



LA  
RICERCA  
VENUTA  
DAL  
FUTURO



Ensemble predictions (e projections):  
come le tecniche di insieme  
hanno rivoluzionato  
previsioni meteorologiche  
e proiezioni climatiche

Susanna Corti  
18 Ottobre 2023



Il Centenario del CNR è realizzato con il contributo della  
Presidenza del Consiglio dei Ministri e con il Patrocinio di Rai

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO  
DEI MINISTRI

Struttura di missione anniversari nazionali  
ed eventi sportivi nazionali e internazionali



- Incertezza nelle previsioni meteorologiche – esistenza di un orizzonte della previsione – alcuni esempi
- *Ensemble predictions* nel modello di Lorenz
- *Ensemble Prediction System* all' ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts)
- Uso di una previsione di insieme per prendere decisioni
- Quanto è affidabile la nostra previsione di ensemble? (*reliability diagrams*)
- Utilizzo degli ensemble per stimare l'incertezza nelle proiezioni climatiche

*“...one flap of a sea-gull’s wing may forever change the future course of the weather...”*

**Edward Lorenz (1963)**



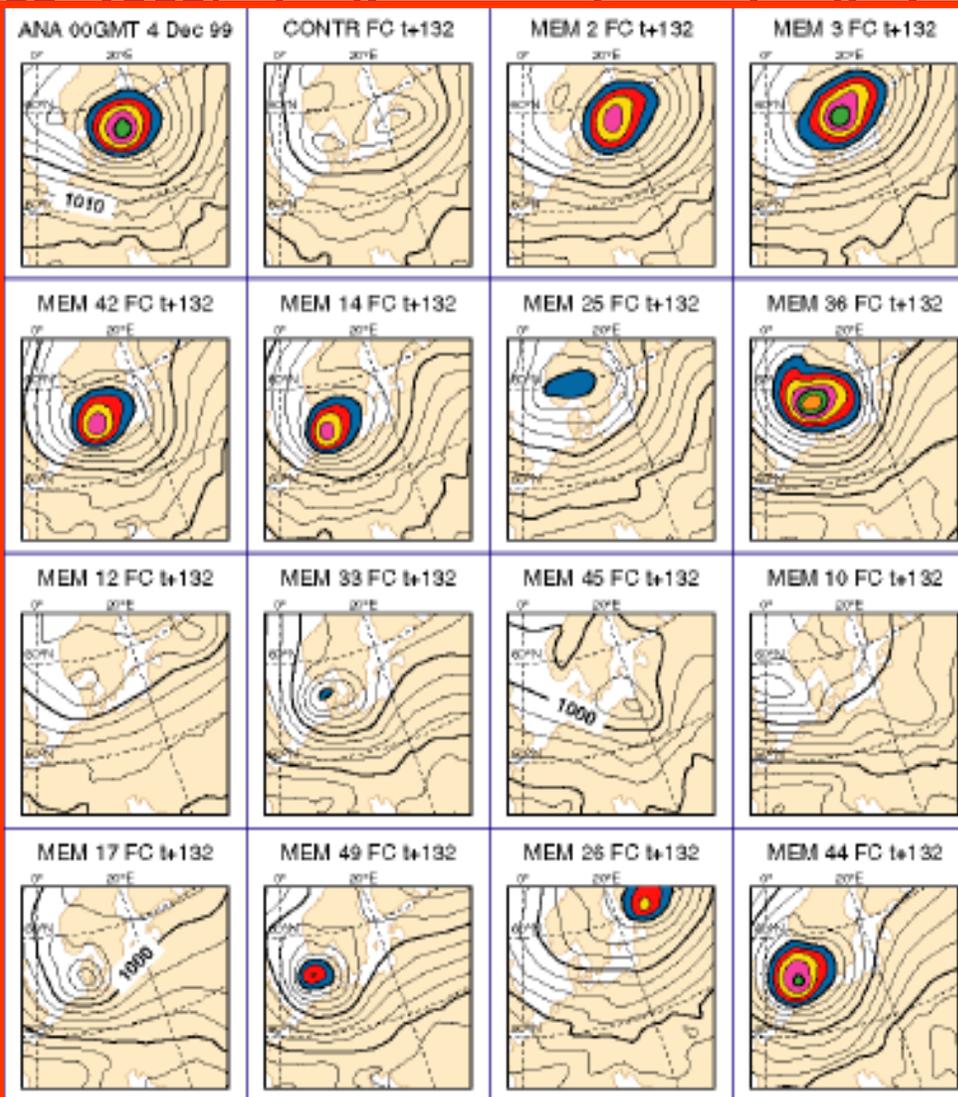
... sappiamo (Lorenz 1963, 1969) che il comportamento di alcuni sistemi dinamici e in particolare di un sistema fisico che possiede più scale di moto quale l’atmosfera non può essere previsto indefinitamente nel tempo. **Esiste cioè un “orizzonte della previsione”** determinato tipicamente dalla vita media dei fenomeni più energetici. Nel caso del tempo meteorologico alle medie latitudini esso coincide grosso modo con il tempo di vita medio di un ciclone extra-tropicale: **una settimana (al massimo due).**

“...one flap of a sea-gull’s wing may forever change the future course of the weather...”

