

Introduzione ai modelli meteorologici

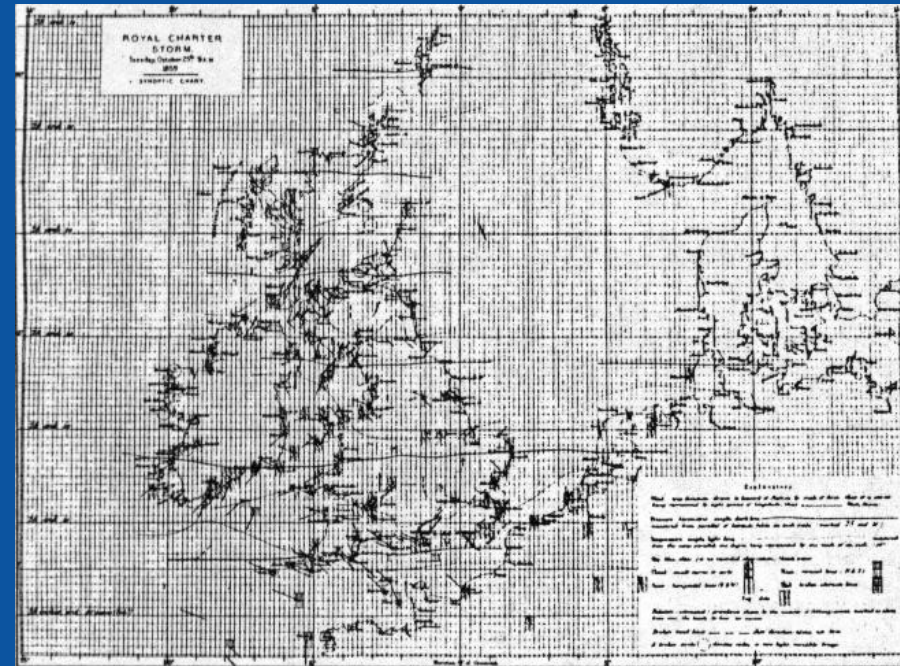
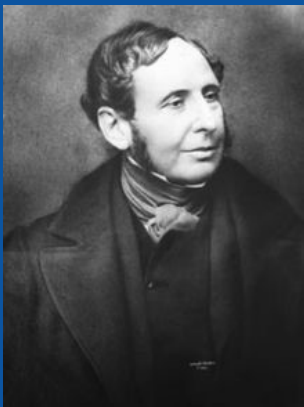
Federico Cassola
Centro Funzionale Meteo-idrologico di Protezione Civile - ARPAL

Genova, 22 marzo 2021

Dal dato alla previsione: le mappe sinottiche

Mappe disegnate a mano a partire dalle osservazioni sparse sul territorio, sviluppo dei primi modelli concettuali (cicloni, fronti...)

In Europa uno dei pionieri delle mappe sinottiche fu l'ammiraglio Robert Fitzroy (1805-1865), il comandante del Beagle su cui viaggiò intorno al mondo Charles Darwin



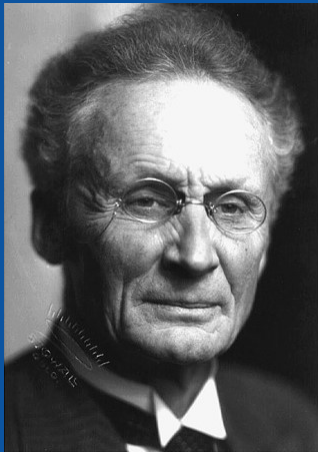
A Fitzroy si deve tra l'altro la pubblicazione delle prime previsioni del tempo sui giornali dell'epoca, per i cui fallimenti venne aspramente criticato tanto da essere indotto al suicidio

Le leggi fisiche fondamentali

Nel XIX secolo lo sviluppo della fluidodinamica e della termodinamica pongono le basi della meteorologia scientifica:

- Navier e Stokes completano le equazioni di Eulero che descrivono la dinamica dei fluidi
- Introduzione della forza di Coriolis
- Importanza del primo principio della termodinamica e della legge di stato dei gas per la descrizione dell'atmosfera (Kelvin e Helmholtz)

Un problema deterministico

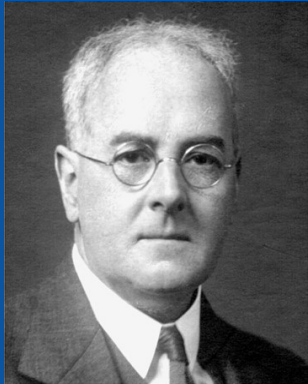


1904 Vilhelm Bjerknes (1862-1951) pone le basi matematiche della previsione numerica del tempo meteorologico

Bjerknes riconosce che la previsione del tempo è un problema deterministico ai valori iniziali. Questo richiede:

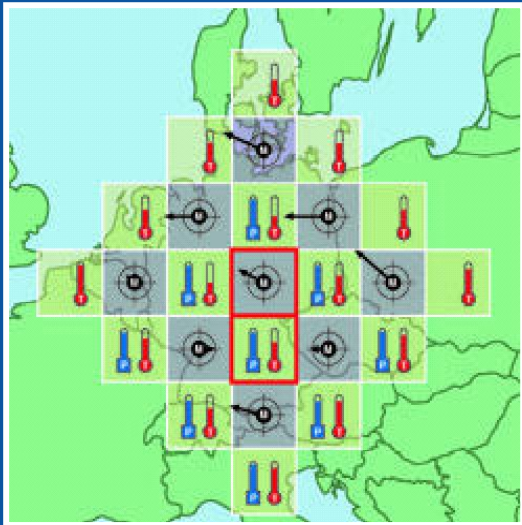
- La conoscenza con sufficiente precisione dello stato dell'atmosfera a un certo istante
- La conoscenza con sufficiente precisione delle leggi che governano l'evoluzione dell'atmosfera

Il tentativo di Richardson



1916-1923 Lewis Fry Richardson (1862-1951) risolve numericamente (a mano!) le equazioni differenziali dell'atmosfera

Tentativo di previsione della pressione superficiale sull'Europa centrale a +6 ore: clamoroso fallimento per motivi di instabilità numerica



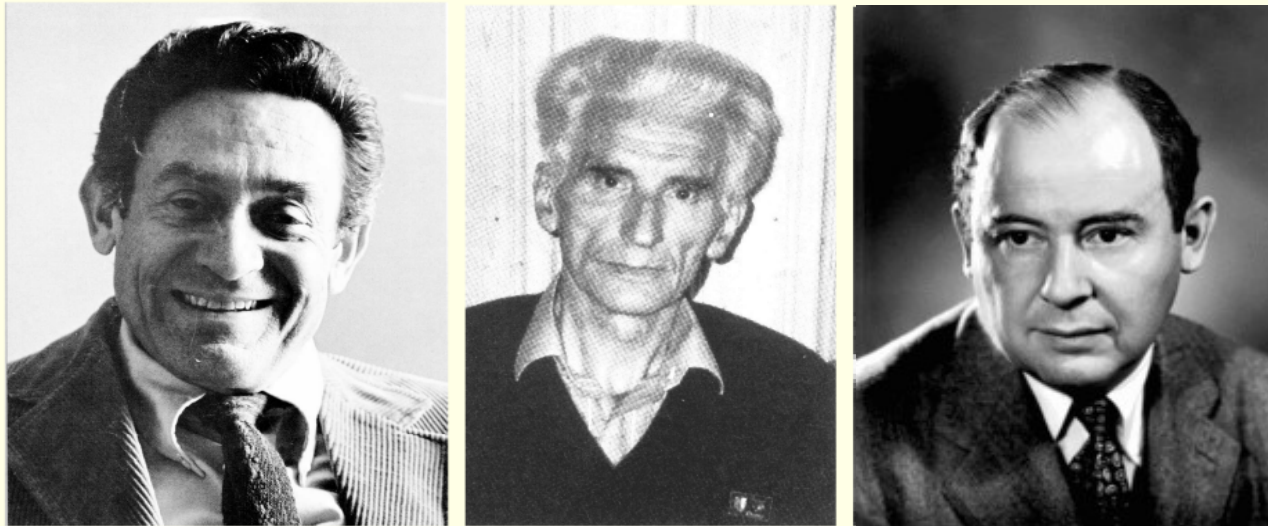
La «fabbrica del tempo»:
64000 matematici al
lavoro per fornire
previsioni in tempo utile!

"Perhaps some day in the dim future it will be possible to advance the calculations faster than the weather advances. But that is a dream."

La prima previsione numerica

- 1930 prime misure meteorologiche in quota
- 1948 Jule Gregory Charney (1917-1981) introdusse le approssimazioni “geostrofica” e “idrostatica”
- 1950 John von Neumann (1903-1957) invitò un gruppo di meteorologi allo Institute of Advanced Studies a Princeton (USA).
- 1950 Charney, Ragnar Fjortoft e von Neumann realizzarono la prima vera previsione numerica a 500 hPa

Charney, Fjørtoft, von Neumann

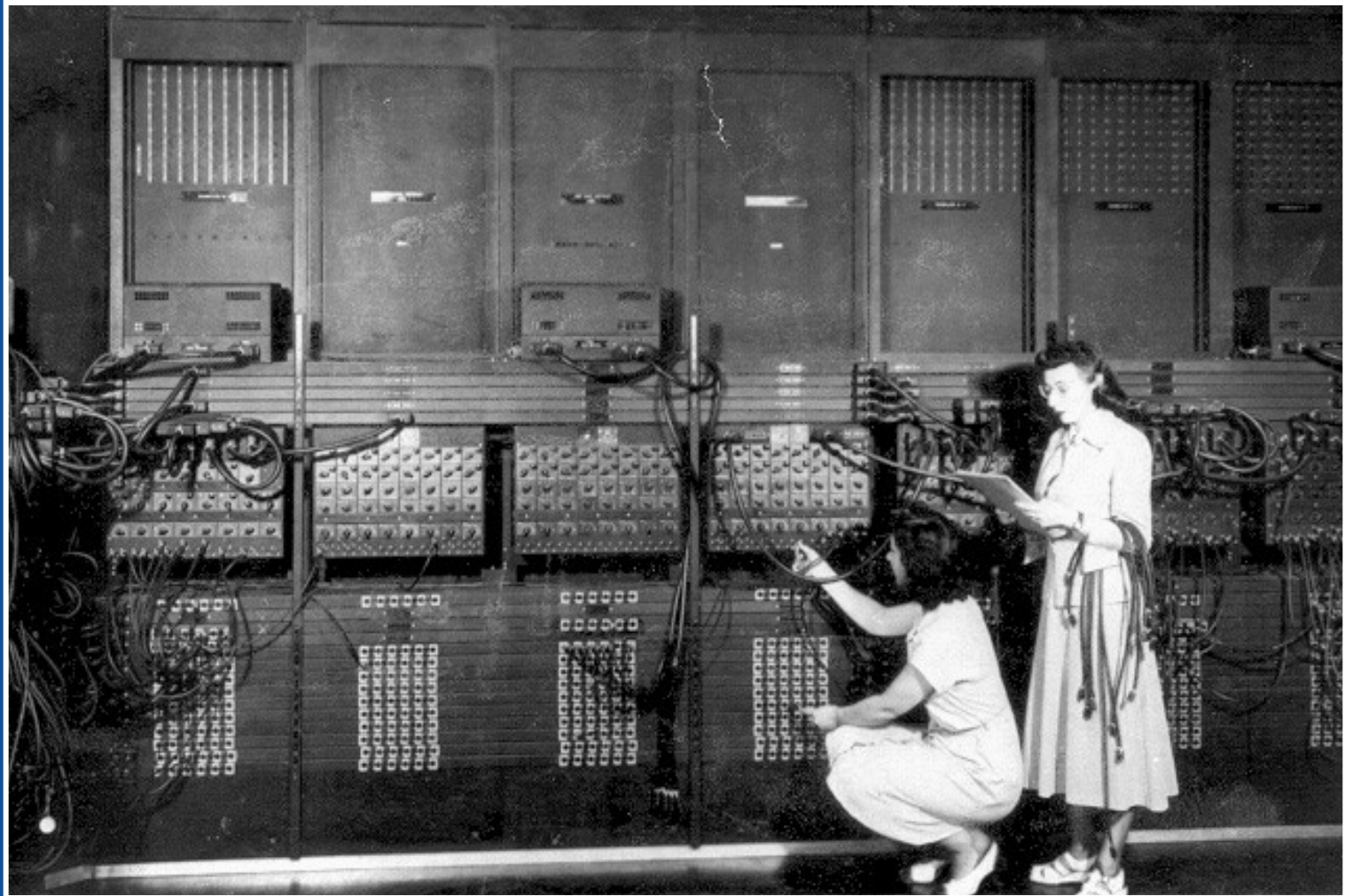


Charney, J.G., R. Fjørtoft and J. von Neumann, 1950:
Numerical integration of the barotropic vorticity equation.
Tellus, 2, 237–254.

39

- La prima previsione corretta dell'altezza di geopotenziale a 500 hPa con un modello semplificato barotropico equivalente sul calcolatore ENIAC (1950).

Electronic Numerical Integrator And Computer ENIAC



Verso l'era contemporanea

- 1955 Introduzione di modelli baroclini tridimensionali, prime previsioni numeriche operative negli USA
- 1960's Introduzione delle «equazioni primitive», più accurate per descrivere moti in atmosfera su scale più piccole di 1000 km (Hinkelmann e Phillips)
- 1973 Fondazione dello ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts) a Reading (UK)
- 1979 Prima previsione a medio termine prodotta da ECMWF con il supercomputer CRAY1

Numerical Weather Prediction

La meteorologia dinamica fornisce la base teorica e la metodologia per la moderna previsione numerica del tempo.

L'obiettivo della previsione numerica è quello di ottenere uno stato futuro del sistema atmosferico a partire dalla conoscenza di uno stato iniziale, integrando attraverso approssimazioni numeriche le equazioni dinamiche.

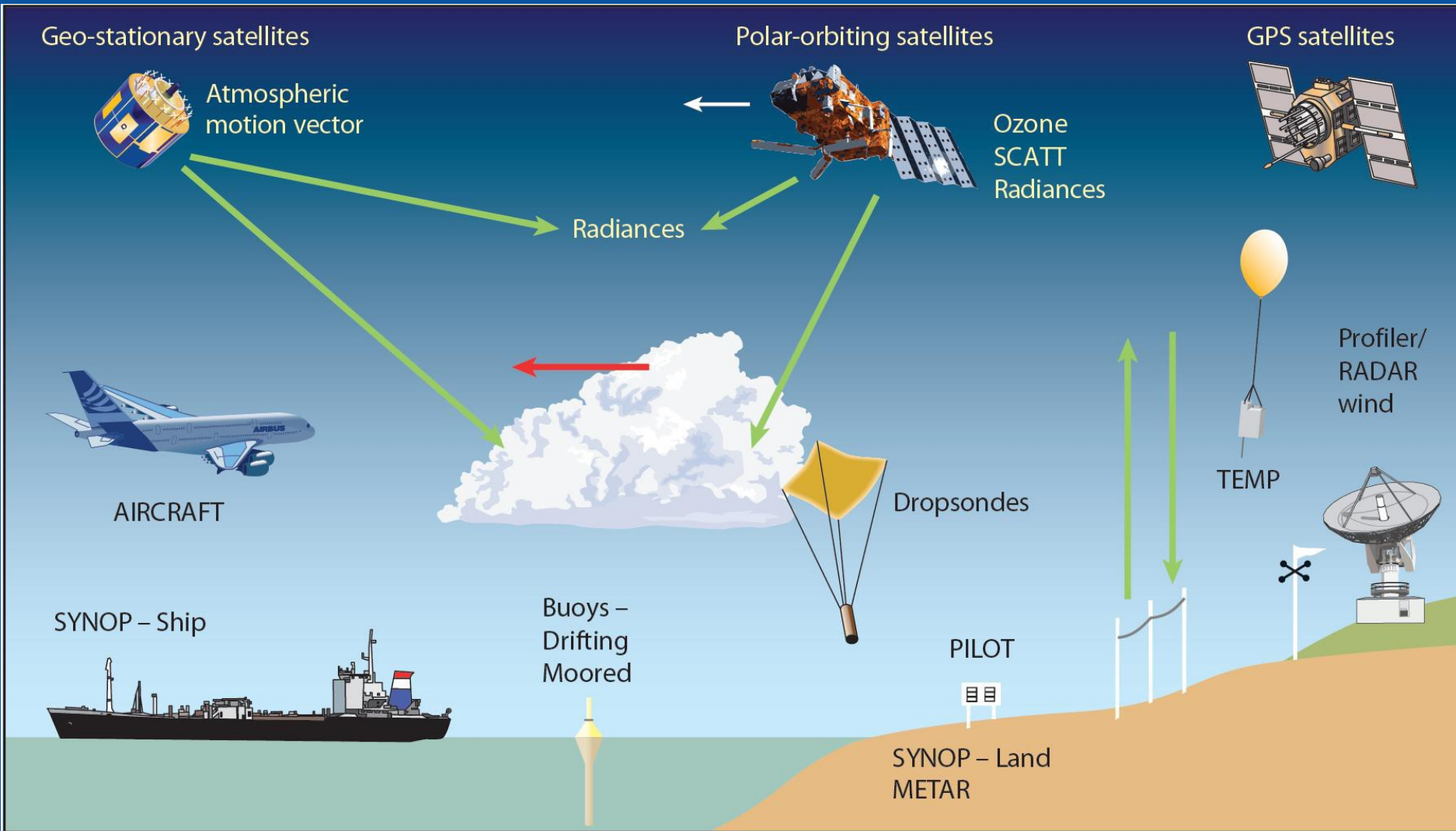
Sono quindi necessari i valori osservati delle variabili in gioco all'istante iniziale, un set chiuso di equazioni e metodi e strumenti adeguati per l'integrazione delle stesse.



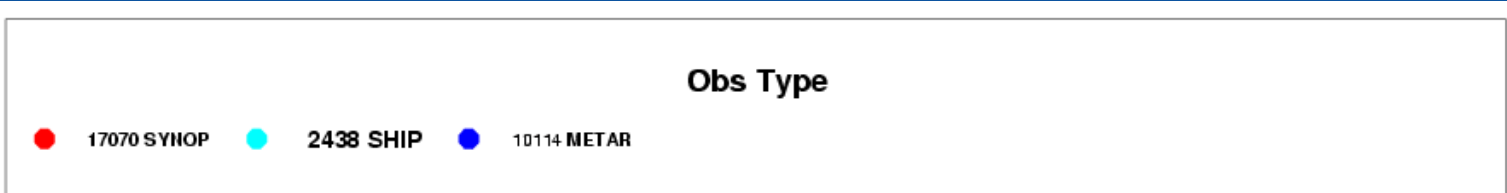
Caratteristiche principali di un modello

- Condizioni iniziali
- Core dinamico
 - Equazioni fondamentali
 - Schemi numerici
- Parametrizzazione dei processi fisici
- Post-processing e verifica

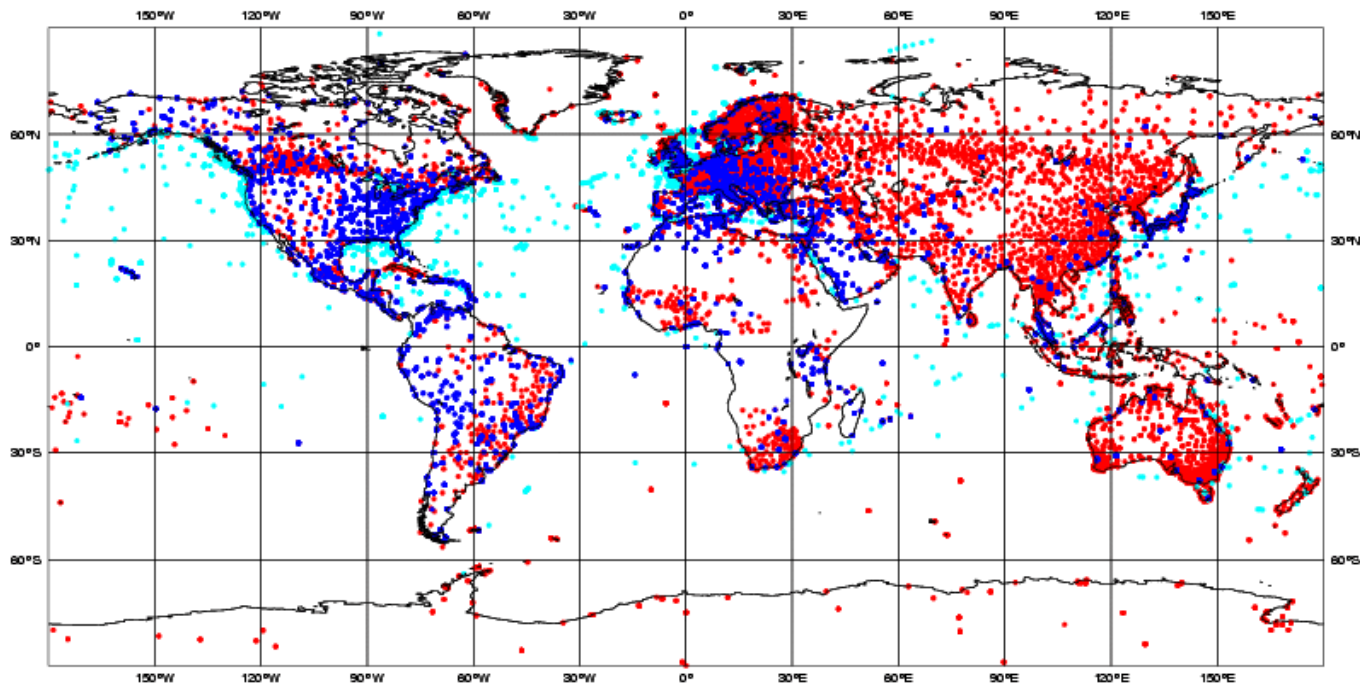
Le osservazioni in atmosfera



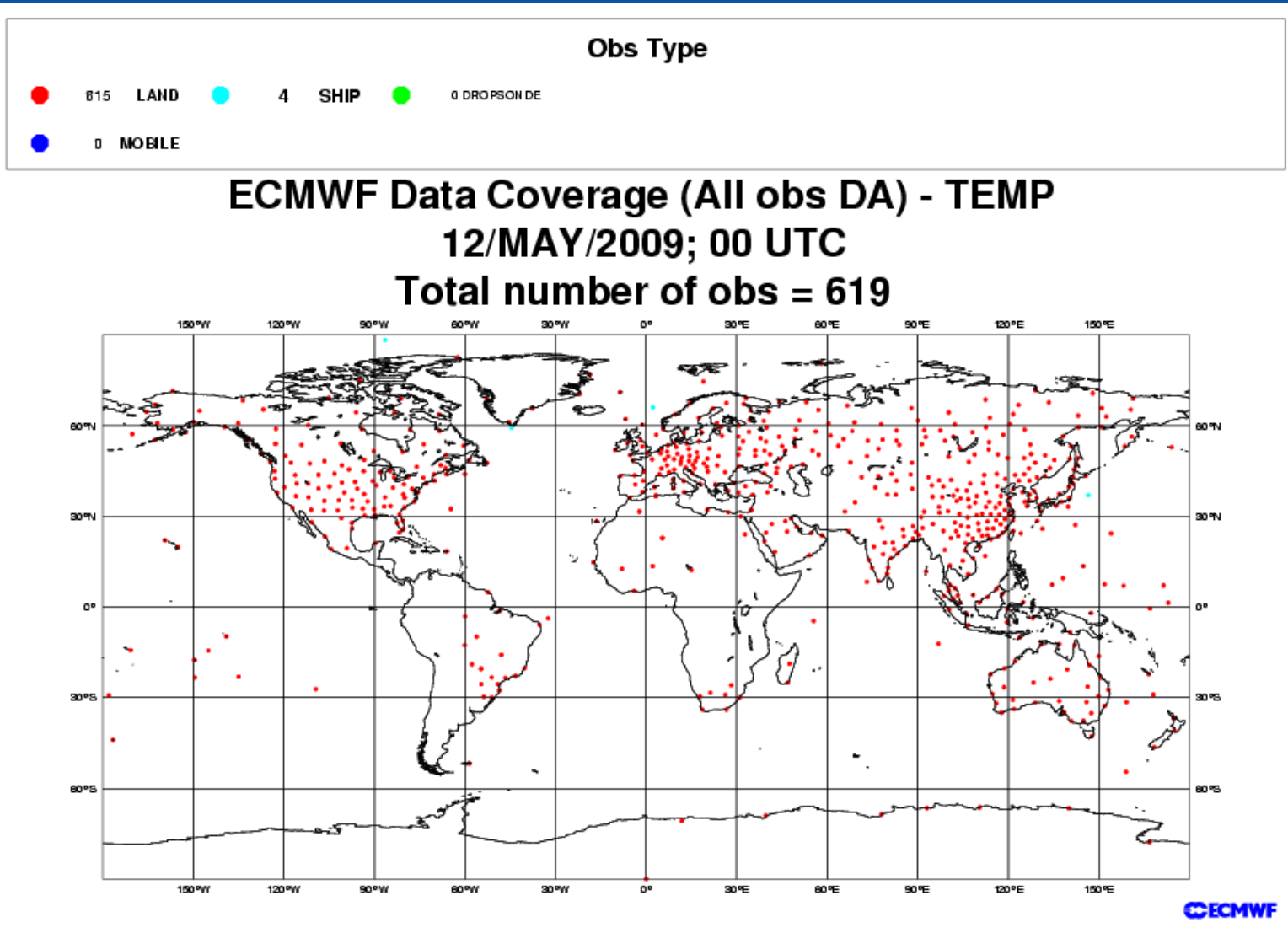
Le osservazioni in atmosfera



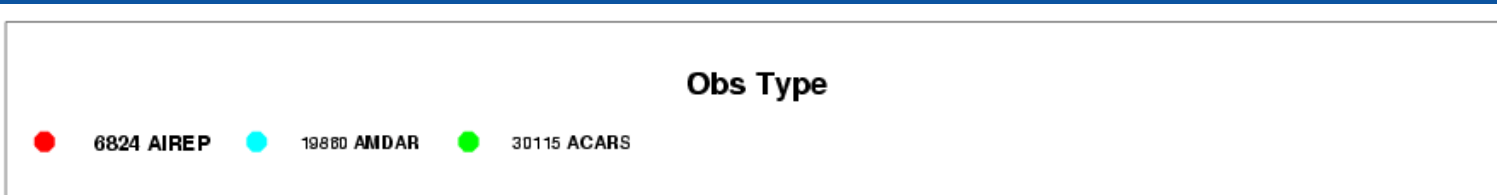
ECMWF Data Coverage (All obs DA) - SYNOP/SHIP
12/MAY/2009; 00 UTC
Total number of obs = 29622



