

Quanto è difficile prevedere il clima? E il tempo (atmosferico)?

S. Tibaldi

ARPA Emilia-Romagna
e Università di Bologna

Ringraziamenti per il materiale a:



e molti altri...



Schema della presentazione

- Come si fanno le previsioni meteorologiche?
- Sono migliorate nel tempo e, se sì, perché?
- E le proiezioni climatiche?
- L'attendibilità delle proiezioni climatiche
- La gestione dell'incertezza nelle previsioni meteorologiche
- Le previsioni in probabilità
- E la farfalla, c'entra qualcosa?

Come si fanno le previsioni
meteorologiche?

Con i modelli matematici globali (e ad area
limitata) che risolvono le “equazioni del
moto” dell’atmosfera usando grandi
supercalcolatori

I modelli matematici di previsione del tempo trattano l'atmosfera come un fluido soggetto alle leggi della dinamica e della termodinamica (conservazione della massa, dell'energia, della quantità di moto), leggi espresse attraverso equazioni differenziali alle derivate parziali, funzioni delle variabili meteorologiche (pressione, temperatura, umidità, nubi, velocità del vento, radiazione solare e terrestre) e dello spazio e del tempo.

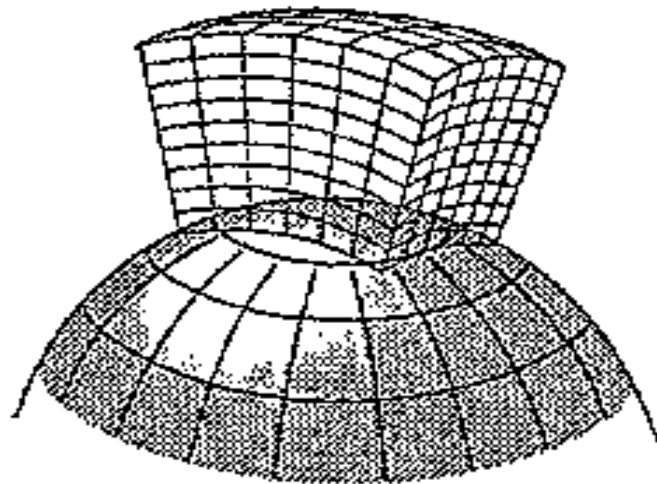
- $\frac{dv}{dt} = -(1/\rho)\nabla p - g(r/r) + (1/\rho)[\nabla \cdot (\mu \nabla v) + \nabla(\lambda \nabla \cdot v)]$
- $c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = q + f$
- $\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot v = 0$
- $p = \rho RT.$

Il tutto sulla sfera!

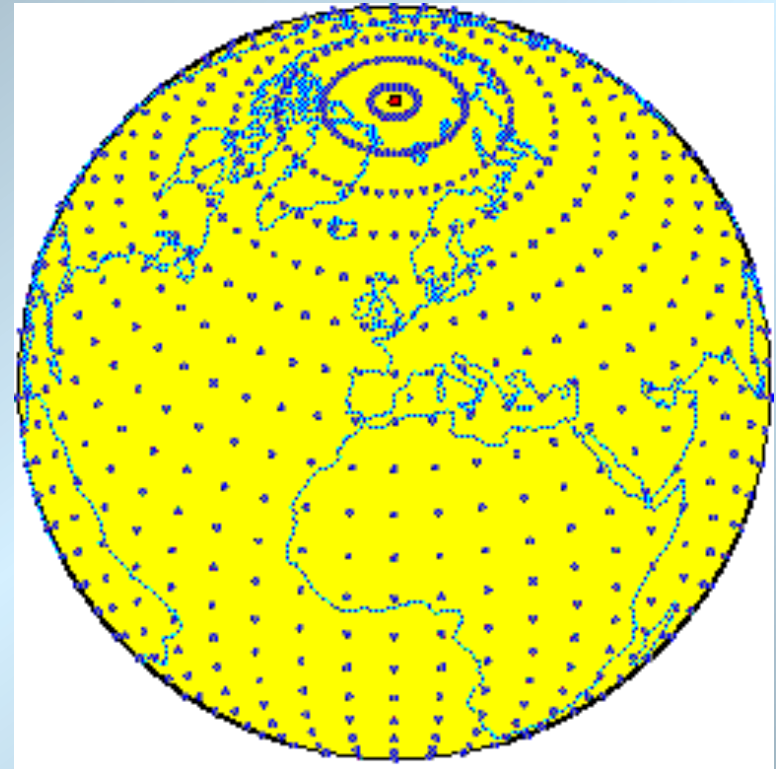
- Sei equazioni in sei incognite ($\underline{v}$, p , ρ , T)
- Conservazione della quantità di moto (secondo principio della dinamica, $\underline{F} = m \underline{a}$, tre equazioni)
- Conservazione dell'energia
- Conservazione della massa (equazione di continuità, in verità spesso sono tre o quattro equazioni: aria, vapor d'acqua, acqua liquida, ghiaccio)
- Equazione di stato dei gas perfetti

Poi le equazioni bisogna
risolverle (approssimativamente)
con i cosiddetti metodi numerici:
la discretizzazione

Atmosphère



Terre

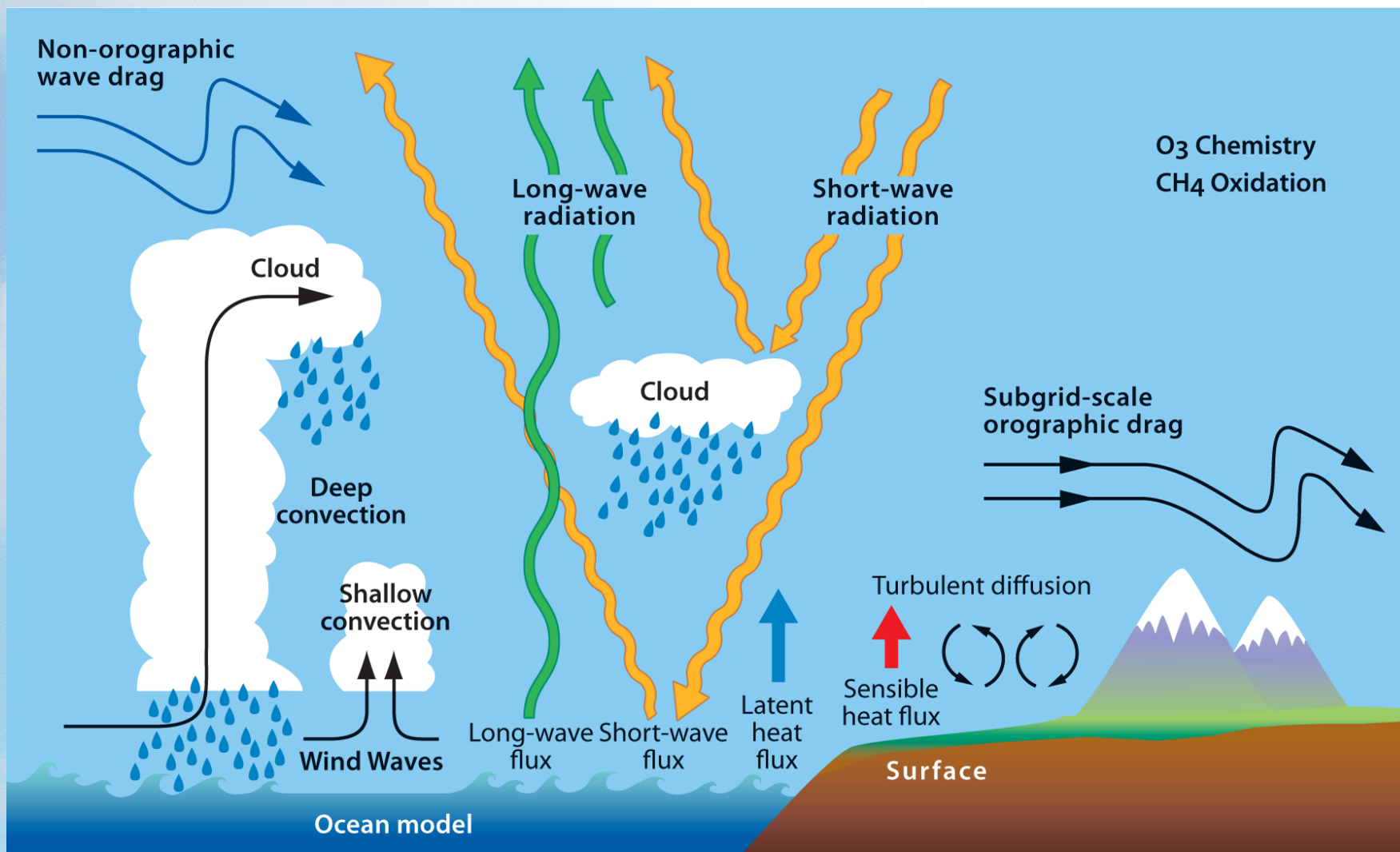


E' tutto già compreso nelle equazioni o manca qualcosa?

Manca, manca, manca sempre qualcosa...
manca soprattutto la descrizione di tutti quei
fenomeni fisici che a causa della limitata
risoluzione spaziale dei modelli (limitata
capacità di descrivere i fenomeni in piccolo),
non vengono rappresentati adeguatamente, ma
sono importanti.

Occorre rappresentarli, magari anche soltanto
approssimativamente,

Le “parametrizzazioni” degli effetti fisici da includere nei modelli

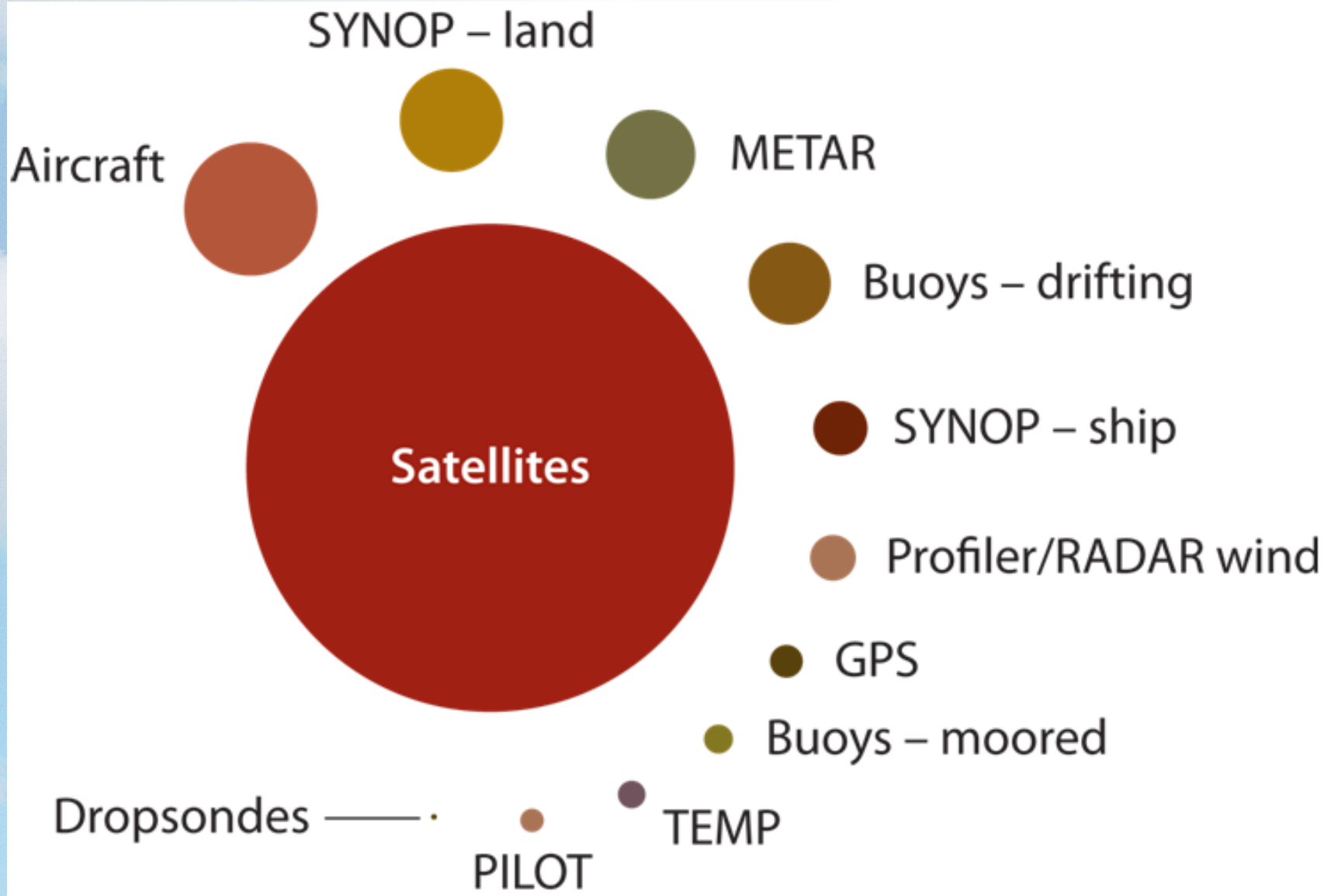


Le equazioni che alla fine vengono risolte sono quindi molto complicate (molte variabili, alcune delle quali non direttamente osservabili dal sistema osservativo meteorologico) e complesse (fortemente non-lineari) e devono essere risolte con l'aiuto delle tecniche dell'analisi numerica e di potenti elaboratori digitali, oltre che partendo da tutti i dati meteorologici osservati disponibili, al suolo e in quota e con tecniche di "remote sensing" (radar e satelliti)

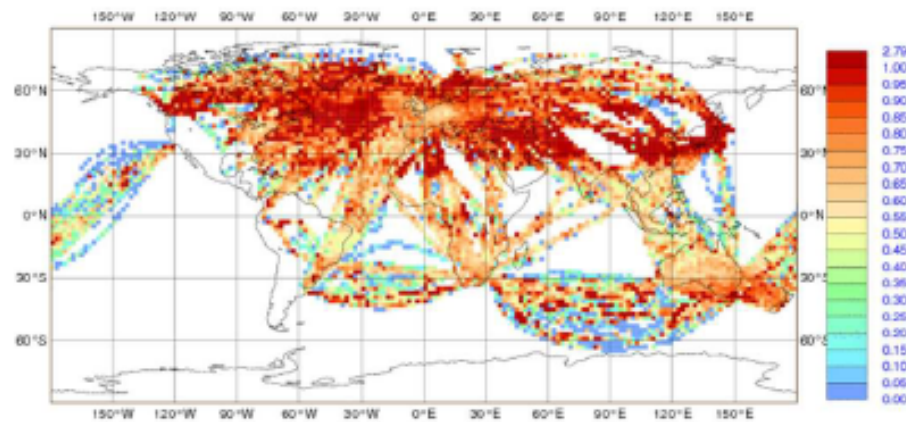
La meteorologia chiama il problema della condizioni iniziali: l'**analisi** e lo affronta con metodi matematici di interpolazione dinamica spazio-temporale chiamati collettivamente: **assimilazione dati**

I dati meteorologici:
come si osserva l'atmosfera?

