... es: cosa avviene in quota?
2. Perché la capacità dispersiva dell'atmosfera dipende dalla TURBOLENZA...  
e noi chiamiamo **TURBOLENZA** ciò che **NON MISURIAMO** e **NON DESCRIVIAMO** puntualmente!!!

TURBOLENZA = RUMORE



*Fig.2.16: spettro della velocità del vento al suolo.*

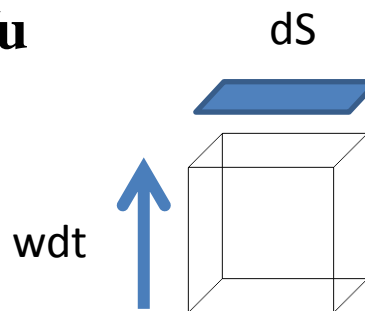
Perché la TURBOLENZA è fondamentale... anche se non la misuriamo?

Esempio: il flusso di “calore sensibile”  
L’atmosfera è come una “pentola sul fuoco”...

- u,v componenti orizzontali della velocità del vento
- w componente verticale

$$\mathbf{q} = \rho C_p T \mathbf{u}$$

$$\left( \begin{array}{l} dQ_w = \rho \cdot C_p \cdot T \cdot dS_w \cdot w \cdot dt \\ \dots \\ \dots \end{array} \right)$$



$$q_w [kW \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}] = \rho C_p T \cdot w \Rightarrow \overline{q_w} = \rho C_p \overline{T} \cdot \overline{w} = 0$$

$\overline{w} = 0$  vicino al suolo!

⇒ il flusso verticale netto di calore è di origine turbolenta  
(c’è anche in assenza di moto *medio* delle masse d’aria)

In una giornata soleggiata, il volumetto di aria che sale è impercettibilmente più caldo di quello che scende un istante dopo...

Dovremmo poter misurare SIMULTANEAMENTE  $w$  e  $T$  a frequenze di 10, 20, 50 Hz

$$H = \overline{q_z} = \rho C_p \sum_i (w_i - \overline{w}) \cdot (T_i - \overline{T})$$

è una covarianza, fra una componente della velocità del vento ed uno scalare

(si fa, con anemometri sonici...)

Roberto Sozzi, *La Micrometeorologia e la Dispersione degli Inquinanti in Aria*, APAT, RTI CTN\_ ACE XX/2003 (2004):

ipotesi di Reynolds, ergodicità, stazionarietà...



Allo stesso modo, l'allargamento di un pennacchio dipende dalla turbolenza

Vento medio -> <b>Trasporto</b>	(Segnale)	(Misura)
<hr/>		
Turbolenza -> <b>Diffusione</b>	(Rumore)	(Stima parametrica)

Le  $\sigma$  di un pennacchio gaussiano sono legate alla varianza delle 3 componenti del vento

- ⇒ Bisogna legarla parametricamente a variabili misurate
- ⇒ Relazioni semi-empiriche

- Ci interessa conoscerne la distribuzione anche in quota
- ⇒ Bisogna legarla parametricamente a variabili misurate
- ⇒ Relazioni semi-empiriche





Il grosso sforzo dei modelli di dispersione gaussiani e a puff è proprio nella **PARAMETRIZZAZIONE**, per avere un modello ANALITICO (NON NUMERICO)... appunto, una semplice GAUSSIANA!

A tal fine...

i modelli più recenti basano la descrizione dello Strato Limite Planetario (PBL) sulla Teoria della Similarità di Monin-Obukhov

i modelli più datati utilizzano piuttosto le classi di stabilità di Pasquill-Gifford

In tutti i casi...

servono informazioni relative al **bilancio radiativo**, anche notturno

(radiazione netta, copertura nuvolosa...)



## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria



Roberto Sozzi, *La Micrometeorologia e la Dispersione degli Inquinanti in Aria*, APAT, RTI CTN\_ACE XX/2003 (2004):

EPA (2000): *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina, EPA-454/R-99-005

## Quanto fare «in casa» e quanto acquistare «beni» o servizi?

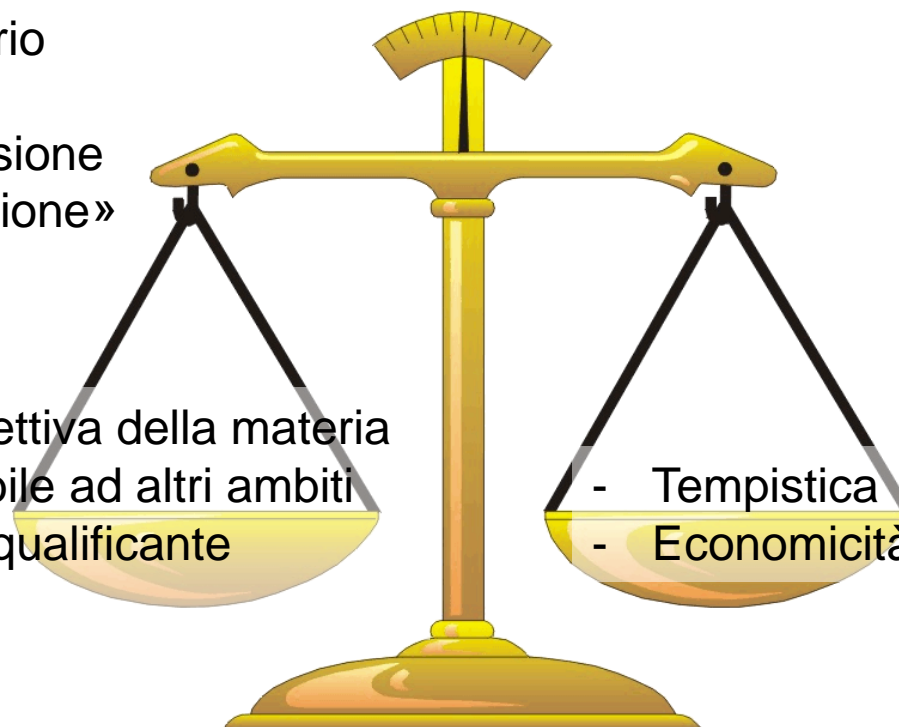
I «motori» non conviene certamente costruirli...!

Quanto al resto...

- Popolamento inventario
- Run modelli meteo
- Run modelli di dispersione
- Software di «connessione»

### Pro «in casa»:

- Consapevolezza effettiva della materia
- Esperienza esportabile ad altri ambiti
- Lavoro motivante e qualificante
- Diversità biologica



### Pro esternalizzazione:

- Tempistica
- Economicità (sul medio periodo)

### Fattori INCERTI:

- Economicità (sul lungo periodo)
- Qualità



## Risorse

### **EPA SCRAM:**

<http://www.epa.gov/ttn/scram/>

(NB: Title 40, Code of Federal Regulations (CFR) section 51, Appendix W... **per le VIA!!**)

### **In Europa...**

#### **comunità:**

FAIRMODE, Forum for Air quality Modelling

HARMO, Initiative on "Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes"

#### **azioni:**

COST 715 - Urban meteorology applied to air pollution problems

COST 728 - Enhancing meso-scale meteorological modelling capabilities for air pollution and dispersion applications

FP5 FUMAPEX - Integrated Systems for Forecasting Urban Meteorology, Air Pollution and Population Exposure



## Cos'è il PBL?

## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

### Planetary Boundary Layer (PBL)

Lo Strato Limite Planetario o Planetary Boundary Layer (PBL) è quella porzione di Troposfera a diretto contatto con la superficie terrestre prevalentemente interessata dall'Inquinamento Atmosferico.

Stull, 1989:

Essa può anche essere definita come quella porzione di Troposfera direttamente influenzata dalla superficie terrestre, che risponde all'immissione di energia da essa proveniente con scale temporali dell'ordine dell'ora.

Beyrich, 1997:

l'altezza di rimescolamento è l'altezza di quello strato di atmosfera adiacente al suolo in cui gli inquinanti o ogni altro costituente emesso nel suo interno o inglobato per entrainment diviene ben rimescolato o per convezione o per turbolenza meccanica con un tempo di scala dell'ordine dell'ora.