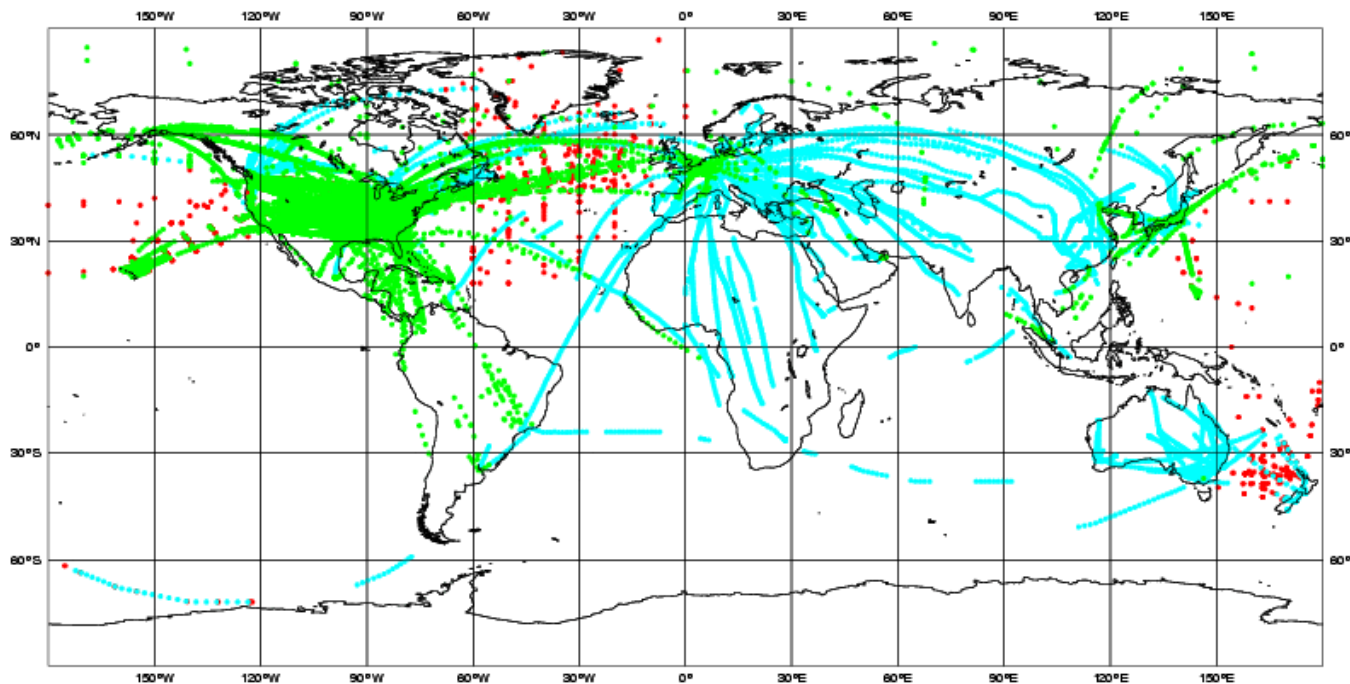
Le osservazioni in atmosfera



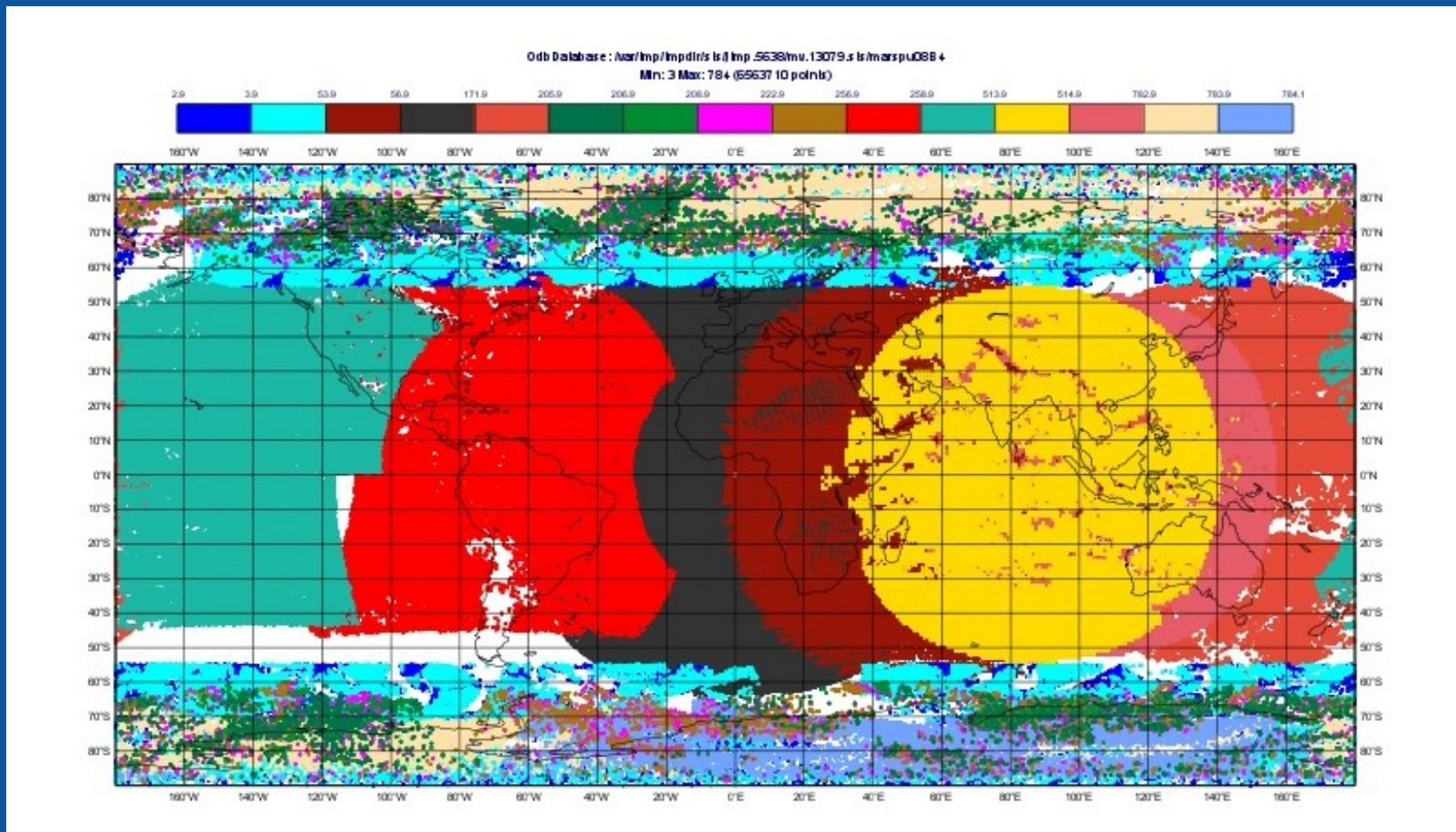
Le osservazioni in atmosfera



ECMWF Data Coverage (All obs DA) - AIRCRAFT
12/MAY/2009; 00 UTC
Total number of obs = 56799



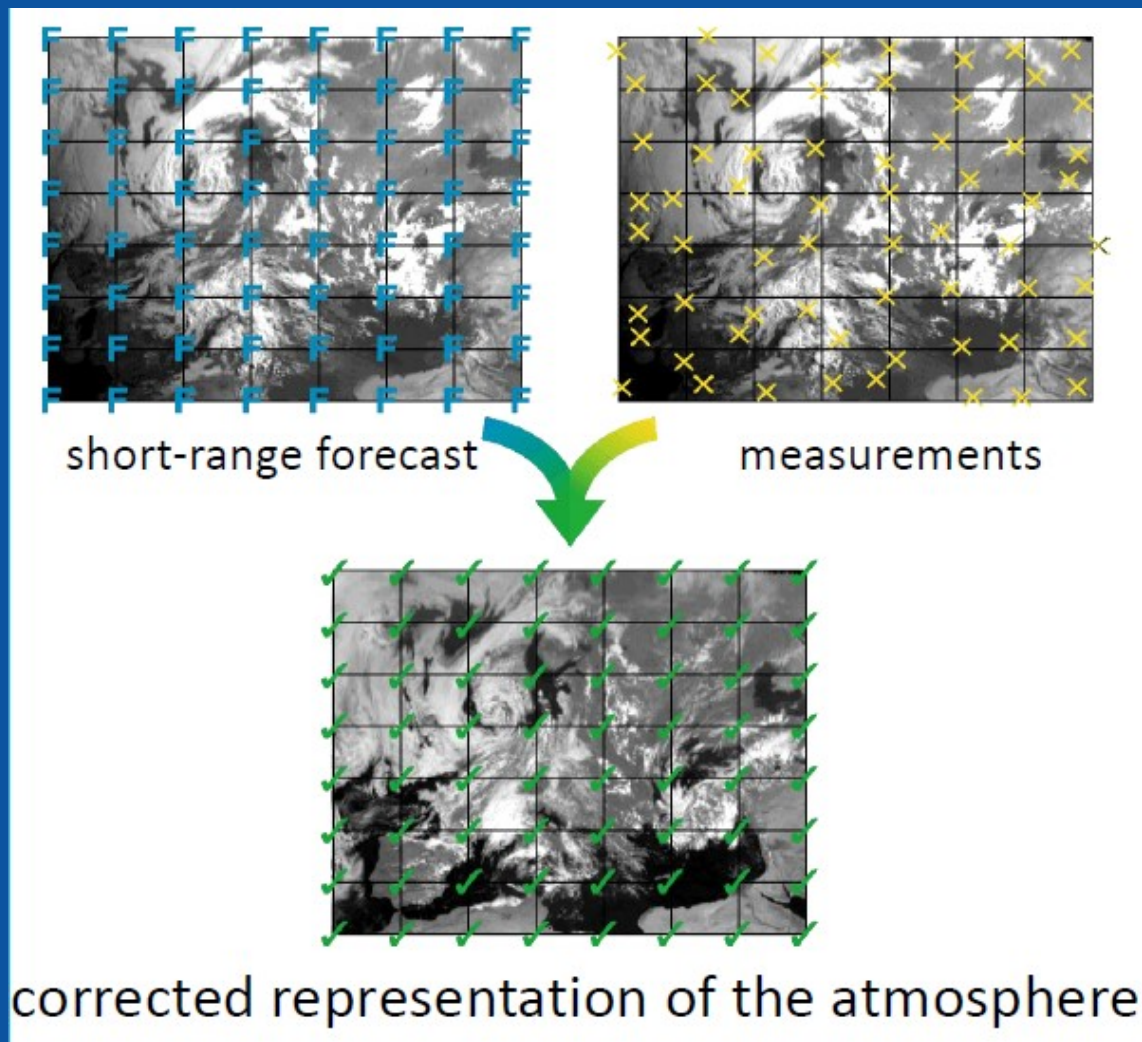
Le osservazioni in atmosfera



~ 10^7 dati disponibili

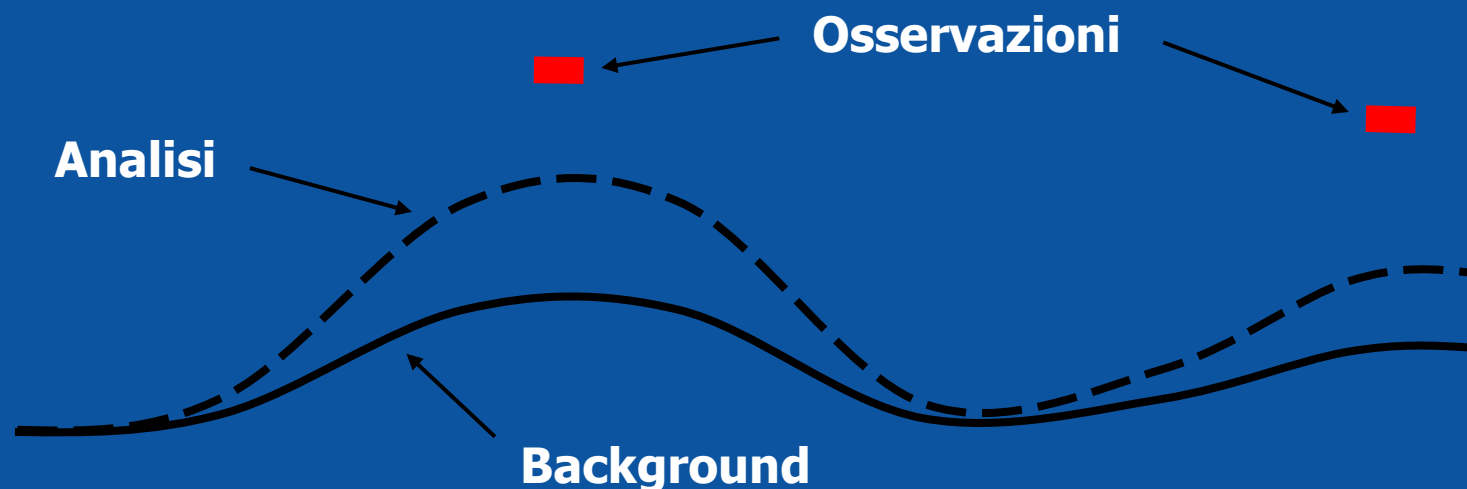
~ 10^9 dati necessari

Assimilazione dati



- I “buchi” nelle osservazioni sono riempiti usando previsioni a breve termine
- Con una interpolazione in 4 dimensioni (spazio e tempo) le misure più recenti di temperature, vento e umidità sono impiegate per migliorare la rappresentazione della realtà da parte del modello
- Questa operazione richiede una potenza di calcolo simile o superiore a quella necessaria per l'intera previsione

Analisi: interpolazione statistica tra il background (first guess) e le osservazioni disponibili



Come background viene usata una previsione a breve termine della corsa più recente. Un ciclo continuo di data assimilation prevede tipicamente 4 analisi al giorno (00, 06, 12, 18). L'analisi va "inizializzata" in modo che i suoi campi siano bilanciati tra loro (rispettando equazioni semplificate), per non far innescare onde spurie.

Approcci all'assimilazione dati

- **Nudging:** Aggiunta di un termine alle equazioni del modello per forzare le variabili verso i valori misurati, con velocità di rilassamento dipendente dal rapporto fra gli errori delle misure e quelli del modello
- **Optimal Interpolation:** minimizzazione dell'errore dell'analisi a partire dagli errori del background e delle osservazioni
- **Sistemi variazionali:** minimizzazione di una *cost function* che rappresenta la somma delle distanze fra l'analisi e le misure e il background, pesate con i rispettivi errori (matrici di covarianza)
- **Filtro di Kalman:** simile a OI o sistemi variazionali, ma con la matrice di covarianza del background prevista in modo esplicito (riferimento teorico)
- **Ensemble Kalman Filters:** schemi che utilizzano tecniche di ensemble per stimare l'evoluzione degli errori del modello

Le equazioni fondamentali

- Le equazioni risolte dai modelli meteorologici sono dette **equazioni primitive** e derivano da alcuni principi di conservazione e alcune approssimazioni

Principi di conservazione

- conservazione della **quantità di moto**;
- conservazione della **massa**;
- conservazione dell'**energia** (primo principio termodinamica);
- conservazione dell'**acqua** (mixing ratio) in varie forme;
- conservazione di altre **sostanze gassose e aerosol**.

Le equazioni fondamentali

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\alpha\nabla p - \nabla\Phi - 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad \text{Eq. moto}$$

$$\dot{q} = c_p \frac{dT}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt} \quad \text{Primo principio}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad \text{Eq. continuità}$$

$$p\alpha = RT \quad \text{Eq. gas}$$

$$\frac{d}{dt} m_w = E - C \quad \text{Conservazione } H_2O$$

Le equazioni fondamentali

Nelle equazioni del moto sono inclusi termini per descrivere:

- **Effetti dell'attrito** (al bordo inferiore);
- **Trasporto turbolento** orizzontale e verticale di quantità di moto

Nell'equazione per l'energia il termine diabatico \dot{q} include:

- **Flusso di calore sensibile** – legato a differenze di temperatura;
- **Riscaldamento radiativo**;
- **Flusso di calore latente** – legato a cambi di fase dell'acqua come evaporazione sul mare, condensazione nelle nubi ed evaporazione della precipitazione.

I termini di sorgente e pozzo nell'equazione dell'umidità sono:

- **Evaporazione** (dalla superficie terrestre, dal mare, dai laghi, vegetazione, ma anche dalla precipitazione che cade).
- **Condensazione e precipitazione** (stratiforme e convettiva);

L'approssimazione idrostatica

L'equazione del moto lungo la verticale si scrive come:

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

e le **accelerazioni verticali** sono calcolate esplicitamente

Come abbiamo visto per i moti orizzontali su larga scala le accelerazioni verticali sono trascurabili e l'equazione si riduce al **bilancio idrostatico**:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

L'approssimazione idrostatica

$$\frac{Dw}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Dinamicamente, in un modello idrostatico, l'aggiustamento verticale è istantaneo: una variazione di temperatura in quota è immediatamente avvertita come una variazione di pressione alla superficie (equazione ipsometrica che lega temperature e spessore di uno strato).

Nell'atmosfera reale, non idrostatica, l'influenza di un cambio di temperatura si propaga a una velocità finita nella colonna. Un modello non idrostatico riproduce questo processo di rapido aggiustamento invece di imporre una variazione istantanea.

Per descrivere in modo opportuno i moti verticali i modelli non idrostatici devono trattare in grande dettaglio i processi legati a nubi e precipitazioni nelle equazioni prognostiche per la temperatura e l'umidità.

L'approssimazione idrostatica

L'approssimazione idrostatica è valida per fenomeni con **scala orizzontale L molto maggiore della scala verticale D**

$$L \gg D$$

Es. fronti e grandi sistemi perturbati; onde orografiche; brezze

Il termine non idrostatico, Dw/Dt diventa importante quando

$$L \sim D$$

Siccome D è determinato tipicamente dall'altezza della troposfera, la scala critica è **circa 10 km**
Es. sistemi convettivi e fenomenologia connessa.

Modelli idrostatici e non idrostatici

In origine tutti i modelli erano **idrostatici**, con il moto verticale dedotto da altre variabili diagnosticamente (equazione di continuità) e non calcolato direttamente.

Con l'aumento della risoluzione grazie alla maggior potenza di calcolo disponibile, sono stati introdotti **modelli non idrostatici**.

I modelli non idrostatici risolvono le equazioni complete anche per il moto verticale. Sono quindi più dispendiosi ma indispensabili per descrivere correttamente fenomeni dove le accelerazioni verticali sono importanti rispetto a quelle orizzontali come la **convezione** profonda.

Nei moti convettivi la spinta di galleggiamento domina sulla forza di gradiente di pressione. Un aumento di temperatura e umidità incrementa questa spinta mentre acqua nelle nubi e precipitazioni la diminuiscono.

Modelli idrostatici e non idrostatici: caratteristiche

Modelli idrostatici

- Usano le equazioni primitive idrostatiche, moti verticali dedotti diagnosticamente dal moto orizzontale;
- Non possono prevedere tutti i dettagli dei processi a piccola scala associati alla forza di galleggiamento;
- Usati per la previsione di fenomeni a scala sinottica.

Modelli non idrostatici

- Usano le equazioni complete, calcolando esplicitamente il moto verticale;
- Descrivono i processi legati a nubi e precipitazioni e il loro contributo ai moti verticali e sono in grado di prevedere la convezione;
- Usati per la previsione di fenomeni a piccola scala.

Modelli idrostatici e non idrostatici: vantaggi

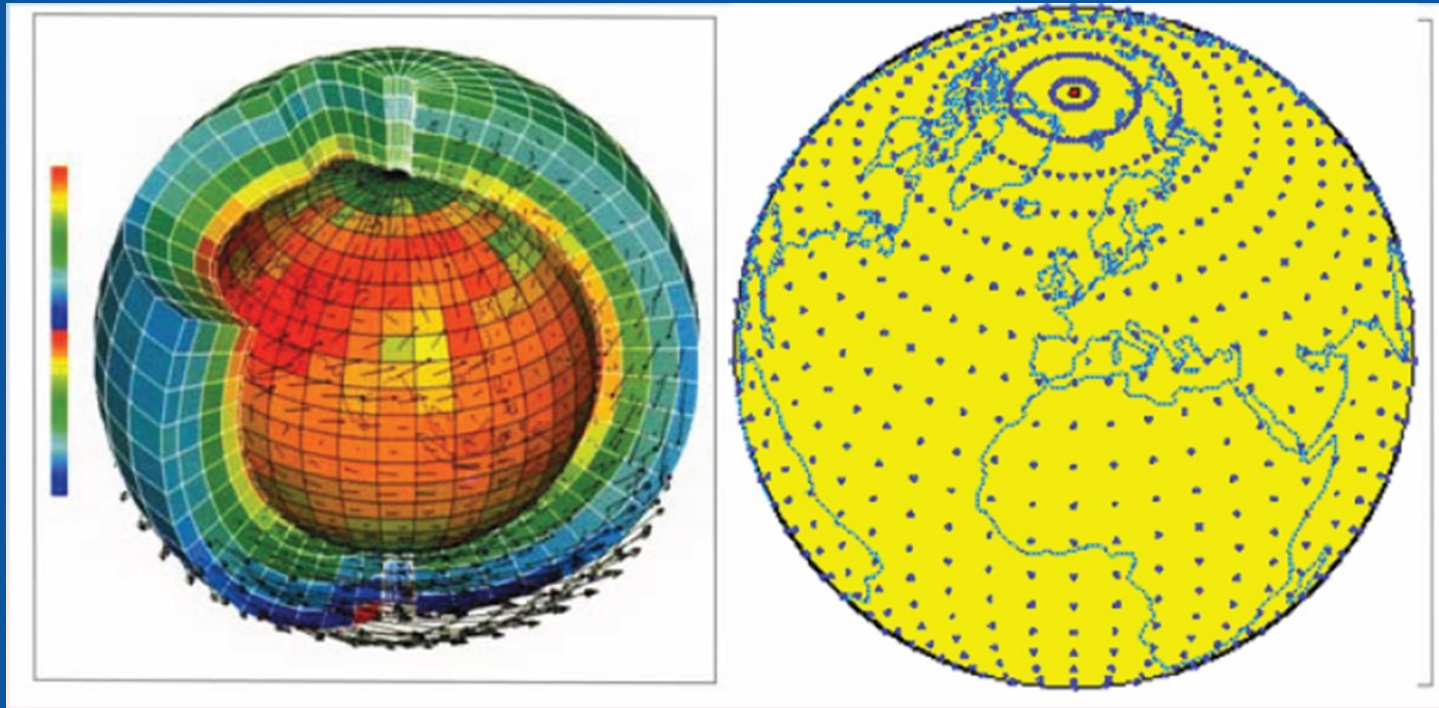
Modelli idrostatici

- Girano velocemente su domini ad area limitata fornendo previsioni operativamente in tempo utile;
- Approssimazione idrostatica valida per molti fenomeni su scala sinottica e subsinottica.

Modelli non idrostatici

- Più costosi computazionalmente a parità di dominio e risoluzione: usati per domini ad area limitata, necessità di condizioni al contorno;
- In grado di prevedere fenomeni realistici ma la collocazione spazio-temporale può essere errata

La discretizzazione dell'atmosfera

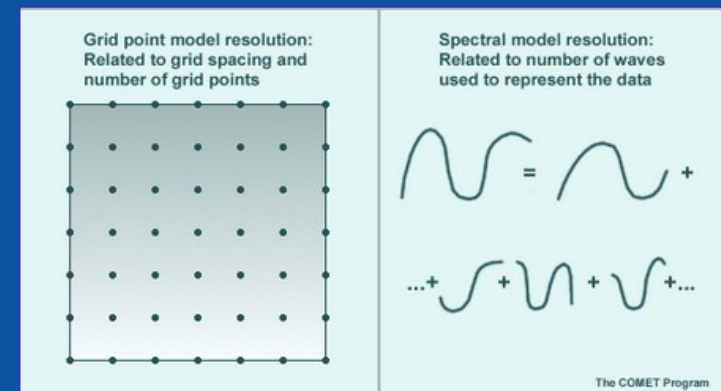


- In un modello meteorologico l'atmosfera è divisa in "cubetti"
- Equazioni discretizzate sulla griglia (spazio e tempo): necessità di schemi numerici adeguati
- La condizione iniziale deve essere definita in ogni cella di calcolo filtrando le onde spurie (sonore e di gravità)

La discretizzazione dell'atmosfera

La soluzione numerica di equazioni differenziali alle derivate parziali (PDE) in generale è possibile usando diverse tecniche:

- Punti di griglia o differenze finite
- Metodi spettrali
- Elementi finiti
- Volumi finiti



La scelta del metodo dipende da una serie di fattori come il dominio di calcolo (globale o regionale) e il tipo di applicazione e la facilità di modifica (operatività o ricerca).

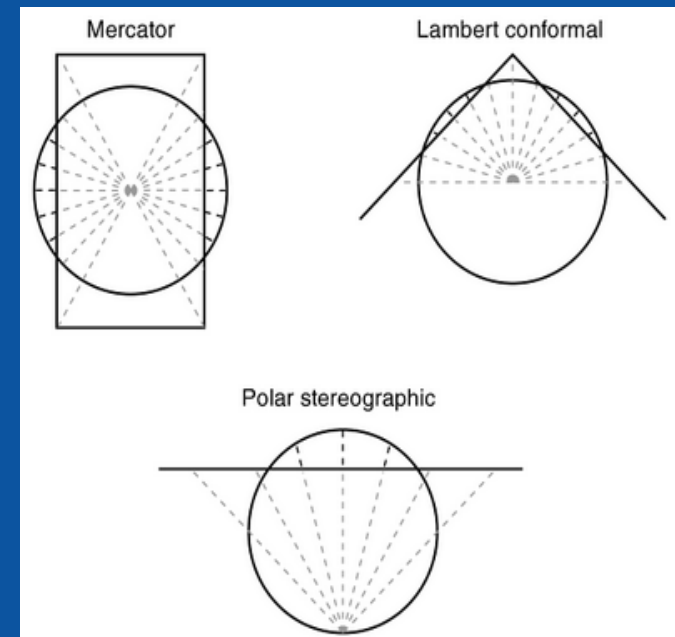
La maggior parte dei modelli meteorologici utilizzano una discretizzazione su punti di griglia o tecniche spettrali.