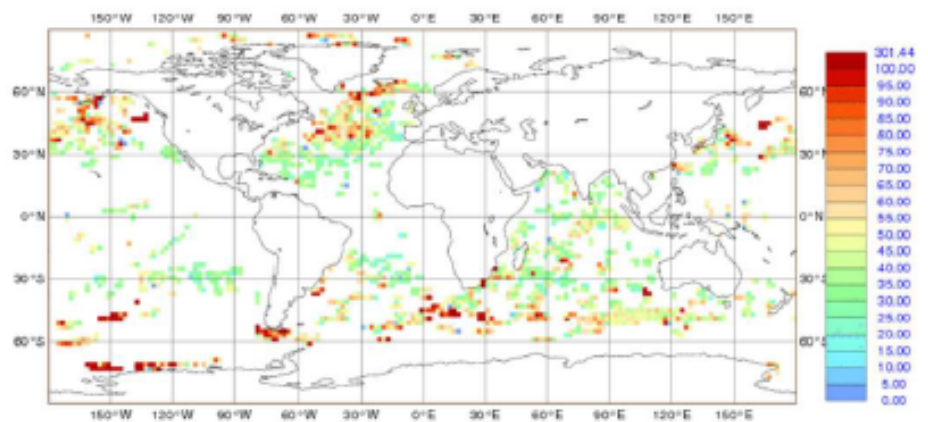
Data Assimilation



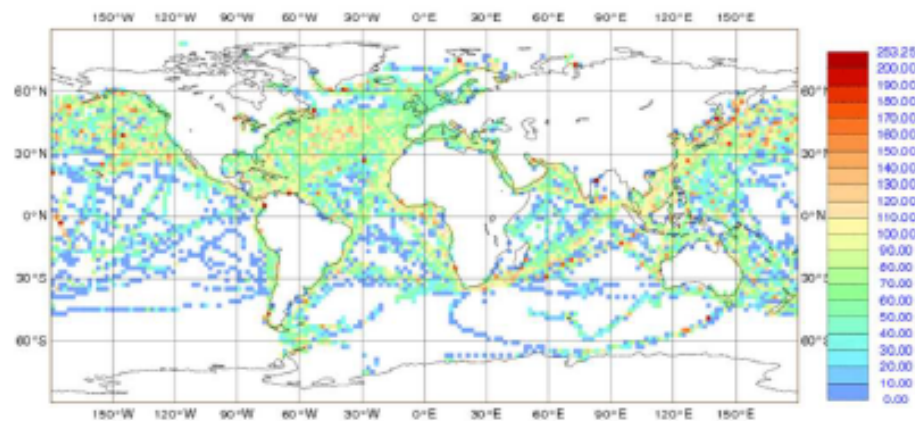
Example of conventional data coverage



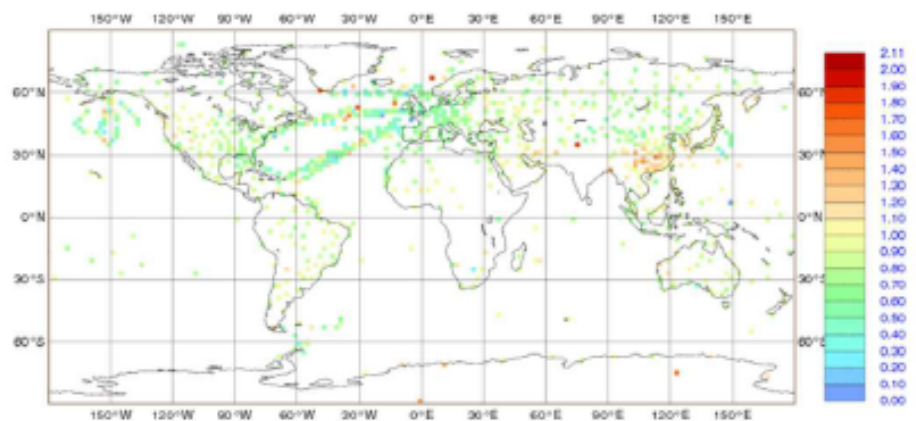
Aircraft – AMDAR



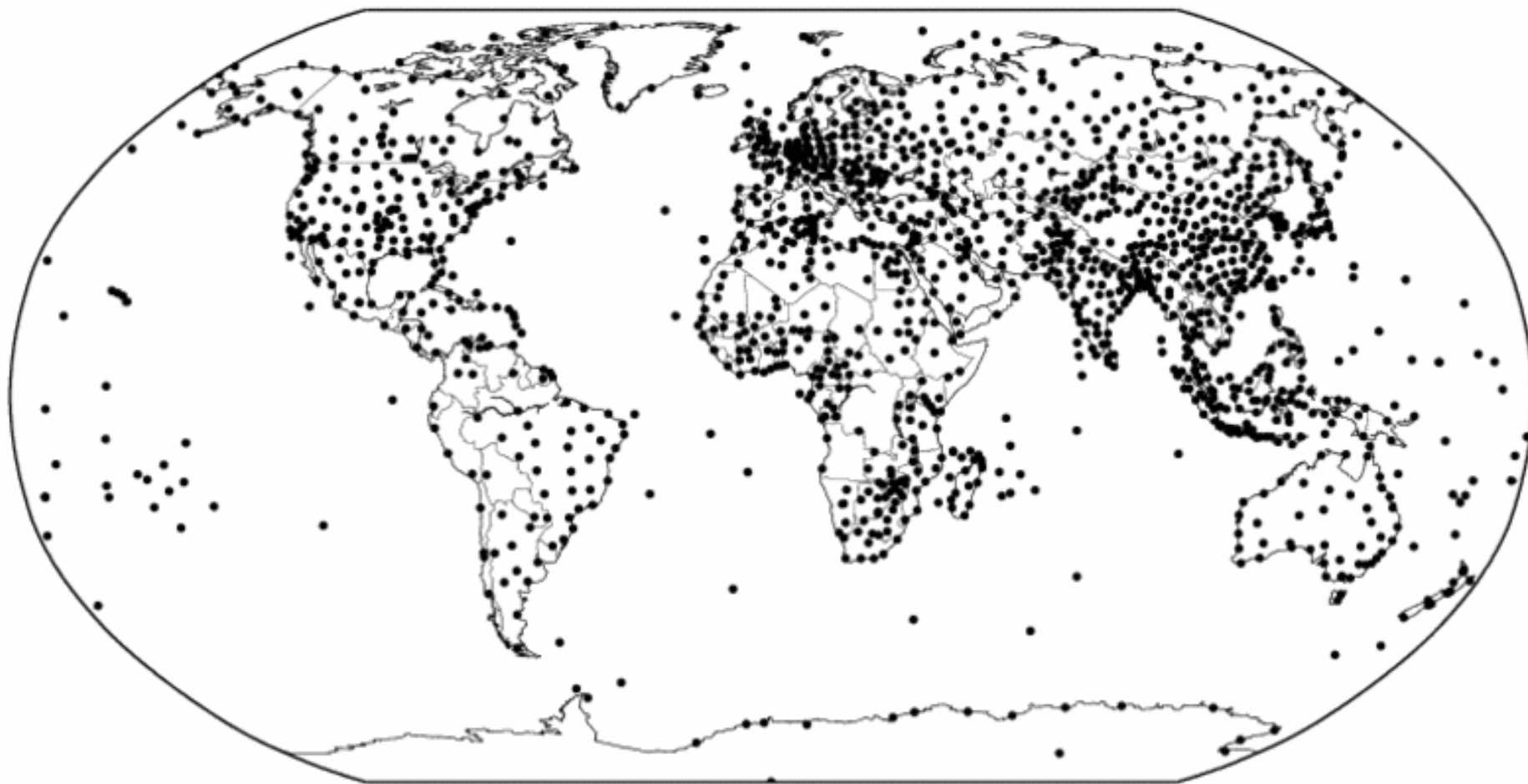
Buoy



Synop - ship



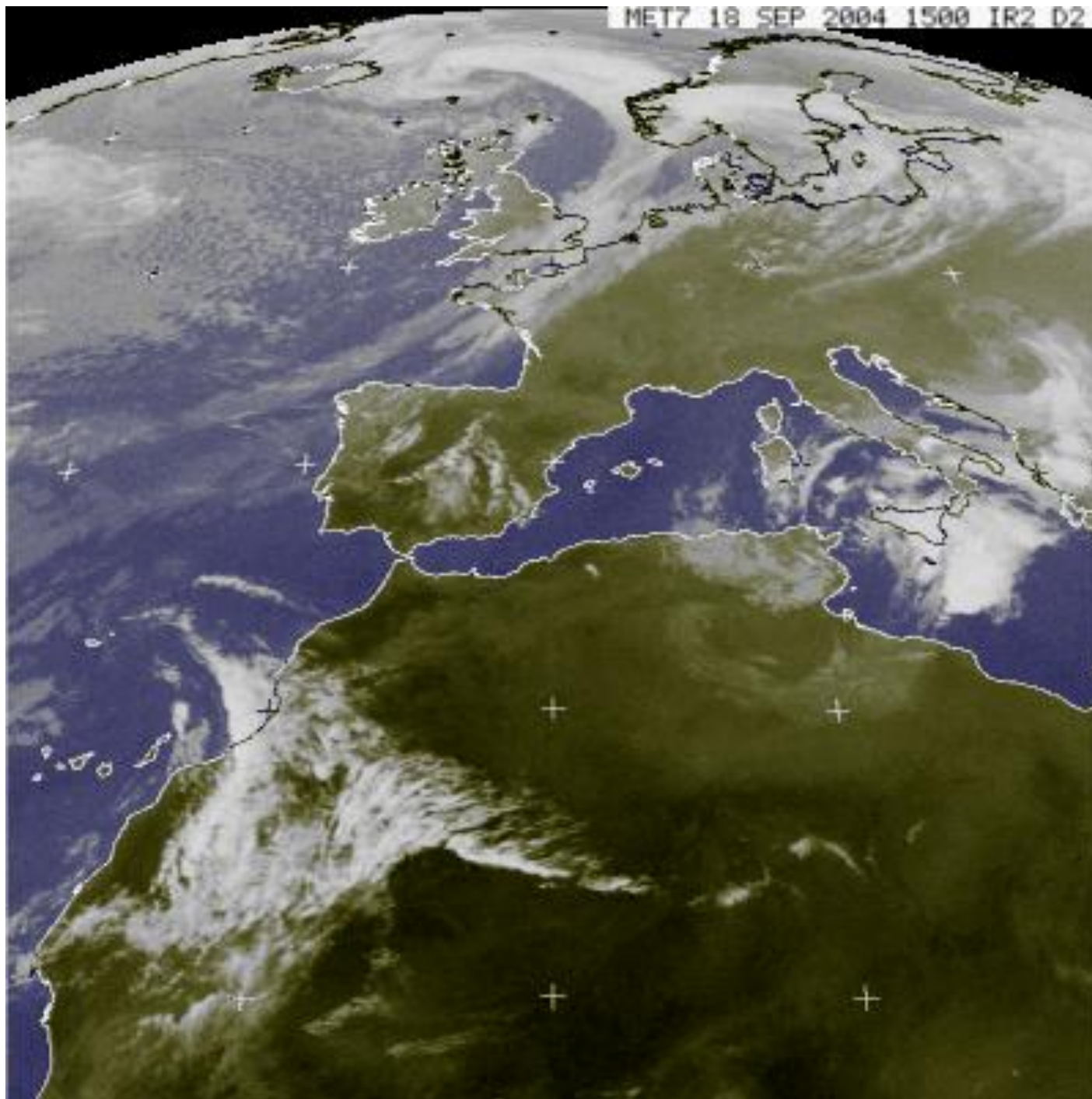
Temp



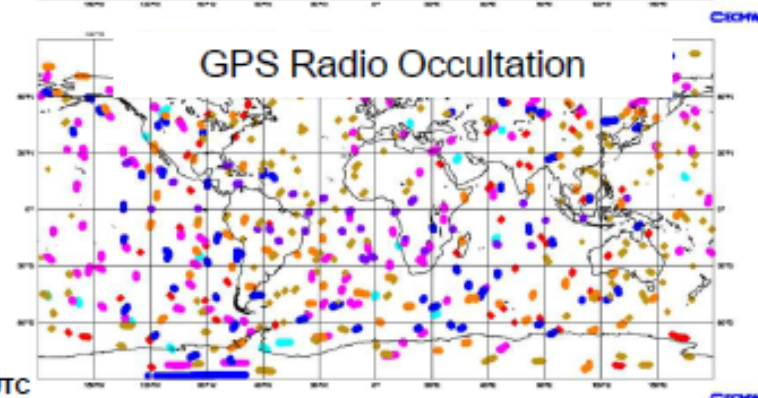
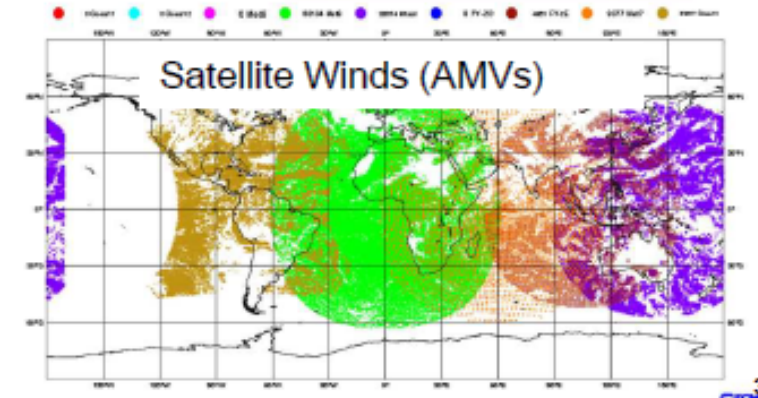
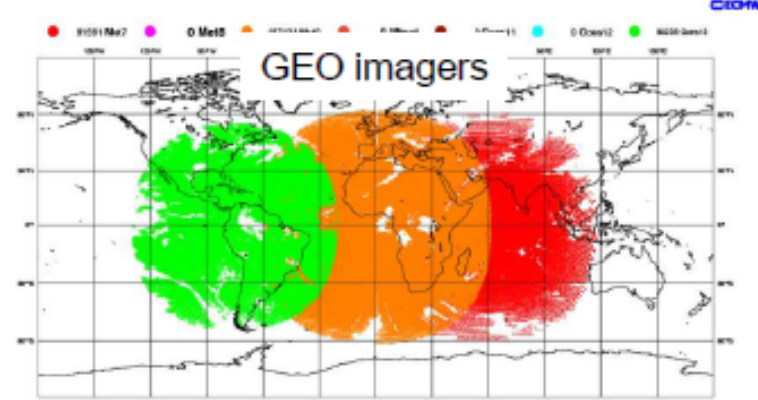
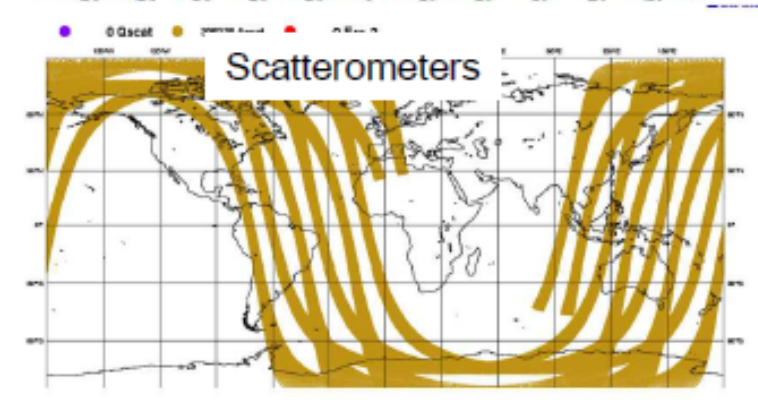
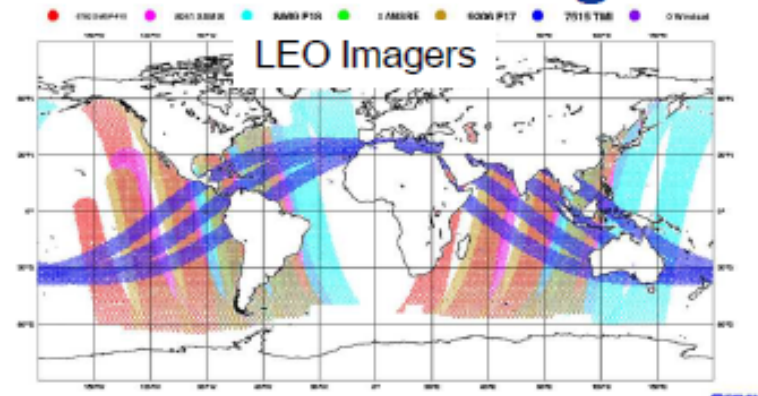
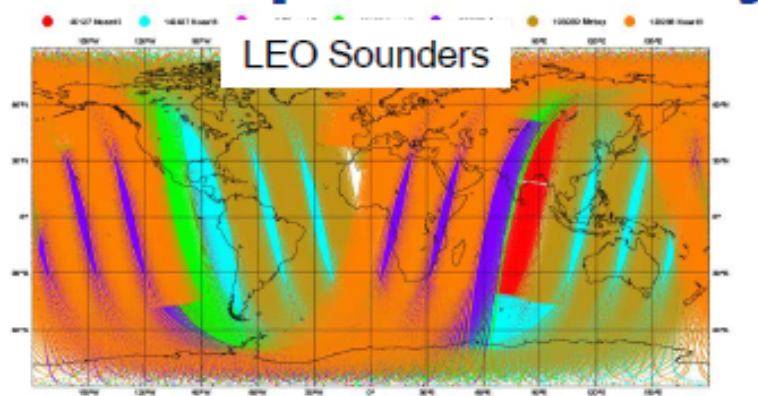
Mappa “storica” delle stazioni di radiosondaggio del WWW (SYNOP)

Un discorso a parte meriterebbe il
ruolo dei satelliti meteo...

MET7 18 SEP 2004 1500 IR2 D2



Example of 6-hourly satellite data coverage



30 March 2012 00 UTC

Le previsioni a grande scala che si
usano in Europa e in Italia:
l'ECMWF

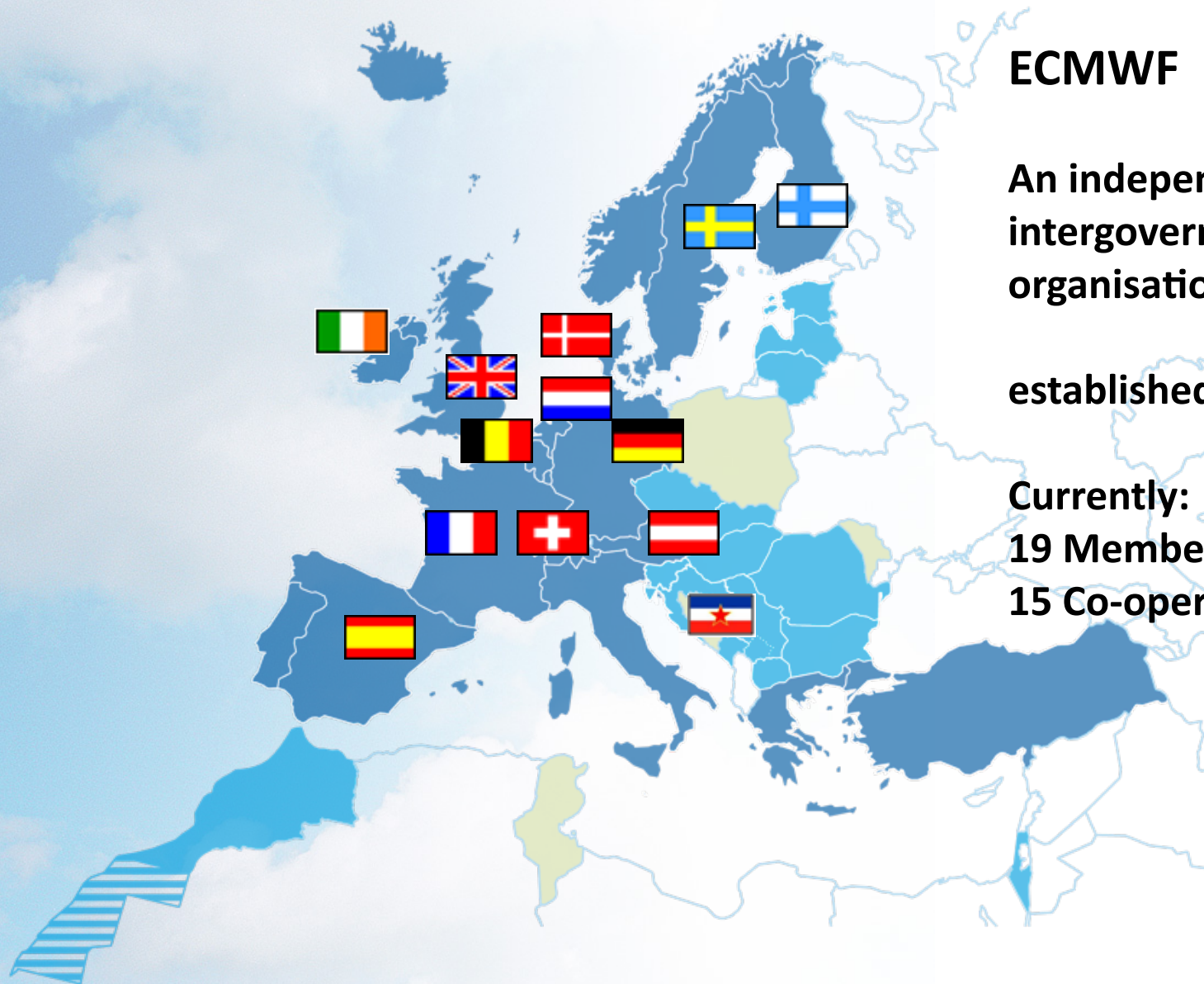
■ Member States ■ Co-operating States ■ Under negotiation

ECMWF

An independent
intergovernmental
organisation

established in 1975

Currently:
19 Member States
15 Co-operating States



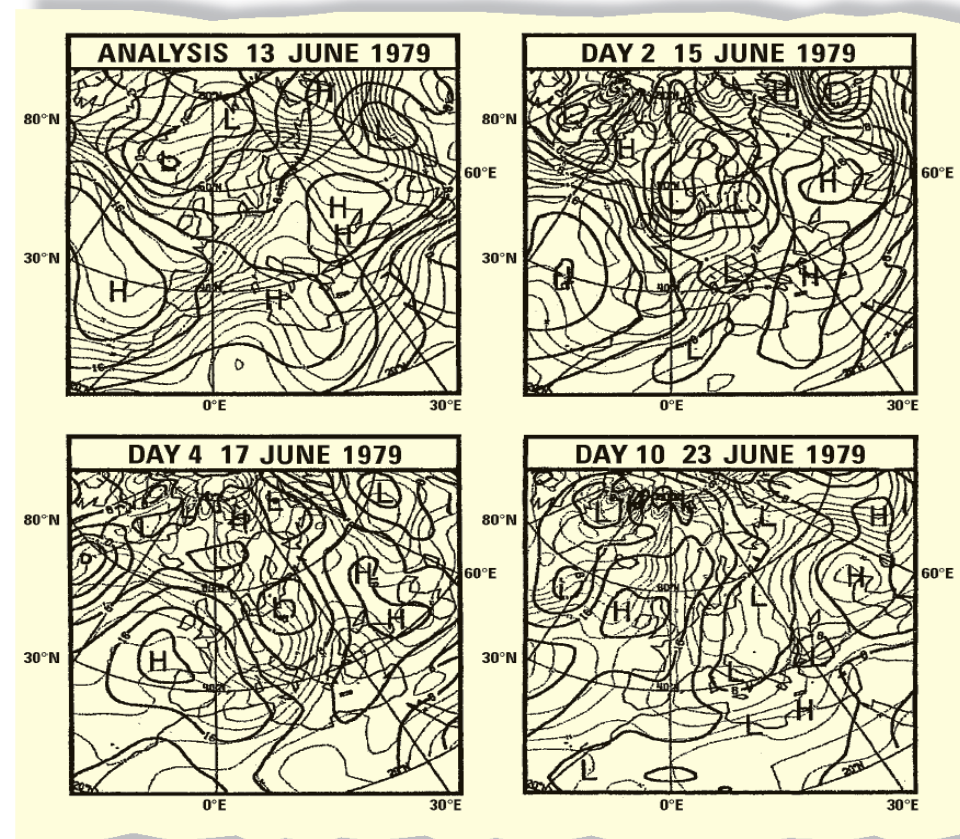
How ECMWF was established

Start of operational activities

1978 Installation of first computer system (CRAY 1-A)

1979 Start of operations

N48 grid point model – 210km

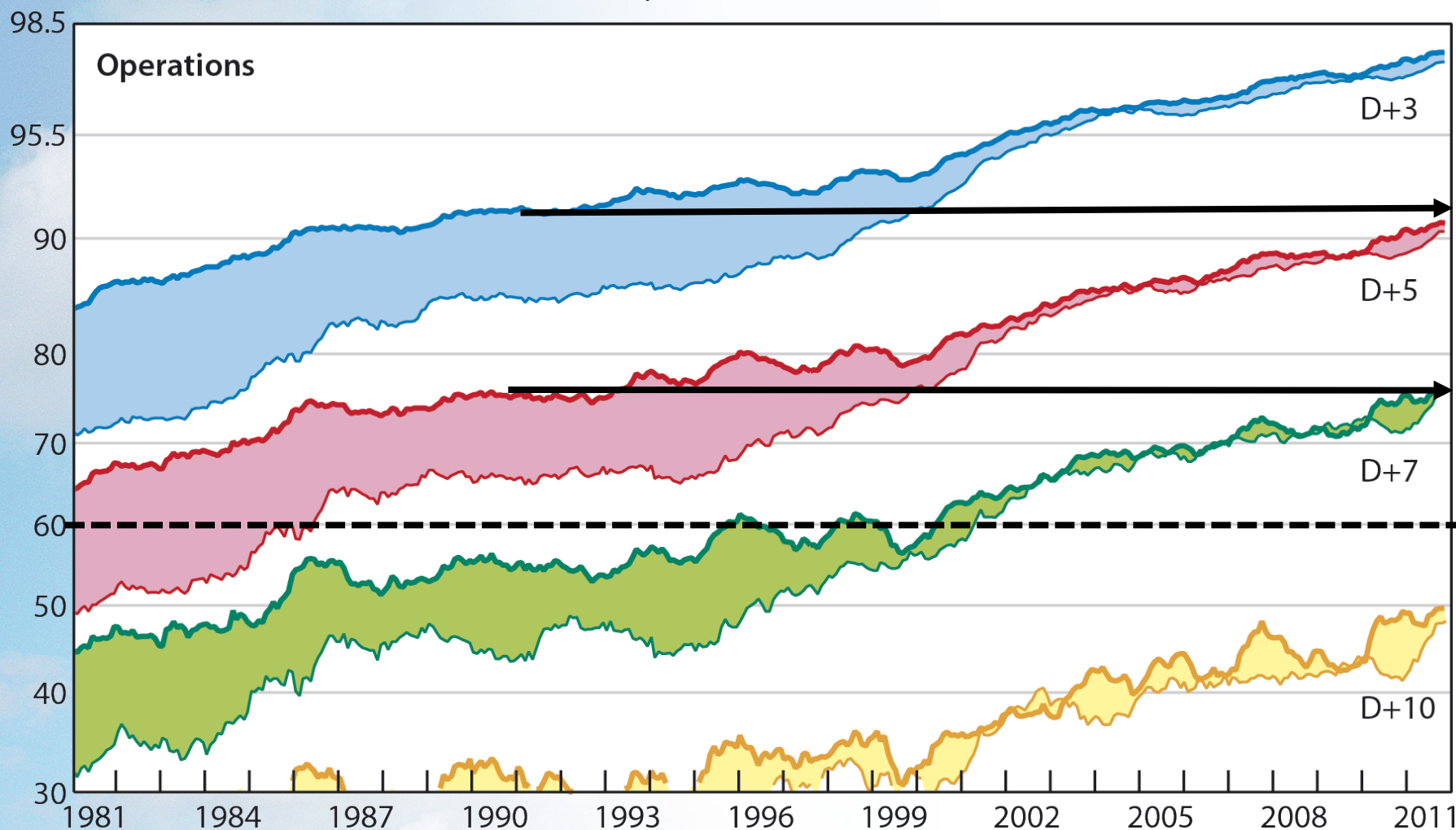


Evoluzione negli anni della qualità delle previsioni dell'ECMWF + i due emisferi a confronto (2 giorni ogni 20 anni!)