Edward Lorenz (1963)



... sappiamo (Lorenz 1963) che in un sistema fisico che evolve indefinitamente nel tempo, tipicamente dalla vita media delle medie latitudini esso è di tipo tropicale: una settimana



... sistemi dinamici e in particolare l'atmosfera non può essere previsto con precisione "della previsione" determinato nel caso del tempo meteorologico alle scale di vita medio di un ciclone extra-

Esempio di previsione di un ciclone con 5 giorni di anticipo: le varie immagini rappresentano situazioni ugualmente probabili a cui corrispondono cicloni di intensità e posizione leggermente diverse tra loro.

“...one flap of a sea-gull’s wing may forever change the future course of the weather...”

Edward Lorenz (1963)



... sappiamo (Lorenz 1963) che in un sistema fisico che evolve indefinitamente nel tempo, tipicamente dalla vita media alle medie latitudini esso evolve in un tempo medio di un ciclone extra-tropicale: **una settimana**



... sistemi dinamici e in particolare l'atmosfera non può essere previsto **“della previsione”** determinato nel caso del tempo meteorologico alle scale di vita medio di un ciclone extra-

**Conseguenza:** esiste un **limite di predicibilità intrinseco** dovuto al fatto che due traiettorie che partono molto vicine dopo un tempo assai breve divergono e dopo un certo intervallo di tempo caratteristico risulta impossibile risalire alla loro origine comune. Quali sono gli ingredienti essenziali che danno luogo a questo fenomeno di **“sensibilità alle condizioni iniziali”**?

**INSTABILITÀ & NON-LINEARITÀ**

Esempio di previsione di un ciclone con 5 giorni di anticipo: le varie immagini rappresentano situazioni ugualmente probabili a cui corrispondono cicloni di intensità e posizione leggermente diverse tra loro.

# La predicibilità varia localmente sull'attrattore di Lorenz



Le equazioni mettono in relazione le proprietà di uno strato fluido bidimensionale, riscaldato uniformemente dal basso e raffreddato dall'alto. Descrivono la velocità di variazione di tre grandezze rispetto al tempo:  $x$  è proporzionale alla velocità della convezione,  $y$  alla variazione orizzontale della temperatura e  $z$  alla variazione verticale della temperatura. Le costanti  $\sigma$ ,  $r$  e  $b$  sono parametri di sistema proporzionali alle caratteristiche del fluido e alle sue dimensioni.

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x) \\ \frac{dy}{dt} &= rx - y - xz \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz\end{aligned}$$

## *Lorenz 63*

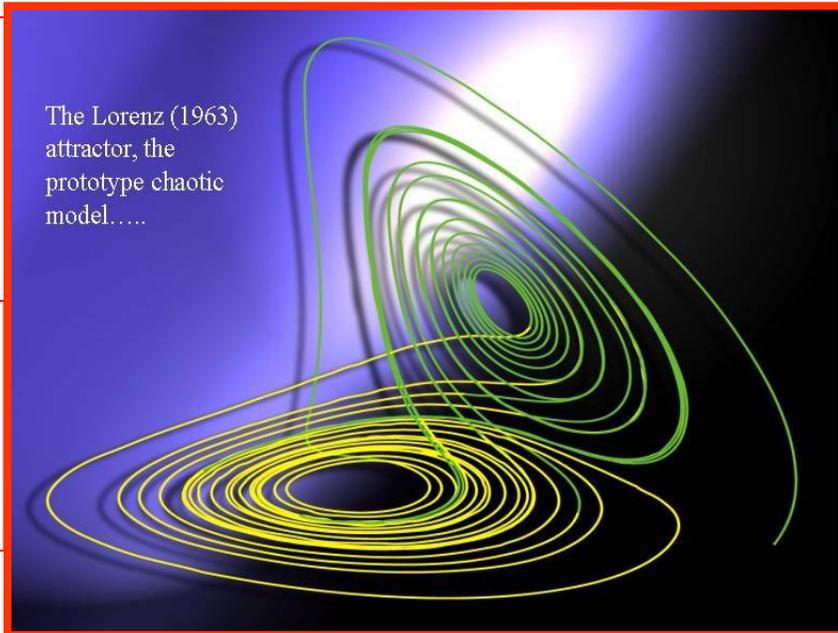
3 equazioni differenziali con 3 variabili

# La predicibilità varia localmente sull'attrattore di Lorenz



Le equazioni mettono in relazione le proprietà di uno strato fluido bidimensionale, riscaldato uniformemente dal basso e raffreddato dall'alto. Descrivono la velocità di variazione di tre grandezze rispetto al tempo:  $x$  è **proporzionale alla velocità della convezione**,  $y$  alla **variazione orizzontale della temperatura** e  $z$  alla **variazione verticale della temperatura**. Le costanti  $\sigma$ ,  $r$  e  $b$  sono parametri di sistema proporzionali alle caratteristiche del fluido e alle sue dimensioni.