Tecniche numeriche: metodi a punti di griglia

Diverse tecniche sono state sviluppate nelle scienze dell'atmosfera e dell'oceano per risolvere le equazioni della fluidodinamica sulla geometria terrestre usando un approccio a punti di griglia.

I punti di griglia devono essere definiti e disposti in modo opportuno sull'area della sfera da simulare

Le proiezioni sono una serie di relazioni geometriche per trasformare leggi definite su una superficie quasi sferica su una superficie piatta come la griglia di un modello

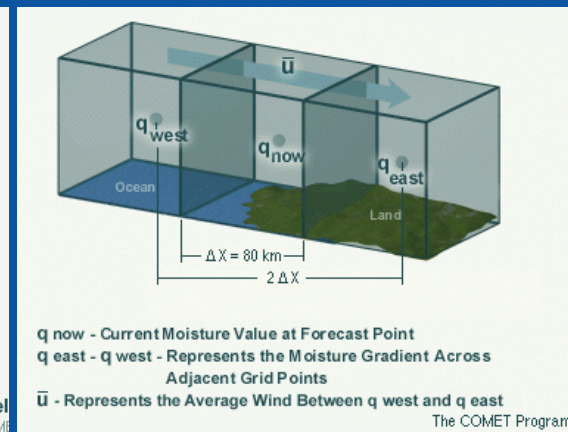
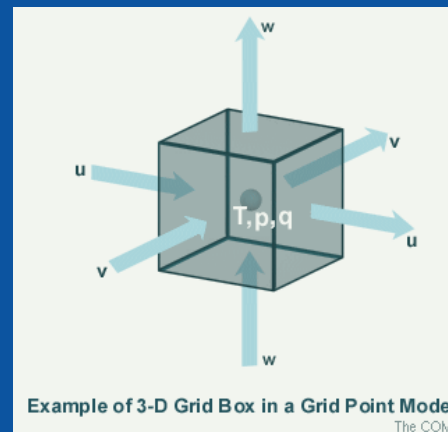


Tecniche numeriche: metodi a punti di griglia

Tutti i calcoli sono svolti su un insieme discrete di punti di griglia con geometria regolare. L'atmosfera è suddivisa in celle di calcolo cubiche.

I valori delle variabili riferiti ai punti di griglia rappresentano una media su tutta la cella di calcolo. Temperatura, pressione e umidità sono tipicamente rappresentati al centro del cubo.

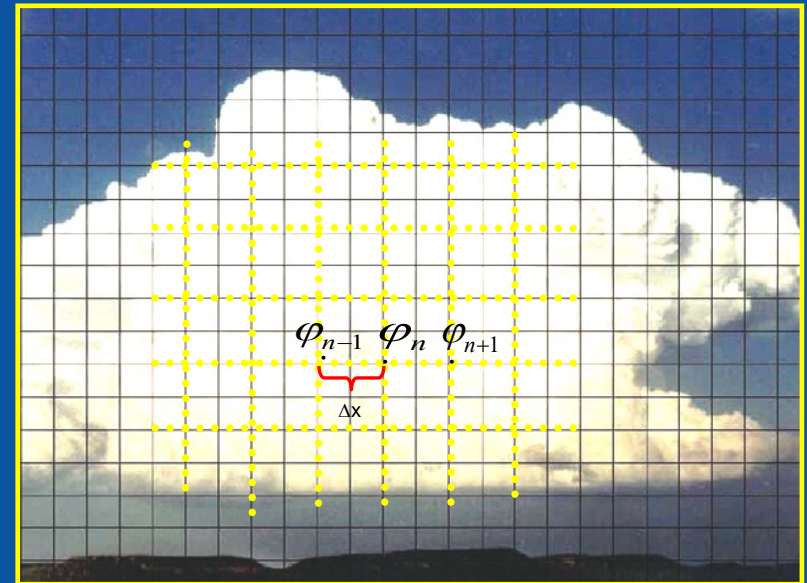
Le componenti orizzontali del vento sono collocate ai lati del cubo, mentre la velocità verticale sulle facce inferiori e superiori (*staggering*).



Una volta definita la griglia il numero di punti N dipende semplicemente dalla dimensione dell'area considerata L e dal passo di griglia Δx , quindi (in 1D), $N=L/\Delta x$.

Tutte le variabili sono discretizzate sulla griglia e le derivate sono calcolate tramite differenze finite:

- Backward $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_j \rightarrow \frac{\varphi_j - \varphi_{j-1}}{\Delta x}$
- Centered $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_j \rightarrow \frac{\varphi_{j+1} - \varphi_{j-1}}{2 \cdot \Delta x}$
- Forward $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_j \rightarrow \frac{\varphi_{j+1} - \varphi_j}{\Delta x}$



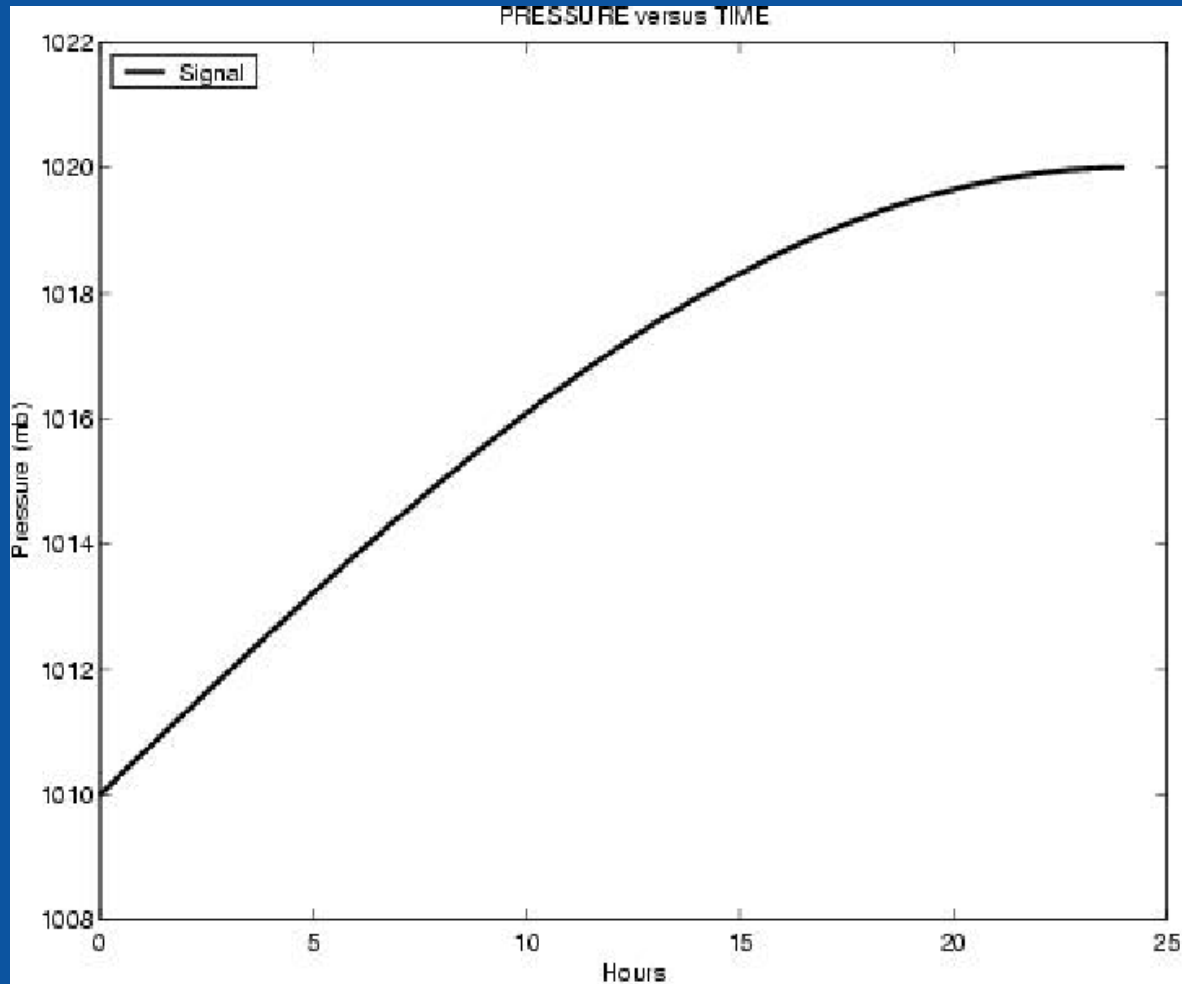
Stabilità numerica: il criterio CFL

Per evitare instabilità numerica nella soluzione di PDE, il passo temporale e il passo di griglia devono soddisfare il criterio noto come CFL (Courant, Friedrichs and Lewy, 1928):

$$\Delta t \leq \Delta x/v$$

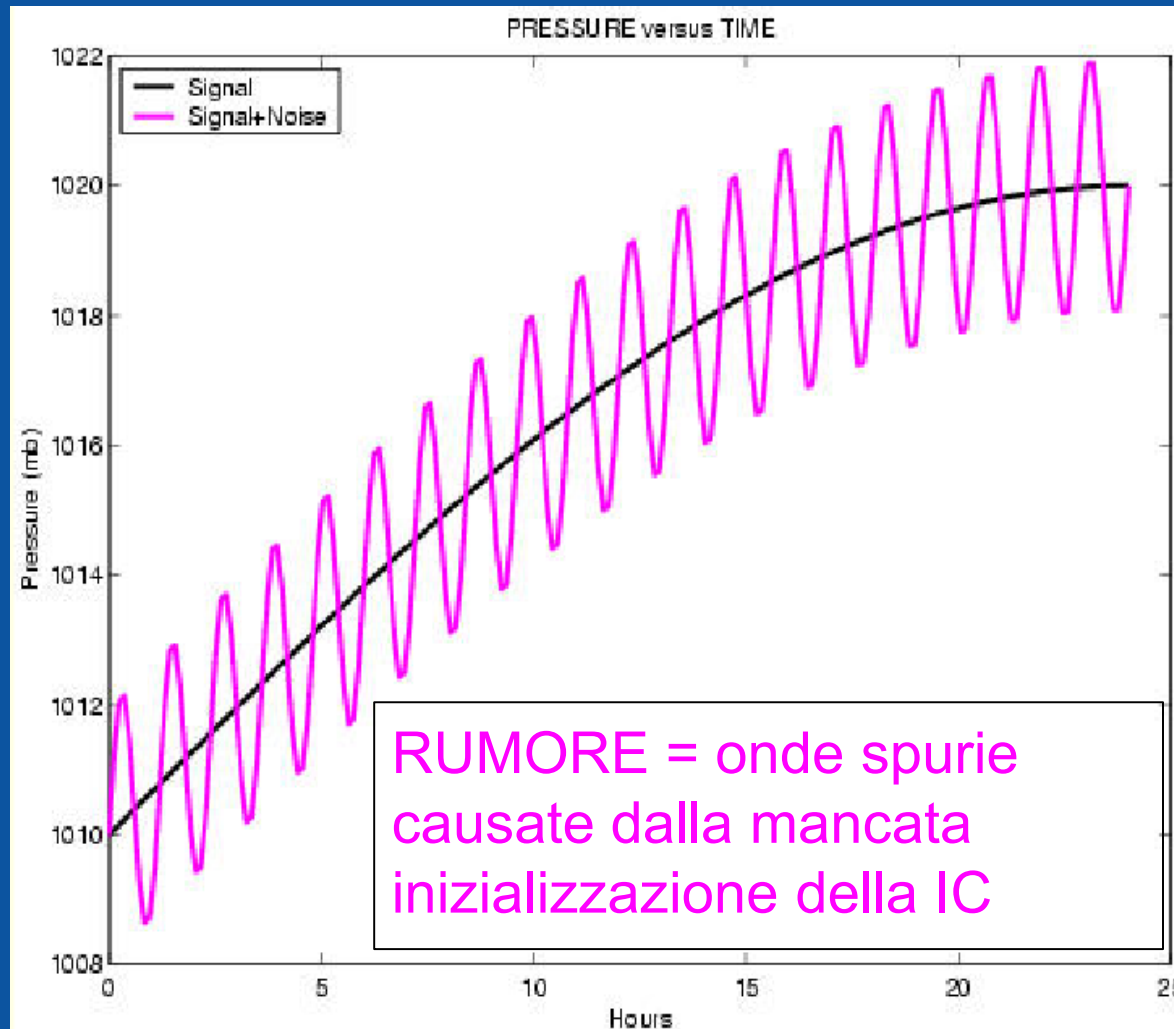
Per calcolare l'ampiezza di un'onda che si muove su un grigliato con un certo passo temporale discreto, questo deve essere inferiore al tempo che l'onda impiega per viaggiare tra due punti di griglia adiacenti. Come corollario, diminuendo il passo di griglia anche il passo temporale di integrazione deve essere ridotto

Equazioni filtrate



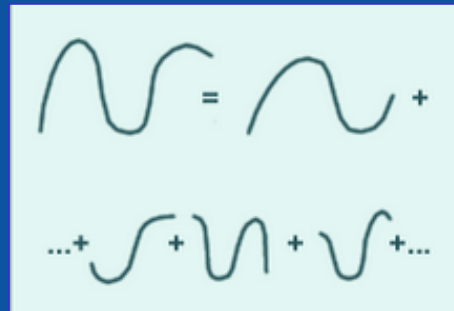
Equazioni non filtrate: rumore!

Lewis Fry
Richardson



Tecniche numeriche: metodi spettrali

I metodi spettrali descrivono le variazioni spaziali delle variabili meteorologiche come una serie finita di onde di diversa lunghezza

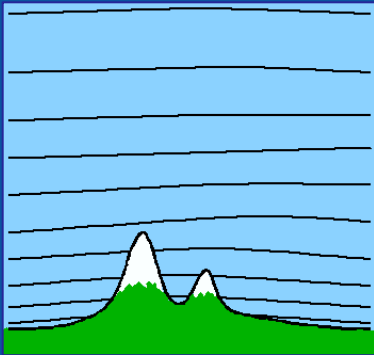


Il vantaggio principale è che non vengono introdotti errori di troncamento nel calcolo delle derivate spaziali.

L'uso di un numero limitato di onde fa sì che un modello spettrale descriva perfettamente le onde che risolve mentre le onde su scala più piccola sono rimosse. La risoluzione corrisponde al numero di onde usate.

Le tecniche spettrali sono particolarmente adatte per i modelli globali anche per la maggior facilità di gestire condizioni al contorno periodiche.

Coordinate verticali



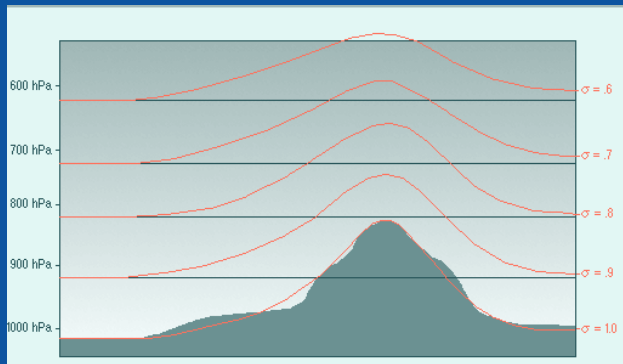
Le equazioni del moto hanno la forma più semplice in coordinate di pressione. Tuttavia le coordinate di pressione hanno lo svantaggio di «attraversare» l'orografia e di non essere definite in alcune parti del dominio.

Per una rappresentazione più efficiente della struttura verticale dell'atmosfera (e quindi una miglior qualità delle previsioni) sono stati introdotti diversi sistemi di coordinate verticali:

- Le coordinate **sigma**;
- Le coordinate **eta**;
- Le coordinate **ibride**.

Coordinate verticali: sigma

Le coordinate sigma furono introdotte da Phillips nel 1957. Sono coordinate ***terrain-following*** definite come:



$$\sigma = \frac{p}{p_s}$$

pressione

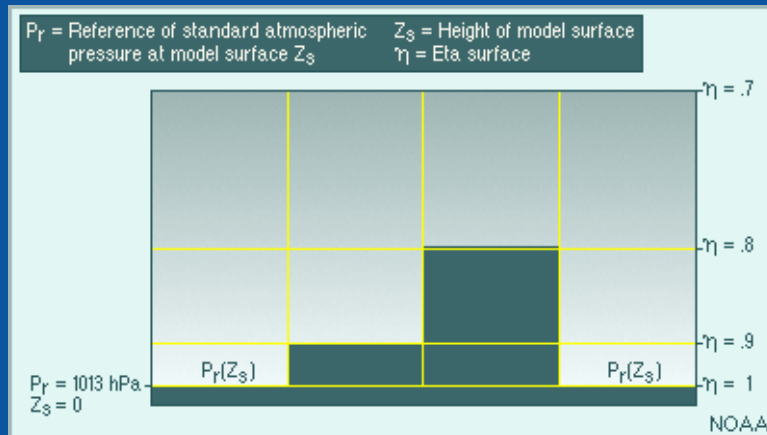
pressione superficiale

La superficie corrispondente alla coordinate più bassa ($\sigma = 1$) segue una rappresentazione lisciata dell'orografia reale. L'uso di coordinate sigma richiede sempre un certo lisciamento delle pendenze dell'orografia.

Le altre superfici sigma variano gradualmente dall'essere parallele al terreno in basso fino a essere quasi orizzontali avvicinandosi alle superfici a pressione costante alla sommità del dominio di calcolo.

Coordinate verticali: eta

Le coordinate eta sono un'altra forma di coordinate sigma, definite usando la pressione in un'atmosfera standard



pressione a un dato livello

$$\eta = \frac{p_{r|z_s} - p_t}{p_{r|z=0} - p_t}$$

pressione al top

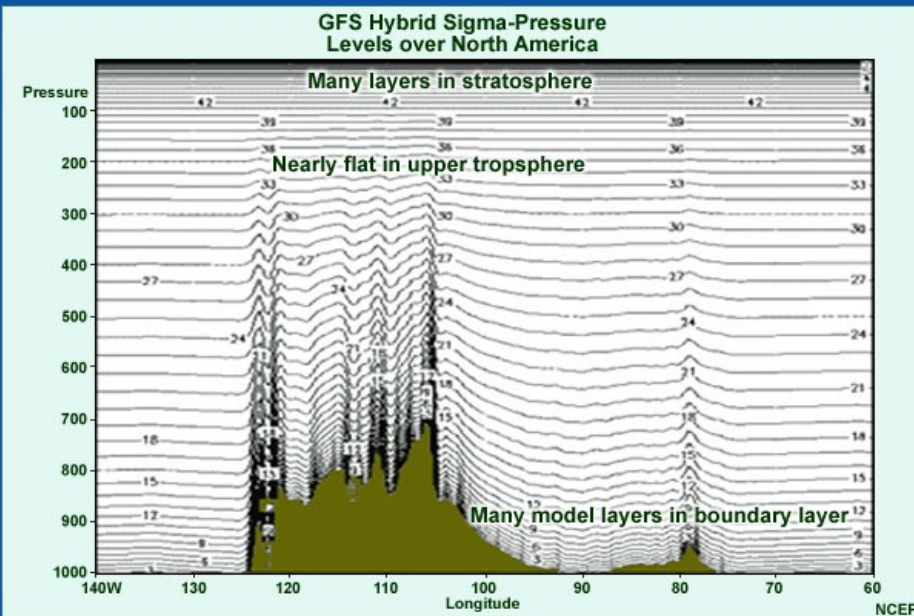
pressione al livello del mare

Lo strato più basso del modello corrisponde a un gradino e l'orografia è ricostruita come una successione di gradini.

Il principale vantaggio consiste nella quasi totale eliminazione degli errori legati alla forza di gradiente di pressione.

Coordinate verticali: sistemi ibridi

L'idea di usare contemporaneamente due sistemi di coordinate risale a Uccellini (1979).



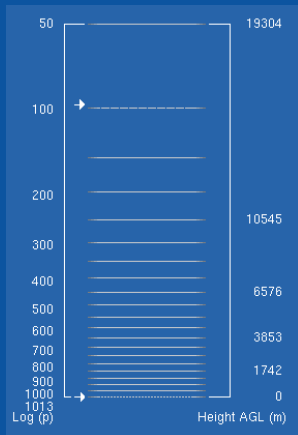
In questo modo si sfruttano i vantaggi di entrambi i sistemi. Ad esempio in un sistema ibrido sigma-pressione i livelli vicini alla superficie seguono il terreno, mentre nell'alta troposfera si trasformano in coordinate di pressione.

Attualmente la maggior parte dei modelli globali operativi usa un sistema di coordinate ibrido.

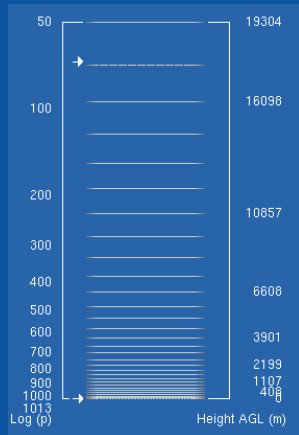
Risoluzione orizzontale e verticale

Sia i modelli spettrali sia quelli a punti di griglia rappresentano la colonna in strati discreti. Come un punto di griglia rappresenta la condizione media in una cella di calcolo, così un livello verticale è rappresentativo di uno strato.

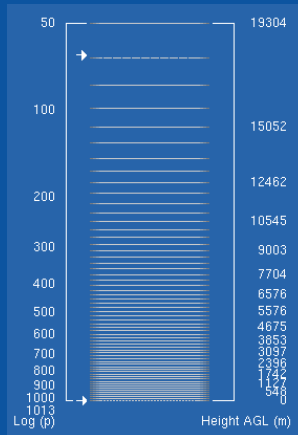
21 levels



31 levels



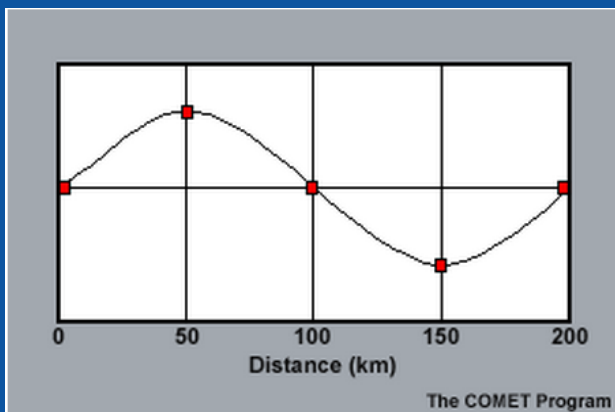
61 levels



I modelli devono essere costruiti con un'adeguata risoluzione verticale per descrivere correttamente la struttura verticale dei fenomeni meteorologici di interesse.

Risoluzione orizzontale e verticale

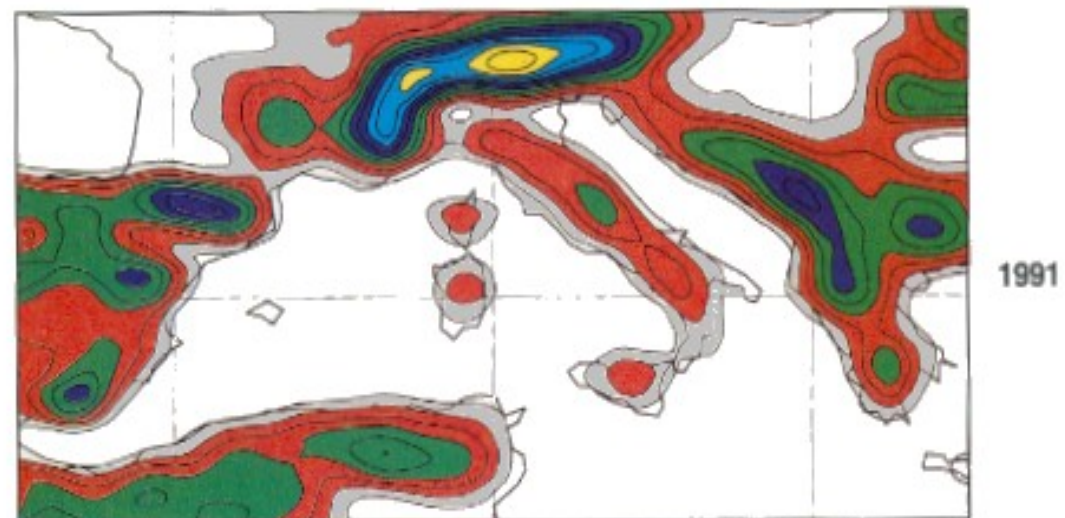
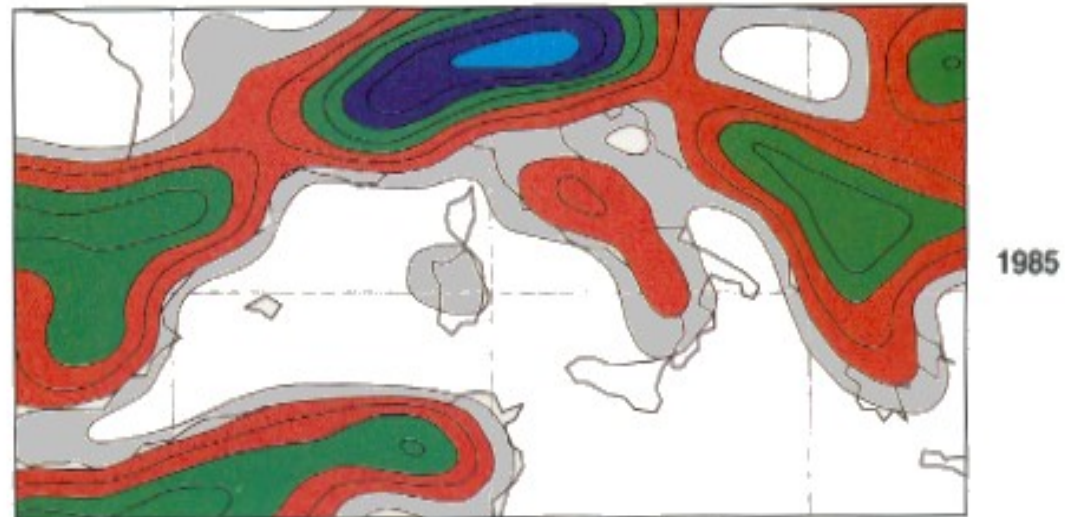
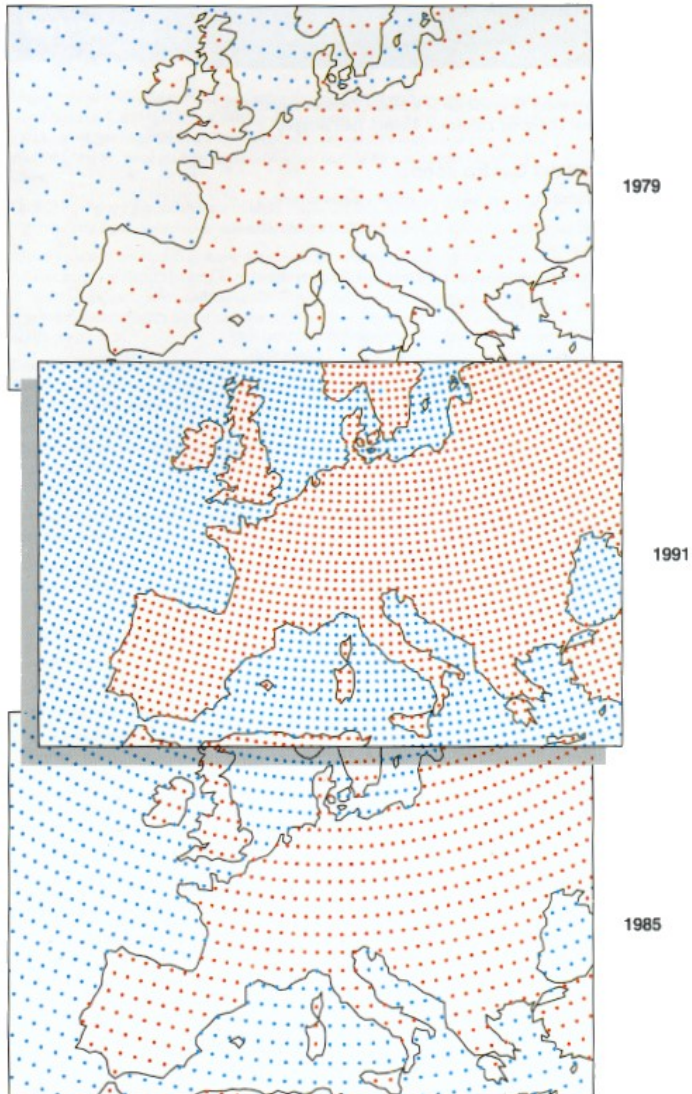
La risoluzione orizzontale di un modello è definita in termini di passo di griglia o numeri di onde a seconda che si tratti di modelli a punti di griglia o modelli spettrali.