Anomaly correlation of 500 hPa height forecasts

— Northern hemisphere

— Southern hemisphere



© European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

Adapted and extended from Simmons & Hollingsworth (2002)



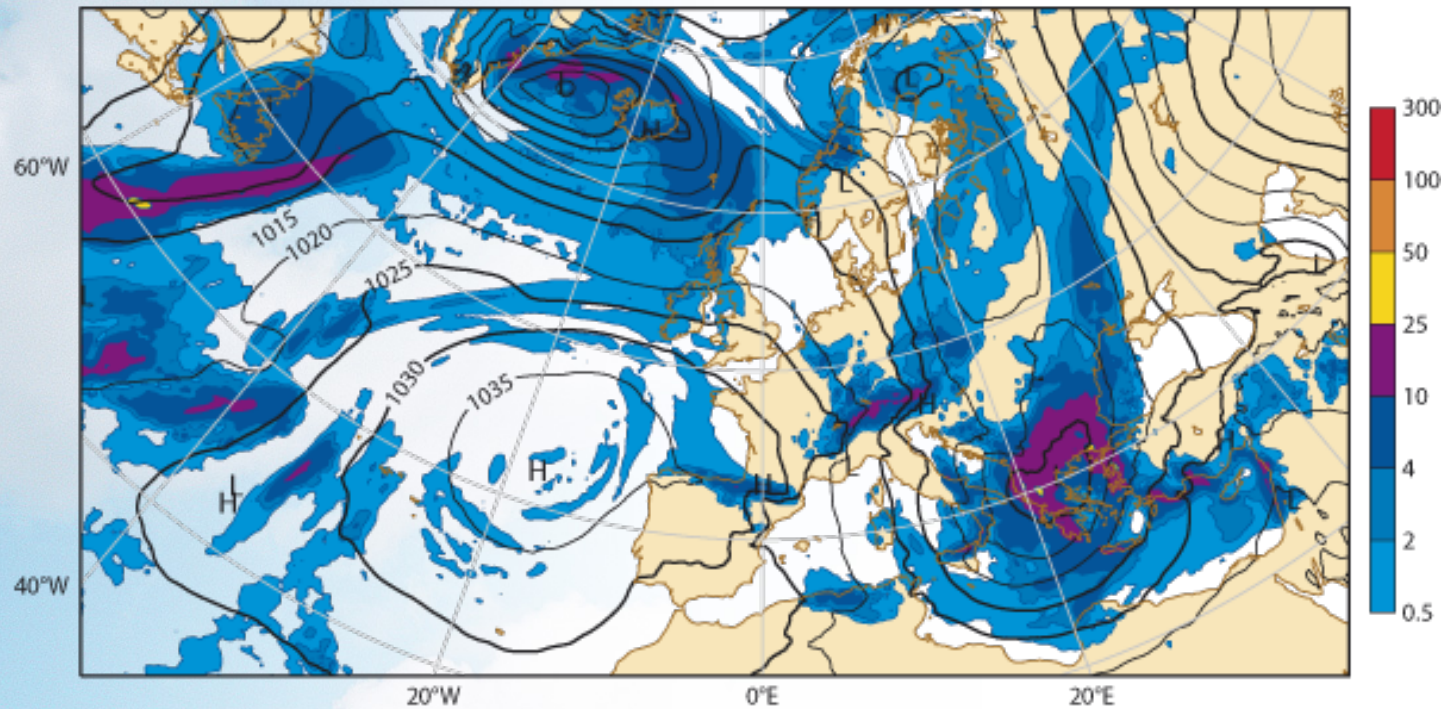
Le cause di un tale clamoroso miglioramento della qualità delle previsioni meteorologiche (un giorno ogni 10 anni)?



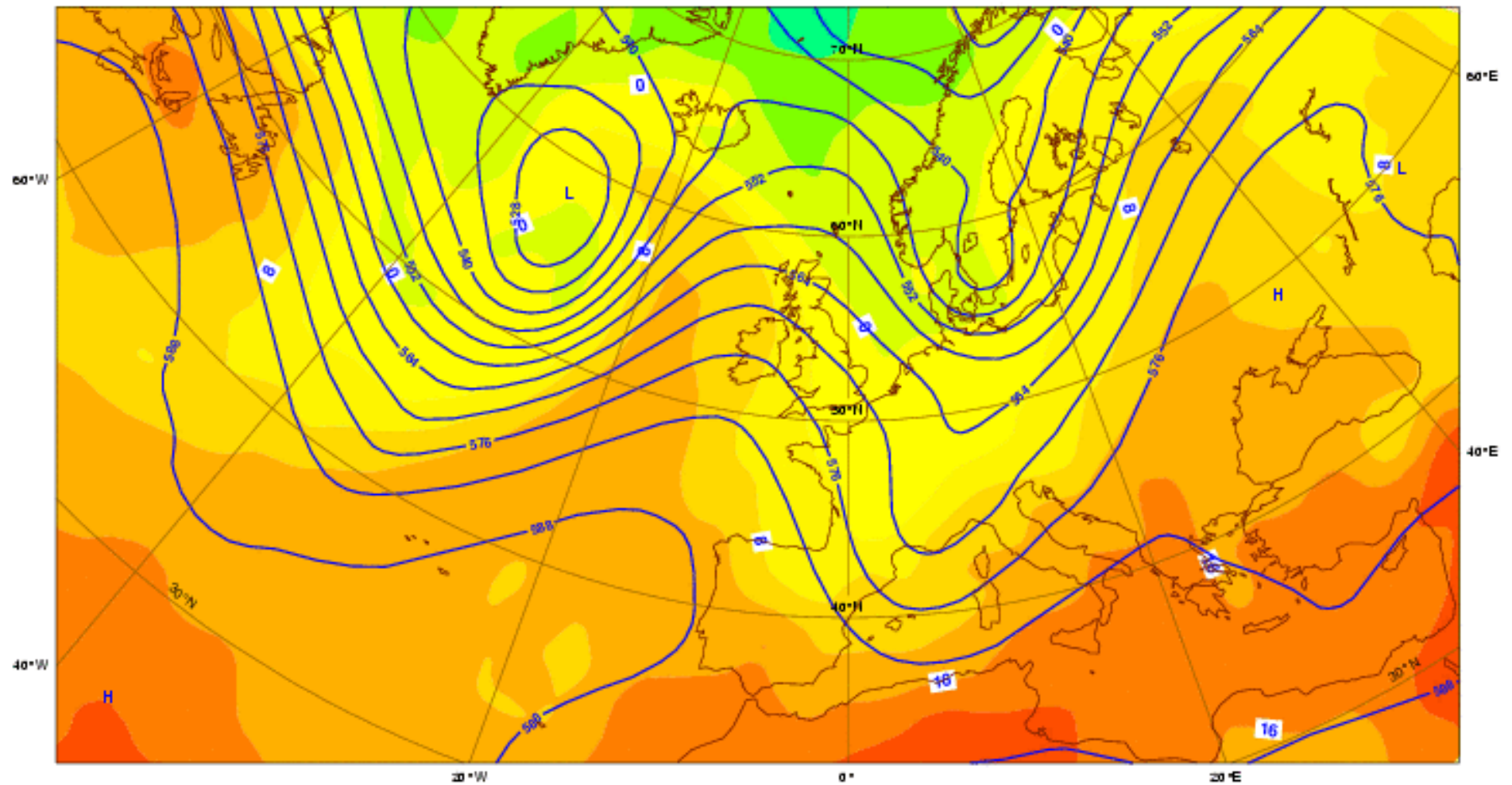
- Aumento della risoluzione dei modelli a seguito dell'aumento della potenza di calcolo a disposizione
- Miglioramento della qualità delle condizioni iniziali (abbiamo imparato ad adoperare i satelliti al meglio)

ECMWF Forecast Products

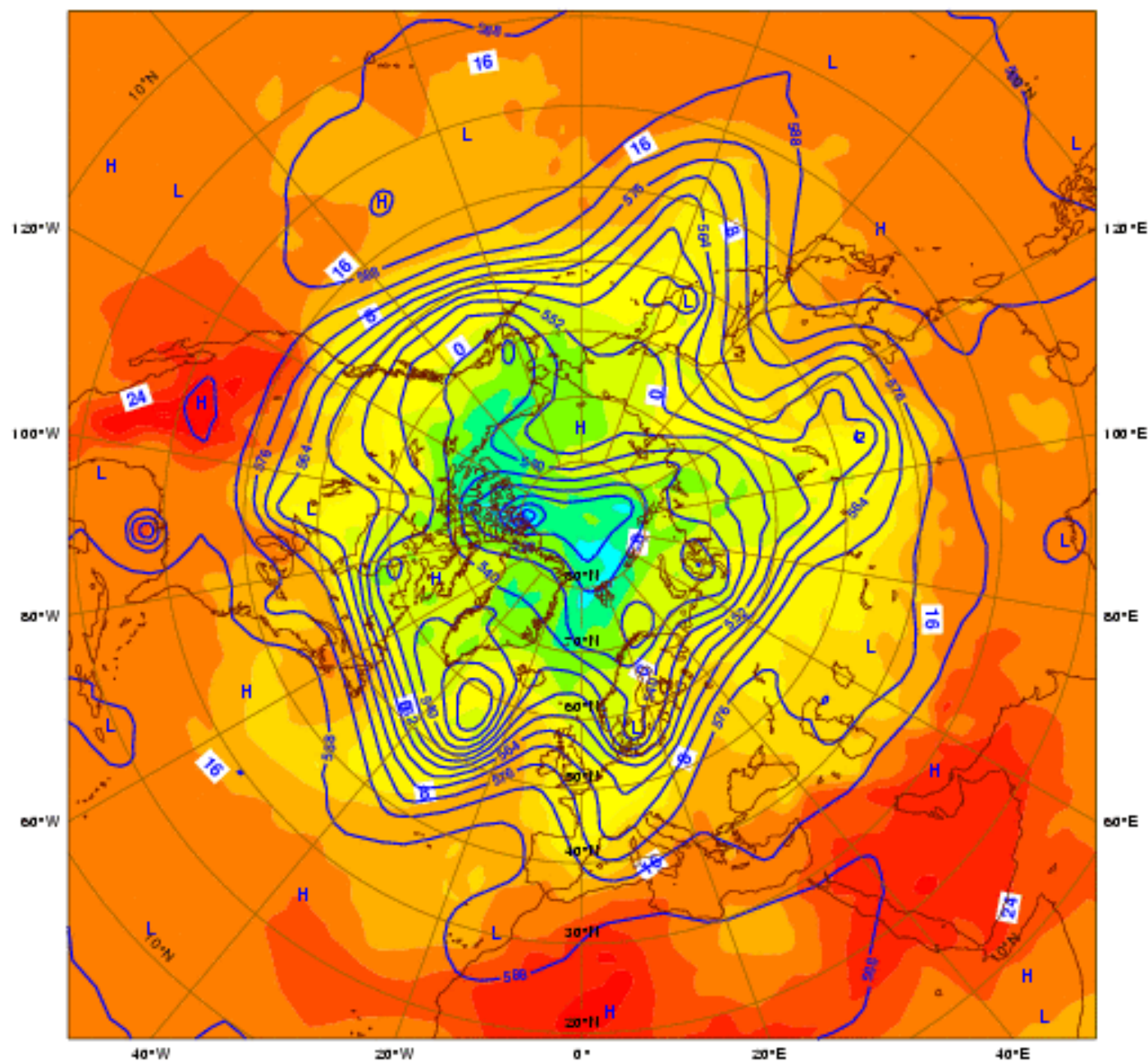
Wednesday 4 January 2012 00 UTC ©ECMWF Forecast t+060 VT: Friday 6 January 2012 12 UTC
Surface: Mean sea level pressure / 12hr Accumulated precipitation (VT-6h/VT+6h)



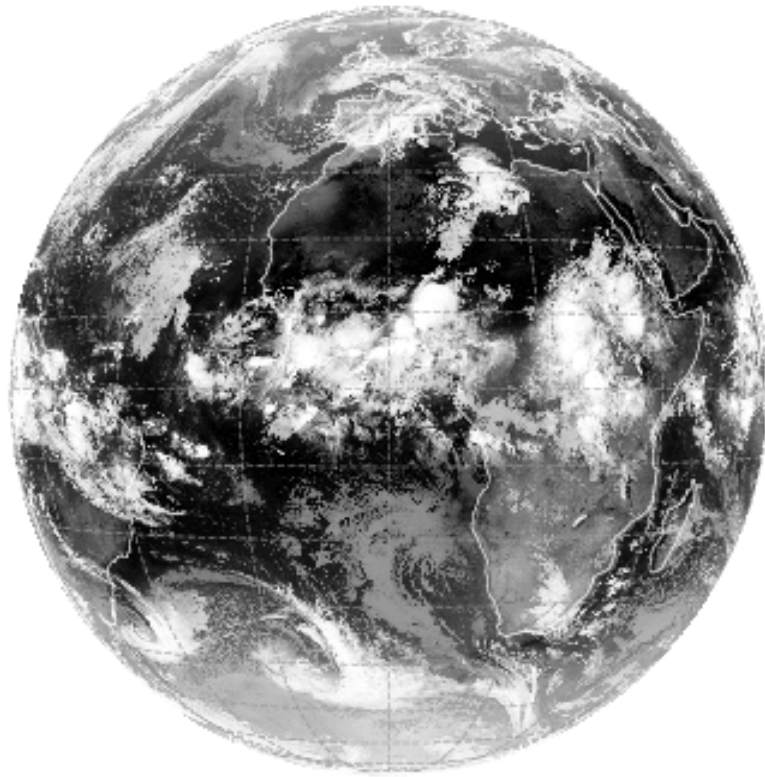
Tuesday 14 September 2004 00UTC ECMWF Forecast t+ 48 VT: Thursday 16 September 2004 00UTC
500 hPa Height / 850 hPa Temperature



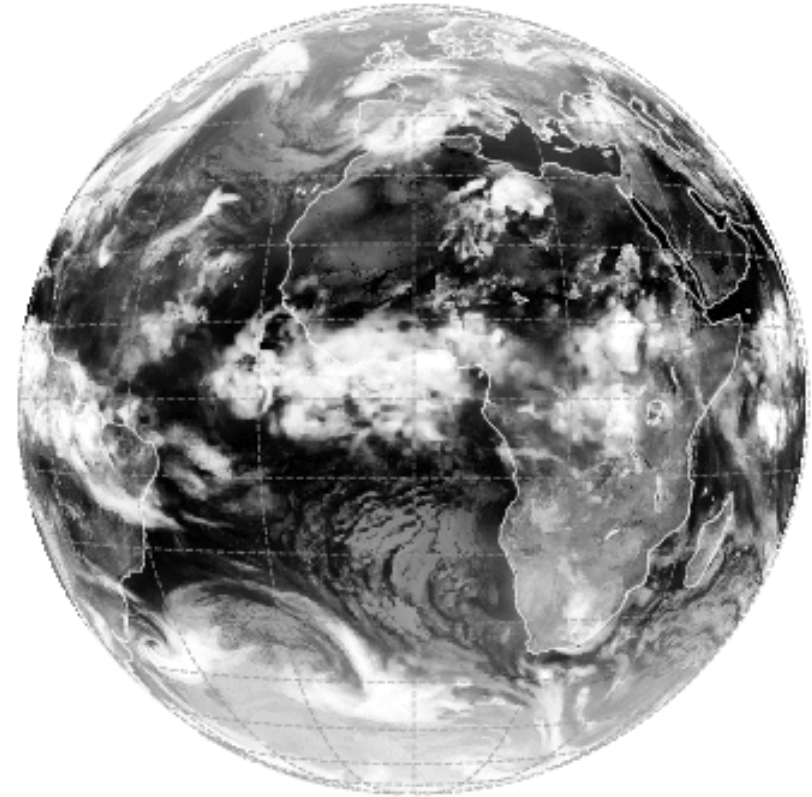
Tuesday 14 September 2004 00UTC ECMWF Forecast t+ 48 VT: Thursday 16 September 2004 00UTC
500 hPa Height / 850 hPa Temperature



Meteosat 9 IR10.8 20080525 0 UTC

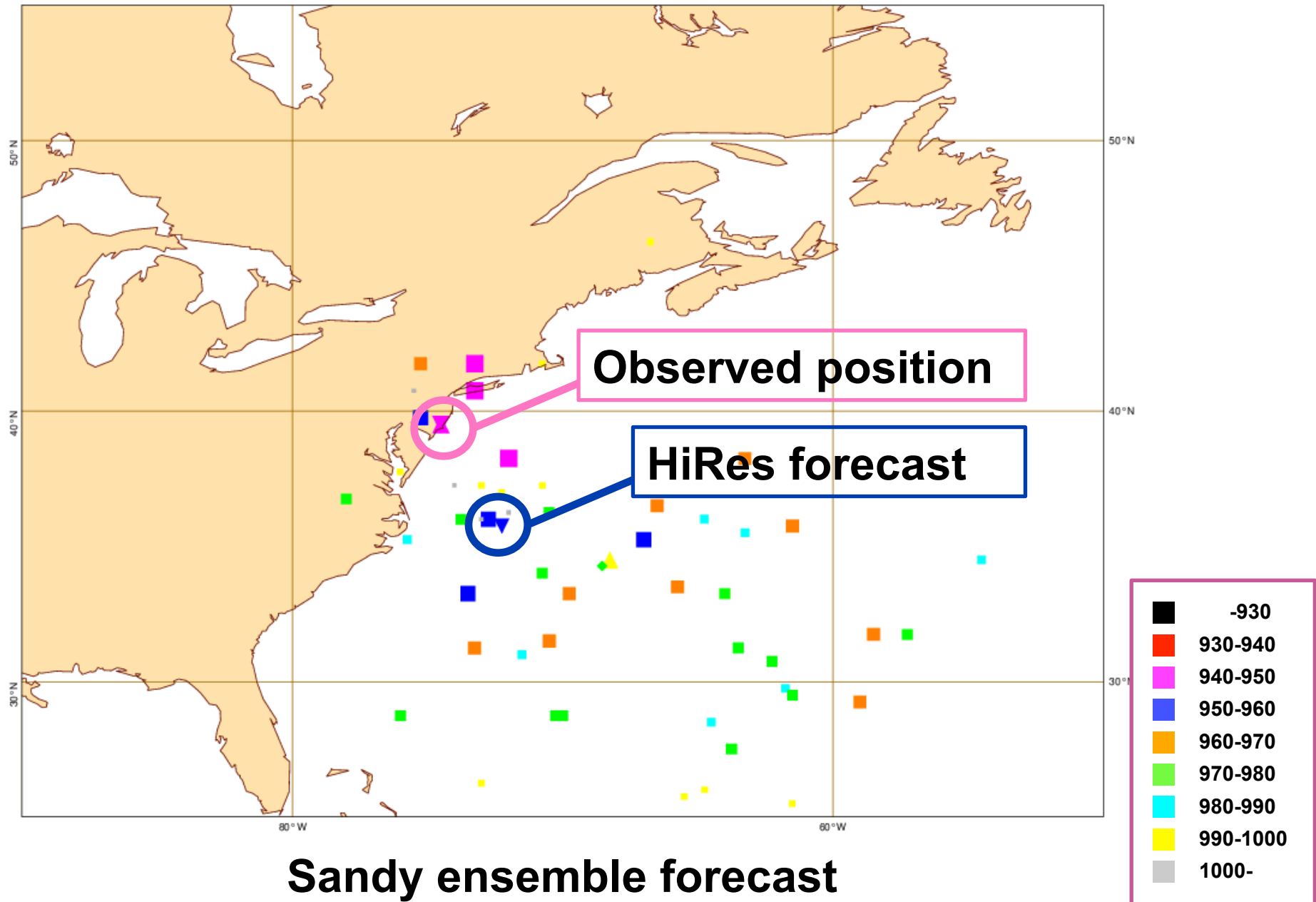


ECMWF Fc 20080525 00 UTC+0h:



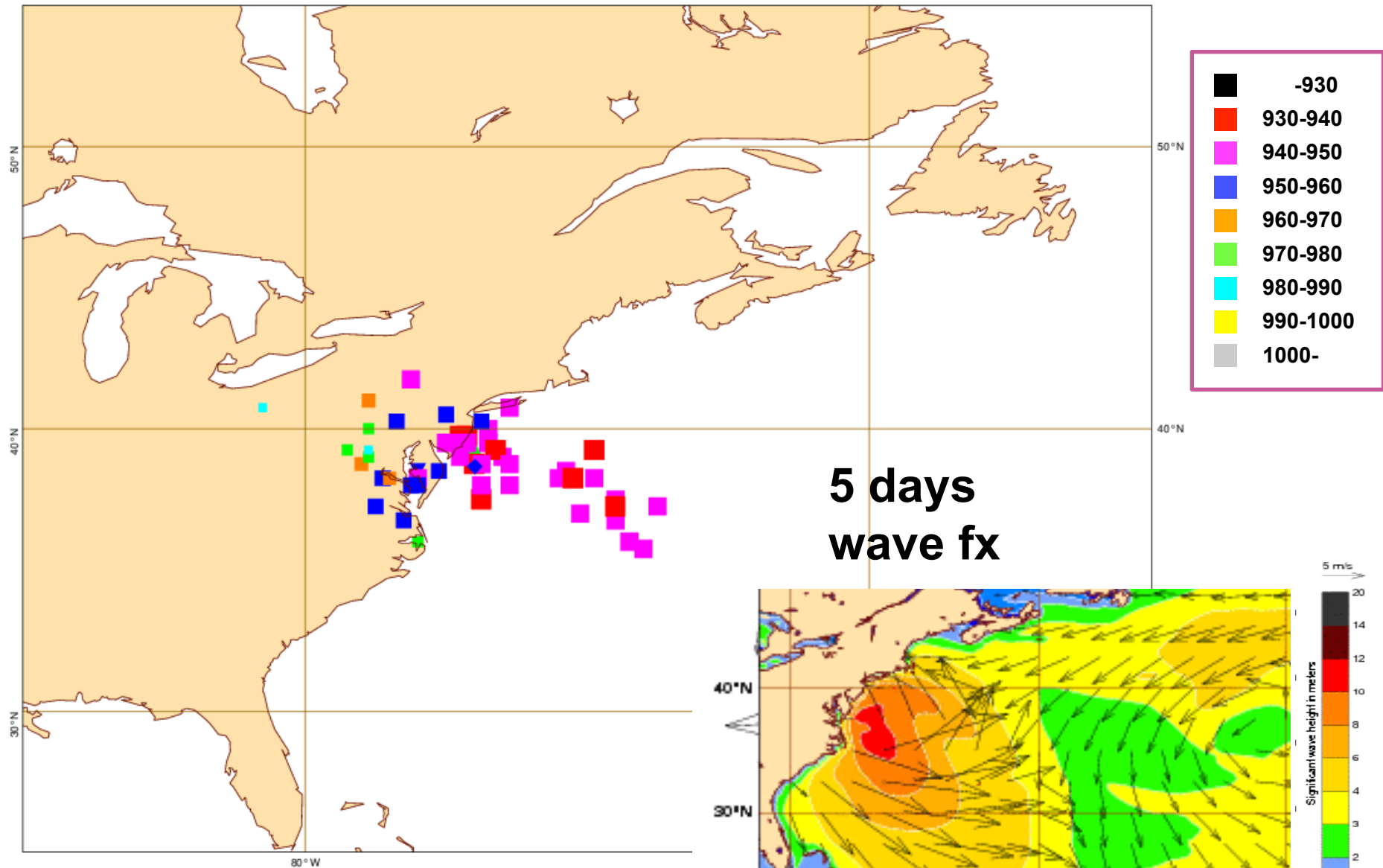
2012102200+192h

8 days ahead



2012102600+96h

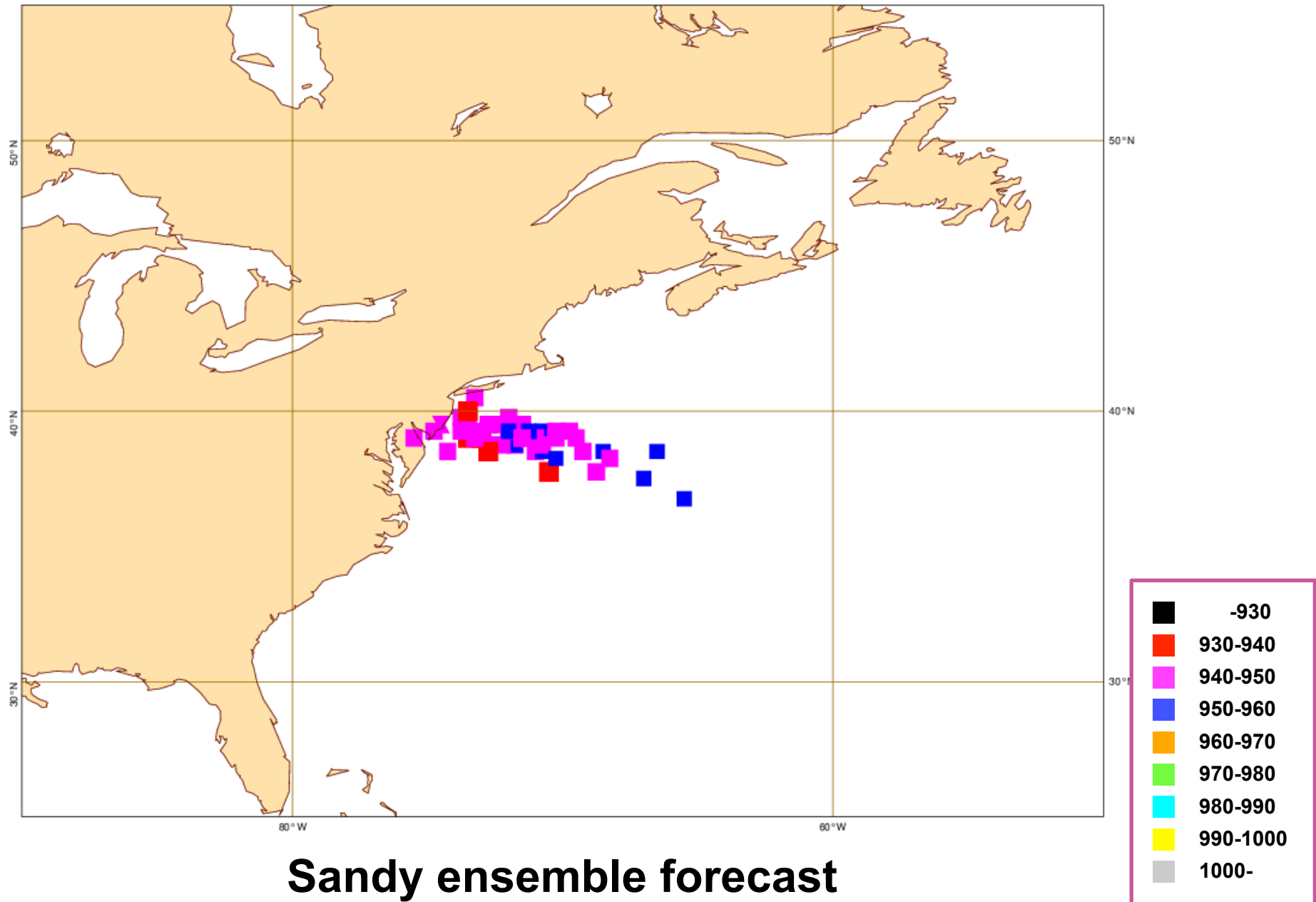
4 days ahead



Sandy ensemble forecast

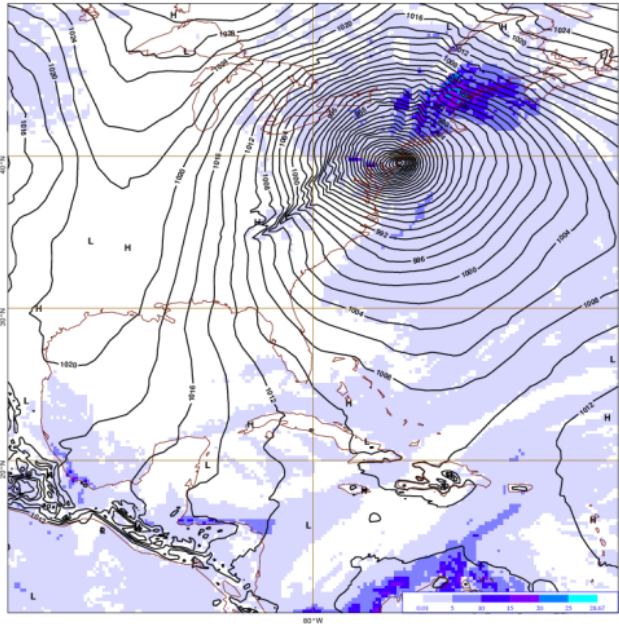
2012102800+48h

2 days ahead

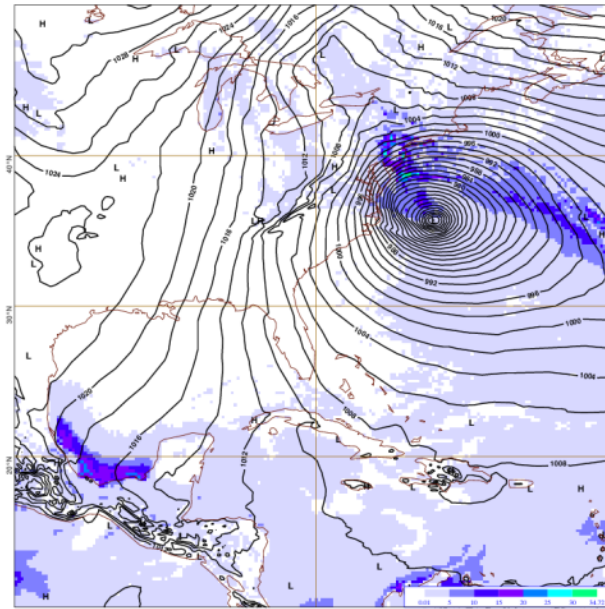


Tropical hurricane Sandy forecast

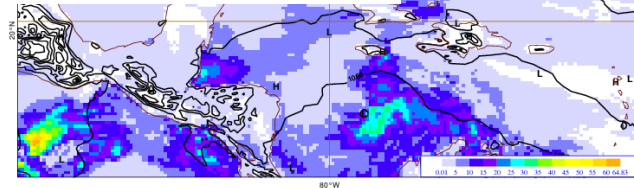
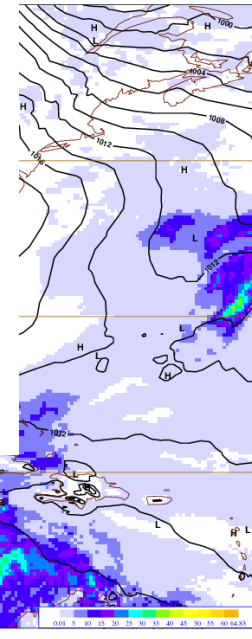
**30 Oct analysis:
Sandy landfall**



8 day forecast



analysis



Le previsioni operative ad area
limitata in Italia: Il Consorzio
COSMO e il suo modello

Organization

COSMO-Model

Documentation

COSMO Tasks

User Support

COSMO Places

Obs. Exchange

Search

Home

Consortium for Small-scale Modeling

The **C**onsortium for **S**mall-scale **M**odeling (COSMO) was formed in October 1998. It's general goal is to develop a limited-area atmospheric model, to be used both for operational and for research applications by the members.

Participating national meteorological services

Today, the consortium, has as members these national meteorological services (presented in date-of-join order)



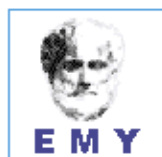
DWD



MCH



USAM



HNMS



IMGW



NMA



RHM

Germany	DWD	Deutscher Wetterdienst
Switzerland	MCH	MeteoSchweiz
Italy	USAM	Ufficio Generale Spazio Aereo e Meteorologia
Greece	HNMS	Hellenic National Meteorological Service
Poland	IMGW	Institute of Meteorology and Water Management
Romania	NMA	National Meteorological Administration
Russia	RHM	Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring

Other major members

Additionally, these regional and military services within the member states are also participating:



AGeoBw



CIRA



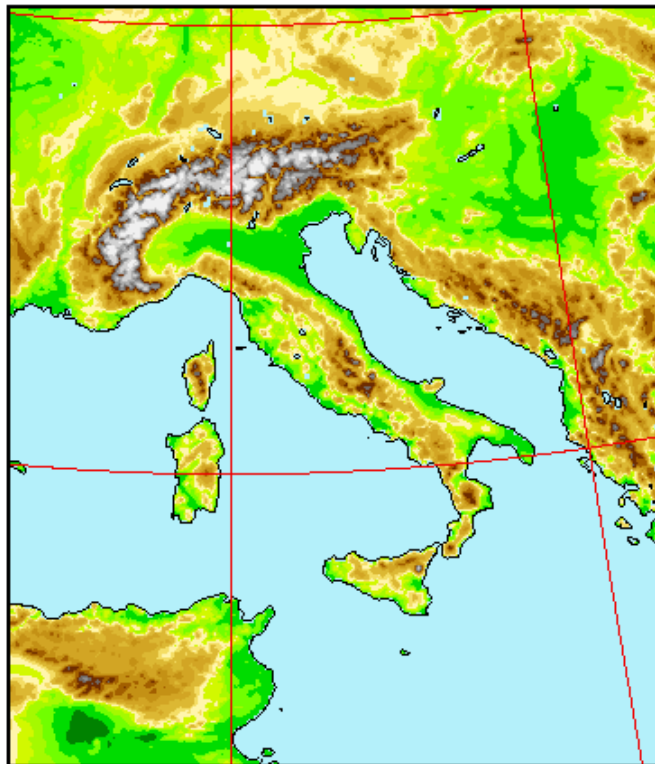
ARPA-SIMC



ARPA Piemonte

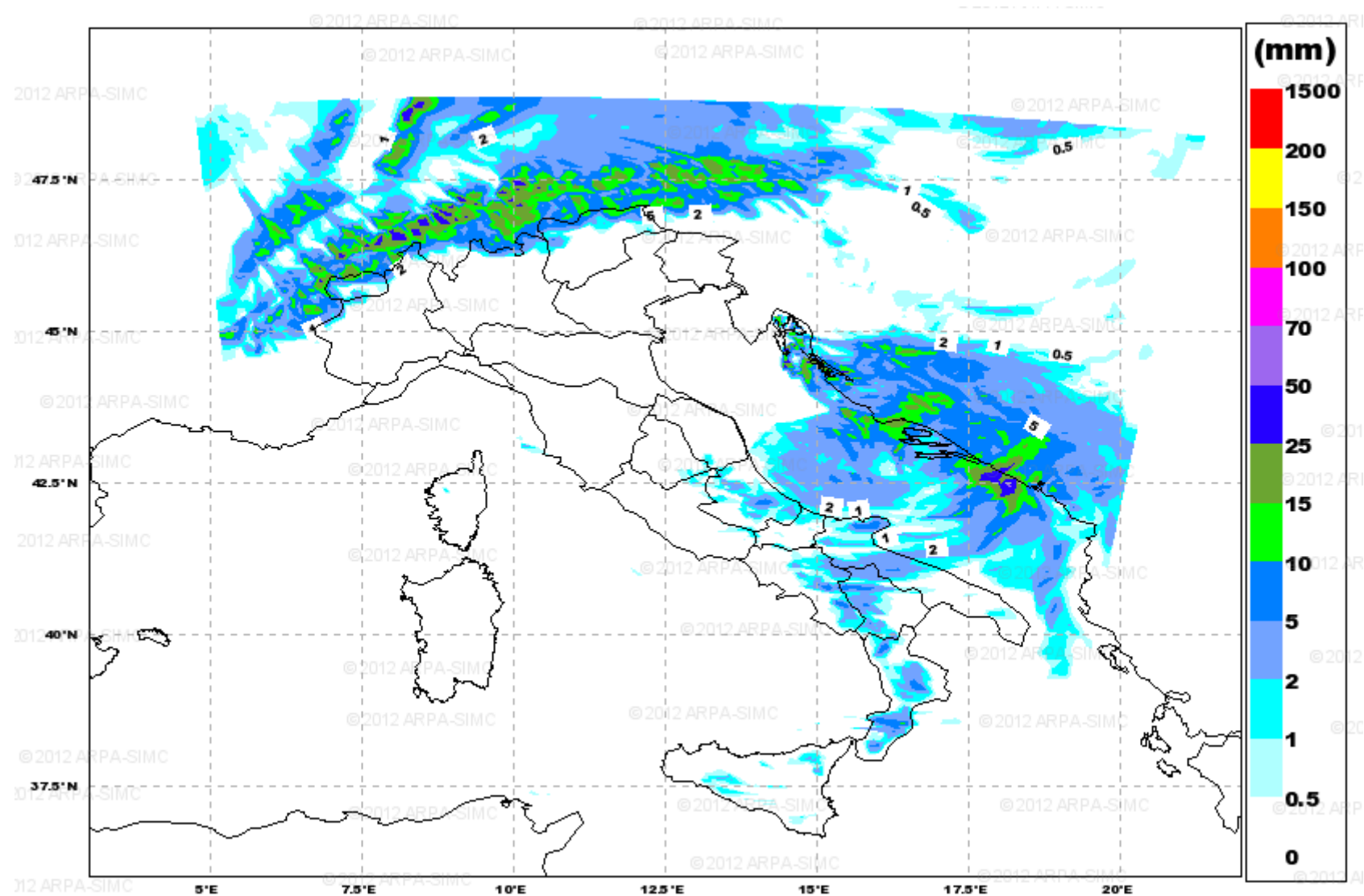
Progetto COSMO -I

SMAM - ARPA E.R. - ARPA Piem.



- 7/2 km risoluzione orizzontale
- 35 livelli in verticale
- Condizioni al contorno : GME – Modello globale tedesco
- Dall'estate 2003 le condizioni iniziali sono prodotte tramite un ciclo di assimilazione continua basato su nudging.

Previsione di precipitazione di COSMO-I per lunedì 10 dicembre 2012 pomeriggio-sera (dalle 12:00 alle 24:00)



Fatte le previsioni del tempo,
servono anche le proiezioni
climatiche: non è più una
questione di giorni ma di anni,
anzi di decenni, se non di secoli...

Si può prevedere il clima che ci attende nel futuro prossimo? Come?

Ovvero, siamo in grado di fare una previsione quantitativa dei futuri cambiamenti climatici a scala globale, regionale e locale ?

Gli strumenti:

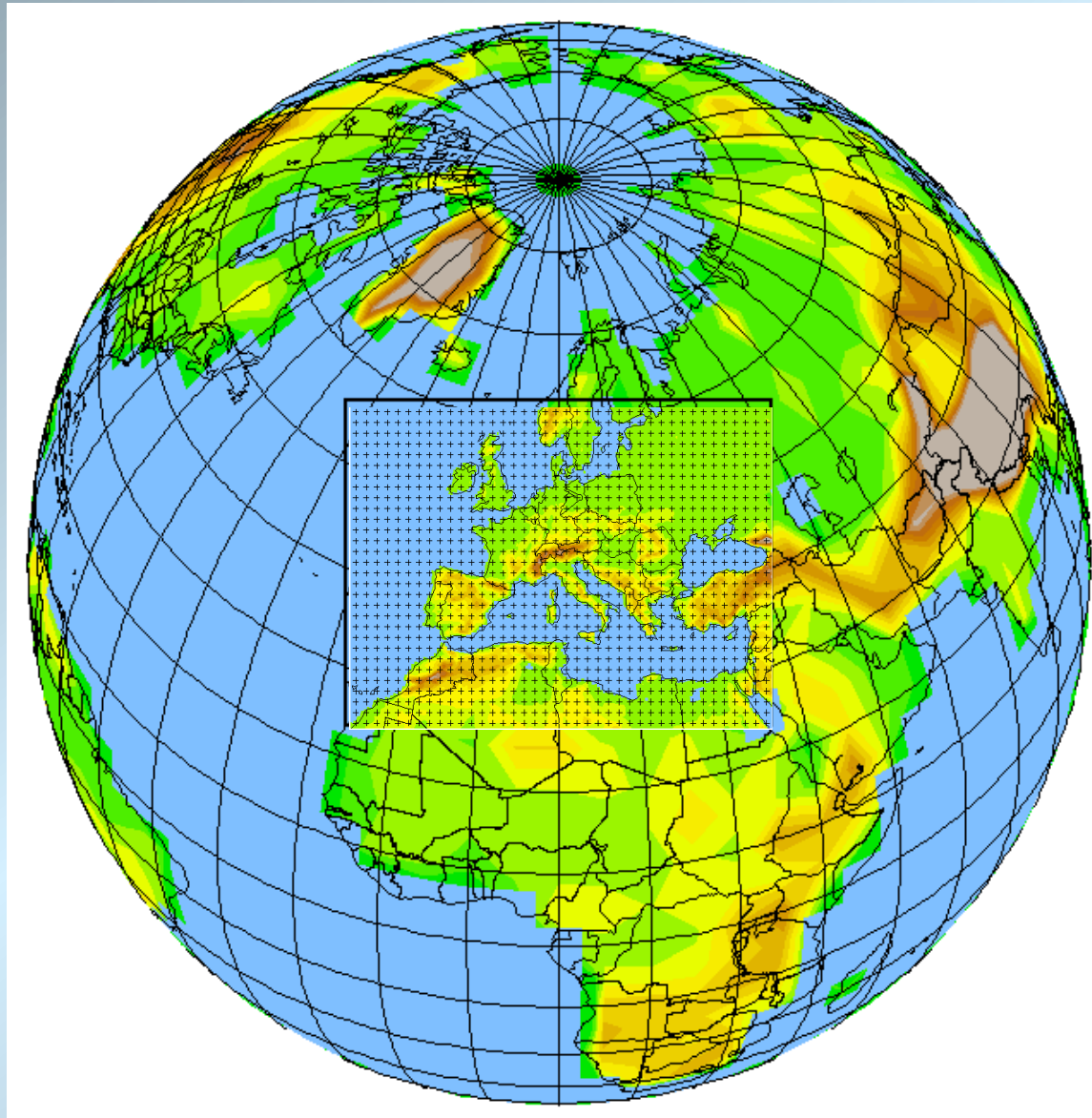
I modelli numerici del clima globali e regionali: sono essenzialmente gli stessi modelli delle previsioni meteo, ma a risoluzione più bassa per motivi di costo computazionale (complessità e estensione temporale della “previsione”)

Ritorniamo alla domanda: se è impossibile fare previsioni meteo oltre alcuni giorni, come si può prevedere il clima del prossimo secolo?

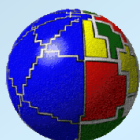
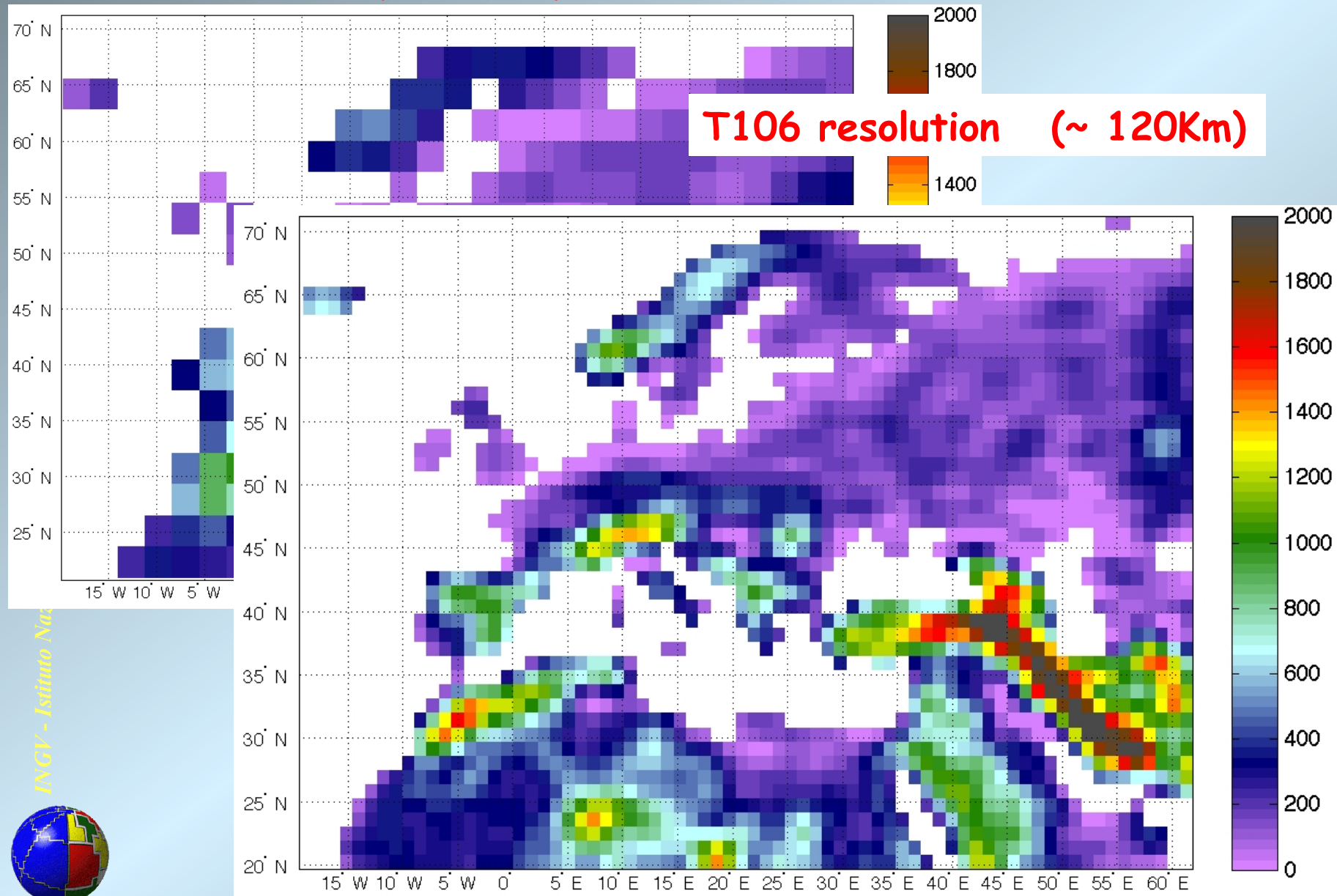
La risposta, in termini un po' matematici, è che le previsioni meteorologiche sono essenzialmente un problema alle condizioni iniziali e cozzano contro la caoticità dell'atmosfera meteorologica (tempo caratteristico: qualche settimana).