The Lorenz (1963) attractor, the prototype chaotic model....

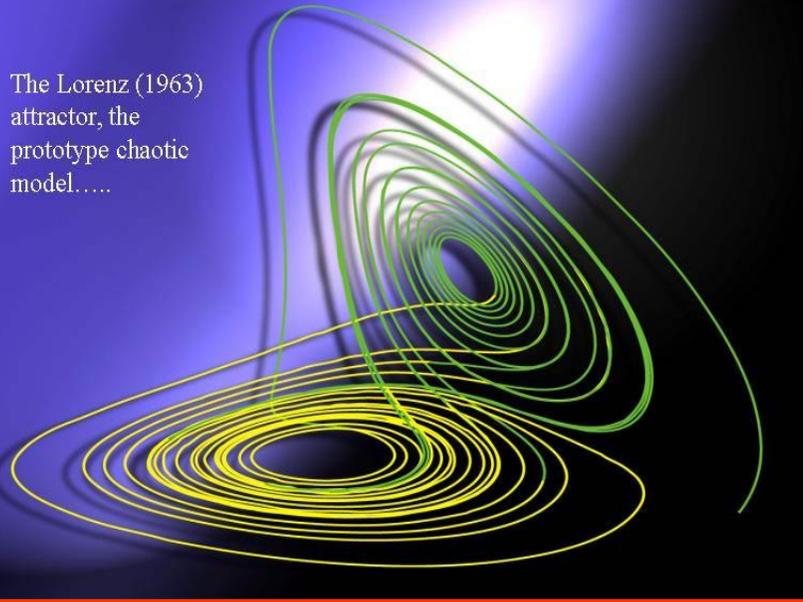


**Lorenz 63**  
3 equazioni differenziali con 3 variabili

# La predicibilità varia localmente sull'attrattore di Lorenz

Le equazioni mettono in relazione le proprietà di uno strato fluido bidimensionale, riscaldato uniformemente dal basso e raffreddato dall'alto. Descrivono la velocità di variazione di tre grandezze rispetto al tempo:  $x$  è **proporzionale alla velocità della convezione**,  $y$  alla **variazione orizzontale della temperatura** e  $z$  alla **variazione verticale della temperatura**. Le costanti  $\sigma$ ,  $r$  e  $b$  sono parametri di sistema proporzionali alle caratteristiche del fluido e alle sue dimensioni.

The Lorenz (1963) attractor, the prototype chaotic model.....