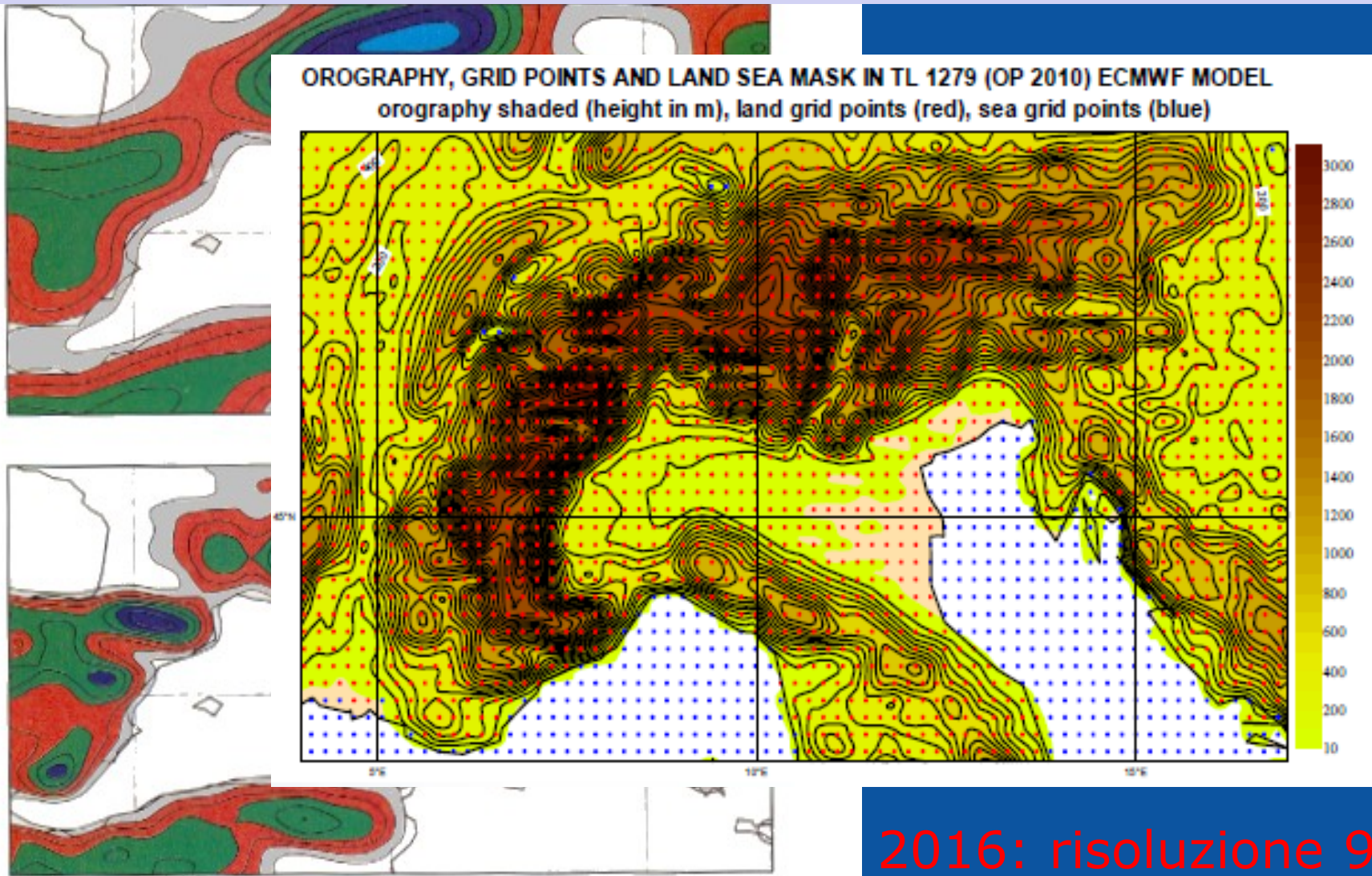
Le scale risolte dal modello sono più grandi rispetto al passo di griglia. Tipicamente sono necessari almeno **4-5 punti** per rappresentare correttamente un fenomeno meteorologico in un modello a punti di griglia.

Pertanto fenomeni con dimensioni paragonabili al passo di griglia del modello non possono essere previsti correttamente da un modello.

La risoluzione spaziale



La risoluzione spaziale



2016: risoluzione 9 km!

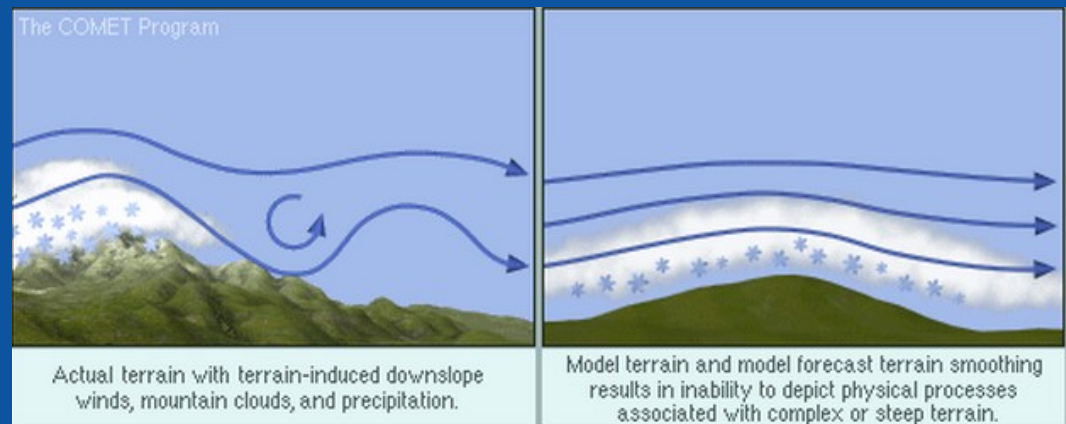
La risoluzione spaziale: rappresentazione dell'orografia

Due fattori limitano la rappresentazione dell'orografia nei modelli:

- La risoluzione del *dataset* “statico” utilizzato: se è troppo grezzo certi dettagli non potranno essere descritti nel modello
- La risoluzione orizzontale del modello: se è troppo grezza rispetto a quella del *dataset* di orografia, i dettagli saranno lisciati e mediati

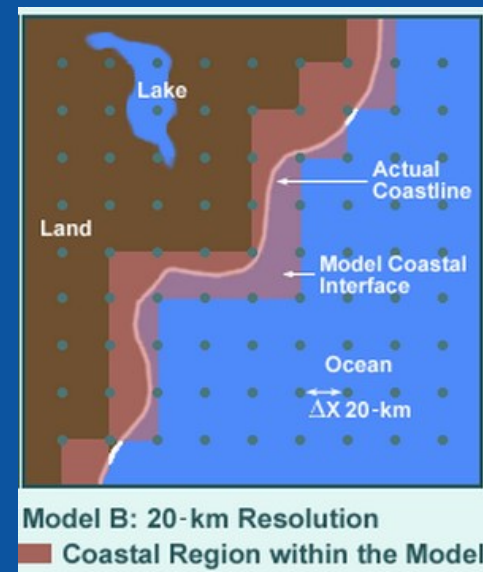
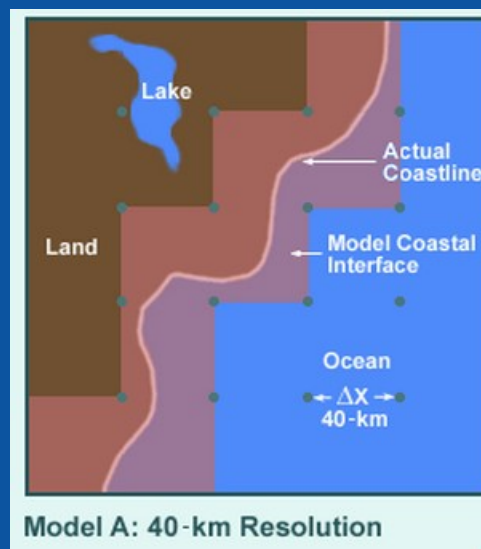
Spesso tuttavia è necessario applicare uno **smoothing** all'orografia per evitare:

- rumore su piccola scala;
- instabilità numerica



La risoluzione spaziale: interfaccia terra-mare

- I modelli spesso faticano a risolvere processi influenzati o causati dall'interfaccia tra la terra e il mare o corpi idrici in generale. Aumentare la risoluzione aiuta a ridurre questi problemi



I tempi di calcolo

1950: ENIAC (Lab. Militari di Aberdeen, Maryland), 18000 valvole termoioniche, potenza=1 kiloflop

1958: IBM 7070, primo calcolatore a transistor

1979 presso ECMWF: supercomputer CRAY 1A, potenza=160 Megaflop

1993 presso ECMWF: CRAY T3D, potenza=10 Gigaflop

2005 presso ECMWF: IBM cluster 1600 (2000 CPU), potenza=10 Teraflop

2014 CRAY XC30, potenza dell'ordine dei petaflop

2021 Atos BullSequana XH2000 (ECMWF data center, Bologna)



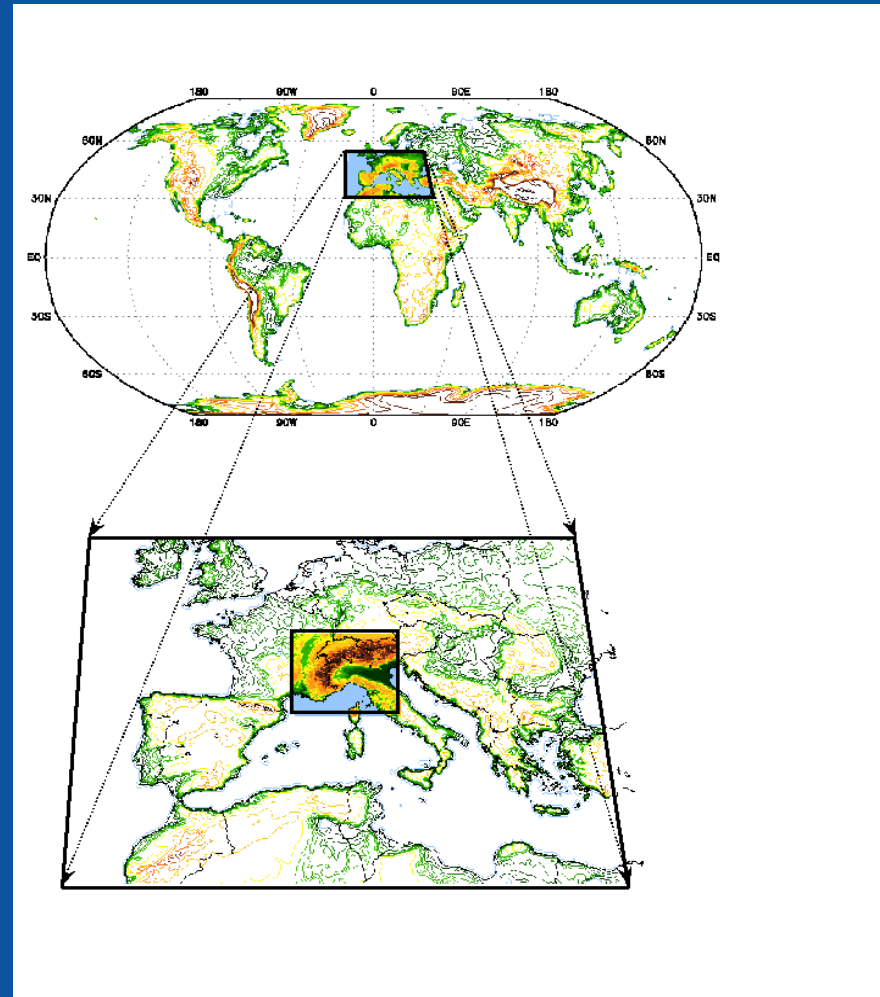


Ogni cluster dispone di 3610 nodi, ciascuno equipaggiato con 2 processori Intel Xeon E5-2695v4 a 18 core e 128 GB di RAM, per un totale di 129960 core, 462 TB RAM, 8499 Tflops. Ogni cluster dispone di 10 PB di storage ad alta performance.

Modelli globali e ad area limitata

General Circulation Models (GCM):
simulano l'evoluzione dello stato dell'atmosfera su tutto il globo terrestre

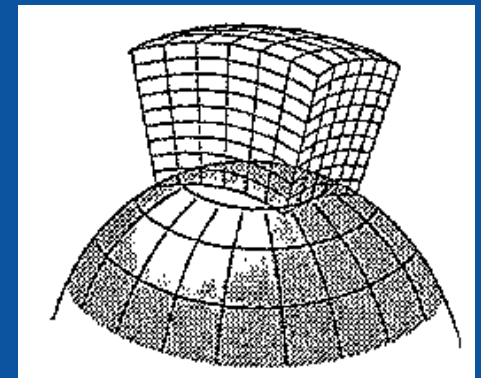
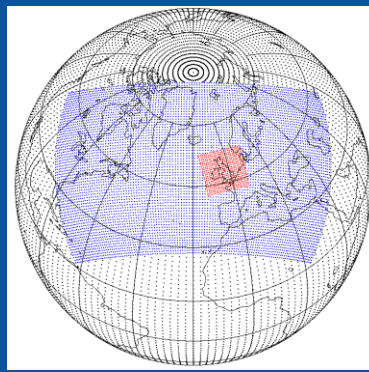
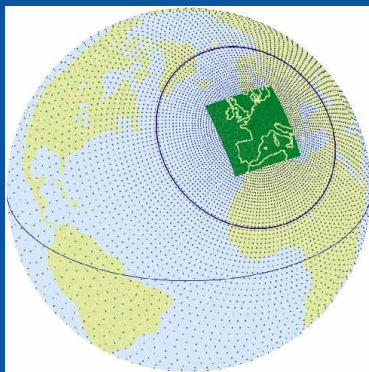
Limited Area Models (LAM):
simulano l'evoluzione dello stato dell'atmosfera su un dominio limitato:
necessitano di **CONDIZIONI AL CONTORNO!**



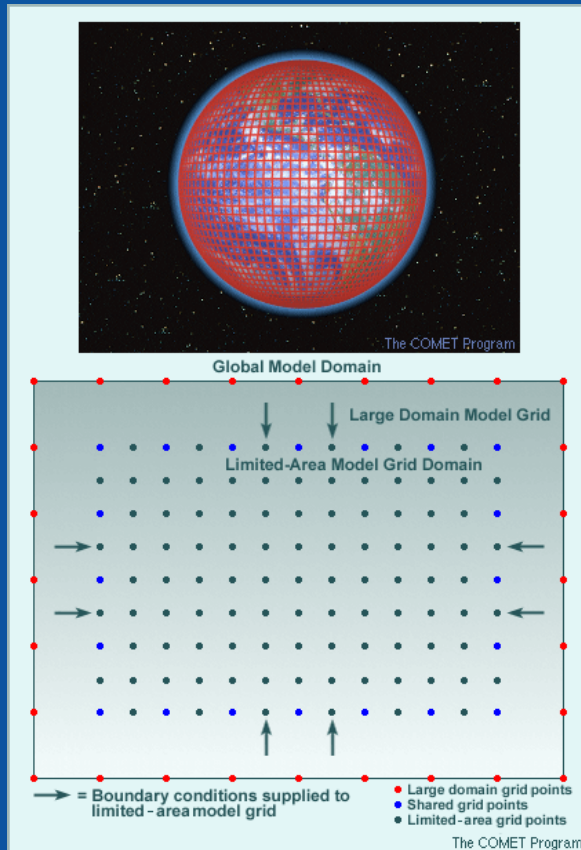
Definizione del dominio e condizioni al contorno

I LAM sono adoperati per previsioni a breve termine (tipicamente fino a 3 giorni) con risoluzione molto più alta rispetto ai modelli globali

La risoluzione maggiore consente una maggior accuratezza e una miglior descrizione di fenomeni su scala più piccola come fronti, sistemi temporaleschi e interazione con l'orografia



Definizione del dominio e condizioni al contorno

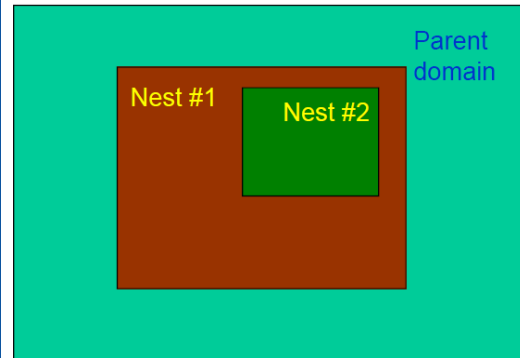


Le condizioni al contorno laterali per i LAM sono tipicamente fornite da modelli a più larga scala o globali

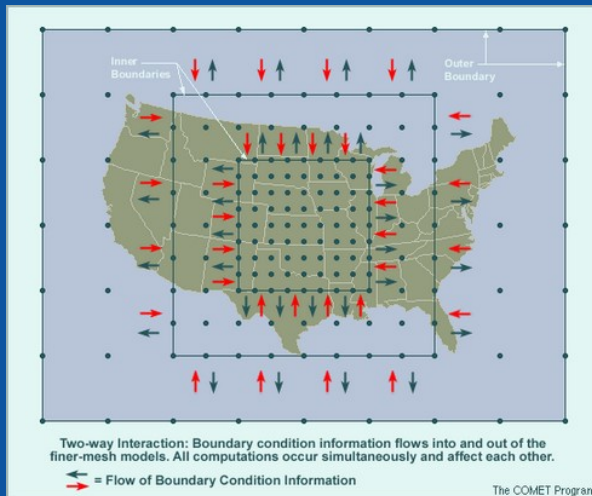
Valori climatologici o costanti possono essere usati per alcuni parametri (caratteristiche della superficie, uso del suolo, umidità del suolo, vegetazione, temperatura del mare...)

Nesting

Two levels of nests, with nest #1 acting as parent to nest #2



Si parla di modelli nidificati (nesting) quando si definiscono una o più griglie di calcolo all'interno di una griglia più esterna con dominio più ampio (dominio «padre»)



Il nesting può essere di due tipi:

- **One-way:** l'informazione va dal dominio padre a quello figlio in modo unidirezionale
- **Two-way:** interazione bidirezionale tra i due domini

I principali modelli globali

- **GFS** Global Forecast System (NCEP, USA)
- **IFS** Integrated Forecast System (ECMWF)
- **NOGAPS** (US Navy)
- **GEM** Global Environmental Multiscale Model (Meteorological Service Canada - MSC)
- **Unified Model** (UM), UK Met Office
- **ICON**, Deutsche Wetterdienst - DWD
- **ARPEGE**, Météo France
- **GSM** (Global Spectral Model), Japan Meteorological Agency - JMA

I principali modelli ad area limitata

BOLAM & MOLOCH (Italia, ISAC-CNR):

<<http://www.isac.cnr.it/~dinamica/bolam/index.html>>

COSMO/Lokal-Modell (Germania, Svizzera, Italia, Grecia, Polonia):

<<http://www.cosmo-model.org/public/default.htm>>

HIRLAM (Danimarca, Finlandia, Islanda, Irlanda, Norvegia, Olanda, Spagna, Svezia): <<http://hirlam.org/>>

ALADIN (Francia, Belgio, Marocco, Polonia, Portogallo, Tunisia, Austria, Croazia, Repubblica Ceca, Ungheria, Slovacchia, Slovenia, Bulgaria, Moldova, Romania):

<<http://www.cnrm.meteo.fr/aladin/>>

Unified Model (UK, MetOffice):

<<http://www.metoffice.gov.uk/science/creating/daysahead/nwp/um.html>> .

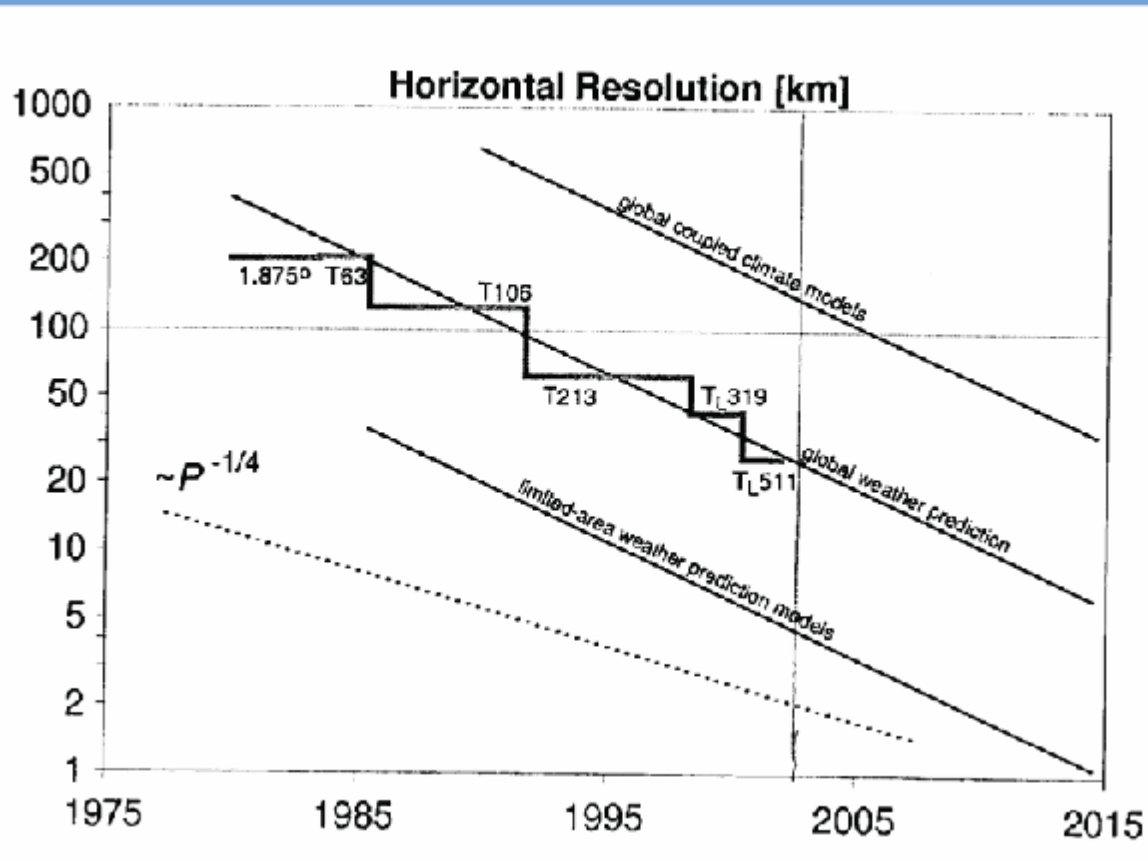
WRF (USA, National Center for Atmospheric Research):

<<http://www.wrf-model.org/>>

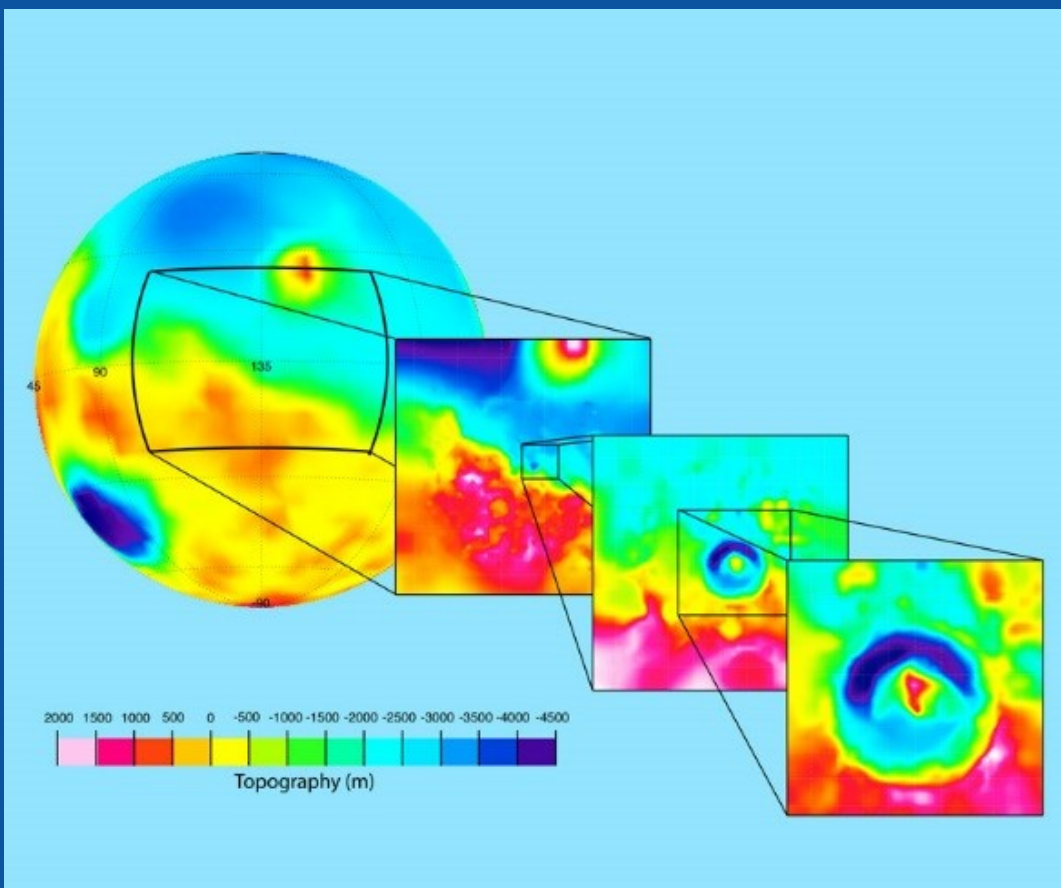
RAMS (USA, University of Colorado): <<http://www.atmet.com/index.shtml>>

COAMPS (US Navy): <<http://www.nrlmry.navy.mil/coamps-web/web/home>>

Aumento nel tempo della risoluzione orizzontale dei modelli meteorologici



La risoluzione spaziale



Aumentando la risoluzione riesco a vedere con dettaglio sempre maggiore

Ma aumentare la risoluzione vuol dire aumentare il costo di calcolo!