Le proiezioni climatologiche, invece, sono un problema alle condizioni al contorno, o tutt'al più di previsione di valori medi (nel tempo e nello spazio), e si fanno in genere per periodi molto più brevi del tempo caratteristico di caoticità del sistema climatico (molte migliaia di anni?)

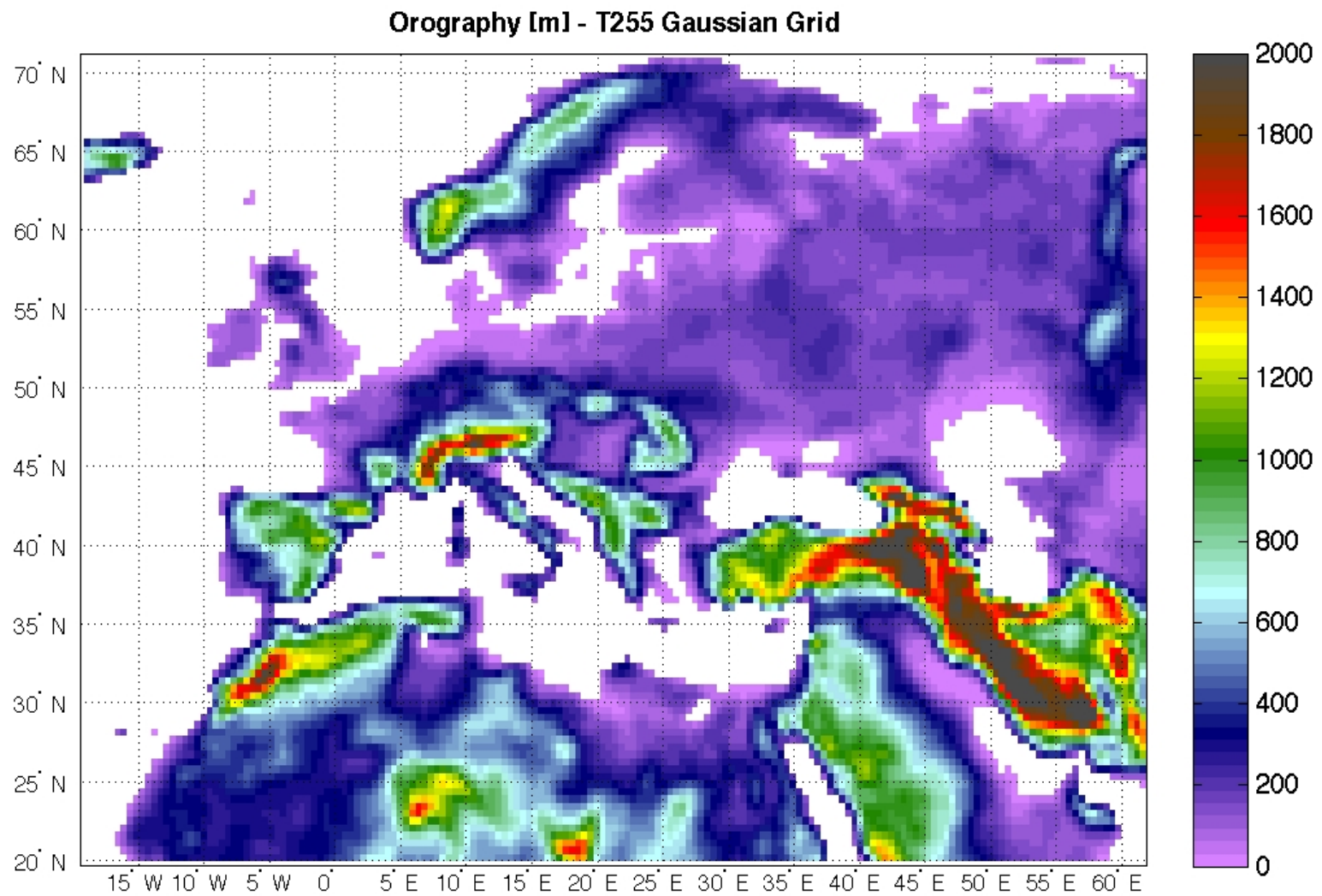
La modellistica del clima: Modelli Globali (GCM) e Modelli Regionali (RCM)



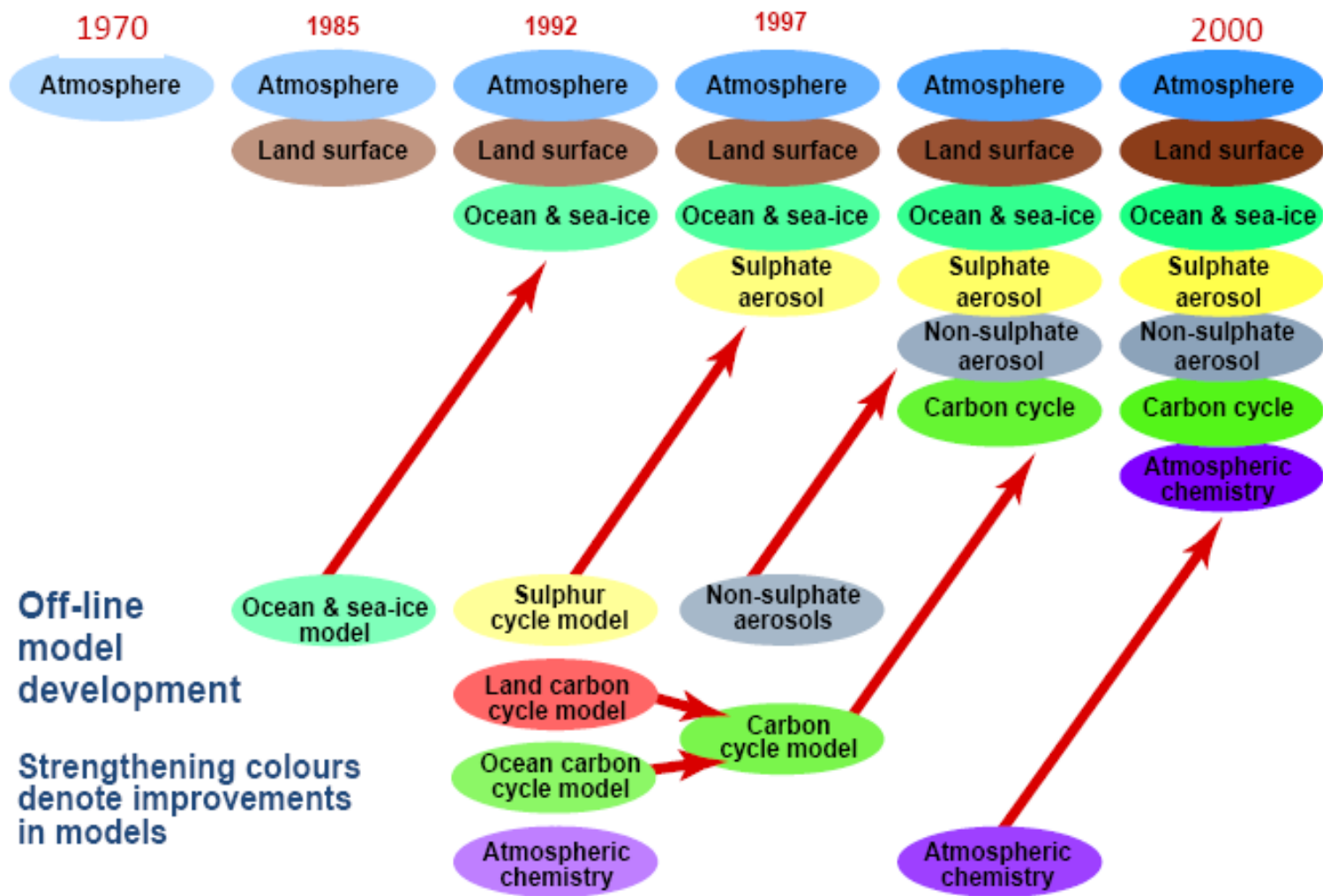
T42 resolution (~ 300Km)



T255 model resolution (~ 50Km)



Evoluzione della complessità dei modelli globali del clima

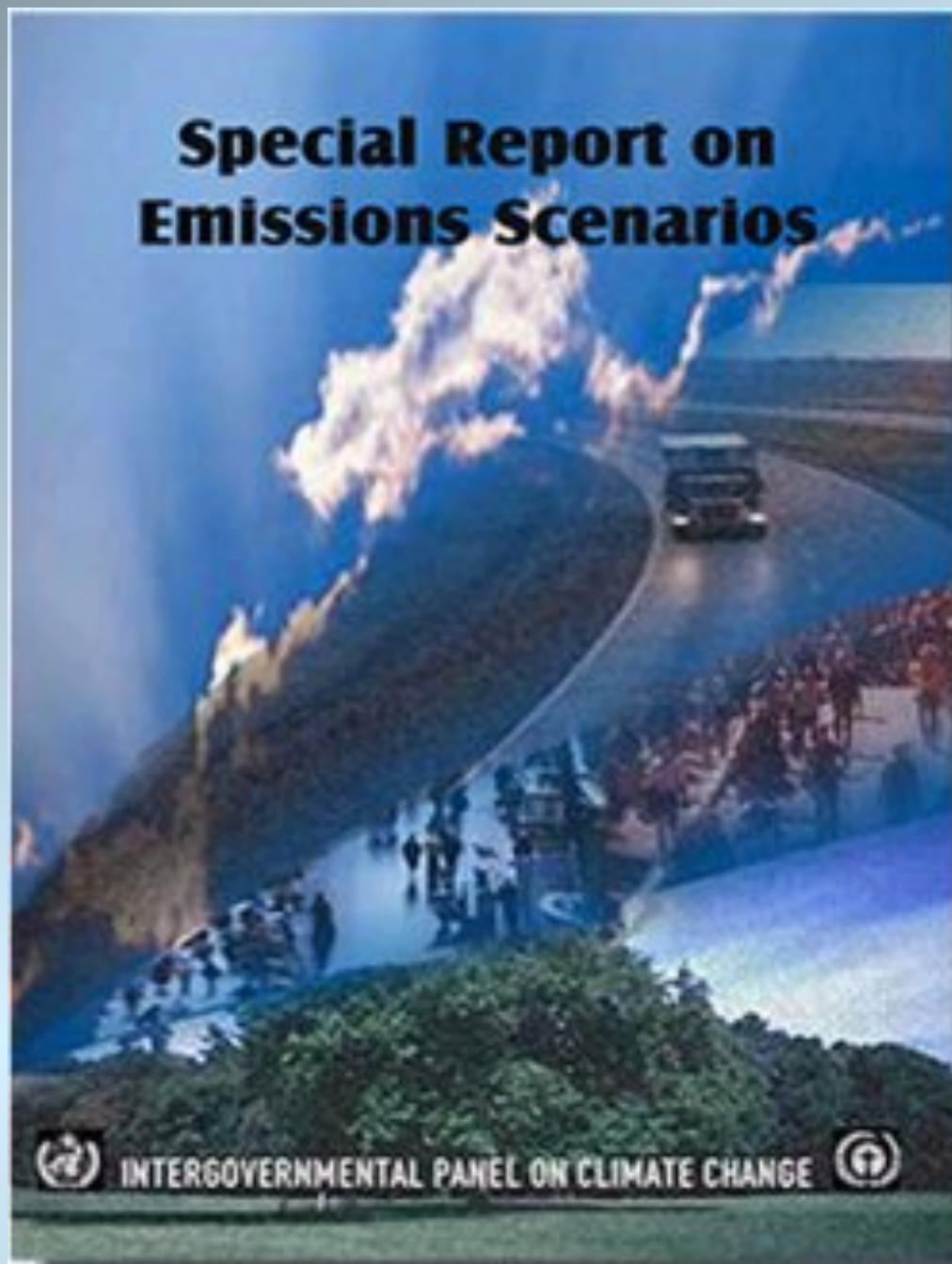


Ma i modelli hanno bisogno di
scenari di sviluppo economico
sui quali basarsi...