**Lorenz 63**  
3 equazioni differenziali con 3 variabili

**Ensemble prediction 1**

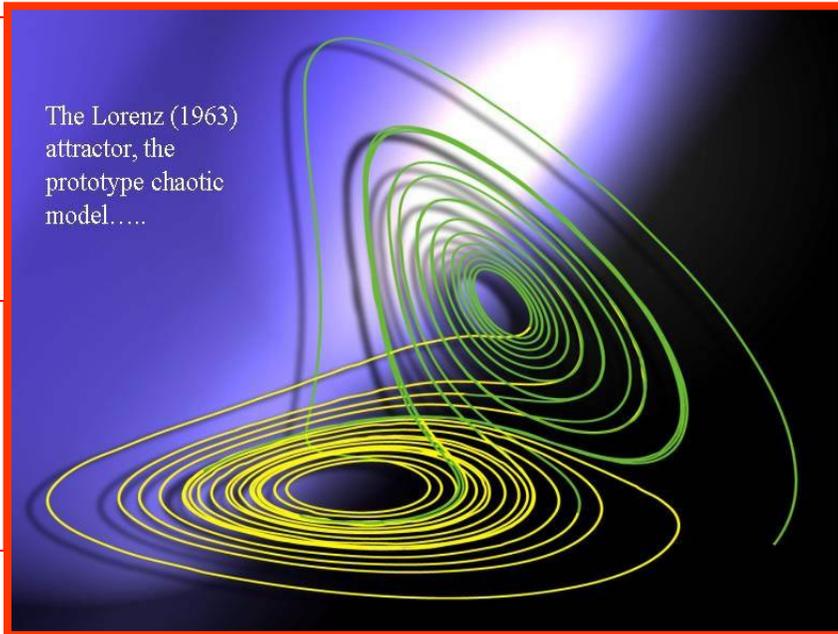
**Probabilità di una transizione 100%**



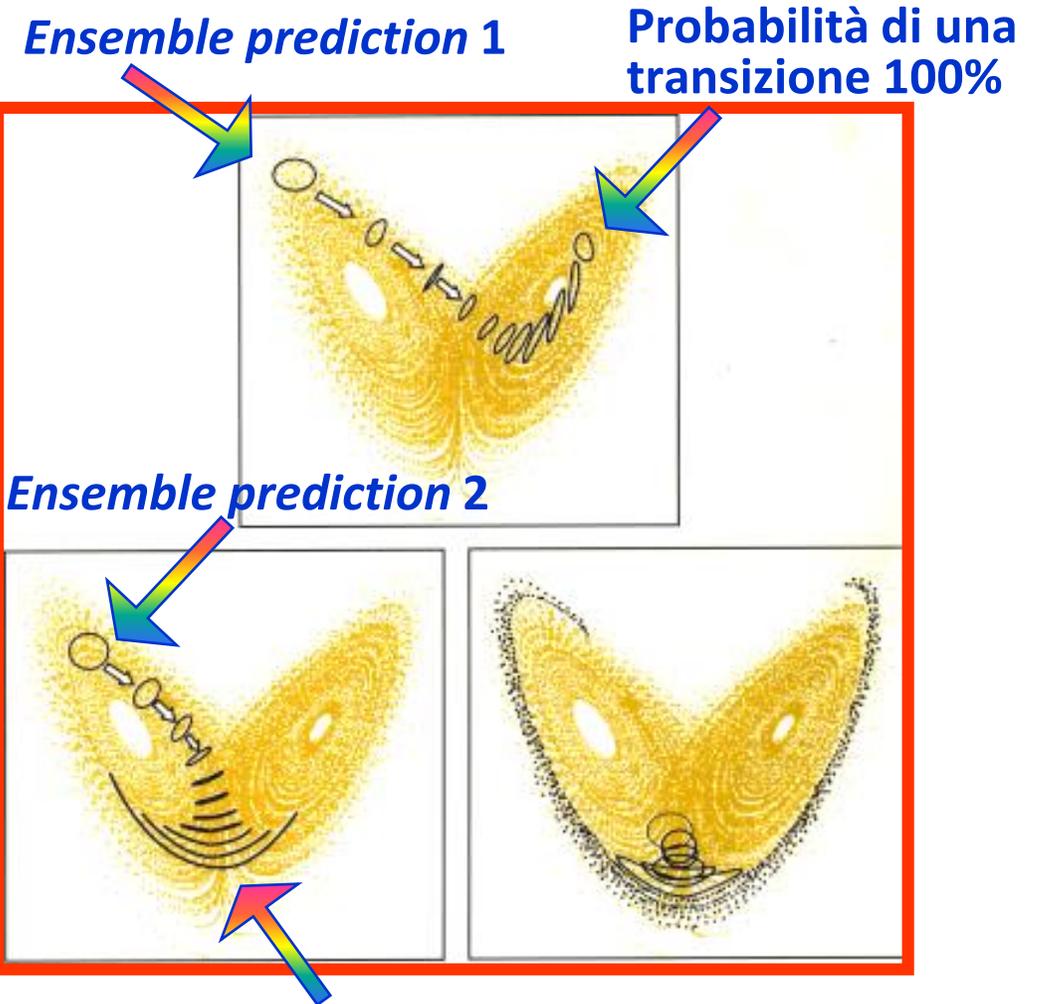
# La predicibilità varia localmente sull'attrattore di Lorenz

Le equazioni mettono in relazione le proprietà di uno strato fluido bidimensionale, riscaldato uniformemente dal basso e raffreddato dall'alto. Descrivono la velocità di variazione di tre grandezze rispetto al tempo:  $x$  è **proporzionale alla velocità della convezione**,  $y$  alla **variazione orizzontale della temperatura** e  $z$  alla **variazione verticale della temperatura**. Le costanti  $\sigma$ ,  $r$  e  $b$  sono parametri di sistema proporzionali alle caratteristiche del fluido e alle sue dimensioni.

The Lorenz (1963) attractor, the prototype chaotic model.....



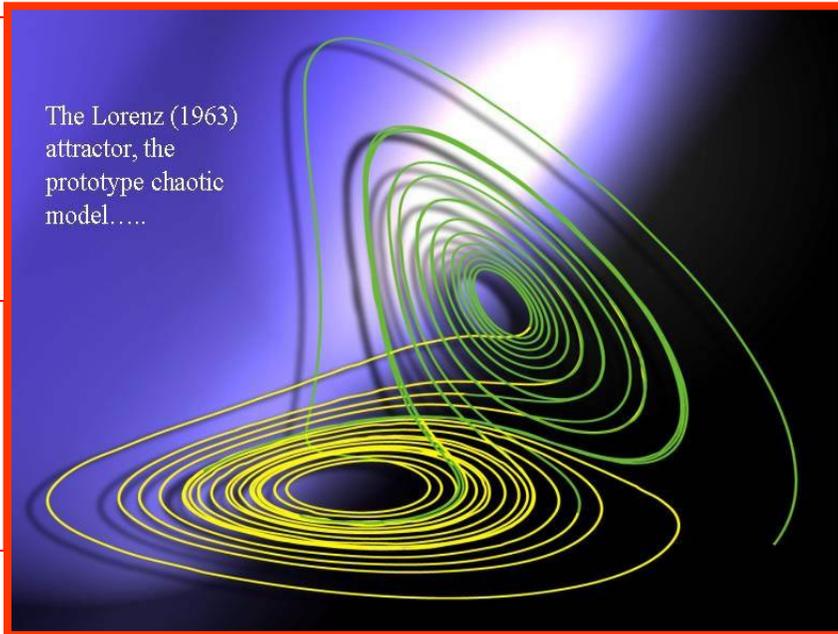
**Lorenz 63**  
3 equazioni differenziali con 3 variabili