- il numero di punti aumenta (anche in verticale);
- il passo temporale è più piccolo;
- aumentano i fenomeni che devono essere descritti in modo esplicito;
- approssimazioni valide a larga scala non sono più valide aumentando la risoluzione.

La non linearità delle equazioni

Un modello vede un'atmosfera discretizzata a “cubetti”, con una risoluzione orizzontale data dalla maglia della griglia (Δx). Supponiamo che

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_m + \mathbf{X}'$$

Ossia che il campo \mathbf{X} “vero” sia dato da due componenti:

- quella descritta sulla griglia che chiameremo \mathbf{X}_m (\mathbf{X} visto dal modello)
- quella sottogriglia, non risolta dal modello, che chiameremo \mathbf{X}'

Se: $\langle \mathbf{X}' \rangle = 0$ allora: $\langle \mathbf{X} \rangle = \langle \mathbf{X}_m \rangle + \langle \mathbf{X}' \rangle = \langle \mathbf{X}_m \rangle = \mathbf{X}_m$

Quindi il campo \mathbf{X}_m risolto descrive bene il valore medio di \mathbf{X}

La non linearità delle equazioni

$$X = X_m + X'; \quad Y = Y_m + Y'$$

SOMMA (*operatore lineare*)

$$\begin{aligned} \langle X+Y \rangle &= \langle X_m+Y_m \rangle + \langle X_m+Y' \rangle + \langle X'+Y_m \rangle + \langle X'+Y' \rangle = \langle X_m+Y_m \rangle \\ &= \langle X_m \rangle + \langle Y_m \rangle = X_m + Y_m \end{aligned}$$

OK

PRODOTTO (*operatore NON lineare*)

$$\begin{aligned} \langle XY \rangle &= \langle X_m*Y_m \rangle + \langle X_m*Y' \rangle + \langle X'*Y_m \rangle + \langle X'*Y' \rangle = \langle X_m*Y_m \rangle + \langle X'*Y' \rangle \\ &= X_m*Y_m + \langle X'*Y' \rangle \end{aligned}$$

NO! Che cos'è $\langle X'*Y' \rangle$?

E' il contributo delle scale non risolte!

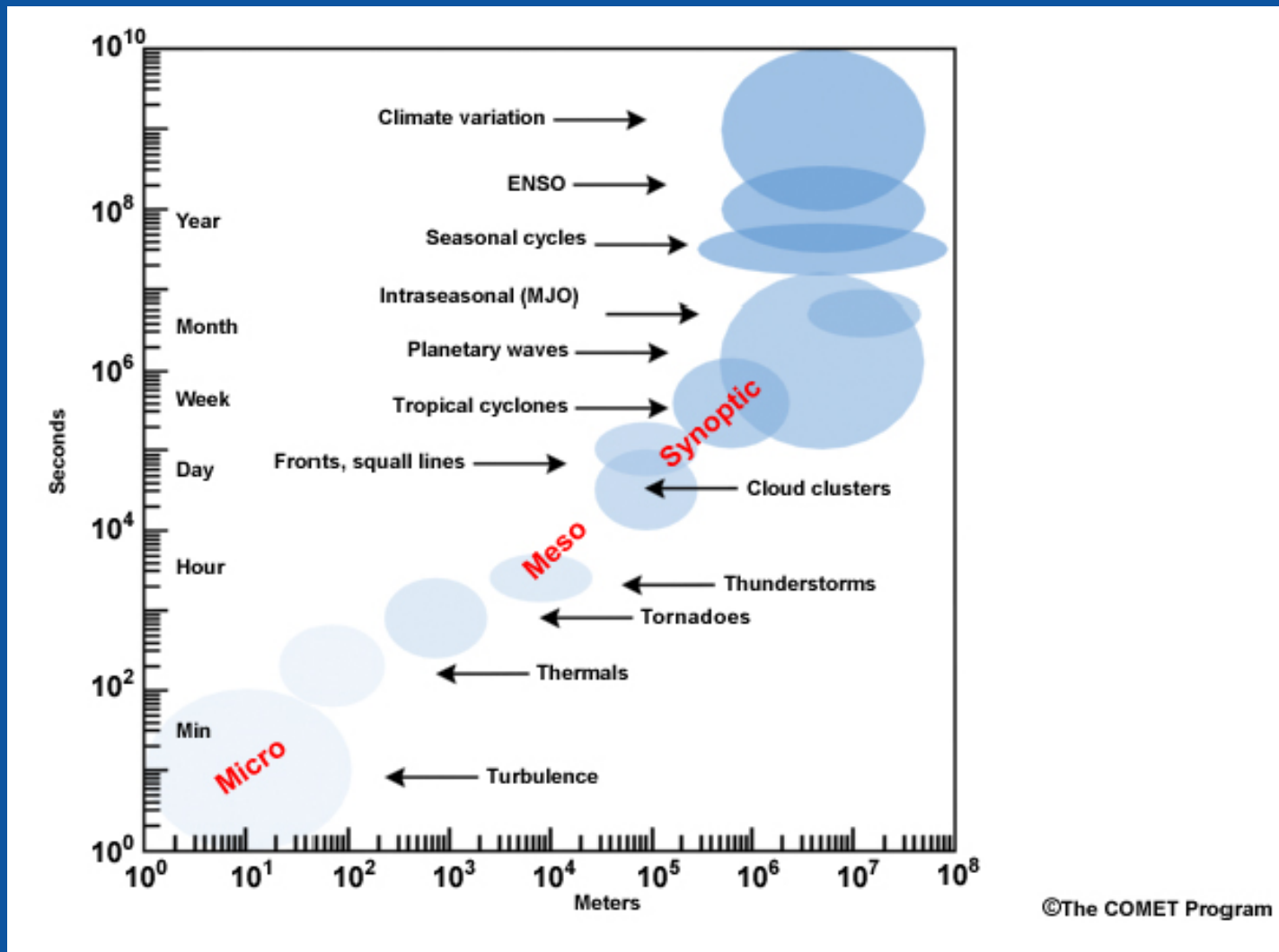
Dinamica e fisica in un modello meteorologico

Da un punto di vista logico il modello si divide in due parti:

la parte ***Dinamica*** (i processi che avvengono alle scale che risolvo direttamente). Nell'esempio precedente $\mathbf{X}_m * \mathbf{Y}_m$ viene risolto dalla dinamica

la parte ***Fisica*** (i processi che avvengono a scale inferiori alla risoluzione che ho adottato). Nell'esempio precedente $\langle \mathbf{X}' * \mathbf{Y}' \rangle$ viene risolto dalla fisica

Le scale dei fenomeni atmosferici



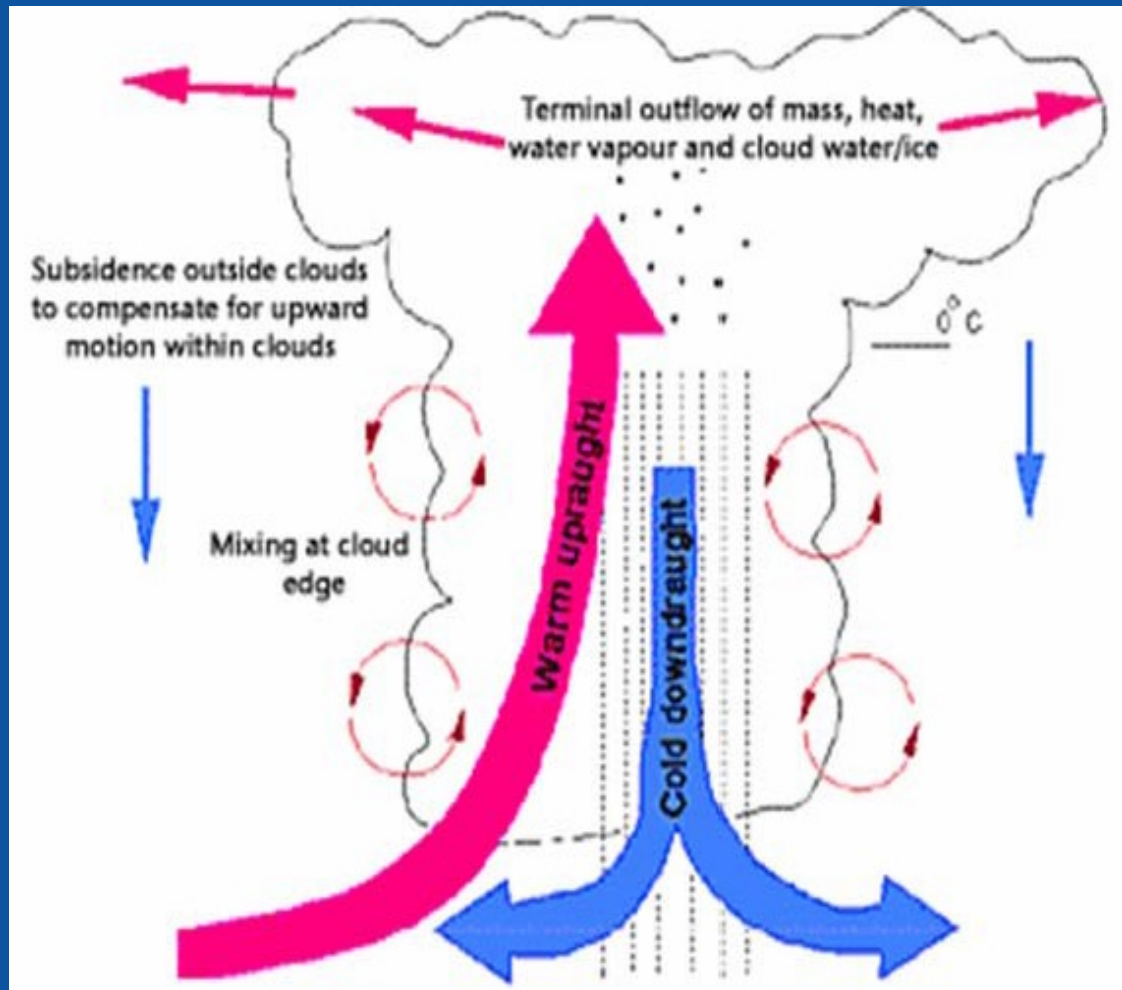
Parameterizzazioni fisiche

Descrizione di fenomeni che avvengono su scale più piccole della risoluzione del modello e dei loro effetti sui campi di larga scala

- Convezione
- Radiazione
- Microfisica delle nubi
- Planetary Boundary Layer (PBL) e turbolenza
- Processi alla superficie e suolo

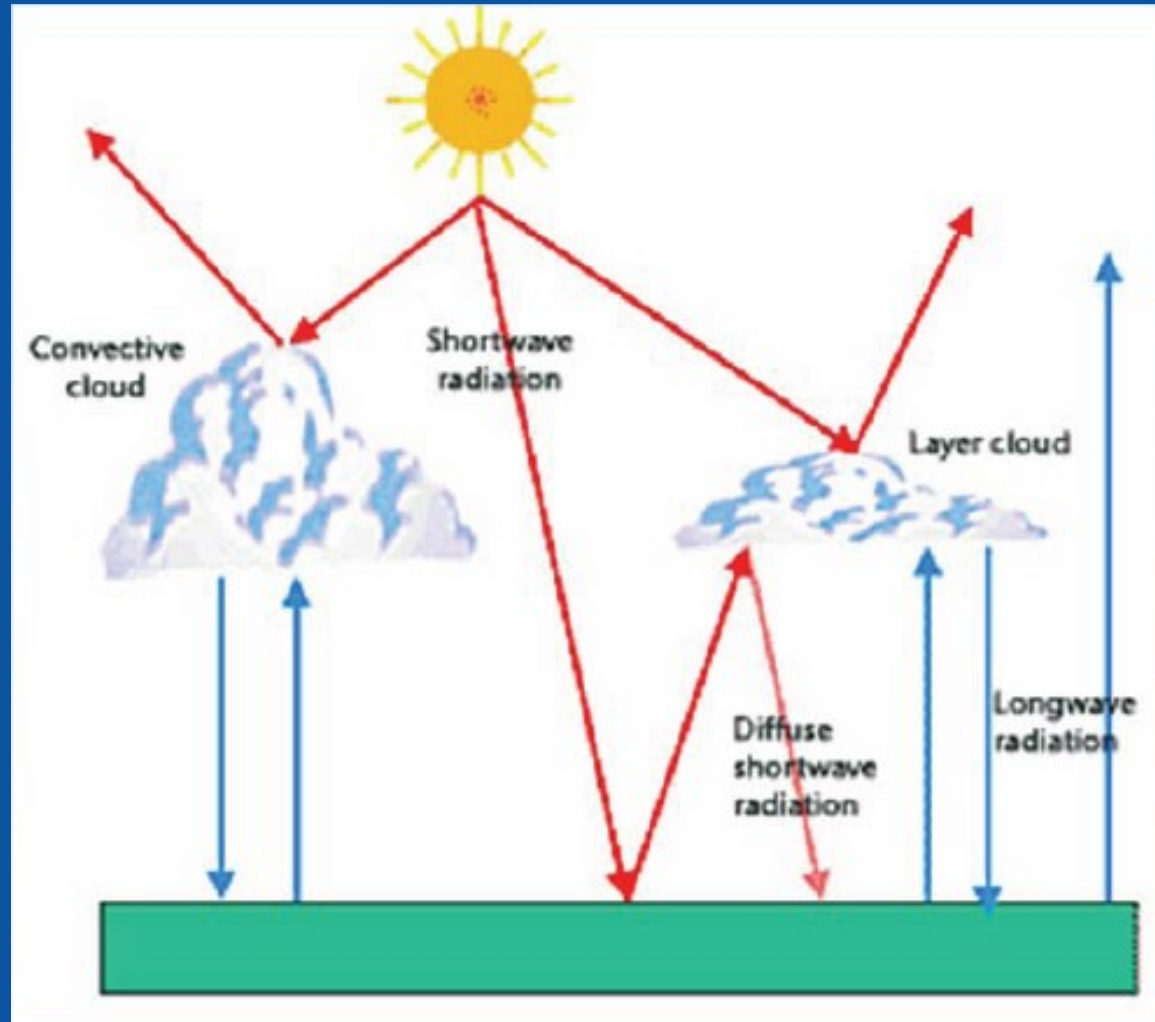
Parametrizzazione della convezione

- Necessaria per risoluzione $> 4-5$ km
- Scambi di calore, umidità e quantità di moto
- Mantiene profili realistici di T, q
- Criteri per l'attivazione della convezione in base a instabilità atmosferica e convergenza di flussi (trigger)
- Contributo alla copertura nuvolosa e precipitazione convettiva



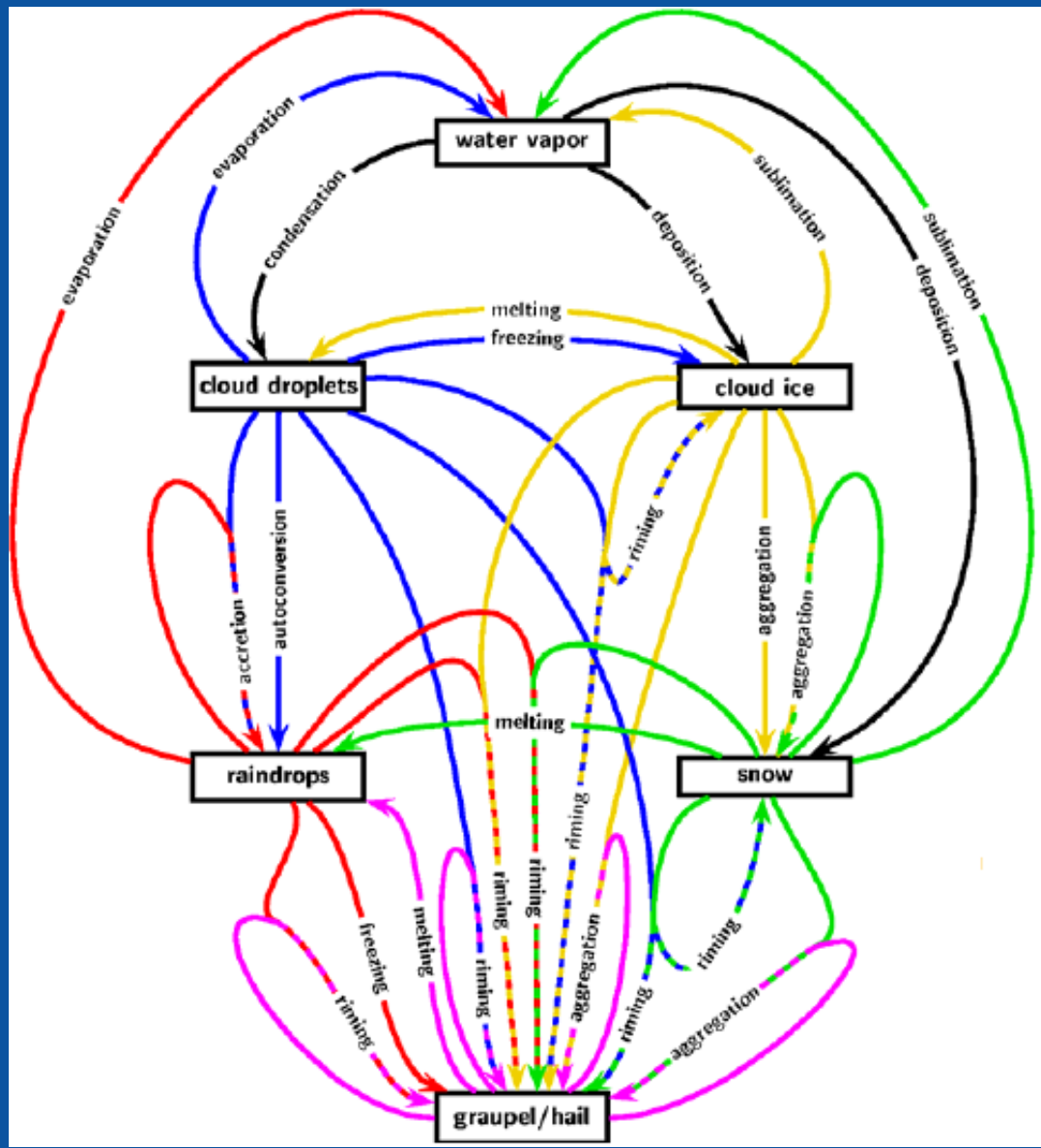
Parametrizzazione della radiazione

- Scala molecolare
- Computazionalmente molto pesante
- Routine chiamata ogni n time step
- Contributi di larga scala per T , nuvolosità, flussi radiativi superficiali



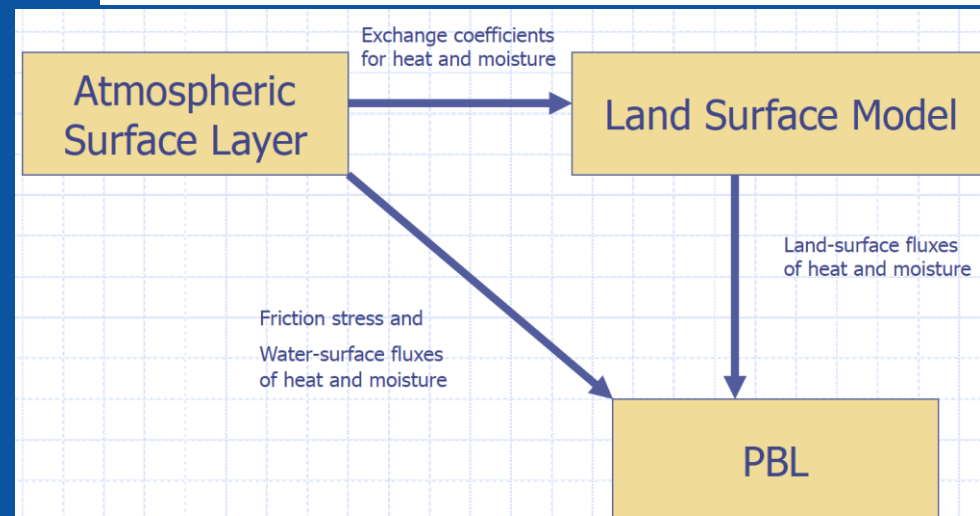
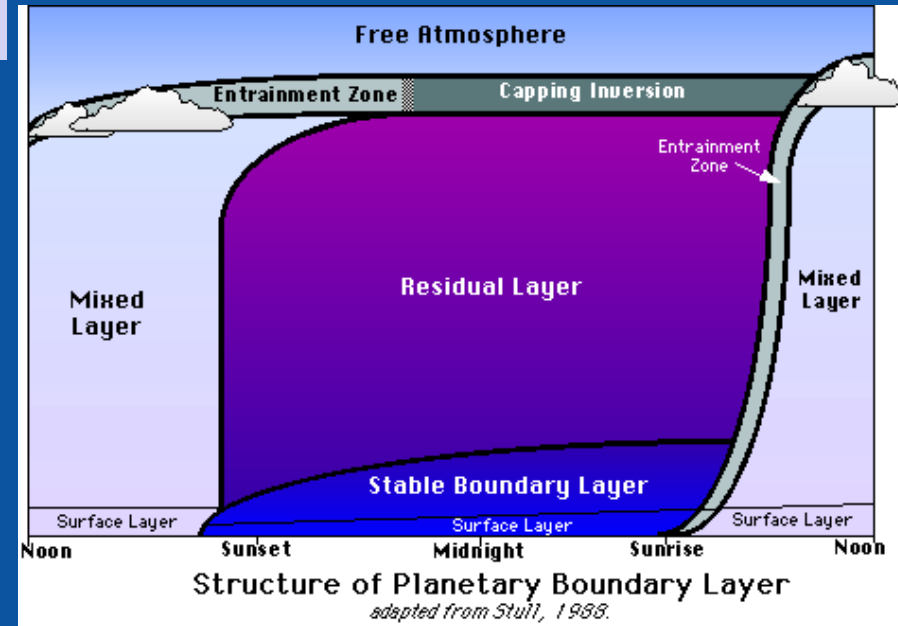
Microfisica delle nubi

- Scala spaziale dell'ordine dei mm
- Descrizione dei processi di formazione e crescita delle gocce nelle nubi
- Fondamentale per nuvolosità e precipitazioni
- Schemi 1-moment e 2-moment



PBL e strato superficiale

- Scala spaziale di circa 100 m
- Descrizione dei processi turbolenti generati nelle vicinanze del suolo per attrito o per effetto termico
- Calcolo dei flussi turbolenti superficiali, vento e temperatura
- «chiusura della turbolenza»

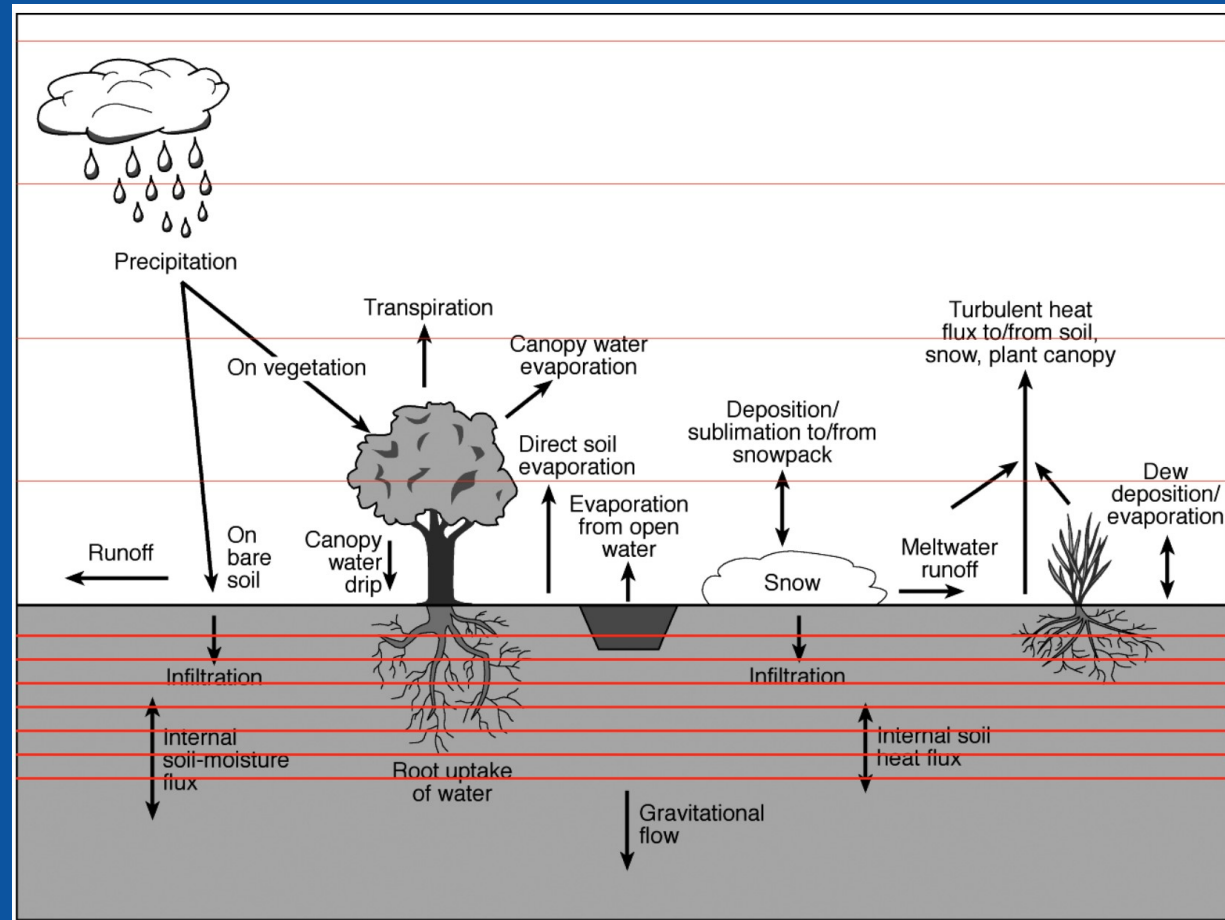


Processi alla superficie e suolo

Calcolo di flussi di calore e umidità sulla terra solida e sul ghiaccio marino

Condizione al contorno inferiore per il trasporto verticale da parte dello schema di PBL

Descrizione dei processi nel suolo e scambi con l'atmosfera con diversi gradi di complessità (numero di livelli, trattamento della neve e della vegetazione...)