Special Report on Emissions Scenarios

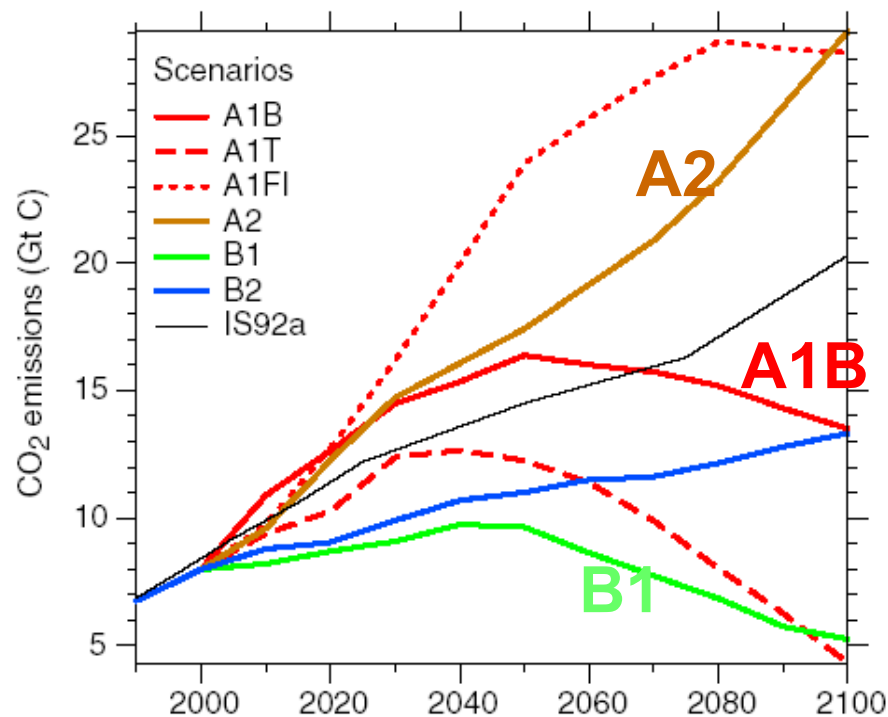


INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

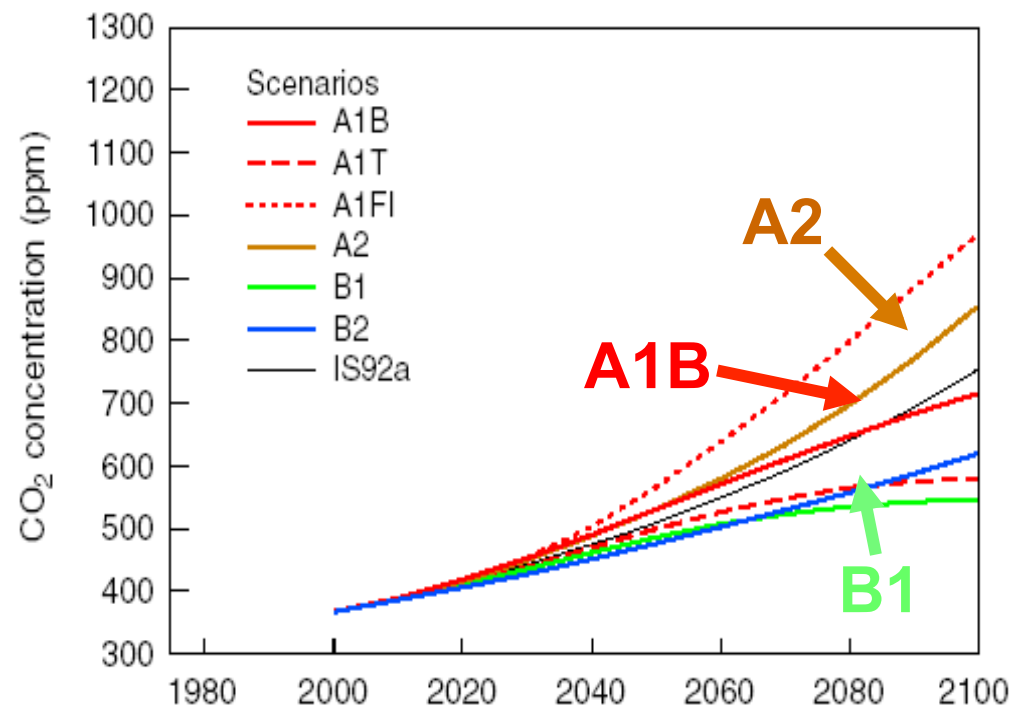


Scenari futuri di emissioni e concentrazioni di gas serra: IPCC SRES

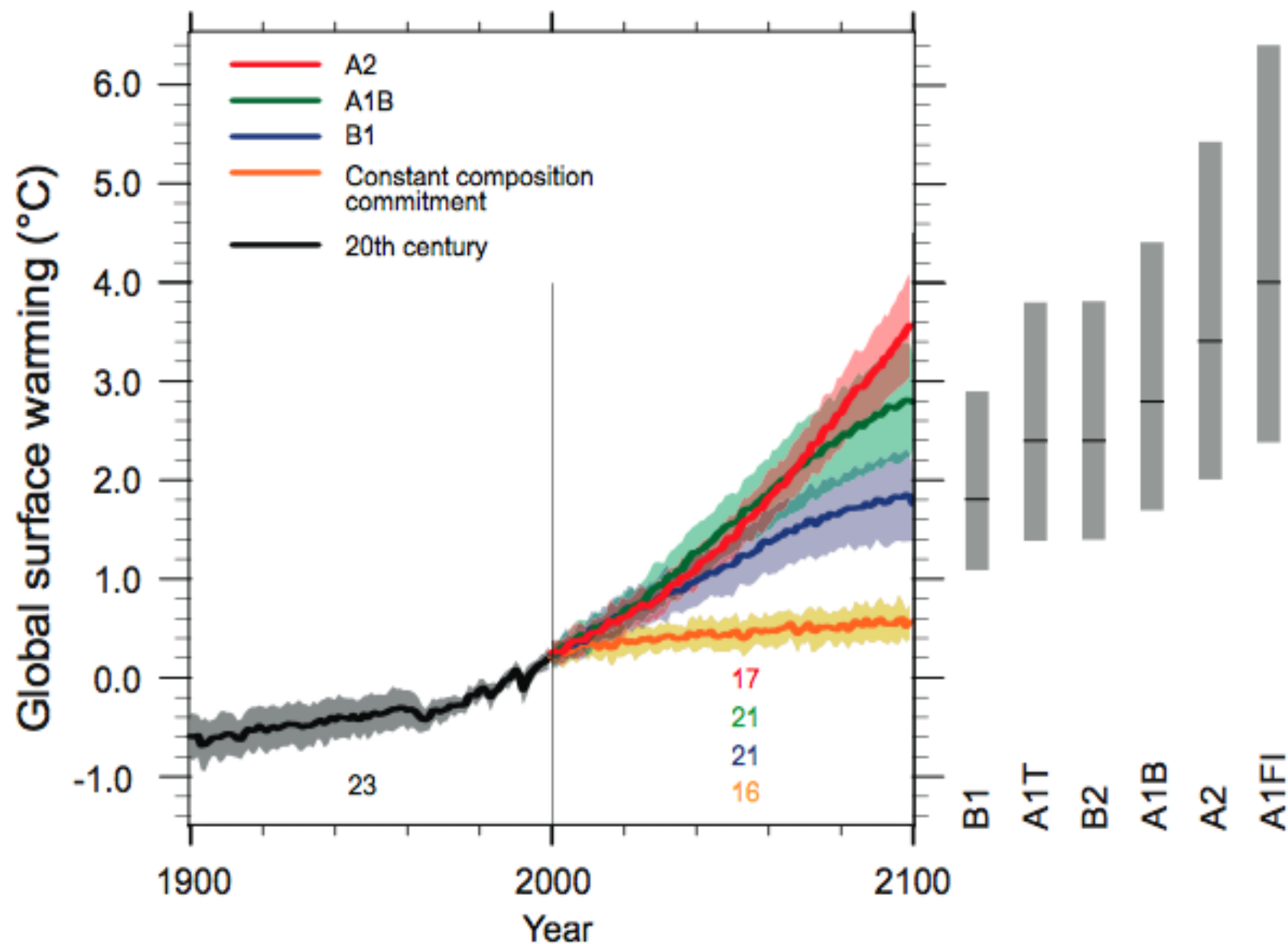
Emissioni di CO₂



Concentrazioni di CO₂

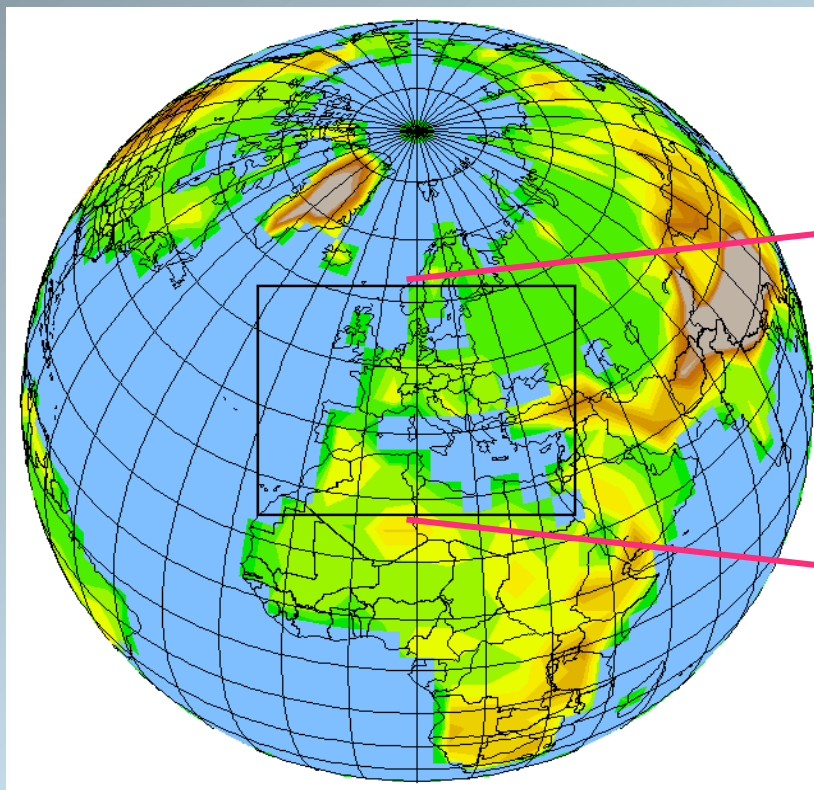


PROIEZIONI IPCC GLOBALI: TEMPERATURA

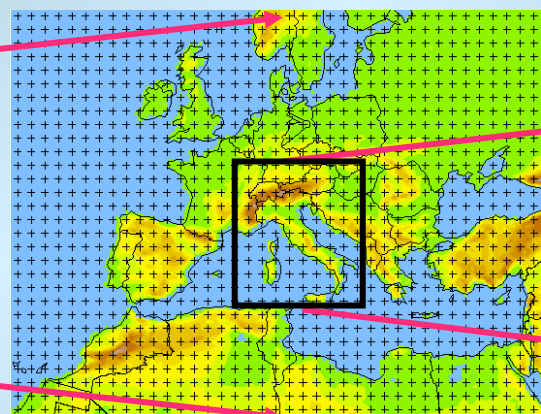


Dalla scala globale a quella locale

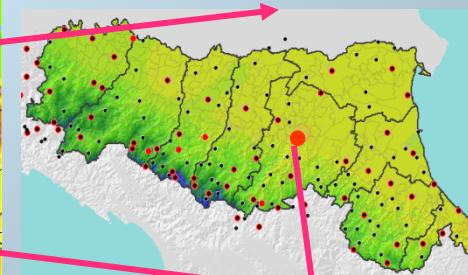
Globale



Continental



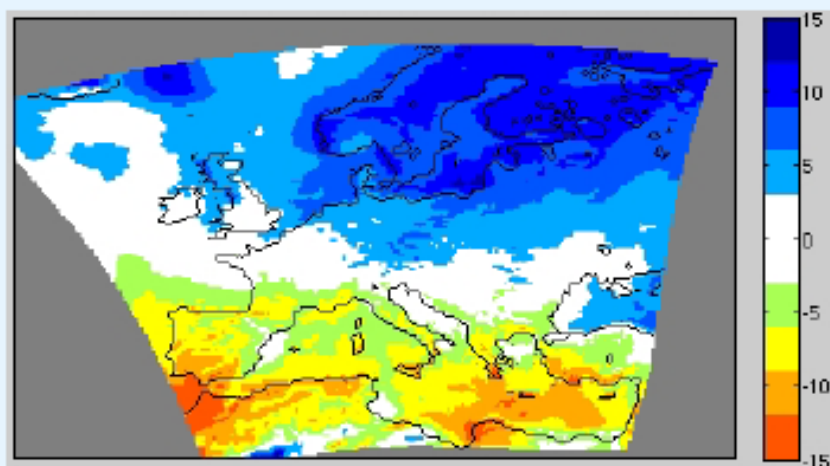
Regionale



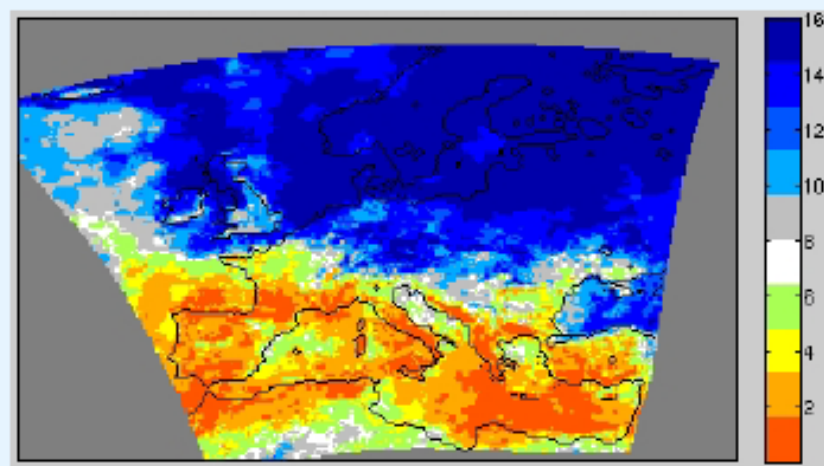
Locale



Modelli Regionali (RCMs): Cambiamenti di precipitazione e stima dell'incertezza (medie su molte previsioni)



Annual precipitation change



Number of models showing increase

Climate-change signal (2021–2050 minus 1961–1990) for annual precipitation total (%) for the multi-model mean of 16 ENSEMBLES RCMs. A1B scenario. (Philip Lorenz, MPI)

Figura 1: Variazione della temperatura media annua entro la fine del secolo¹

Temperatura: variazione della temperatura media annua [°C]

Temperature: change in mean annual temperature [°C]

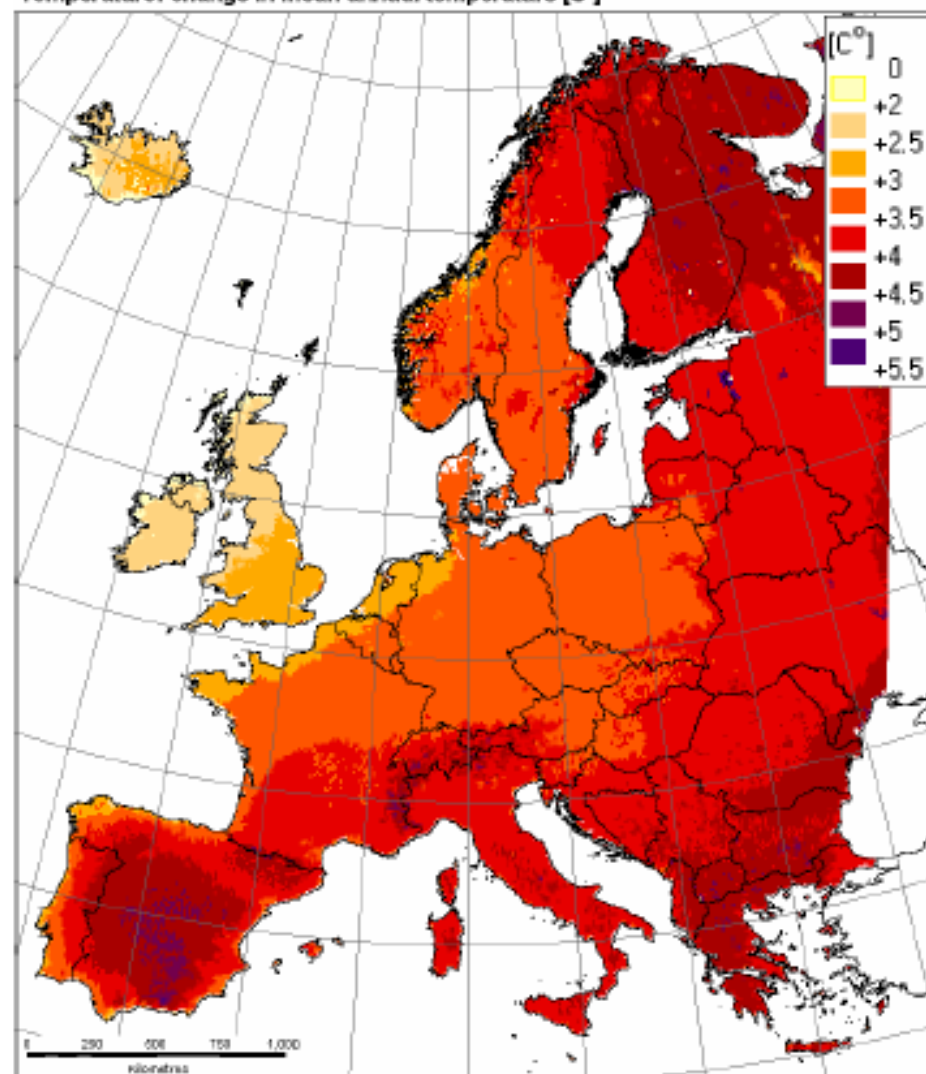
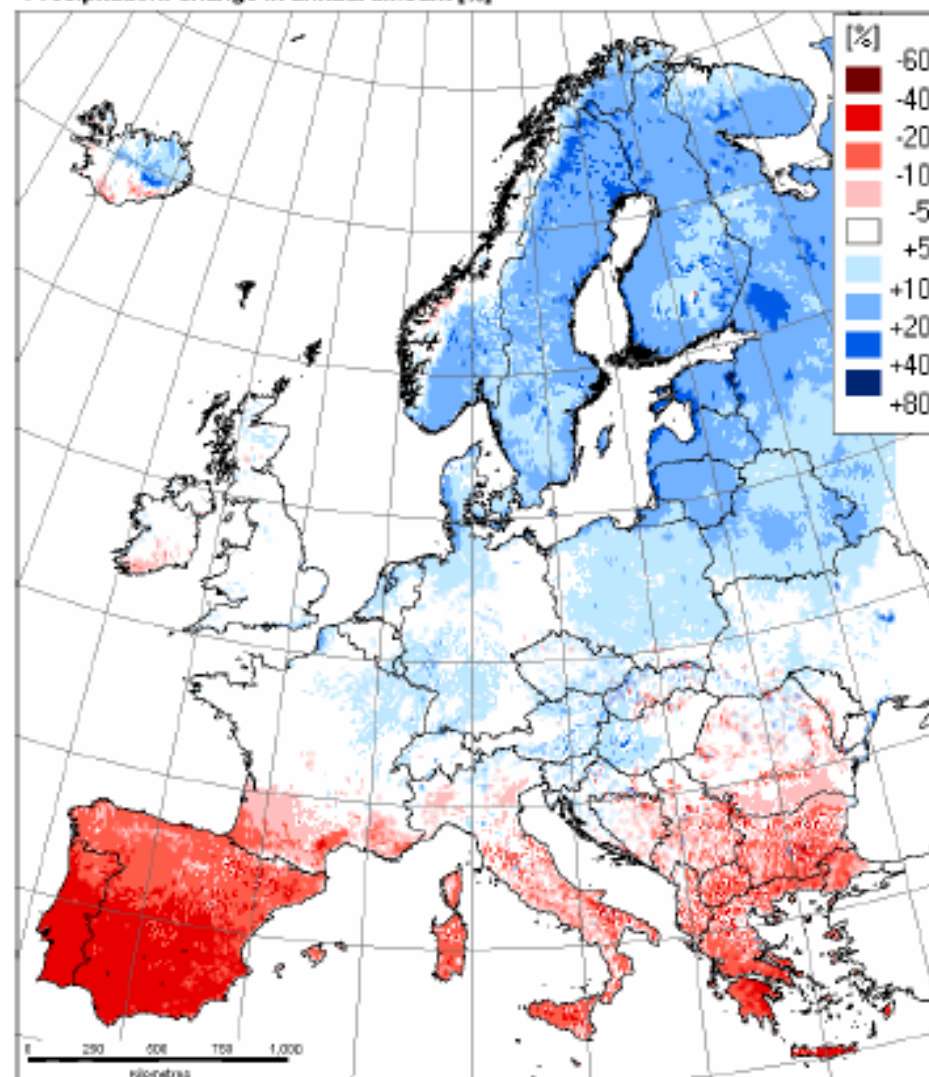


Figura 2: Variazione delle precipitazioni medie annue entro la fine del secolo

Precipitazioni: variazione del volume annuo [%]

Precipitation: change in annual amount [%]



¹ Le figure 1 e 2 si basano sullo scenario A2 contenuto nel rapporto speciale sugli scenari di emissione (SRES) dell'IPCC. Gli impatti climatici stimati si riferiscono al 2071-2100 rispetto ai dati del periodo 1961-1990. Le mappe si basano su dati DMI/PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk/>) e sono state elaborate dal CCR nell'ambito dello studio PESETA da esso finanziato (<http://peseta.jrc.eu>).

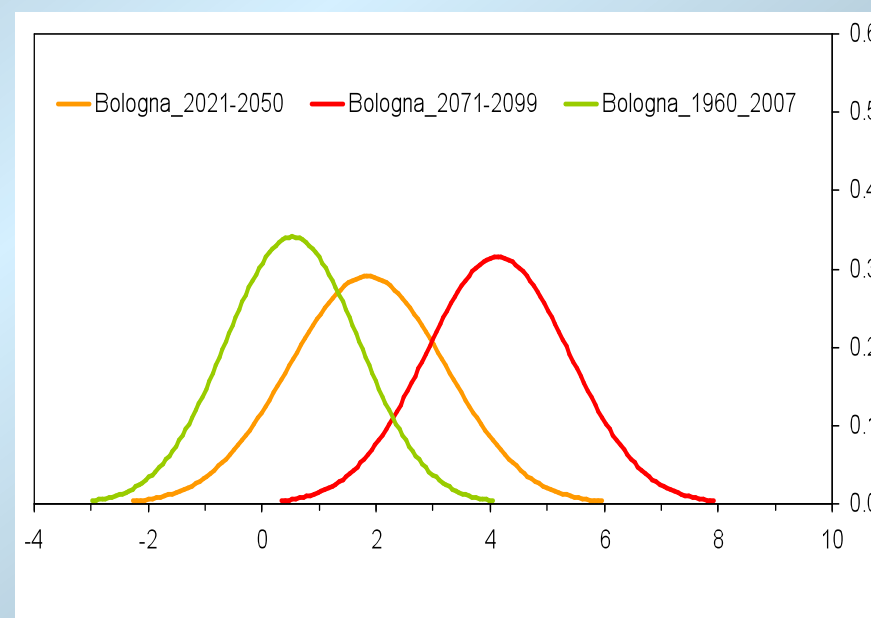
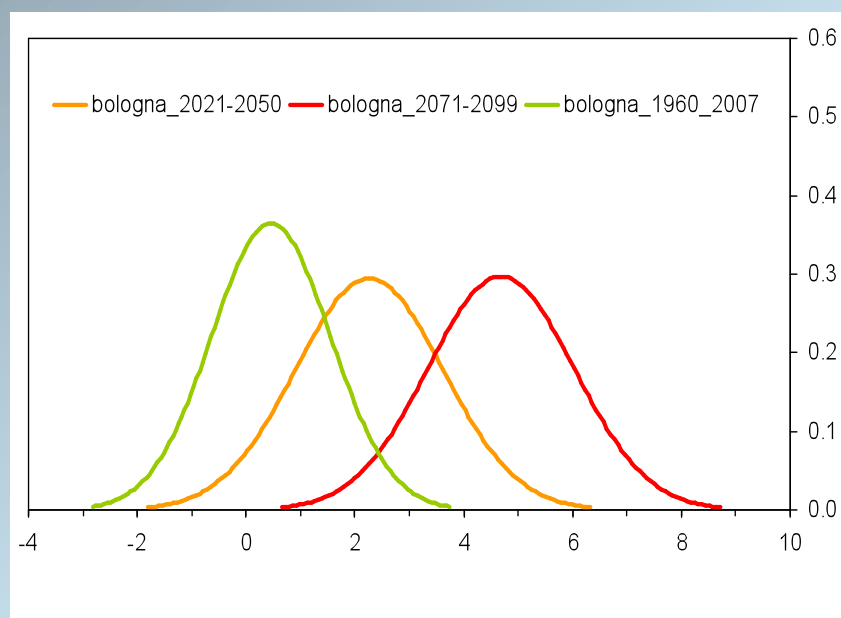
Scenario A2: (2071-2100) – (1961-1990)

Il dettaglio locale: come cambia il clima a Bologna

Tmin

PDF

Tmax

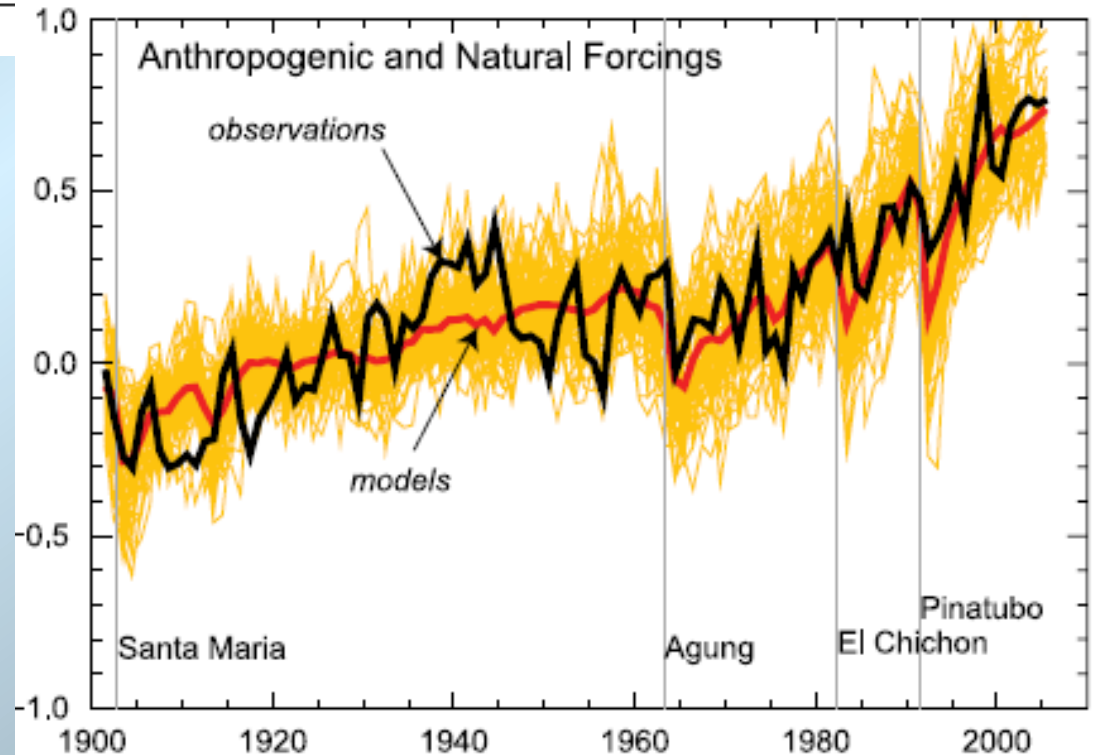
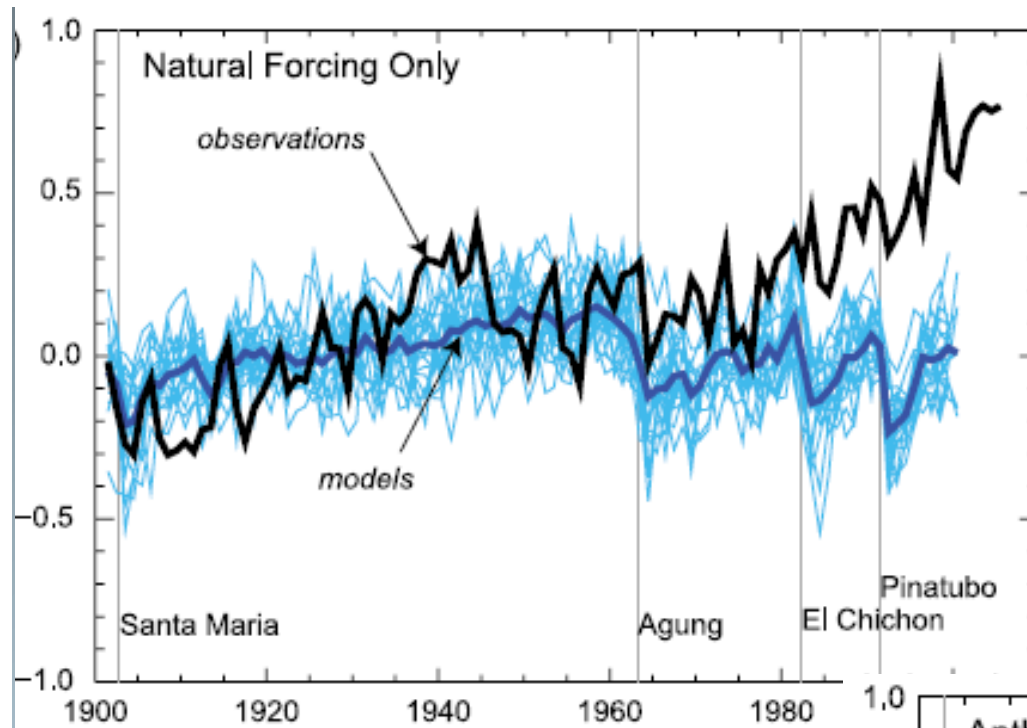


ARPA-SIMC - Ensembles - Scenario usato: A1B
Variazioni calcolate rispetto al clima di riferimento 1961-1990

Quali sono le aree problematiche, o addirittura critiche, della modellistica climatica? I feed-back:

- Più gas serra fanno aumentare la temperatura della superficie terrestre e della bassa atmosfera e raffreddare quella della alta atmosfera (stratosfera) senza necessariamente cambiare la temperatura complessiva del sistema (ecco perché il sistema tropicalizza...)
- Se la temperatura della superficie terrestre si riscalda, si riscalda anche il mare e quindi a) evapora più acqua e b) si rilascia parte della CO₂ disciolta nell'acqua marina (effetto acqua frizzante)
- Se evapora più acqua, si potrebbero formare più nubi
- Se si formano più nubi, si innesca un processo contrastante: le nubi sono riflettenti e quindi il sistema terra più atmosfera si raffredda: feed-back negativo
- Se la temperatura della superficie terrestre si scalda, si scalda il mare. Se si scalda il mare, rilascia parte della CO₂ disciolta nell'acqua marina: feed-back positivo
- I feed-back sono importanti? Quale(i) vince(ono)?
- E l'effetto degli aerosol? Gli aerosol agiscono come le nubi: sono riflettenti. Gli ultimi esperimenti di modellistica contengono gli aerosol, ma poco cambia nei risultati complessivi
- E il ciclo del carbonio (p.es. siamo in grado di modellare la CO₂ disciolta nel mare e quello che le succede quando il mare si riscalda, e gli idrati di metano)?

**La modellistica
della temperatura
globale (anomalie
in °C)**



Ma tutte le previsioni modellistiche sono affette da errore. Nel caso delle previsioni meteorologiche le cause principali sono tre:

- Errori nelle condizioni iniziali (l'”analisi”): troppo pochi dati e errori introdotti dai metodi matematici di interpolazione
- Errori nella formulazione delle equazioni che descrivono l'evoluzione nel tempo
- Errori nei metodi matematici e numerici che usiamo per risolvere le equazioni

Gli errori si sommano e crescono

- Quanto rapidamente, tenuto conto che l'atmosfera meteorologica è un sistema caotico?
- In pratica dopo 2-3 settimane la previsione e la realtà sono diverse tra loro come due carte meteorologiche della stessa stagione prese a caso (cioè correlano zero!)
- E' possibile prevedere “l'errore del giorno” (no forecast is complete without a forecast of the forecast skill, diceva Henk Tennekes già negli anni '80) che può essere (come tutti sappiamo) diversissimo da un giorno all'altro?
- Se non è possibile prevedere il tempo in dettaglio oltre una settimana e anche approssimativamente oltre 2-3 settimane, come si può sperare, con gli stessi modelli (o quasi) di fare proiezioni climatiche (che abbiamo dimostrato essere possibili)?