# La predicibilità varia localmente sull'attrattore di Lorenz

Le equazioni mettono in relazione le proprietà di uno strato fluido bidimensionale, riscaldato uniformemente dal basso e raffreddato dall'alto. Descrivono la velocità di variazione di tre grandezze rispetto al tempo:  $x$  è **proporzionale alla velocità della convezione**,  $y$  alla **variazione orizzontale della temperatura** e  $z$  alla **variazione verticale della temperatura**. Le costanti  $\sigma$ ,  $r$  e  $b$  sono parametri di sistema proporzionali alle caratteristiche del fluido e alle sue dimensioni.

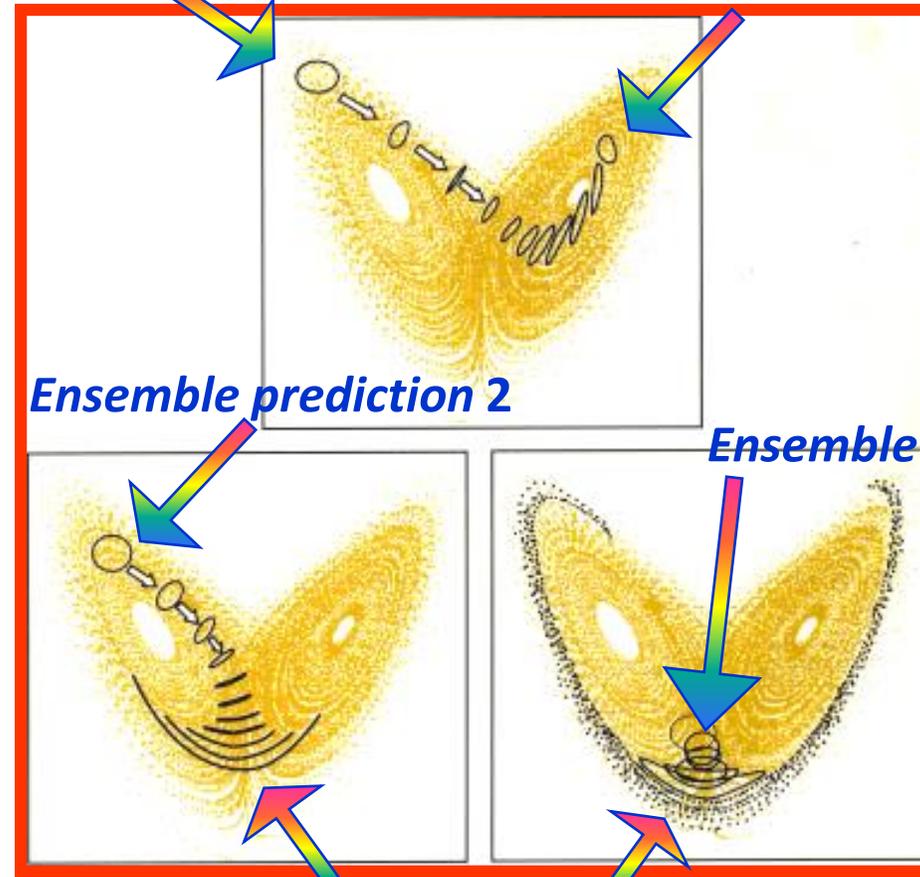
The Lorenz (1963) attractor, the prototype chaotic model.....