Fisica e passo di griglia

$\Delta \approx 3$ km: tipica risoluzione *cloud-permitting*

Non è necessario uno schema di parametrizzazione della convezione

$\Delta \approx 30$ m: tipica risoluzione per approccio LES (large eddy simulation)

Non è necessario uno schema di PBL. I vortici turbolenti più grandi (termiche, rotori) sono descritti dalle equazioni del modello (più schemi per strato superficiale e turbolenza sottogriglia)

Physics “grey zones”:

$5 \text{ km} < \Delta < 10 \text{ km}$

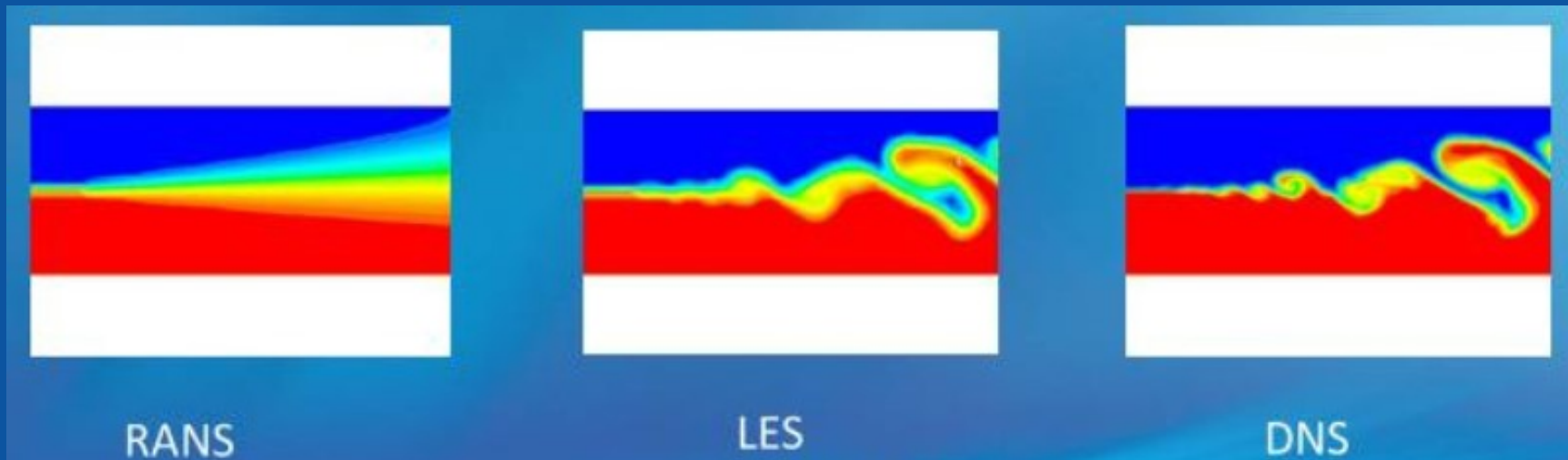
Non c'è consenso, si possono provare schemi di convezione *scale-aware*

$100 \text{ m} < \Delta < 1 \text{ km}$

Uno schema di PBL è tipicamente necessario

Approcci per simulare la turbolenza

- RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes (schemi separati per diffusione orizzontale e verticale)
- LES: Large Eddy Simulation (vortici più grandi risolti esplicitamente in 3D)
- DNS: Direct Numerical Simulation



Modelli mass consistent

Attualmente la risoluzione dei modelli operativi è dell'ordine del km.

In alcuni casi (dispersione di inquinanti), è necessario conoscere le variabili a risoluzione maggiore.

Ad esempio per il vento: uso di modelli mass consistent per aumentare la risoluzione su topografia complessa.

In generale si cerca di utilizzare informazioni di piccola scala per aumentare la risoluzione, mantenendo allo stesso tempo costanti le condizioni di larga scala fornite dai modelli dinamici.

Le informazioni a piccola scala possono essere statistiche o legate a condizioni al contorno.

Modelli mass consistent

La formulazione teorica si basa sui moltiplicatori di Lagrange λ associati al vincolo che la divergenza del flusso sia nulla all'interno del dominio considerato Ω :

$$L(\mathbf{u}, \lambda) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \{ S (\mathbf{u} - \mathbf{u}') \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{u}') + \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} \} dV$$

con \mathbf{u}' campo di velocità osservato, S una matrice diagonale contenente i pesi e \mathbf{u} campo di velocità richiesto.

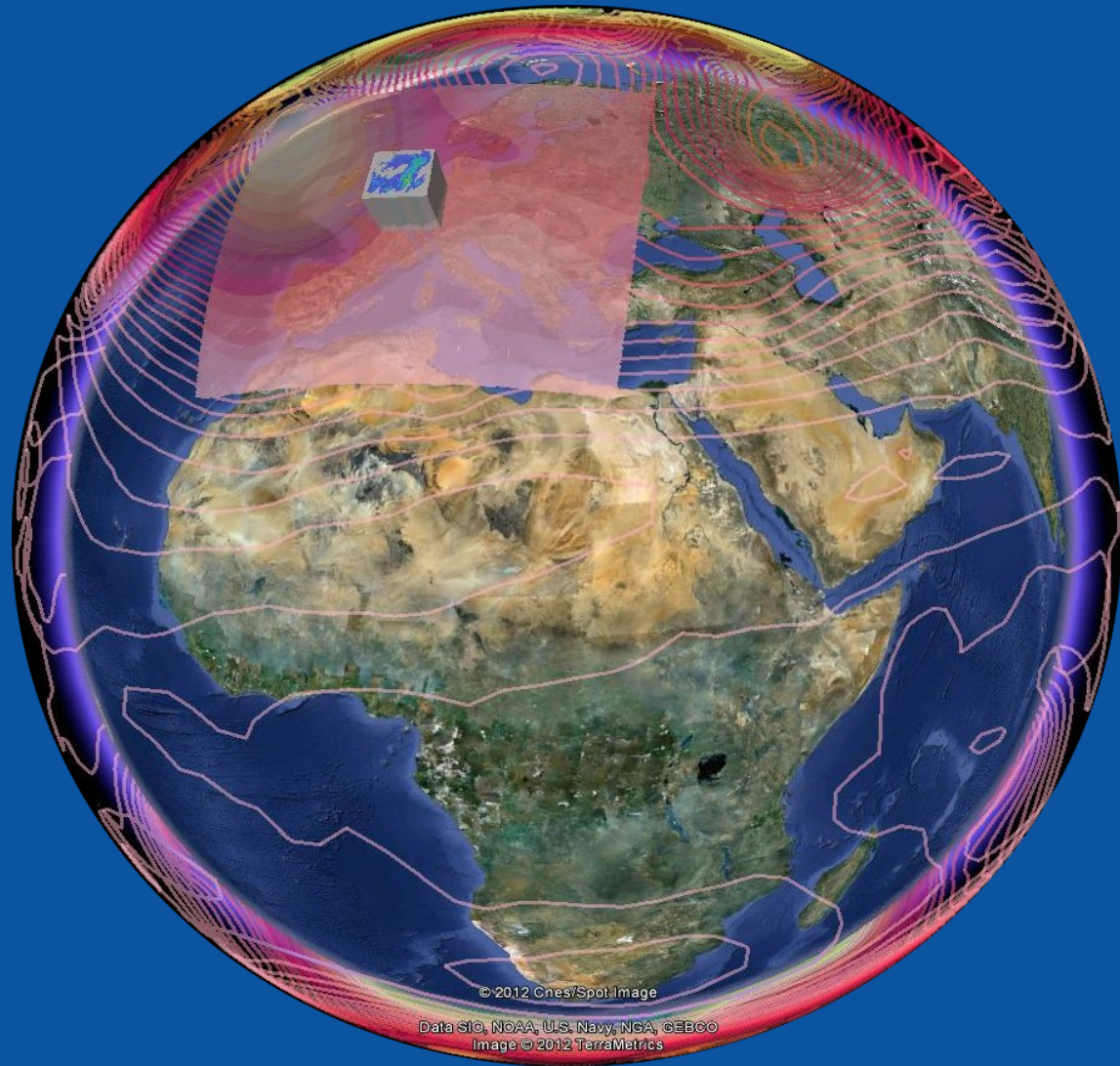
Che cosa si può ottenere?

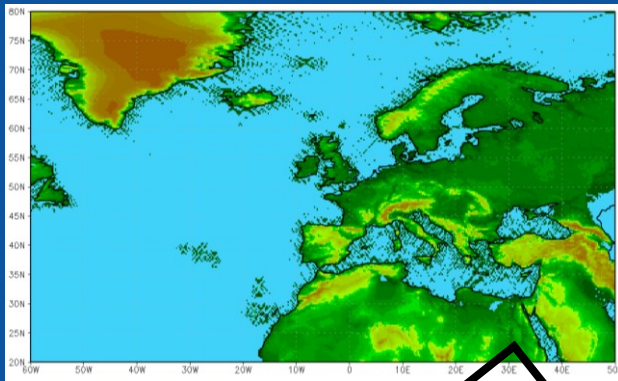
Una interpolazione del campo di vento che tenga conto dell'orografia complessa e di informazioni di dettaglio sul suolo.

Che cosa non si può ottenere?

Qualsiasi informazione di tipo dinamico o termodinamico (instabilità, convezione, . . .).

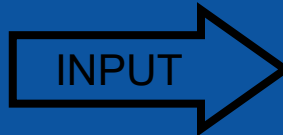
La catena modellistica operativa in ARPAL





Previsioni a medio termine
(15 giorni)

ECMWF
Risol. 10 km



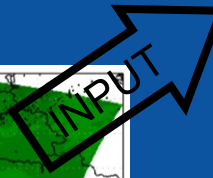
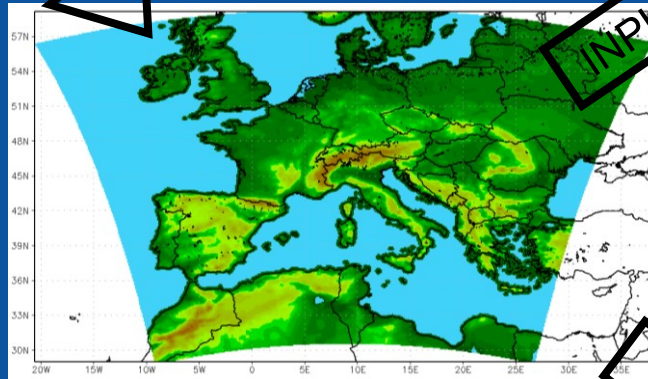
Modellistica
IDROLOGICA

Modellistica
MARINA

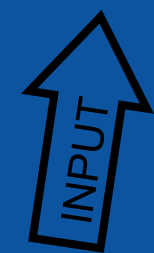
4 run al giorno ogni 6 ore

Previsioni a breve termine
(3 giorni)

BOLAM
Risol. 8 km



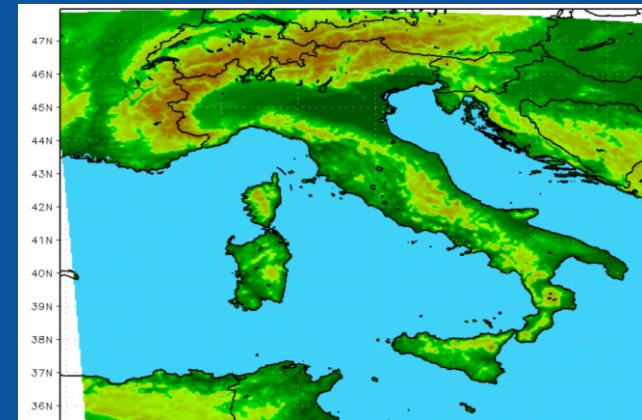
Modellistica di
QUALITÀ DELL'ARIA

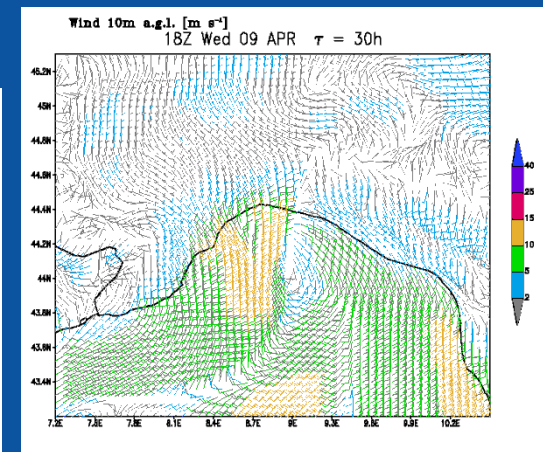
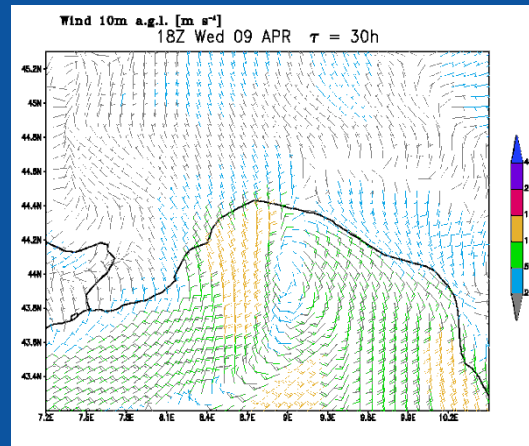
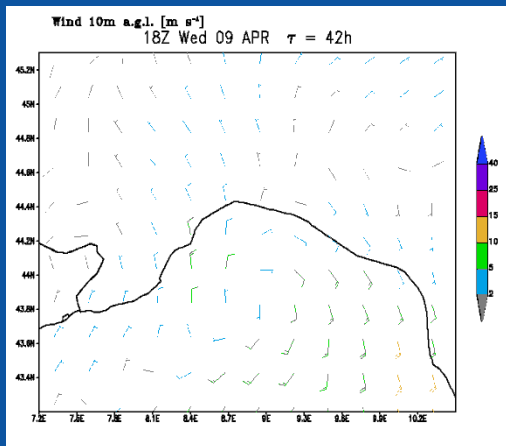
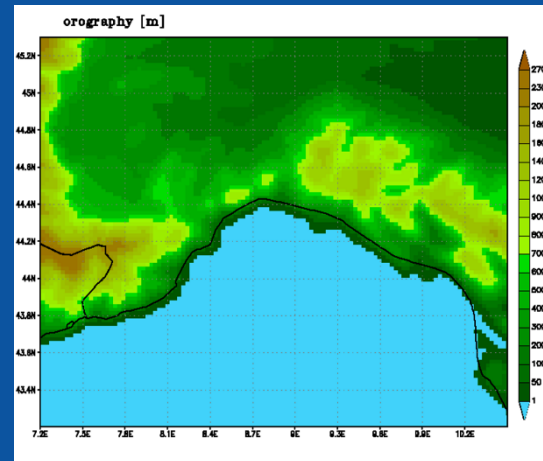
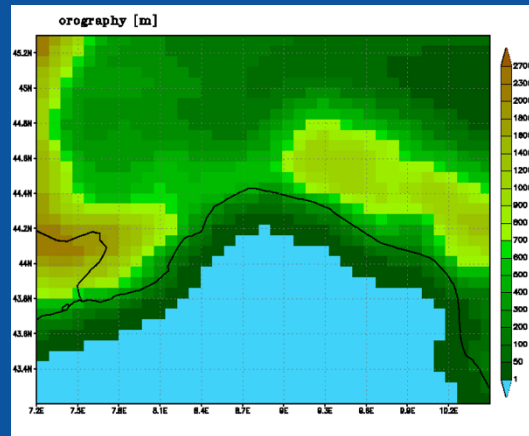
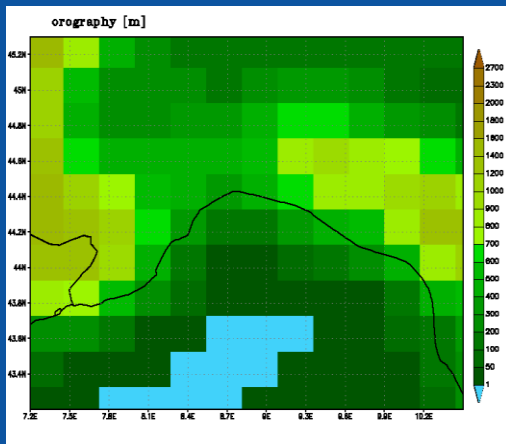


Previsioni a breve termine
(2 giorni)

MOLOCH
Risol. 1.5 km

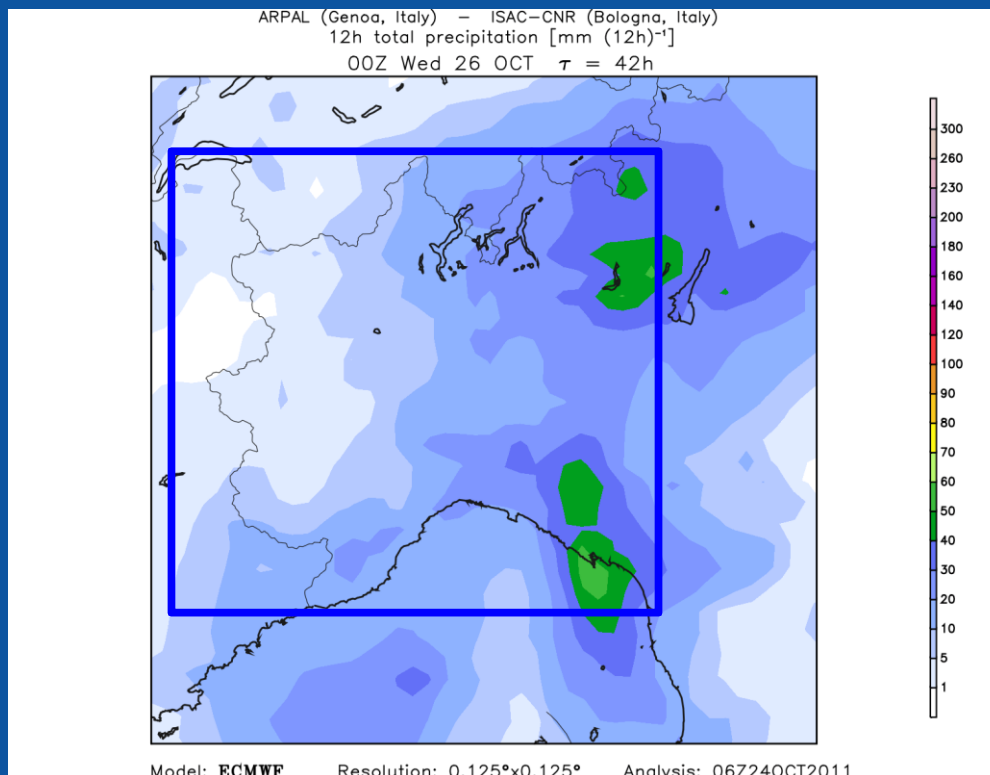
Modellistica
METEOROLOGICA





La previsione dell'evento del 25 Ottobre 2011

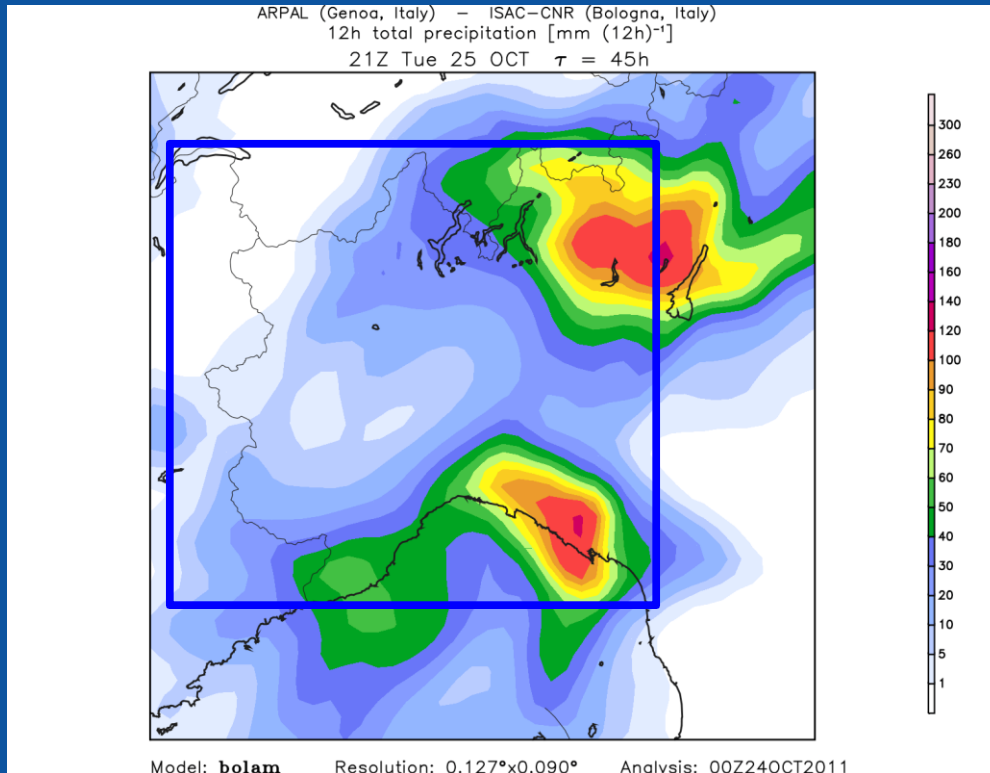
Centro Europeo, risoluzione 16 km – run del 24/10/2011 00:00



**Una applicazione della modellistica LAM:
Precipitazione prevista da ECMWF**

La previsione dell'evento del 25 Ottobre 2011

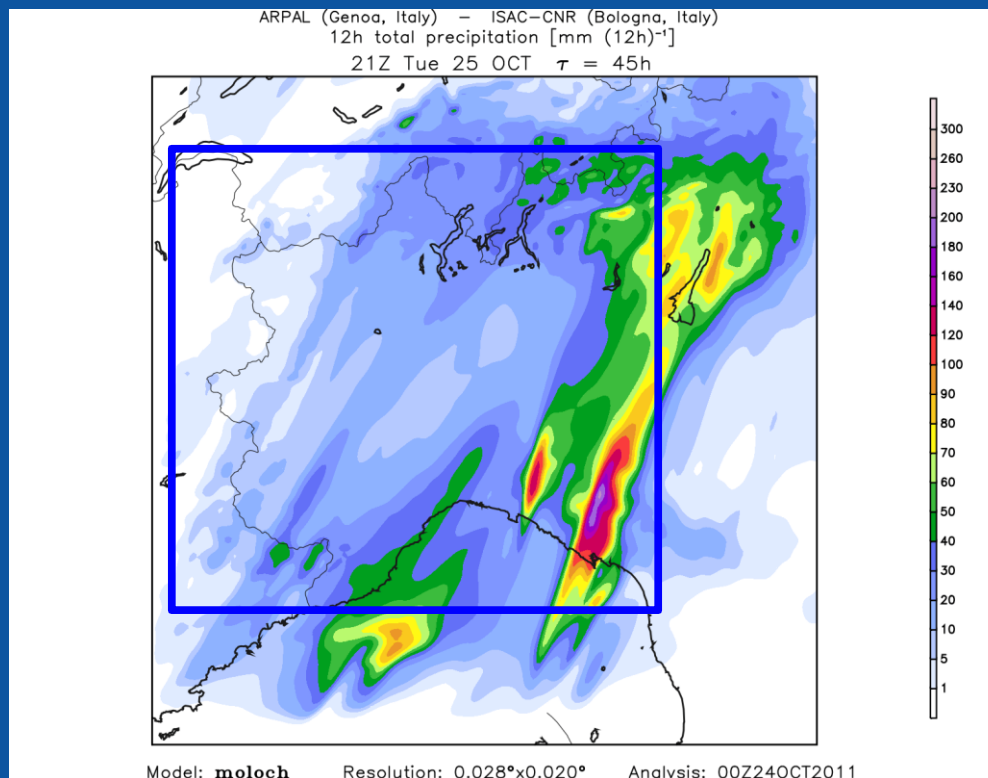
Modello BOLAM, risoluzione 10 km – run del 24/10/2011 00:00



**Una applicazione della modellistica LAM:
Precipitazione prevista da BOLAM**

La previsione dell'evento del 25 Ottobre 2011

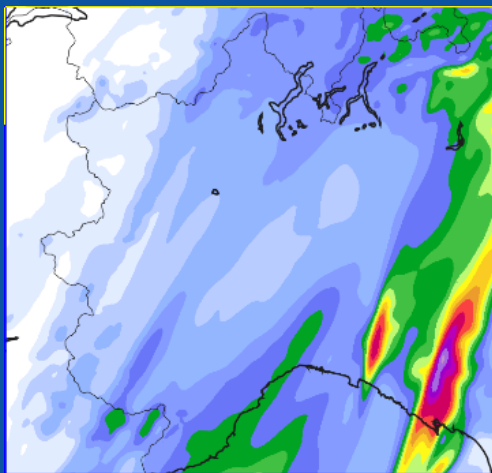
Modello MOLOCH, risoluzione 2.3 km – run del 24/10/2011 00:00