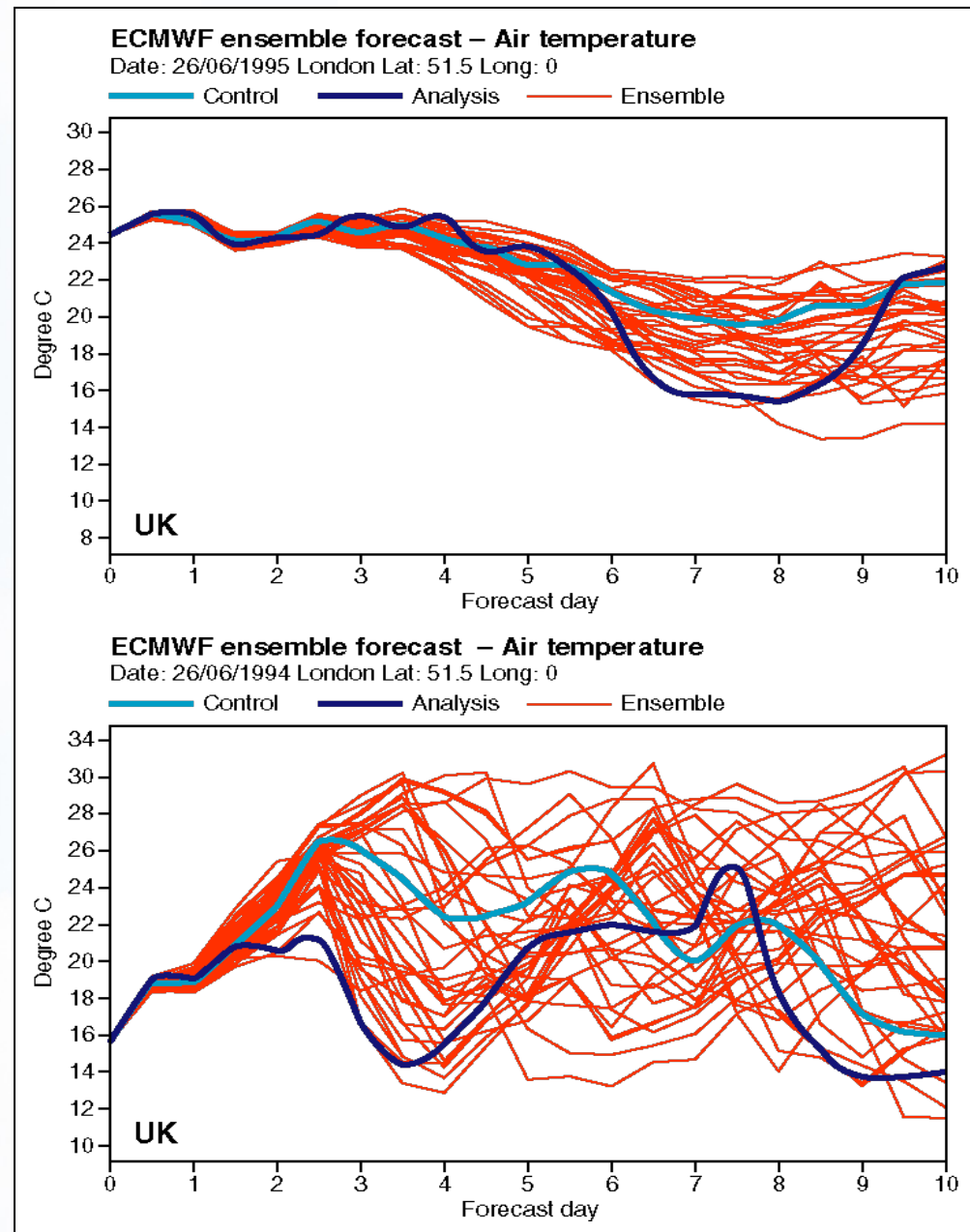
ECMWF Ensemble Forecast: “spaghetti diagrams”

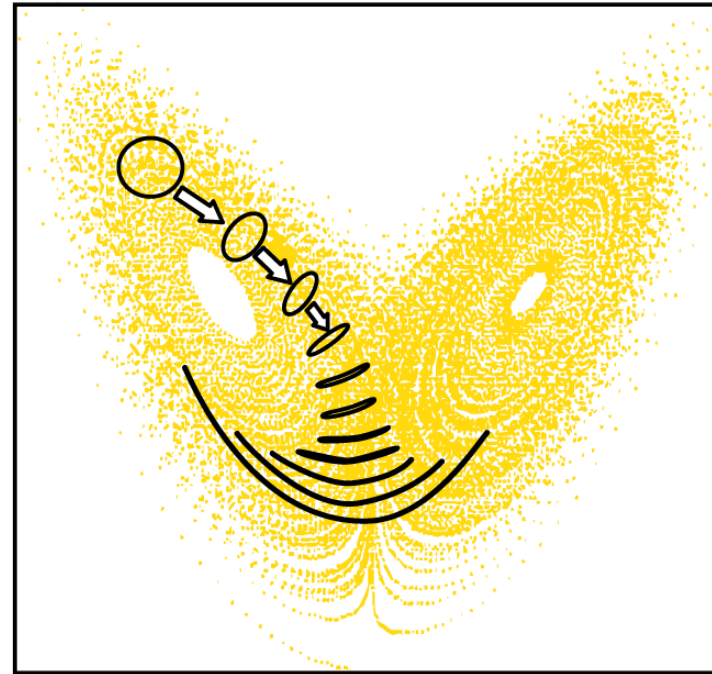
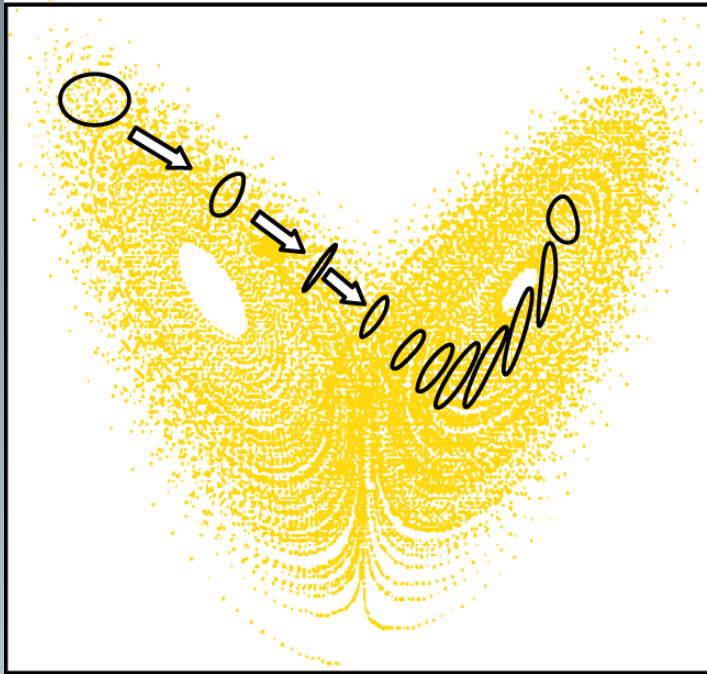
La temperatura prevista a Londra per i dieci giorni seguenti il 26 giugno: due situazioni a diversa predicibilità

Sopra: 1995

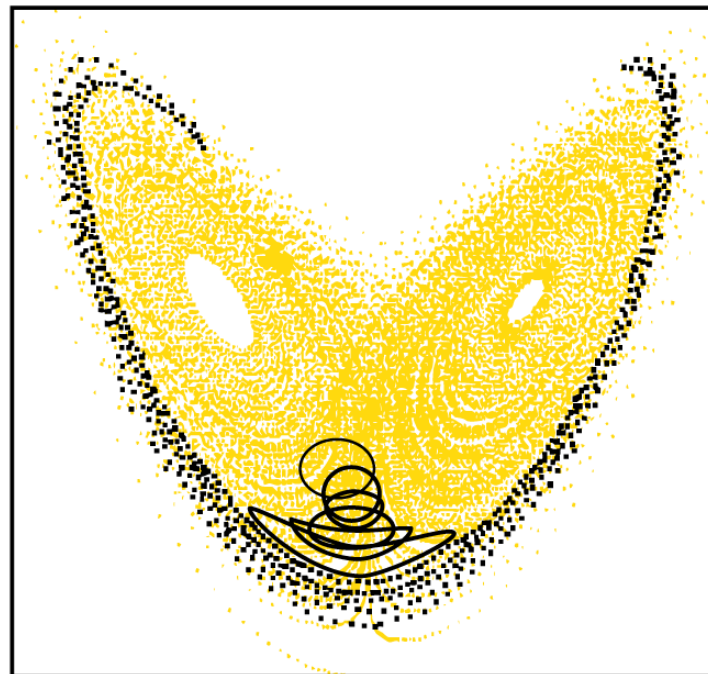
Sotto: 1994

PERCHE’?
Perchè l’atmosfera è
caotica!



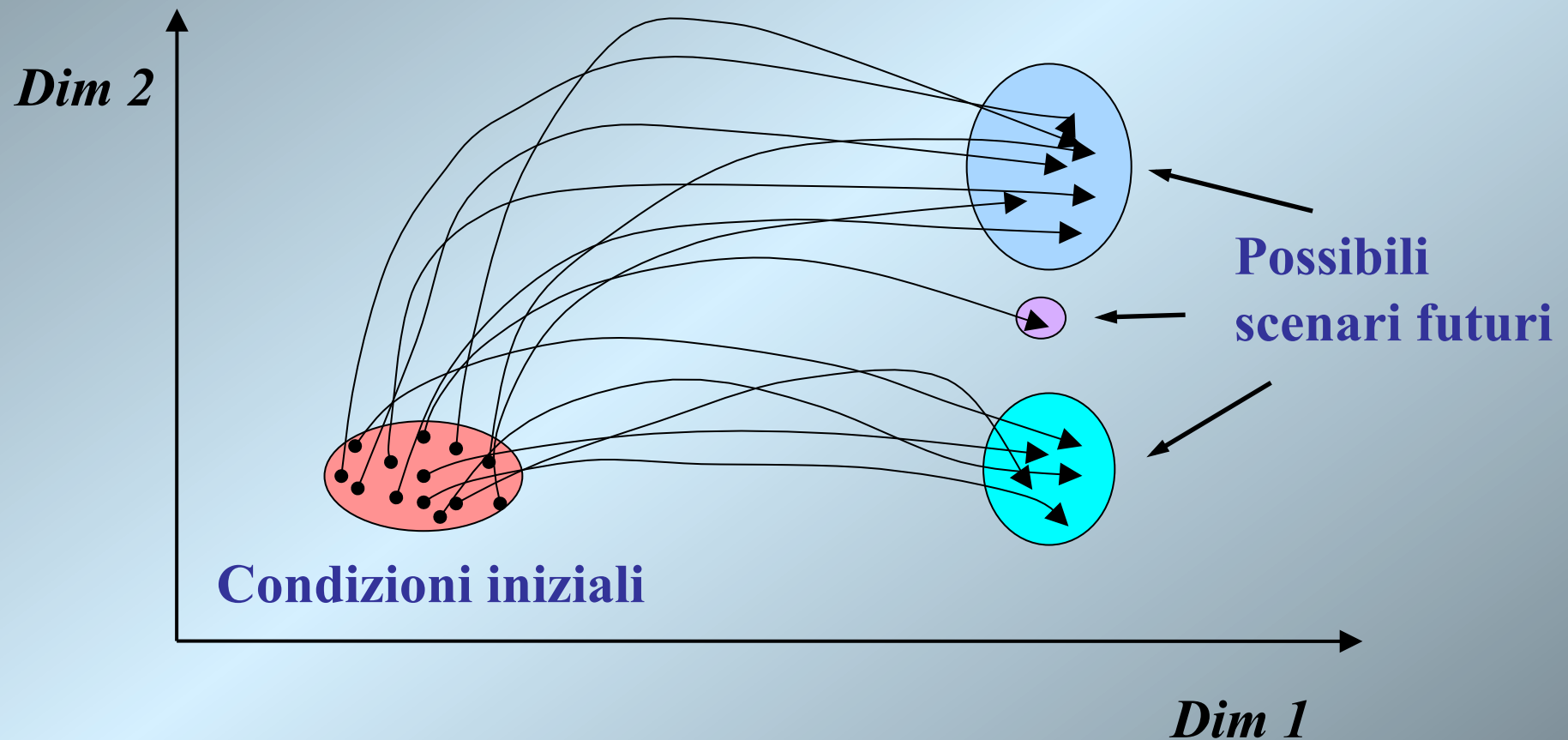


$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= -\sigma X + \sigma Y \\ \frac{dY}{dt} &= -XZ + rX - Y \\ \frac{dZ}{dt} &= XY - bZ\end{aligned}$$

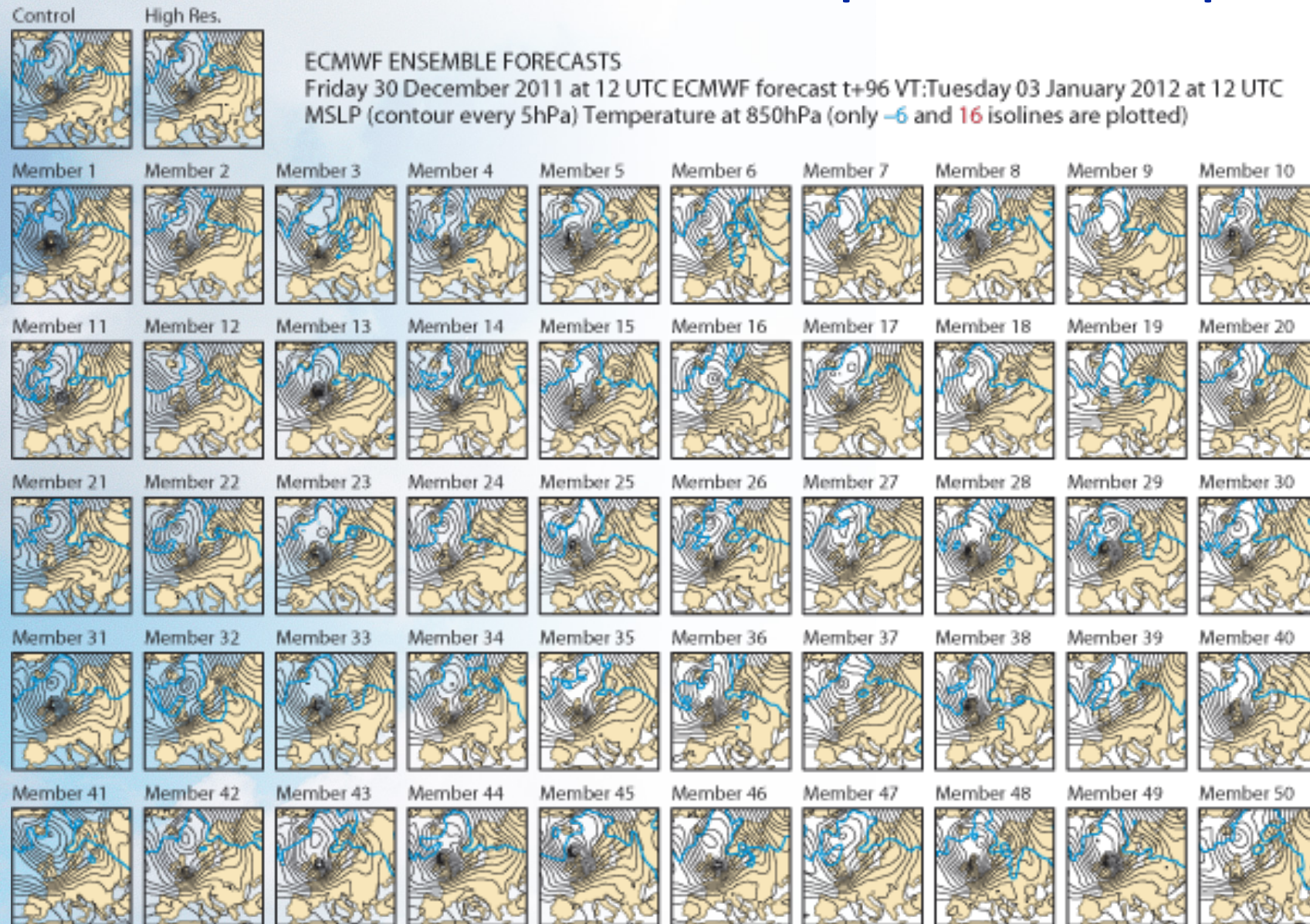


Previsioni d'ensemble (o d'insieme)

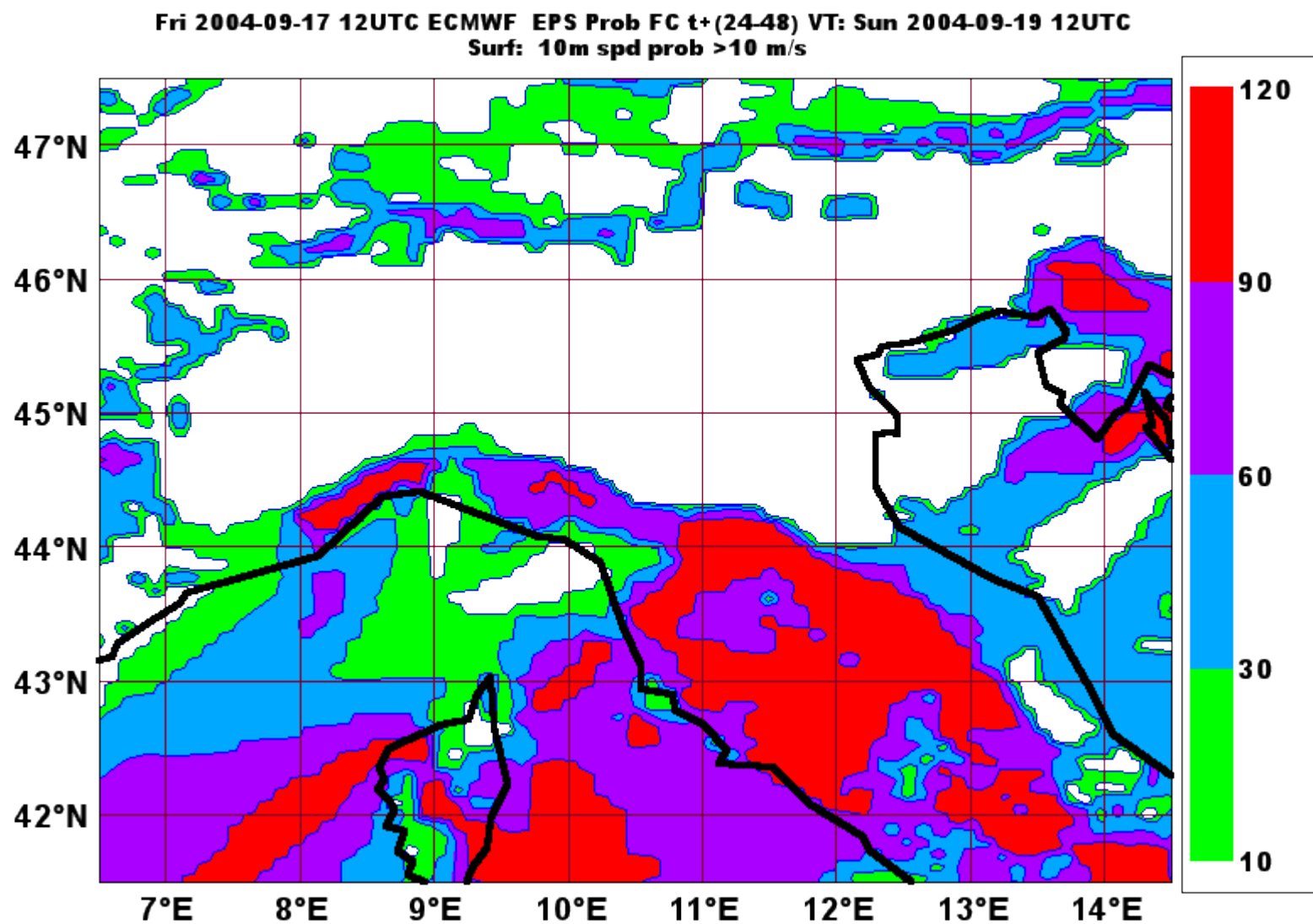
*Spazio delle fasi atmosferico
(semplificato!)*



ECMWF Ensemble Forecast: “stamp collection” maps



Probabilità di vento superiore a 10 m/s: previsione a 2 gg



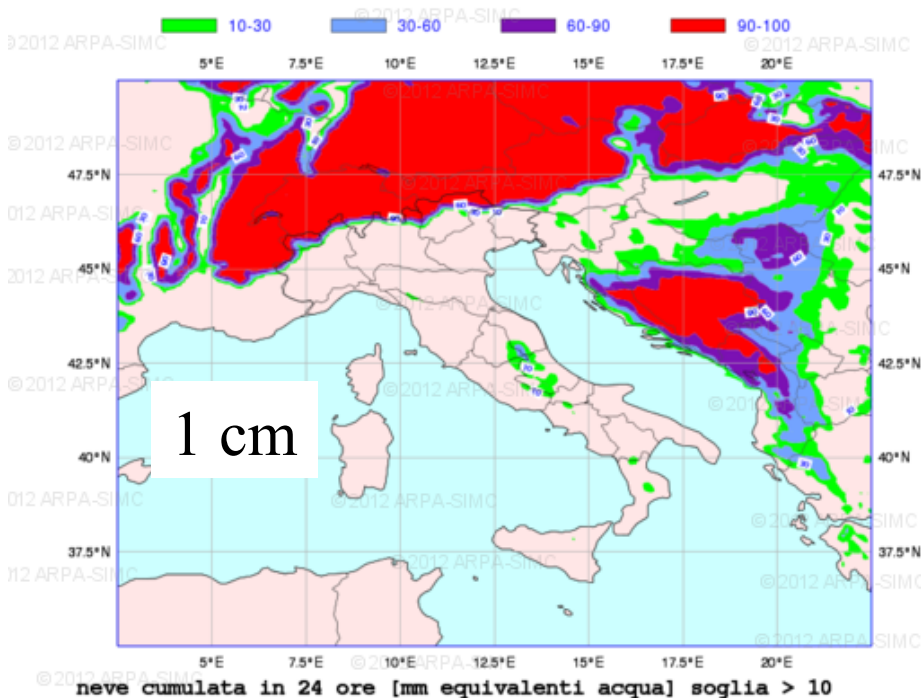
Previsioni di neve per oggi in probabilità di superamento di data soglia

http://www.smr.arpa.emr.it/?par=cHJvZG90dGlfc2Fsb3AlMkZQUkVWsvNjT05JTjGQVJFQV9MSU1JVEFUQSUyRkN - Windows Internet Explorer