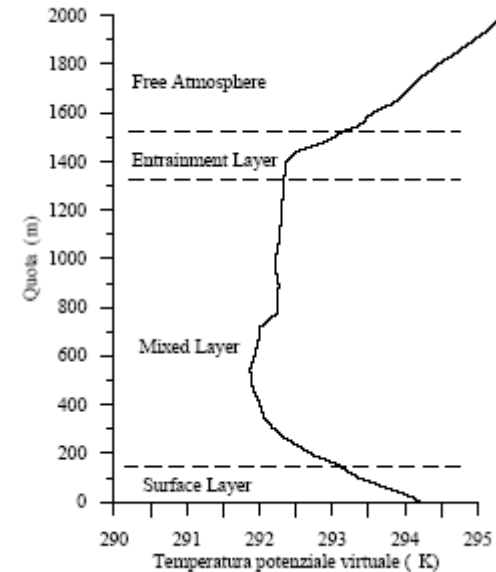
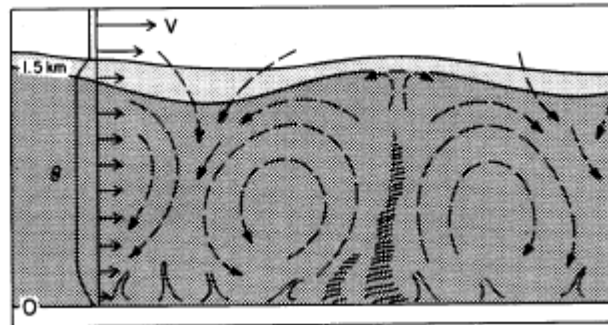
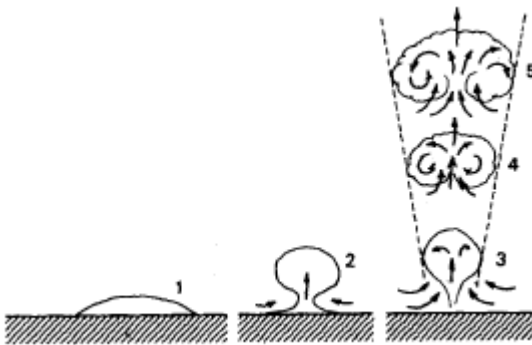
# Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

## Planetary Boundary Layer (II)

Turbolenza meccanica: vortici di dimensione limitata

Turbolenza di tipo convettivo:

- l'aria sopra superfici particolarmente calde dà origine ad una bolla (~ centinaia di metri), internamente instabile ed inizialmente appiattita al suolo (stadio 1)
- essa inizia a contrarsi e ad assumere una forma sempre più sferica (stadio 2)
- si innalza entro il PBL, mossa dalla forza di galleggiamento (stadio 3).
- la bolla inizia il processo d'inglobamento (entrainment) dell'aria fredda circostante (stadio 4)
- l'aumento dimensionale e l'abbassamento della sua temperatura media comportano la diminuzione della spinta di galleggiamento e l'aumento della resistenza aerodinamica
- la velocità di ascesa del thermal diminuisce progressivamente fino ad arrestarsi (stadio 5).



## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

### Planetary Boundary Layer (III)

Boundary Layer: nel moto di un fluido viscoso sopra una superficie, è lo strato all'interno del quale sono presenti i disturbi legati alla superficie (ovvero: gradiente della velocità e, se il moto non è laminare, fenomeni turbolenti).

Nel caso del Boundary Layer Planetario, la turbolenza ha origine anche (o soprattutto) dal riscaldamento del suolo (forzante convettiva).

La definizione dell'estensione di tale strato cambia a seconda dei fenomeni che si intendono considerare:

- nel caso convettivo, importa riconoscere:
  - altezza dello Strato Rimescolato (Mixed Layer, ML)
  - altezza dello Strato di Entrainment (EL)
- nel caso stabile:
  - estensione dello strato sede di turbolenza (di origine meccanica)
  - estensione dello strato di inversione



## Planetary Boundary Layer (IV)

Stratificazione del Boundary Layer convettivo:

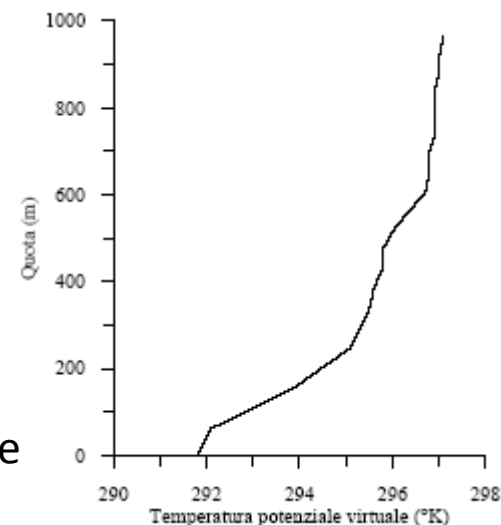
- *Strato Superficiale (Surface Layer, SL):*
  - si estende fino ad una quota dell'ordine dei 100m;
  - in esso la temperatura potenziale diminuisce con la quota, evidenziando uno stato di *instabilità statica*;
  - vi sono concentrati la maggior parte degli effetti di *shear*;
- *Strato Rimescolato (Mixed Layer, ML):*
  - temperatura potenziale praticamente costante (*adiabaticità statica*);
  - nessun ostacolo al proprio moto ascensionale dei vortici caldi, salvo la resistenza aerodinamica;
- *Strato di Entrainment (EL):*
  - infiltrazione dell'aria dagli strati superiori e dissoluzione dei vortici convettivi;
  - forte gradiente positivo di temperatura potenziale;

## Planetary Boundary Layer (V)

### Boundary Layer stabile:

- situazione tipica notturna;
- turbolenza solo meccanica;
- in parte inibita dal raffreddamento dell'atmosfera, più intenso vicino al suolo;
- lo *SBL* non presenta un limite superiore ben definito
- la sommità dello *SBL* viene definita come quella quota in cui l'intensità della turbolenza è inferiore ad una piccola frazione del valore assunto in superficie o come lo strato di atmosfera con il maggior gradiente termico

- gli inquinanti vengono debolmente dispersi
- possono rimanere intrappolati vicino alla superficie



# Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

## Flusso di calore sensibile (flusso turbolento per *convezione nel Surface Layer*)

- $w$  componente verticale della velocità del vento;
- $\theta$  temperatura potenziale;

$$H = \rho C_p \overline{w' \theta'}$$

## Velocità di scala dello Strato Superficiale (indicatore delle *fluttuazioni turbolente del vento nel Surface Layer*)

- $u, v$  componenti orizzontali della velocità del vento;

$$u^* = \left[ \overline{u' w'^2} + \overline{v' w'^2} \right]^{1/4}$$

legata al Flusso (turbolento) verticale della Quantità di Moto vicino alla superficie

( $\rho u^*$  è il flusso turbolento della Quantità di Moto)

## Lunghezza di Monin-Obukhov

$$\frac{1}{L} = - \frac{kg}{\langle T \rangle} \frac{H}{\rho C_p u_*^3}$$

essendo:

$g$  l'accelerazione di gravità

$k$  la costante di von Karman, pari a 0.4 (adimensionale)

$\langle T \rangle$  la temperatura media nello Strato Superficiale (SL)

$L$ , in valore assoluto, rappresenta la quota alla quale si ha il bilancio fra la turbolenza meccanica e la turbolenza termicamente indotta. Tale valore è, dunque, dello stesso ordine di grandezza dell'estensione verticale del SL

## Teoria della Similarità di Monin-Obukhov

- Modello derivato da un'enorme mole di osservazioni
- Applicabile in situazioni di:
  - omogeneità orizzontale
  - quasi-stazionarietà
- Si riferisce al solo SL (esiste l'estensione all'intero PBL)
- Vi si prevede che, per alcuni momenti statistici (medie, varianze, covarianze e momenti di ordine superiore di alcune variabili), valga una relazione del tipo:

$$f(z)/f_0 = F(z/L)$$

essendo:

- $f$  un generico momento
- $z$  la quota
- $L$  la lunghezza di Monin-Obukhov
- $f_0$  un parametro di scala
- $F$  è una Funzione Universale di Similarità, diversa per ciascun momento e variabile meteorologica

## Teoria della Similarità di Monin-Obukhov (I)

Alcune delle variabili che ubbidiscono alla Teoria della Similarità sono:

- velocità media del vento
- temperatura potenziale media
- umidità specifica media
- varianza della componente verticale del vento
- varianza della temperatura potenziale
- tasso di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta

NON vi obbedisce, per esempio, la varianza delle componenti orizzontali del vento (dipende dall'estensione verticale del PBL)