**Lorenz 63**  
3 equazioni differenziali con 3 variabili

**Ensemble prediction 1**

**Probabilità di una transizione 100%**



**Ensemble prediction 2**

**Ensemble prediction 3**

**Probabilità di una transizione 40%**

**Caso totalmente imprevedibile**

# Un caso *ensemble prediction* 3 nell'atmosfera reale: Ciclone Lothar



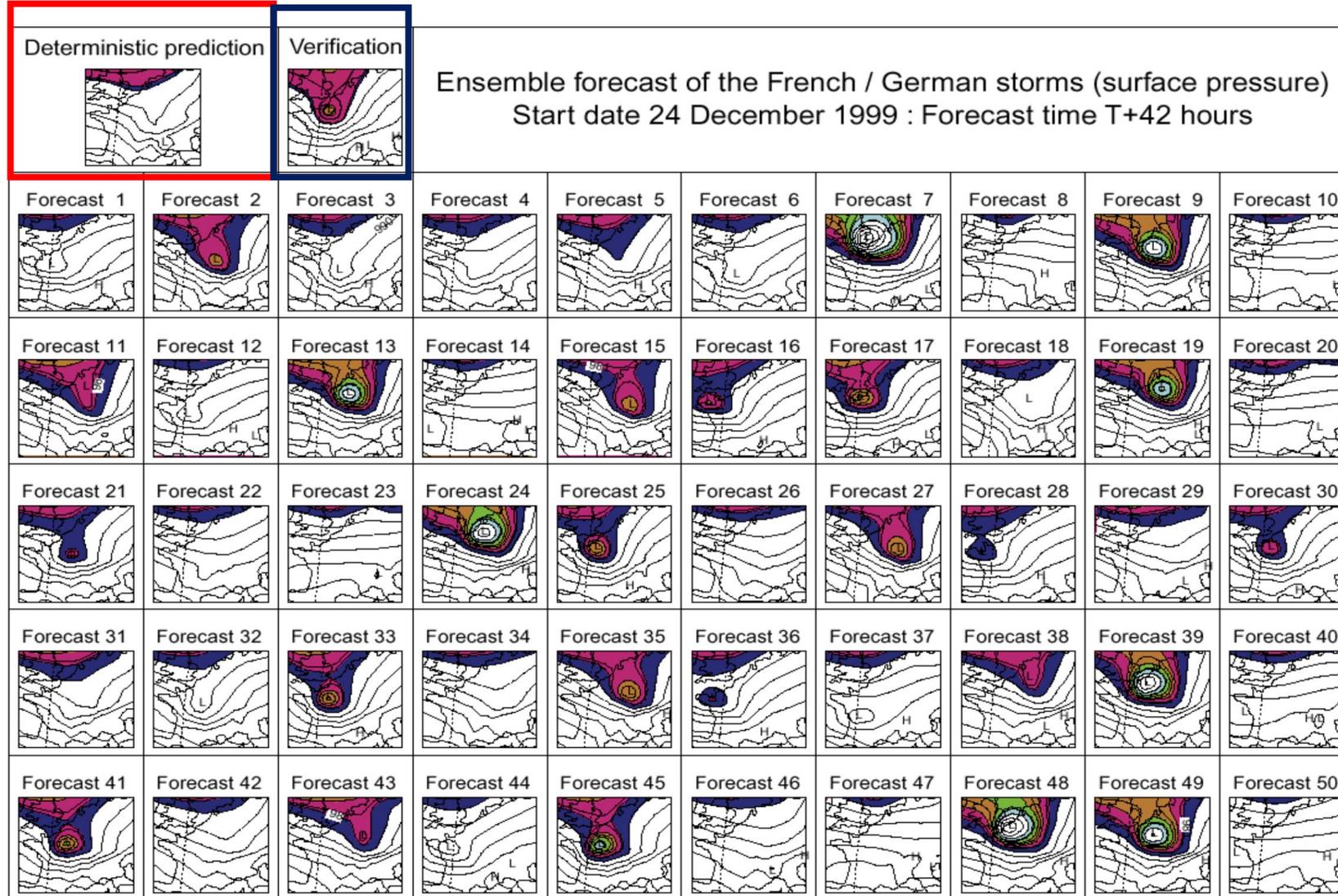
24/12/1999 : 51  
Condizioni iniziali  
leggermente  
diverse