COSMO-LEPS +Preci nev cum[al suolo] CORSA 00 : dom 09 dic '12 1

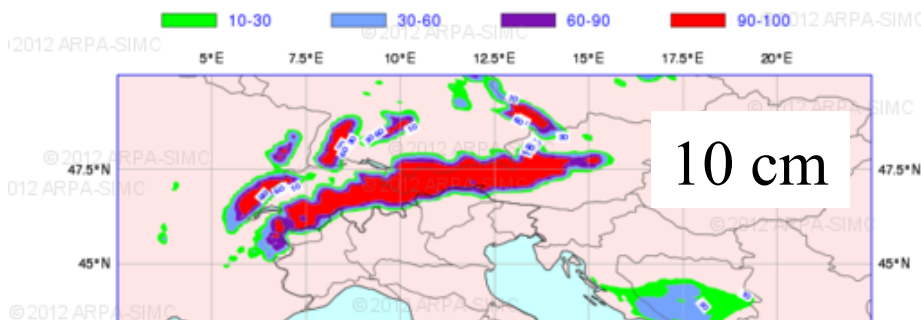
fc: ore 00 di lun 10 dic - ore 00 di mar 11 dic

neve cumulata in 24 ore [mm equivalenti acqua] soglia > 1



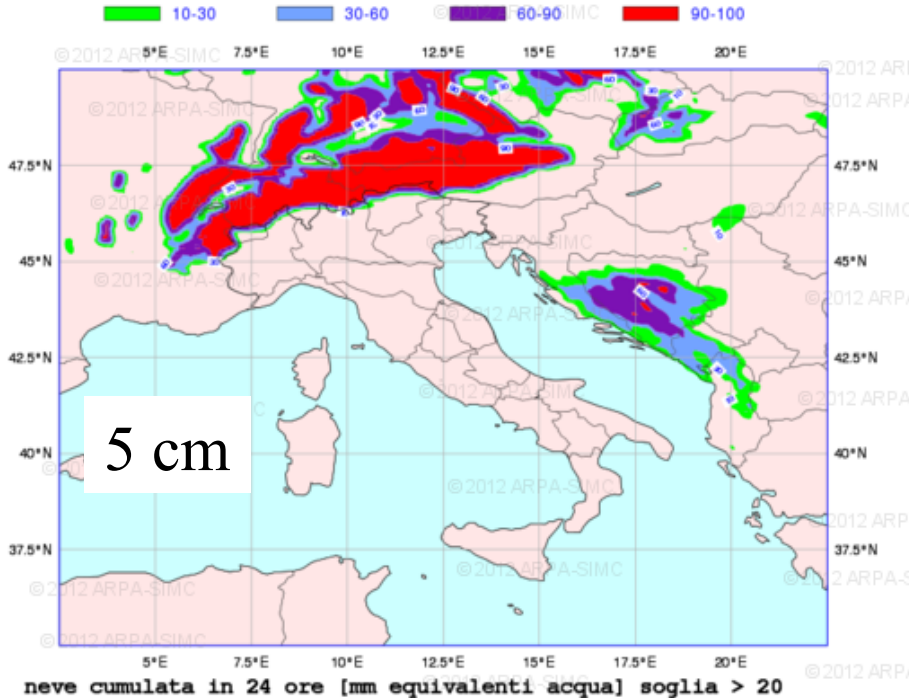
1 cm

neve cumulata in 24 ore [mm equivalenti acqua] soglia > 10



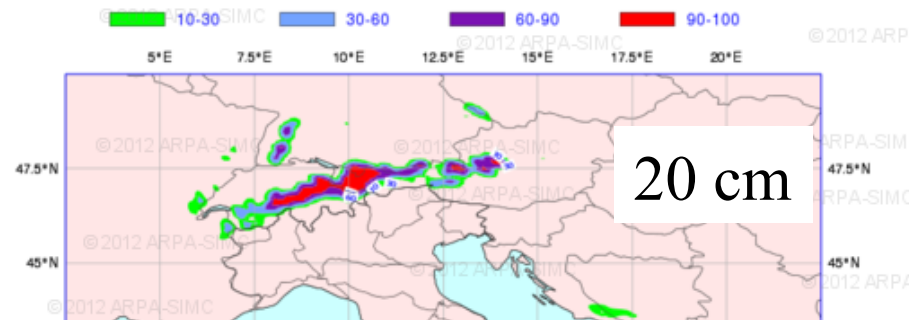
10 cm

neve cumulata in 24 ore [mm equivalenti acqua] soglia > 5



5 cm

neve cumulata in 24 ore [mm equivalenti acqua] soglia > 20



20 cm

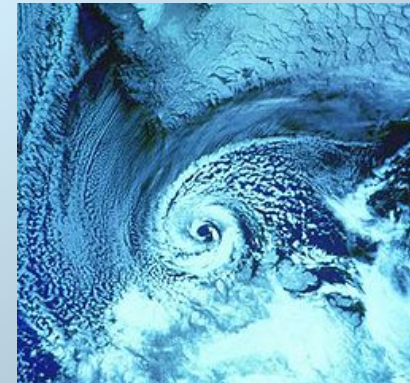
E la farfalla di Lorenz?

L'effetto farfalla è reale?

Alcune considerazioni con il contributo
di

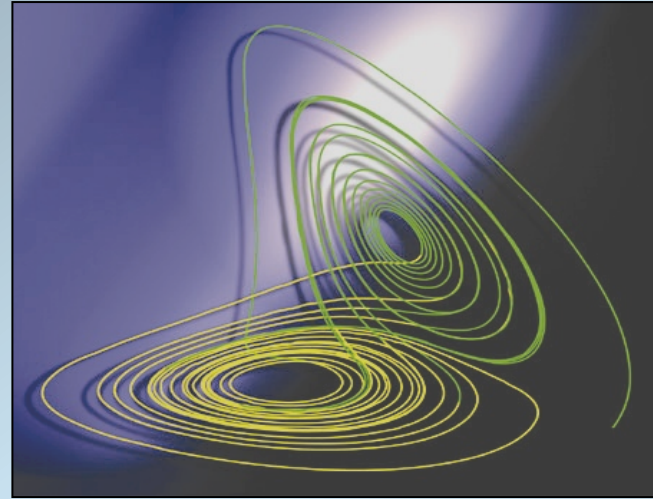


Ed Lorenz
MIT e ECMWF
e



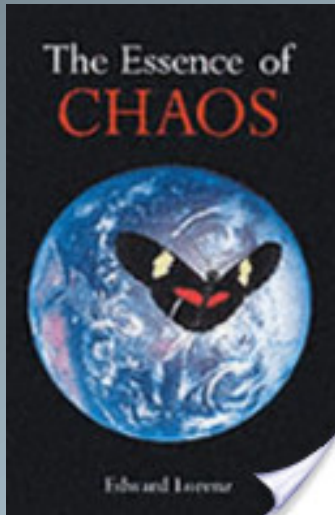
T.N.Palmer
University of Oxford
e ECMWF

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= -\sigma X + \sigma Y \\ \frac{dY}{dt} &= -XZ + rX - Y \\ \frac{dZ}{dt} &= XY - bZ\end{aligned}$$



L'attrattore di Lorenz mostra sicuramente sensibilità (ma *continua*) rispetto alle condizioni iniziali, del tipo: dimmi quanto precisa vuoi la previsione e ti dirò con quale accuratezza dovrai conoscere le condizioni iniziali.

Ma questo non è affatto ciò che Lorenz aveva in mente con “l'effetto farfalla”. Lorenz pensava invece ai sistemi che potrebbero *non* mostrare dipendenza *continua* rispetto alle condizioni iniziali, quelli che a causa di ciò mostrano un tipo molto più radicale di imprevedibilità.

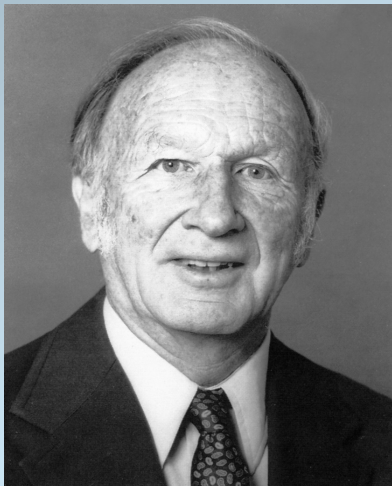


“Questo è il testo della presentazione che ho fatto ...a Washington...nel 1972...nella sua forma originale”

Predicibilità: Il battito d'ali di una farfalla in Brasile può scatenare un tornado in Texas?

...I risultati più significativi sono i seguenti:

1. I piccoli errori nelle scale più grossolane delle strutture atmosferiche ... tendono a raddoppiare in circa tre giorni.
2. I piccoli errori nella struttura più fine, p.es. nella posizione delle singole nubi, tendono a crescere molto più rapidamente, e raddoppiano in meno di un'ora...
3. Quando gli errori nella struttura più fine hanno raggiunto dimensioni apprezzabili, tendono ad indurre errori nelle strutture più grandi. Questo risultato...implica che dopo circa un giorno ci saranno errori apprezzabili nelle strutture a scala più piccola. Dimezzare l'errore osservativo nelle strutture a piccola scala – un compito in sé già enorme – estenderebbe probabilmente il range della previsione utile persino delle strutture più grandi soltanto di meno di un'ora.



The predictability of a flow which possesses many scales of motion

By EDWARD N. LORENZ, *Massachusetts Institute of Technology*¹

(Manuscript received October 31, 1968, revised version December 13, 1968)

ABSTRACT

It is proposed that certain formally deterministic fluid systems which possess many scales of motion are observationally indistinguishable from indeterministic systems; specifically, that two states of the system differing initially by a small "observational error" will evolve into two states differing as greatly as randomly chosen states of the system within a finite time interval, which cannot be lengthened by reducing the amplitude of the initial error. The hypothesis is investigated with a simple mathematical model. An equation whose dependent variables are ensemble averages of the "error energy" in separate scales of motion is derived from the vorticity equation which governs two-dimensional incompressible flow. Solutions of the equation are determined by numerical integration, for cases where the horizontal extent and total energy of the system are comparable to those of the earth's atmosphere.

It is found that each scale of motion possesses an intrinsic finite range of predictability, provided that the total energy of the system does not fall off too rapidly with decreasing wave length. With the chosen values of the constants, "cumulus-scale" motions can be predicted about one hour, "synoptic-scale" motions a few days, and the largest scales a few weeks in advance. The applicability of the model to real physical systems, including the earth's atmosphere, is considered.

Introduction

The laws which govern the behavior of a fluid system—the principles of continuity of mass, momentum, and energy—are often stated in a form which relates the present rate of

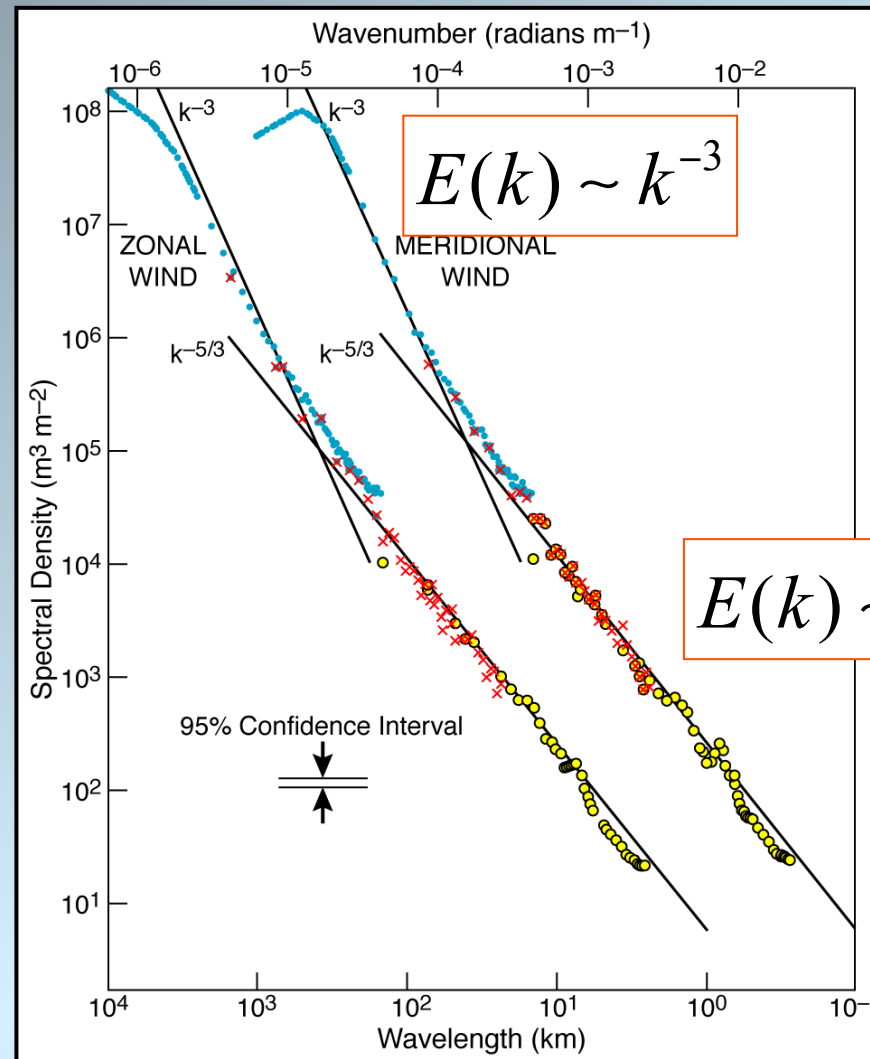
systems are indeterministic, and presumably few fluid dynamicists would question the validity of quantum mechanical principles merely because they do not customarily make use of them. More likely, they would simply take it for granted that their equations need to be

“.... Due stati del sistema che differiscono inizialmente per un piccolo “errore osservativo” evolveranno in due stati tra loro tanto diversi quanto stati del sistema presi a caso, e ciò in un intervallo di tempo finito che non può essere ridotto riducendo l’ampiezza dell’errore iniziale.

Si può dimostrare l’effetto farfalla?

“Non siamo stati in grado di provare o confutare la nostra congettura poichè per rendere le equazioni in questione trattabili siamo stati costretti ad introdurre certe assunzioni statistiche che non sono difendibili rigorosamente. “

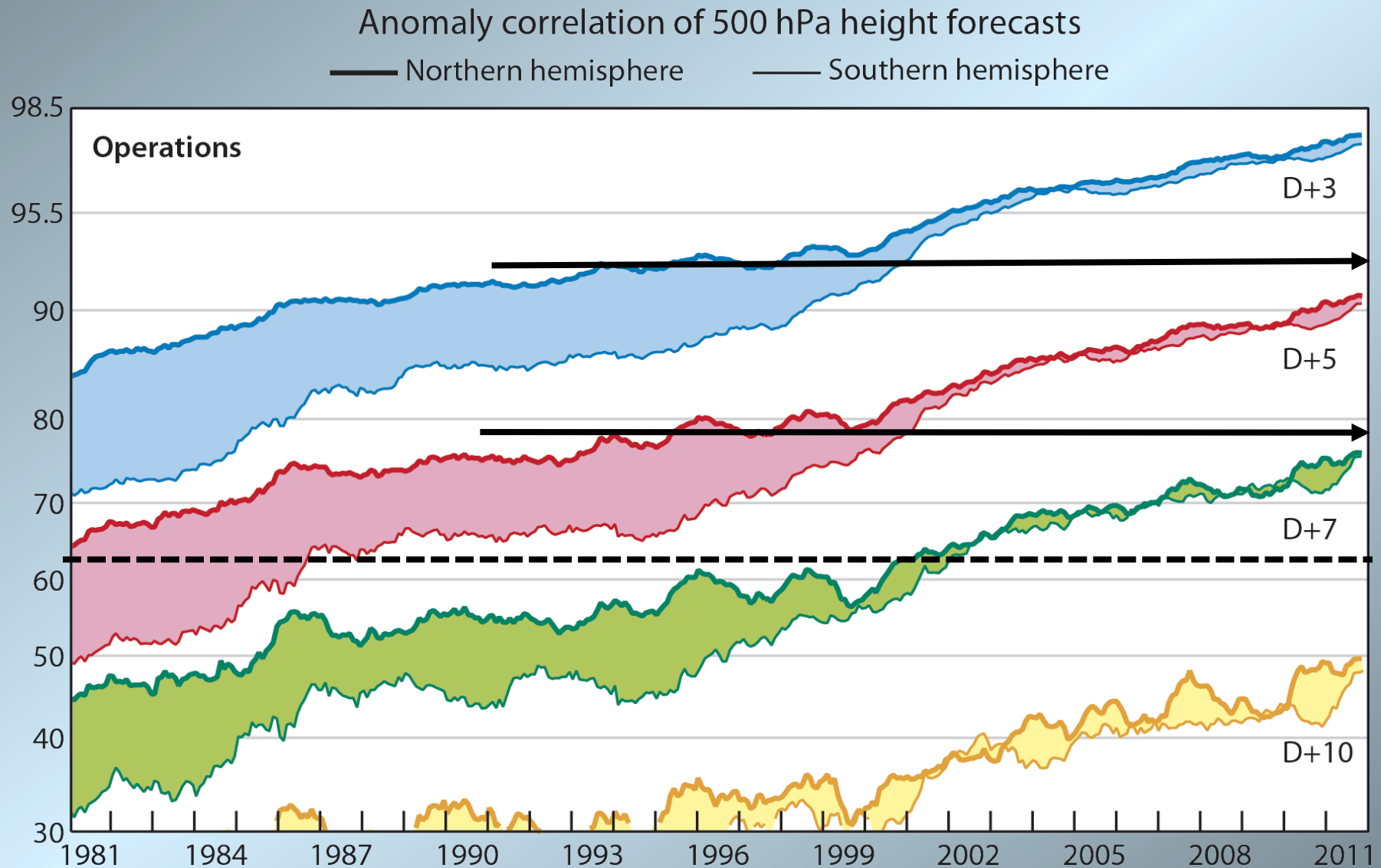
Lorenz 1969 Tellus



Ma l'atmosfera è un sistema dinamico che possiede molte scale di moto:
questo è uno spettro atmosferico e c'è una coda alla meno 5/3, il che
implica...PROBLEMA APERTO!!!!

Ci sono evidenze a sostegno di entrambe le ipotesi...

Evoluzione negli anni della qualità delle previsioni dell'ECMWF + i due emisferi a confronto



Adapted and extended from Simmons & Hollingsworth (2002)



Met Office

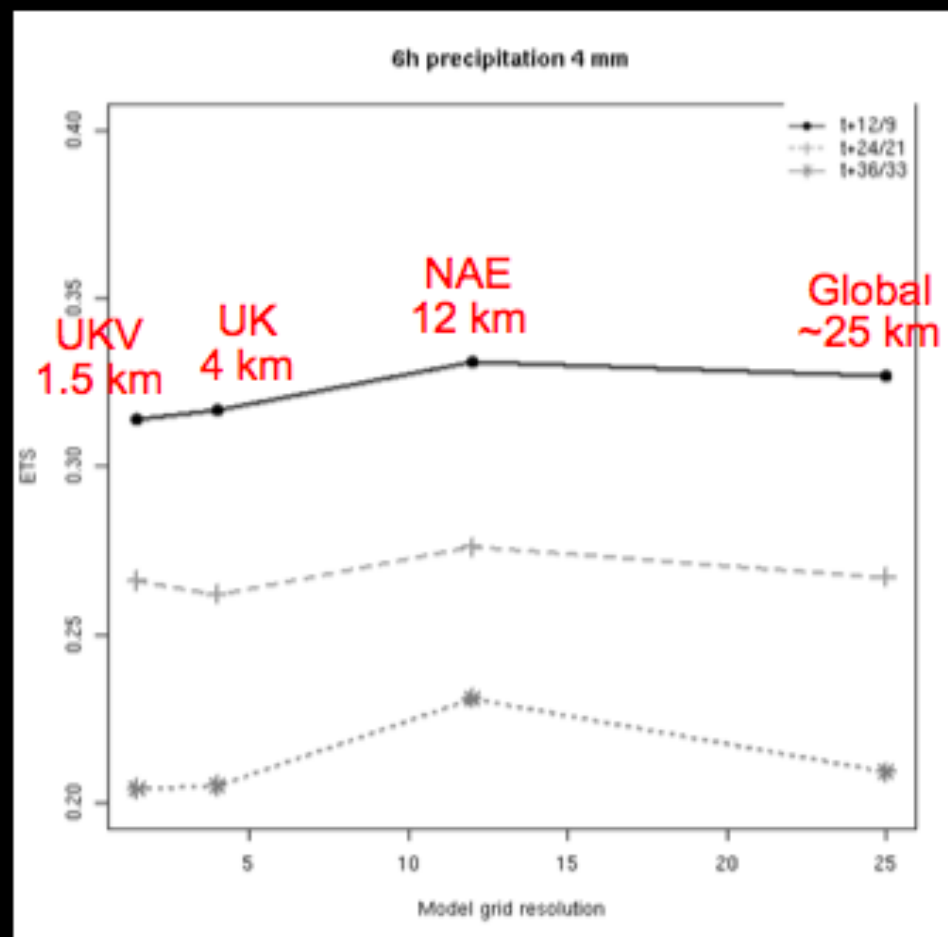
Does higher resolution give more skilful forecasts?

Apparently not! What's going on?

April to Oct 2010

Equitable Threat
Score (ETS)

Using gauges



Marion Mittermaier

*M Mittermaier, N Roberts & S Thompson
submitted to Met Apps*

E allora?

- Se è vero che più piccola è la scala dei fenomeni, più rapidamente crescono gli errori, allora aumentare indefinitamente la risoluzione dei modelli può non essere la strategia migliore perché si andrebbe rapidamente a sbattere contro l'effetto farfalla (quello vero!)
- Potrebbe invece pagare di più aumentare la numerosità degli elementi delle previsioni d'ensemble, migliorando la nostra capacità di trattare gli errori, valutarli e tenerne conto nell'utilizzo di previsioni d'ensemble cioè di **previsioni in probabilità (è il futuro?)**

Grazie per la
vostra
l'attenzione