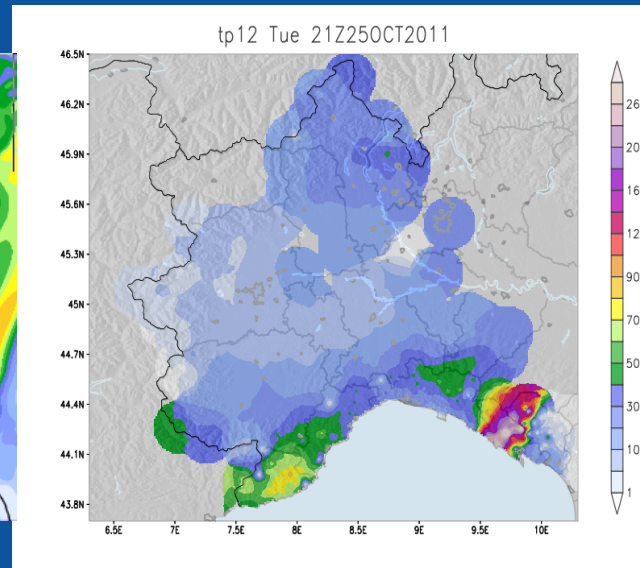
Una applicazione della modellistica LAM:
Precipitazione prevista da MOLOCH

La previsione dell'evento del 25 Ottobre 2011

**Modello MOLOCH, risoluzione
2.3 km – run del 24/10/2011
00:00**

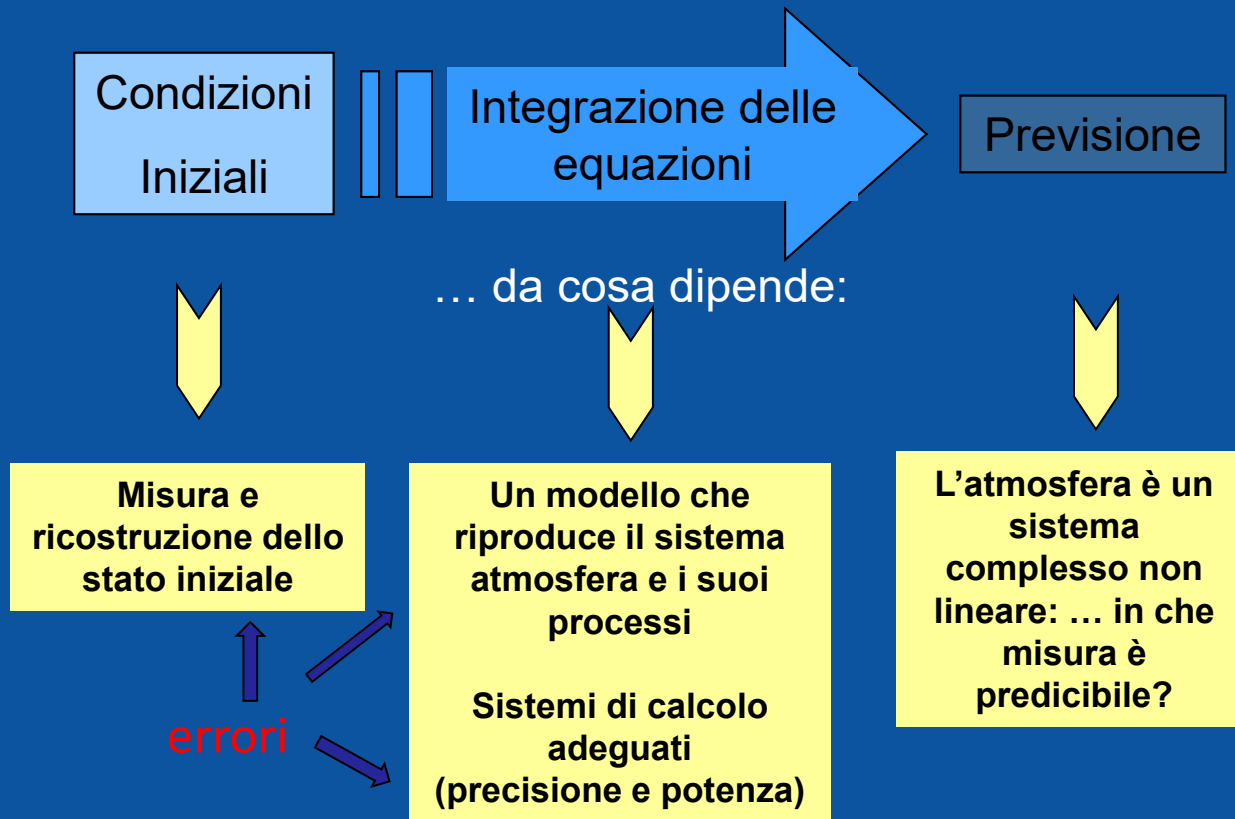


**Pioggia osservata dalla rete
pluviometrica**



**Una applicazione della modellistica LAM:
Precipitazione MOLOCH e osservata**

Accuratezza della previsione

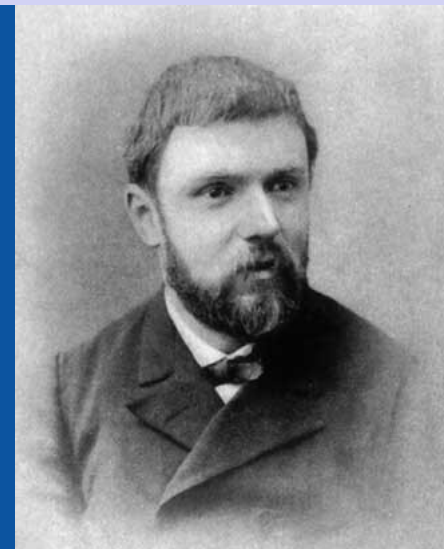




Pierre Simon de Laplace (1749-1827)

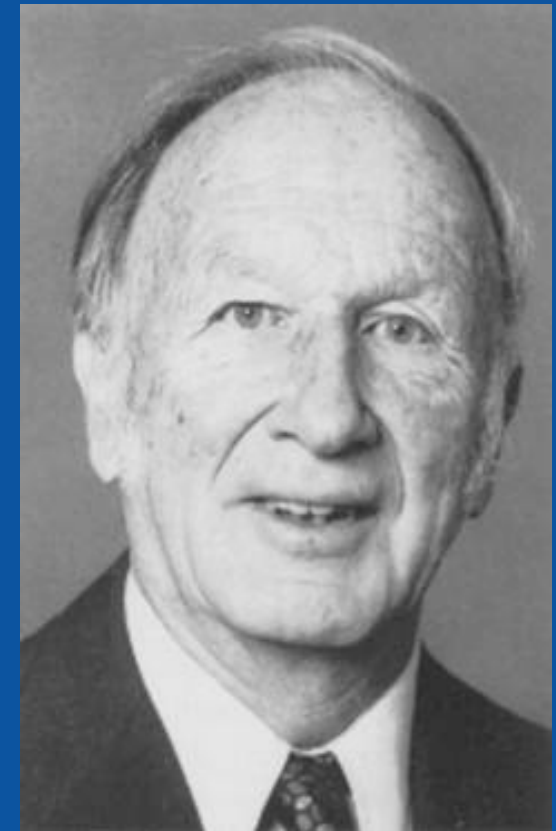
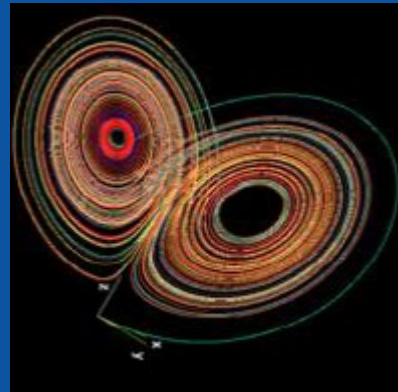
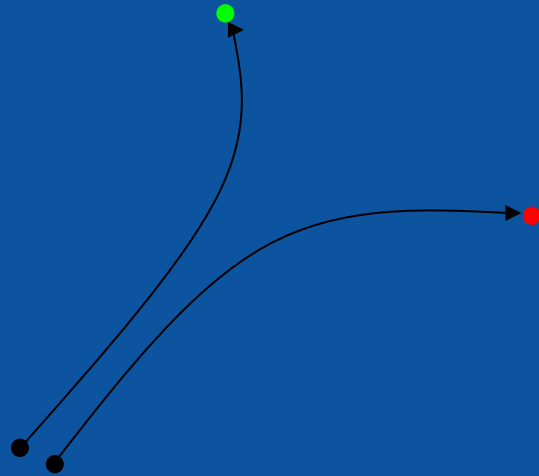
Un'intelligenza che, per un dato istante, conoscesse tutte le forze di cui è animata la natura e la situazione degli esseri che la compongono, se per di più fosse abbastanza profonda per sottomettere questi dati alla analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i movimenti dei più grandi corpi dell'universo e dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto per essa e l'avvenire, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi.

Henri Poincaré (1854-1912)



Se conoscessimo esattamente le leggi della natura e la situazione dell'universo all'istante iniziale, potremmo prevedere esattamente la situazione dello stesso universo in un istante successivo. Ma se pure le leggi naturali non avessero più segreti per noi, potremmo conoscere la situazione iniziale solo approssimativamente. [...] Può accadere che piccole differenze nelle condizioni iniziali ne producano di grandissime nei fenomeni finali. Un piccolo errore nelle prime produce un errore enorme nei secondi. La previsione diventa impossibile e si ha un fenomeno fortuito.

L'ATMOSFERA E' UN SISTEMA CAOTICO!



SENSIBILITÀ ALLE CONDIZIONI INIZIALI
(impredicibilità, effetto farfalla)

Caos deterministico:

il presente determina il futuro ma una conoscenza approssimata del presente non determina approssimativamente il futuro!

Edward Lorenz (1917-2008)

Consideriamo un modello semplice unidimensionale:

$$X_{n+1} = aX_n - X_n^2$$

n rappresenta il tempo e a è una costante (che rappresenta la fisica del sistema). In effetti ci aspettiamo di essere in grado di prevedere l'evoluzione della variabile X all'infinito, note a e la condizione iniziale.

Facciamo un test con $X_0 = 2.2$ e $a = 3.93$. Facciamo anche l'ipotesi che la soluzione corretta sia quella in cui sono considerate tre cifre decimali (per cui $a = 3.930$).

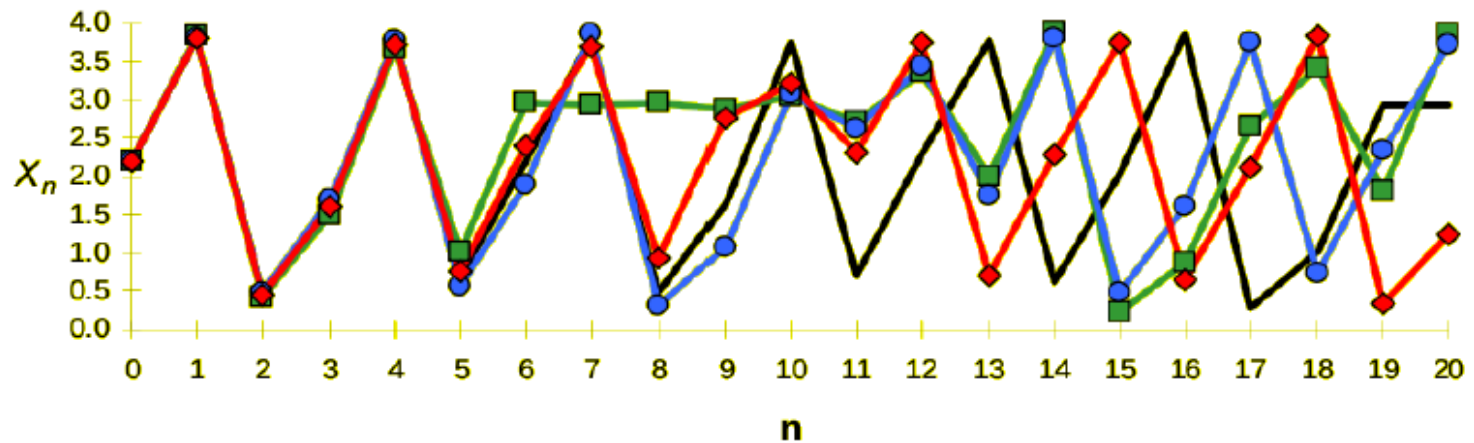
Consideriamo tre tipi di errori:

- Imprecisioni nella conoscenza della fisica;
- Imprecisioni nella condizione iniziale;
- Imprecisioni nel numero di cifre significative.

$$X_{n+1} = a X_n - X_n^2$$

X_0	2.200	2.200	2.210	2.20
a	3.930	3.940	3.930	3.93
Precision (decimal places)	3	3	3	2

$$X_{n+1} = a X_n - X_n^2$$



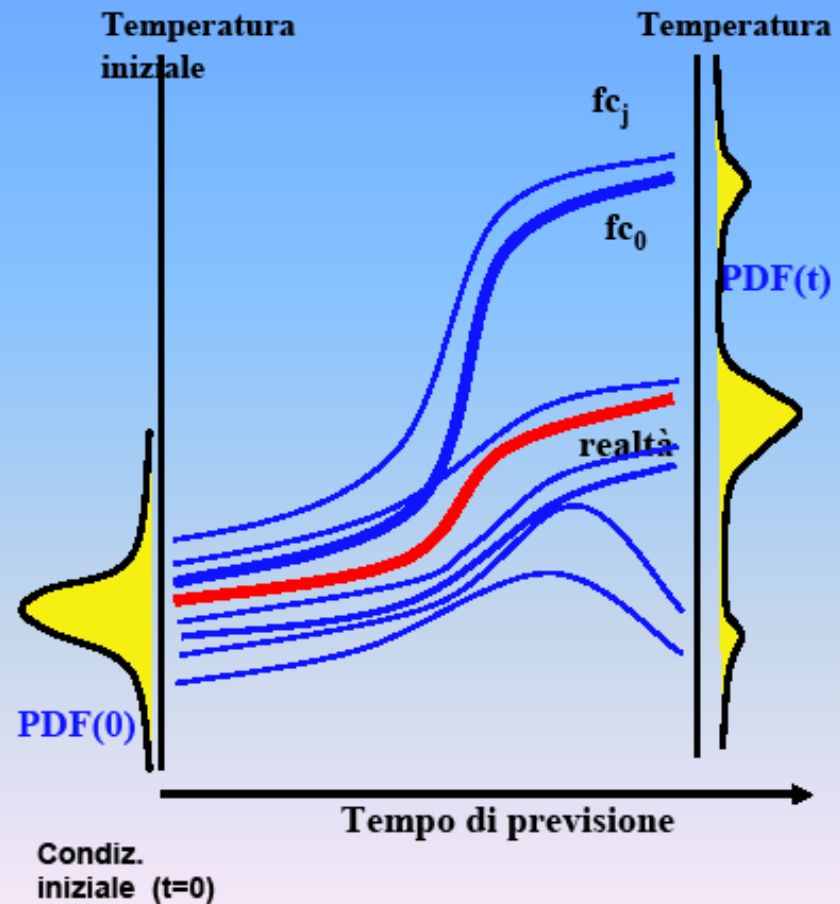
— Control ■ Physics ● Initial Conditions ◆ Rounding

(Source: Prof. Alan Robock, Rutgers University)

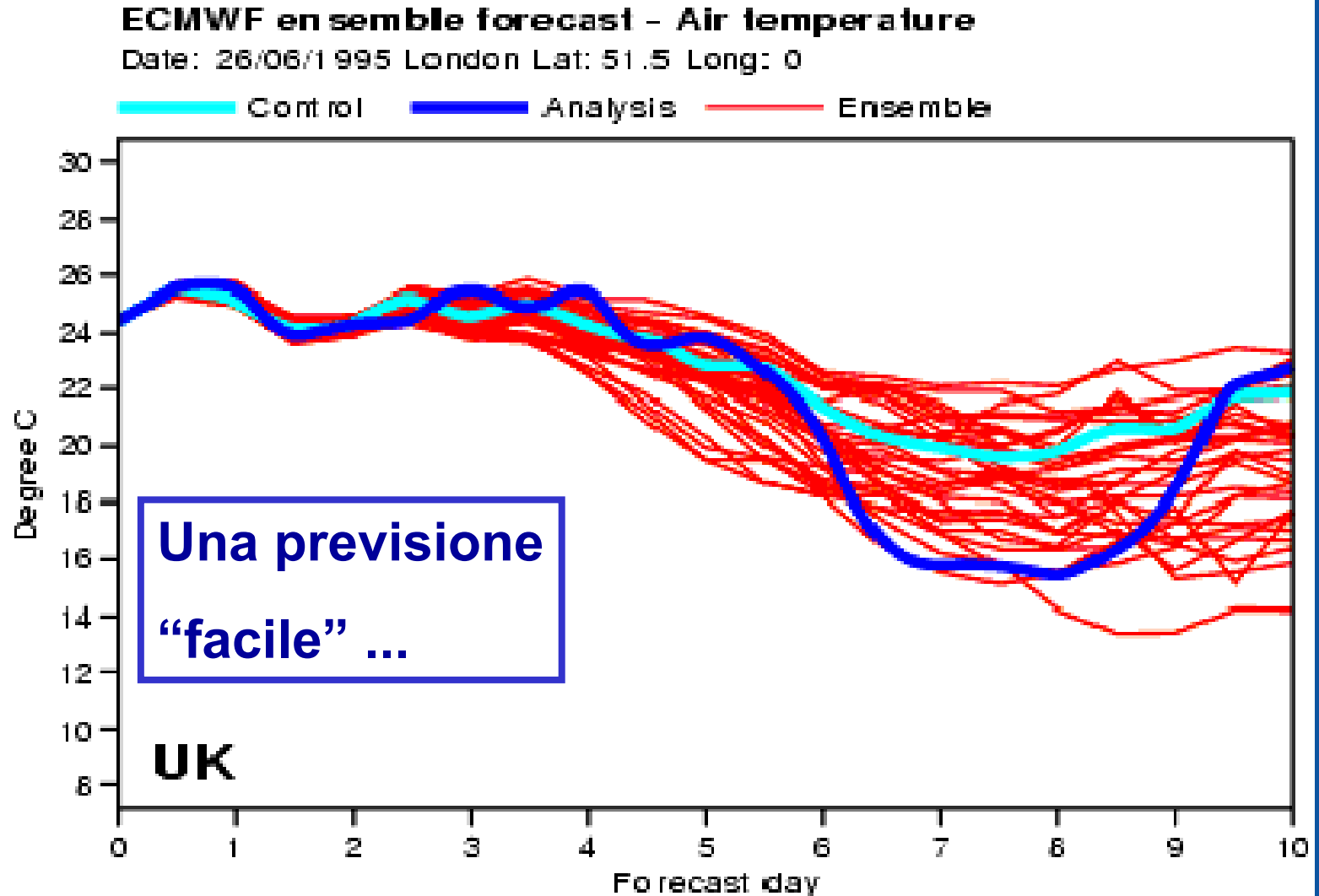
Previsione probabilistica o di ensemble

Invece di effettuare una previsione singola, si prevede una *stima della densità di probabilità (PDF)*.

La *previsione di ensemble* è basata sulla effettuazione di un certo numero di previsioni a partire da condizioni iniziali 'leggermente diverse' e/o utilizzando modelli 'leggermente' diversi



Il caos in atmosfera

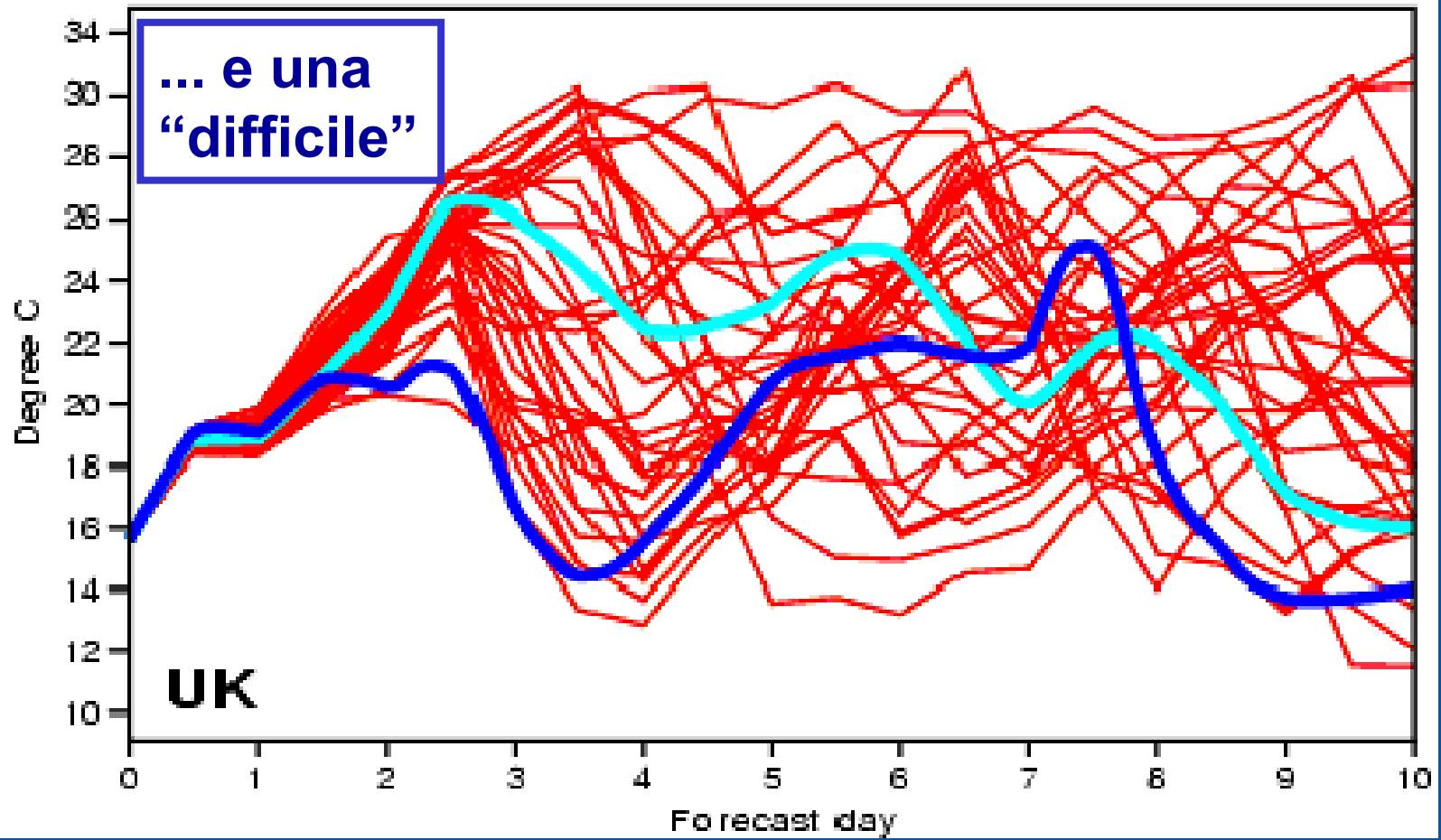


Il caos in atmosfera

ECMWF ensemble forecast - Air temperature

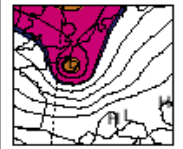
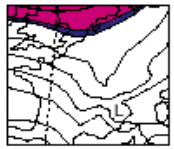
Date: 26/06/1994 London Lat: 51.5 Long: 0

Control Analysis Ensemble

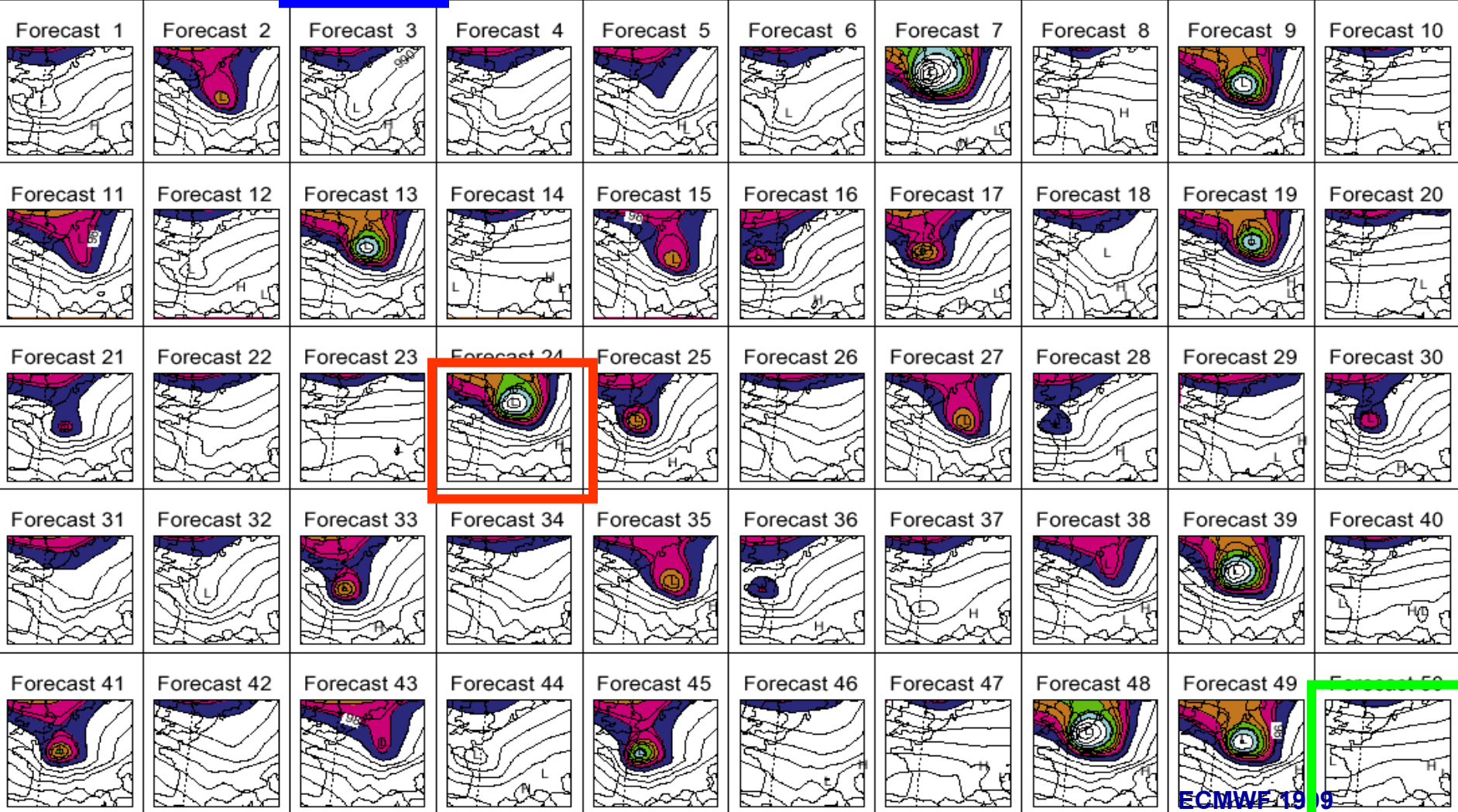


Deterministic prediction

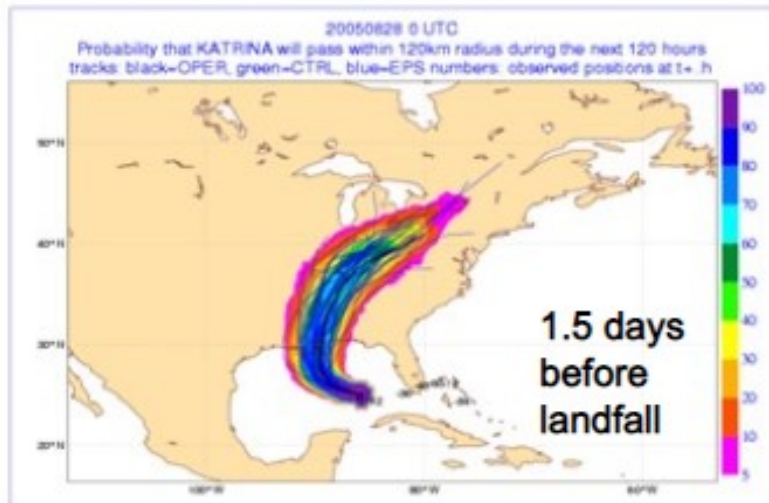
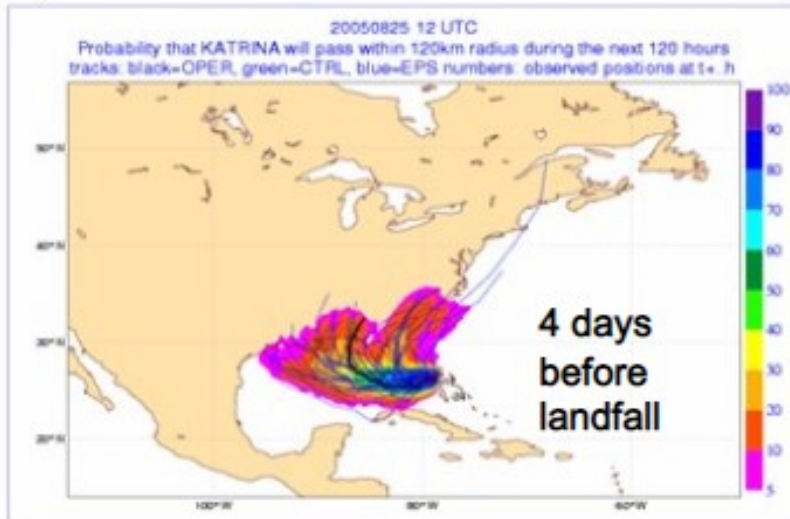
Verification