Campo: Altezza  
geopotenziale a 500  
hPa

# Un caso *ensemble prediction* 3 nell'atmosfera reale: Ciclone Lothar



## Lothar (T+42 hours)



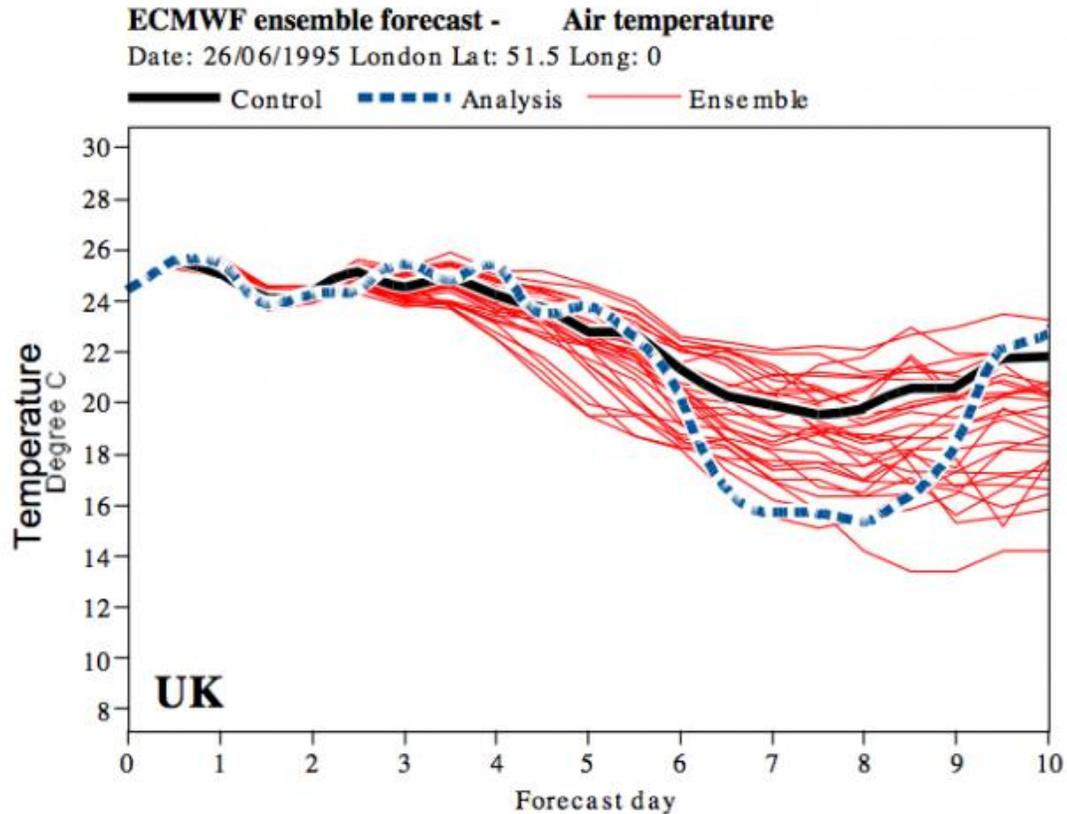
Previsioni  
corrispondenti a 42  
ore  
Campo: Altezza  
geopotenziale a 500  
hPa

# ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Predictions) : nel 1993 nascono le previsioni meteorologiche di insieme

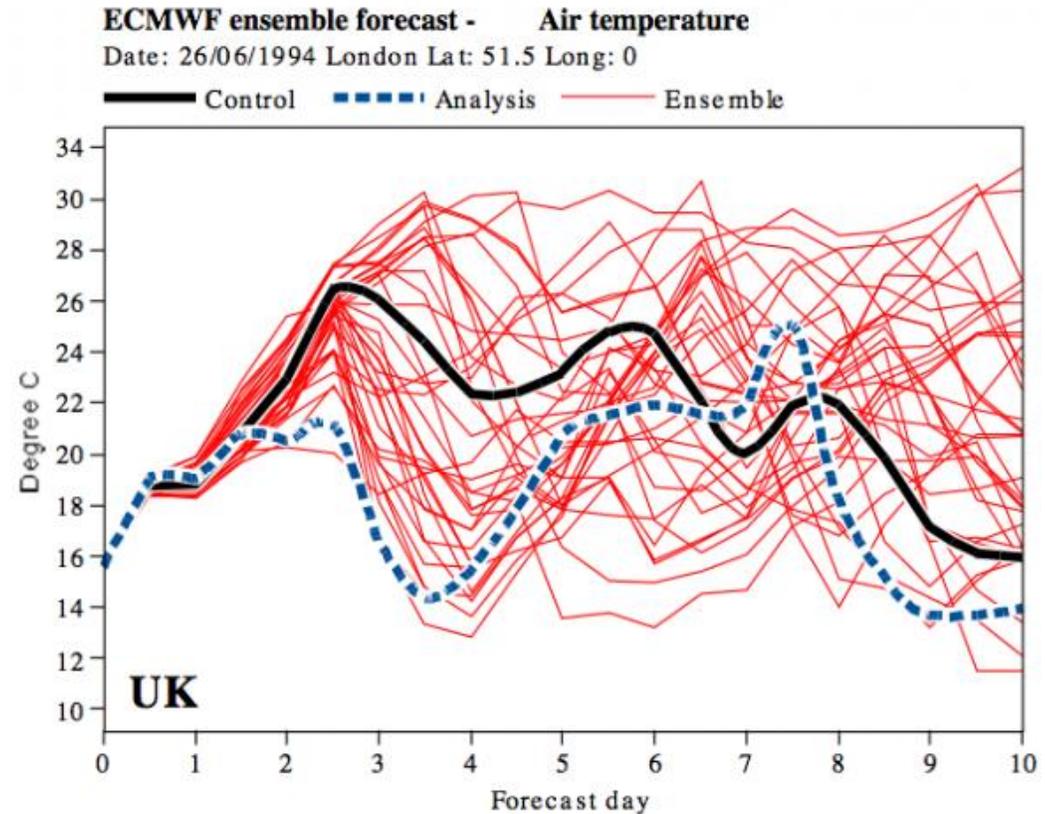


La dispersione dell'insieme fornisce una misura della bontà della previsione.