Velocità media orizzontale del vento:  
Relazione di Similarità

$$u(z)/u_* = \frac{1}{k} \left( \ln \left( \frac{\zeta}{z_0/L} \right) - \Psi_m(\zeta) \right)$$

=> Dati  $u^*$  (parametro di scala) ed  $L$  (~ per 1 ora), noti  $d$  e  $z_0$ , stimo il profilo verticale del vento alle quote  $z$

essendo :  $\zeta = \frac{z-d}{L}$

- $d$  è la *displacement height*;
- $z_0$  la rugosità superficiale;

per situazioni convettive ( $\zeta < 0$ ):

$$\Psi_m(\zeta) = \ln \left( \frac{1+x^2}{2} \left( \frac{1+x}{2} \right)^2 \right) - 2 \tan^{-1} x + \frac{\pi}{2}$$

essendo :  $x = (1-16\zeta)^{\frac{1}{4}}$

per situazioni stabili ( $\zeta > 0$ ):

$$\Psi_m(\zeta) = -5\zeta \quad \text{per } 0 < \zeta < 1$$

$$\Psi_m(\zeta) = -17(1 - \exp(-0.29\zeta)) \quad \text{per } \zeta \geq 1$$



## Elementi essenziali della modellistica per la qualità dell'aria

### Dispersione degli inquinanti: parametri legati alla Teoria della Similarità del PBL

I seguenti parametri vanno ricostruiti, a partire da osservazioni meteorologiche:

- velocità di frizione,  $u^*$  (indicatore della intensità della turbolenza di tipo meccanico)
- flusso di calore latente,  $H$  (indicatore della intensità della turbolenza di tipo convettivo)
- estensione verticale del PBL convettivo,  $z_i$

Variabili accessorie (non indipendenti dalle precedenti):

- lunghezza di Monin-Obukhov,  $L$  (parametro di scala)
- temperatura di scala  $T^*$

Inoltre, i parametri morfologici del sito in esame:

- lunghezza di rugosità del terreno  $z_0$  e *displacement height* (parametri di scala legati alla presenza di vegetazione e manufatti)
- possono a loro volta essere ricavati da osservazioni meteorologiche.

### Flusso di calore sensibile ed equazione del bilancio energetico superficiale

E' il calore che si rende disponibile alla superficie e che causa i moti turbolenti convettivi (forzante convettiva):

$$R_N = G + H_E + H$$

essendo:

- $R_N$  la radiazione netta incidente (sorgente di energia)
- $G$  il flusso di calore nel suolo (energia che passa al suolo)
- $H_E$  il flusso di calore latente (energia incamerate con l'evaporazione)
- $H$  il flusso di calore sensibile

Il bilancio viene stimato sulla base di varie parametrizzazioni (modello di Penman-Monteith, di origine agronomica, ed altre leggi empiriche)

## Flusso di calore sensibile ed equazione del bilancio energetico superficiale

- Holtslag A.A.M., Van Ulden A.P. (1983): *A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data*, J. Clim. Appl. Meteor., **22**; 517-529
- Holtslag, A.A.M. (1984): *Estimates of Diabatic Wind Speed Profiles From Near Surface Weather Observations*, Bound-Layer Meteor., **29**; 225-250
- Van Ulden A.P., Holtslag A.A.M. (1985): *Estimation of atmospheric boundary layer parameters for diffusion applications*, J. Clim. Appl. Meteor., **24**(11); 1196-1207
- Byun, W.B. (1990): *On the Analytical Solution of Flux-Profile Relationships for the Atmospheric Surface Layer*, J. Appl. Meteor., **29**(7); 652-657
- De Bruin H.A.R., A.A.M. Holtslag (1982): *A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman-Monteith concept* - J. Appl. Meteor. **21**; 1610-1621
- Hanna S.R., J.C. Chang (1992): *Boundary layer parameterizations for applied dispersion modeling over urban areas* – Bound. Layer Meteor., **58**, 229-259
- Galinski, A.E. and Thomson, D.J., 1995: Comparison of three schemes for predicting surface sensible heat flux. *Boundary-Layer Meteorol.*, **72**, 345-370
- ... Nielsen (1981), Holtslag (1999), Santaniello (2003) **ed altre!!**