Ensemble forecast of the French / German storms (surface pressure)
Start date 24 December 1999 : Forecast time T+42 hours



Katrina forecasts – strike probability



ECMWF global forecast products
have been recently made freely
available at:

[https://www.ecmwf.int/en/forecasts/
charts](https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts)

La predicibilità dell'atmosfera

**Limite teorico della predicibilità atmosferica
per moti a grande scala**

~15 giorni

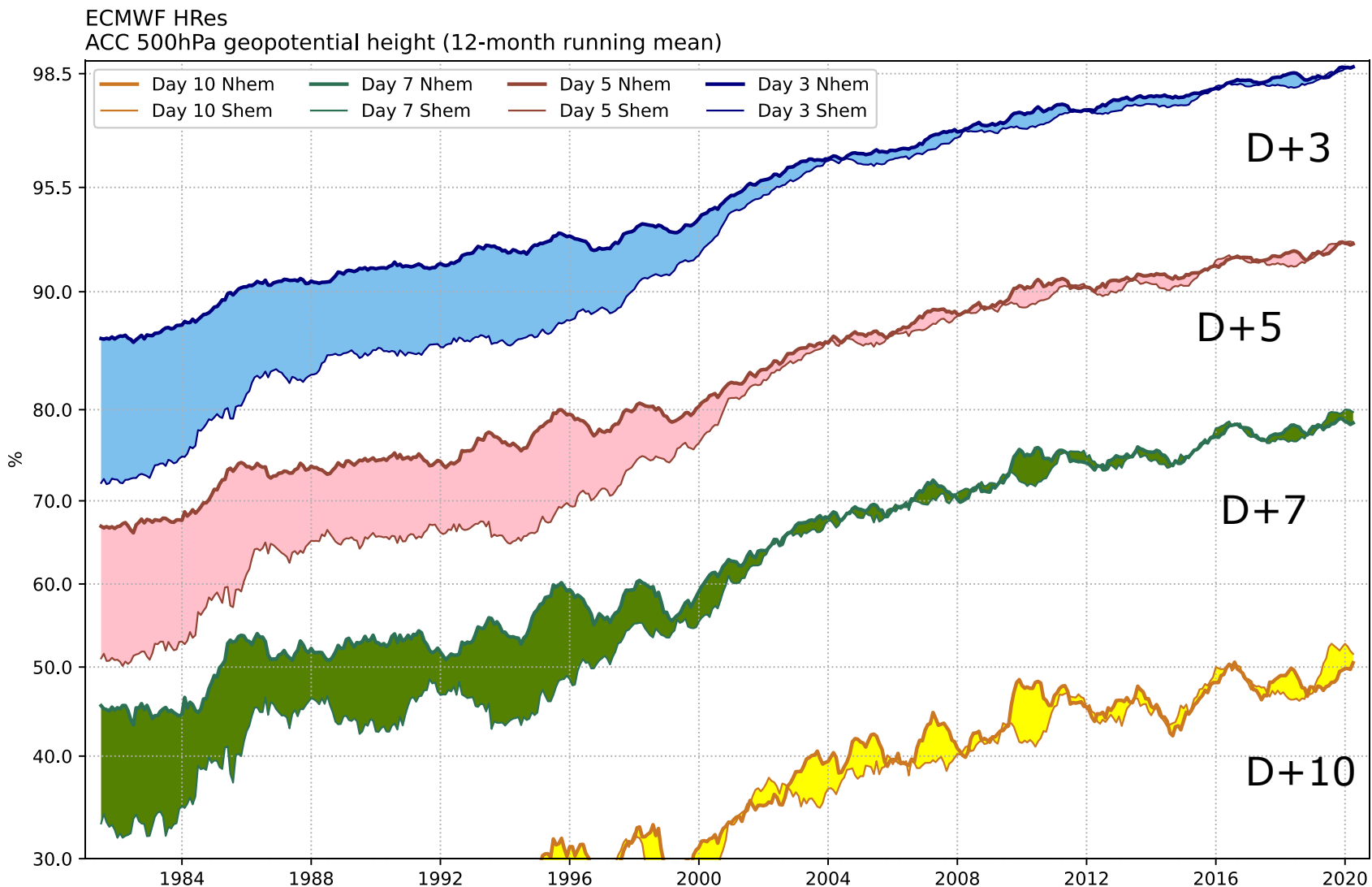
“Forecast skill “ effettivo

~ 5 ÷ 7 giorni

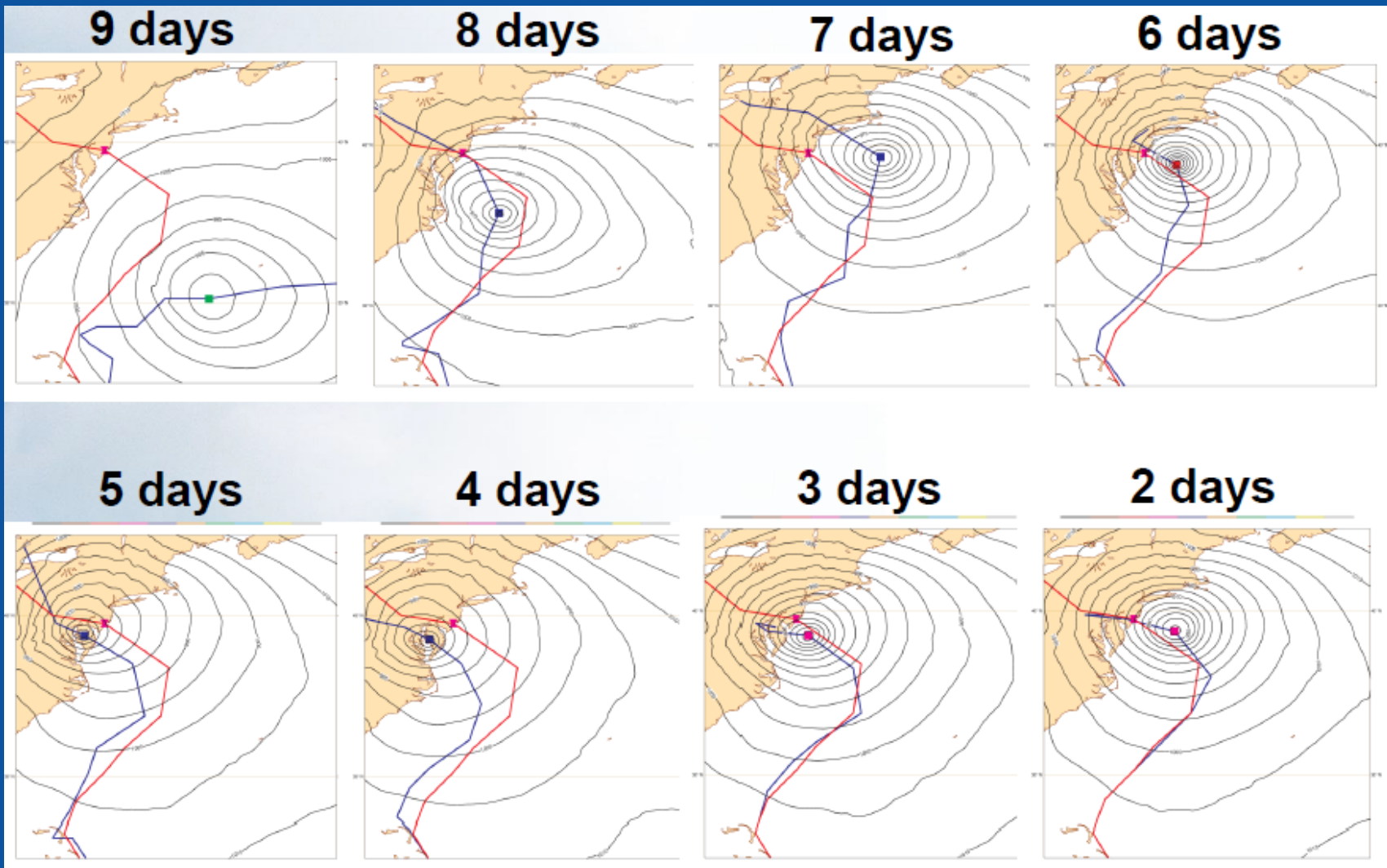
**Limite teorico di predicibilità per il singolo
temporale**

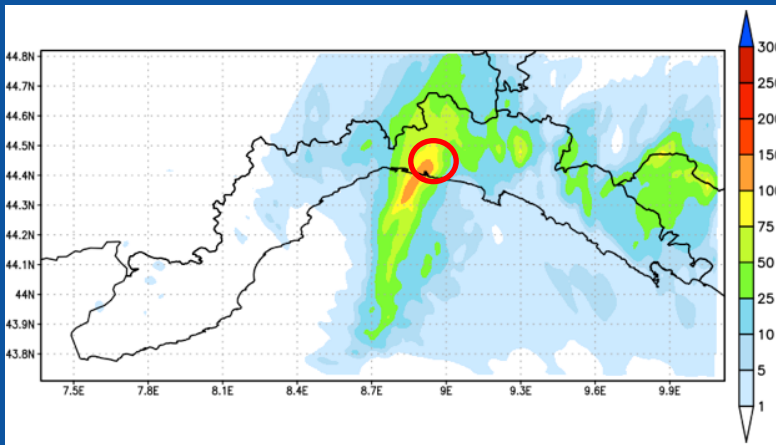
~ 1 h

Evoluzione della qualità delle previsioni



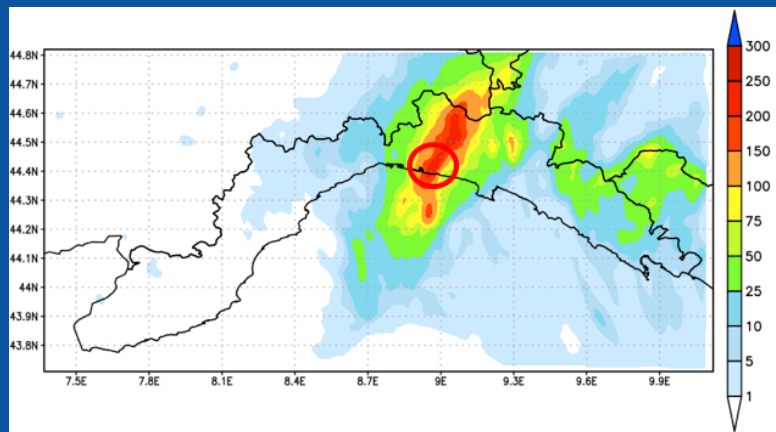
Previsione dell'uragano Sandy (2012)





WRF-GFS run 00UTC, 20141009

**Sensibilità alle condizioni iniziali e al contorno:
9 Ottobre 2014**

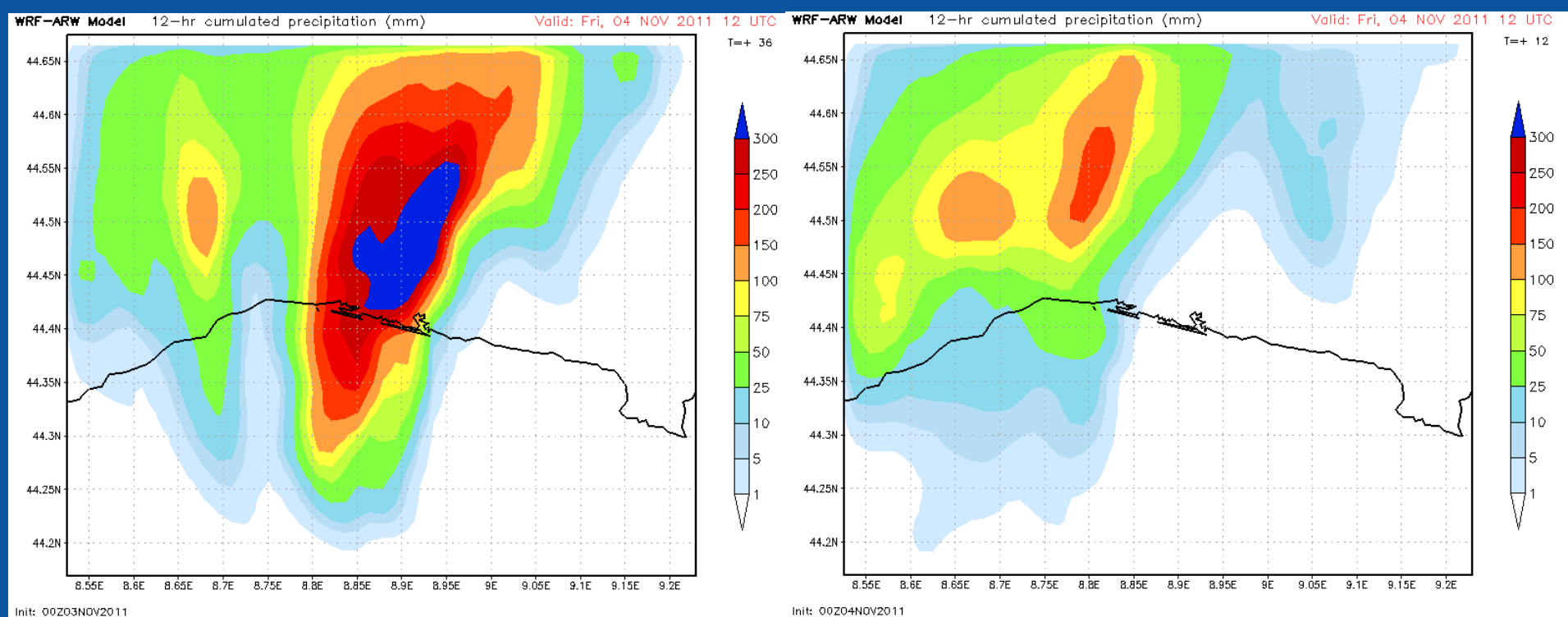


WRF-ECMWF run 00UTC, 20141009

Cassola et al. (2016). The role of the sea on the flash floods events over Liguria (Italy).
Geophysical Research Letters 43

Condizioni iniziali e al contorno diverse portano a previsioni anche molto diverse!

Sensibilità alle condizioni iniziali: 4 Novembre 2011



WRF-GFS run 00UTC, 20111103

WRF-GFS run 00UTC, 20111104

La previsione di oggi può essere peggiore di quella di ieri!

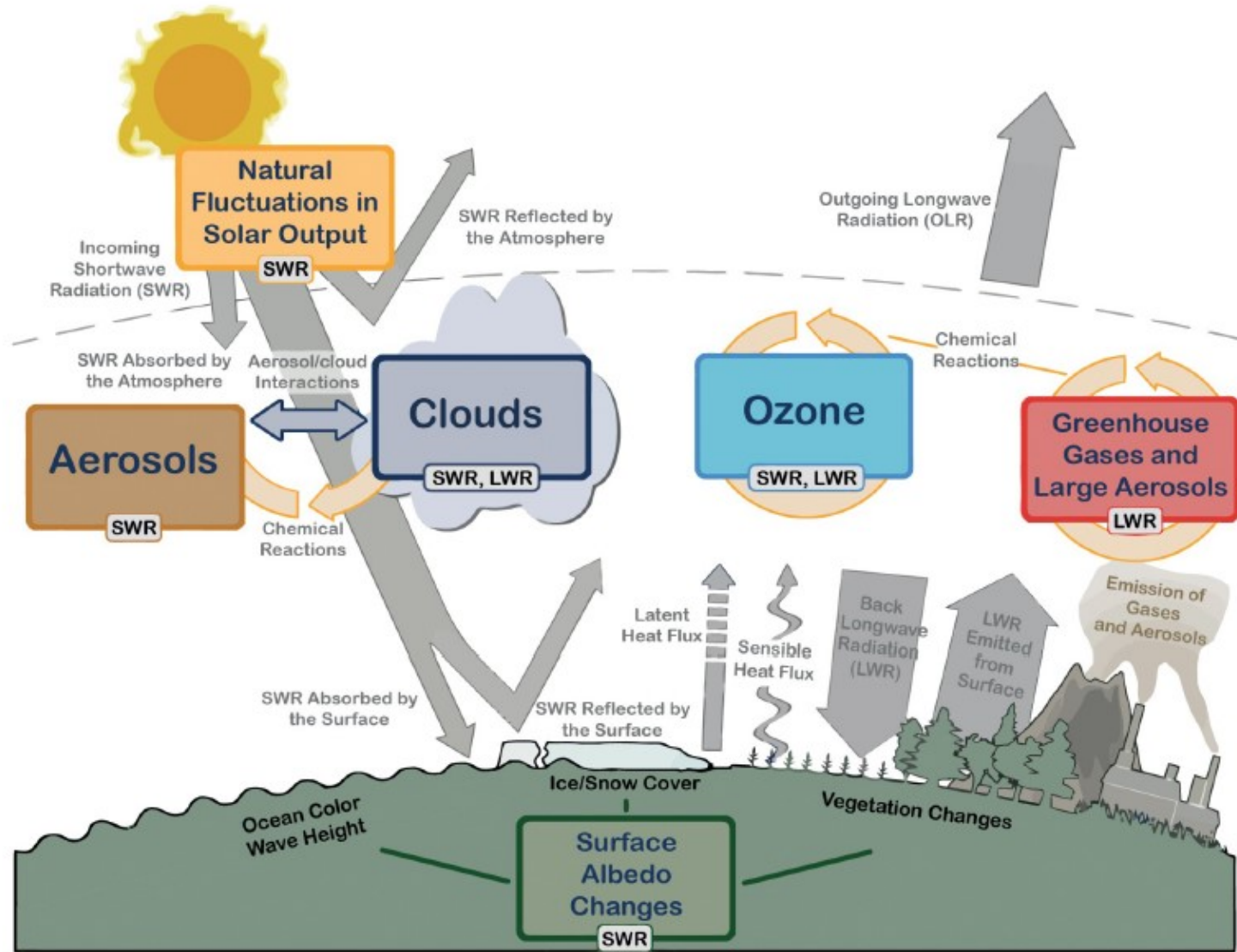
Modelli climatologici

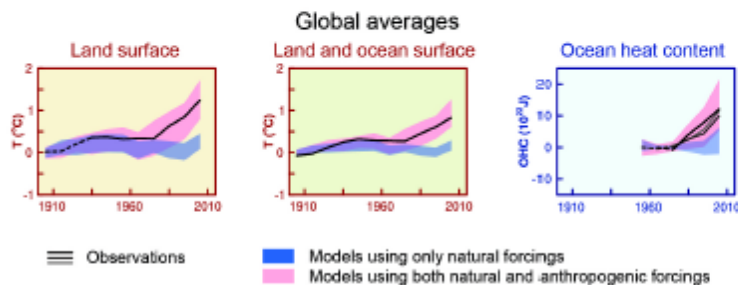
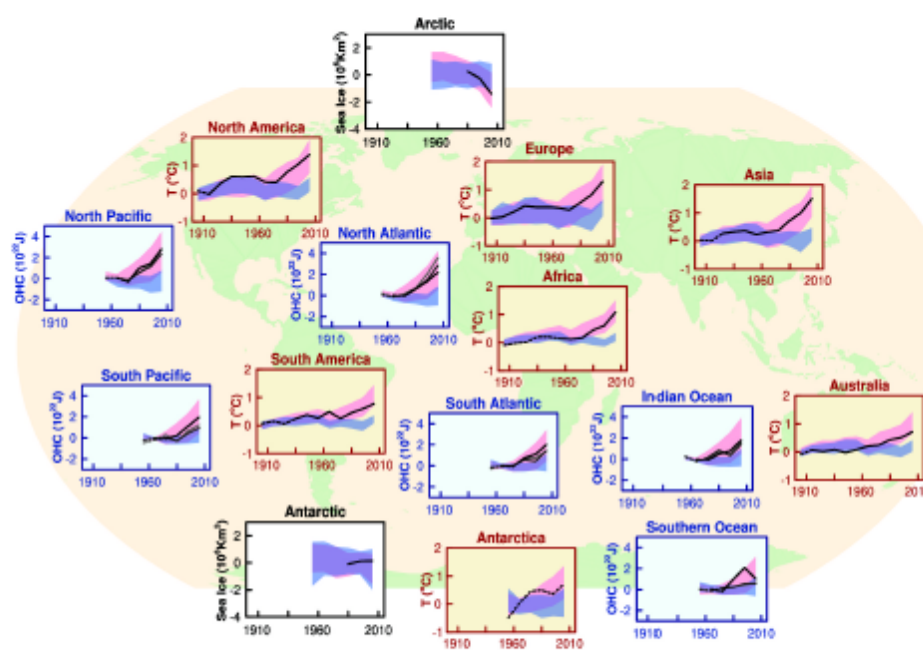
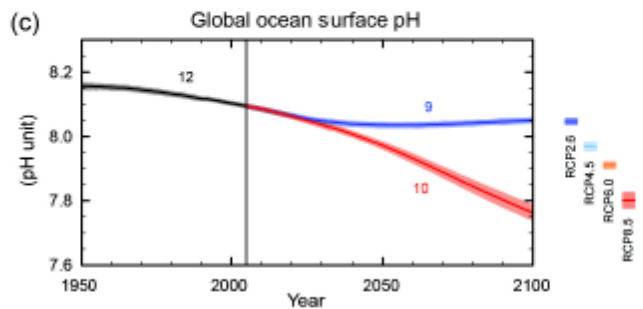
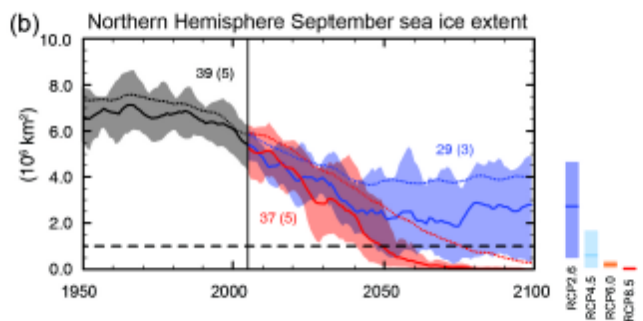
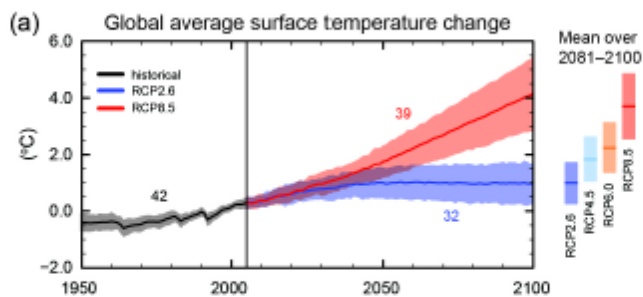
Previsioni a breve e medio termine

Problema ai valori iniziali: predicibilità di primo livello.
Limite teorico dell'ordine dei 15 giorni.

Previsioni climatologiche

Problema alle condizioni al contorno: predicibilità di secondo livello.
Le condizioni al contorno possono avere una variabilità più lenta rispetto a quella dell'atmosfera: è quindi possibile una predicibilità su tempi più lunghi, a patto di abbandonare un approccio deterministico.





Verso il futuro

Enormi progressi della meteorologia negli ultimi decenni grazie a una miglior descrizione dei processi fisici, all'aumento delle osservazioni disponibili e a calcolatori sempre più potenti

La sfida dei prossimi anni è estendere la frontiera della predicibilità tramite sistemi di assimilazione dati sempre più efficienti, aumento della risoluzione (GCM non idrostatici) e uso di «modelli del sistema Terra» (accoppiamento con oceano, aerosol e chimica, ecc...)

L'atmosfera è un sistema caotico con limiti intrinseci di predicibilità: non si può prevedere se ci sarà un temporale sul DIFI alle ore 15 di dopodomani!

Ruolo fondamentale del previsore nell'interpretare le uscite dei modelli anche grazie alla conoscenza del territorio