## 26<sup>th</sup> June 1995

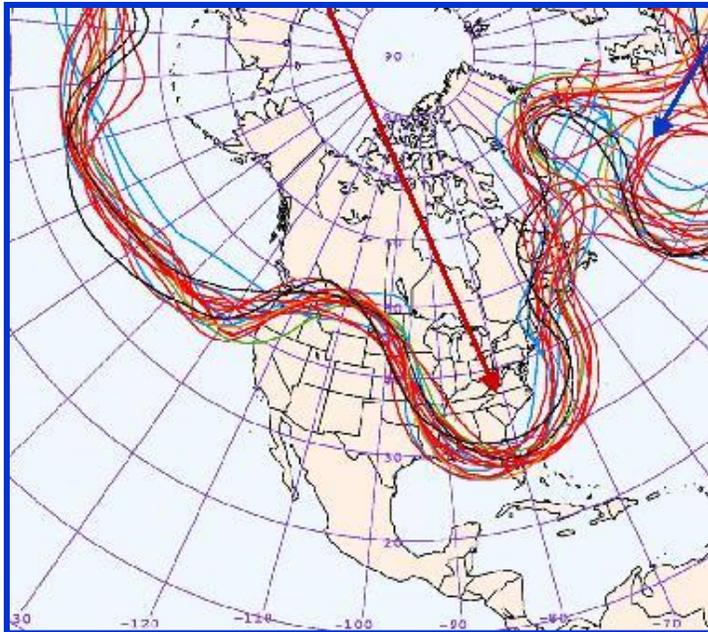


## 26<sup>th</sup> June 1994



# Casi di alta e bassa predicibilità nell'atmosfera reale

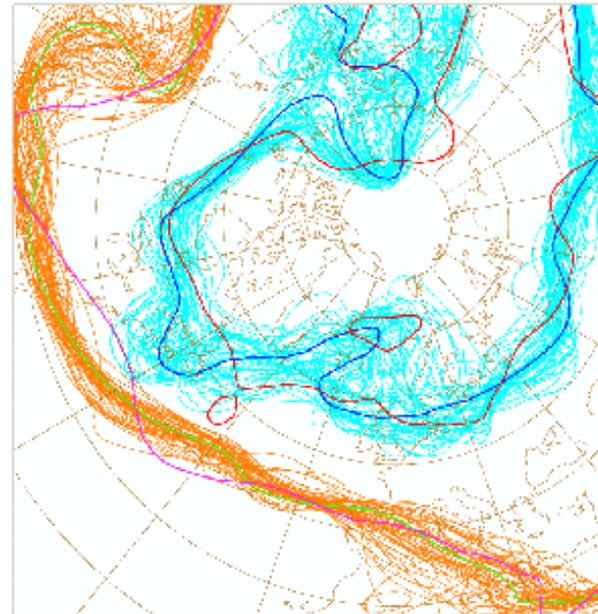
**Spaghetti plots:** Il grado di divergenza delle isolinee della Z500 rappresenta un indice del potenziale tasso di crescita dell'errore.



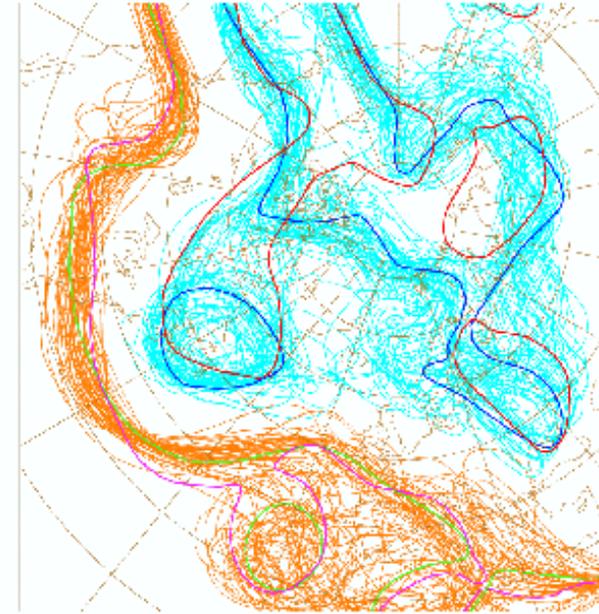
**Esempio di Ensemble Prediction System a NCEP**

**Esempio di Ensemble Prediction System (EPS) all'ECMWF**

500z d:1997-02-09 12:00:00 fc+120h cl:od exp:1  
AN red/purple - CON blue/green - iso=5200-5700



500z d:1997-03-13 12:00:00 fc+120h cl:od exp:1  
AN red/purple - CON blue/green - iso=5200-5700



# Previsioni di Ensemble Bologna 17/10/2023

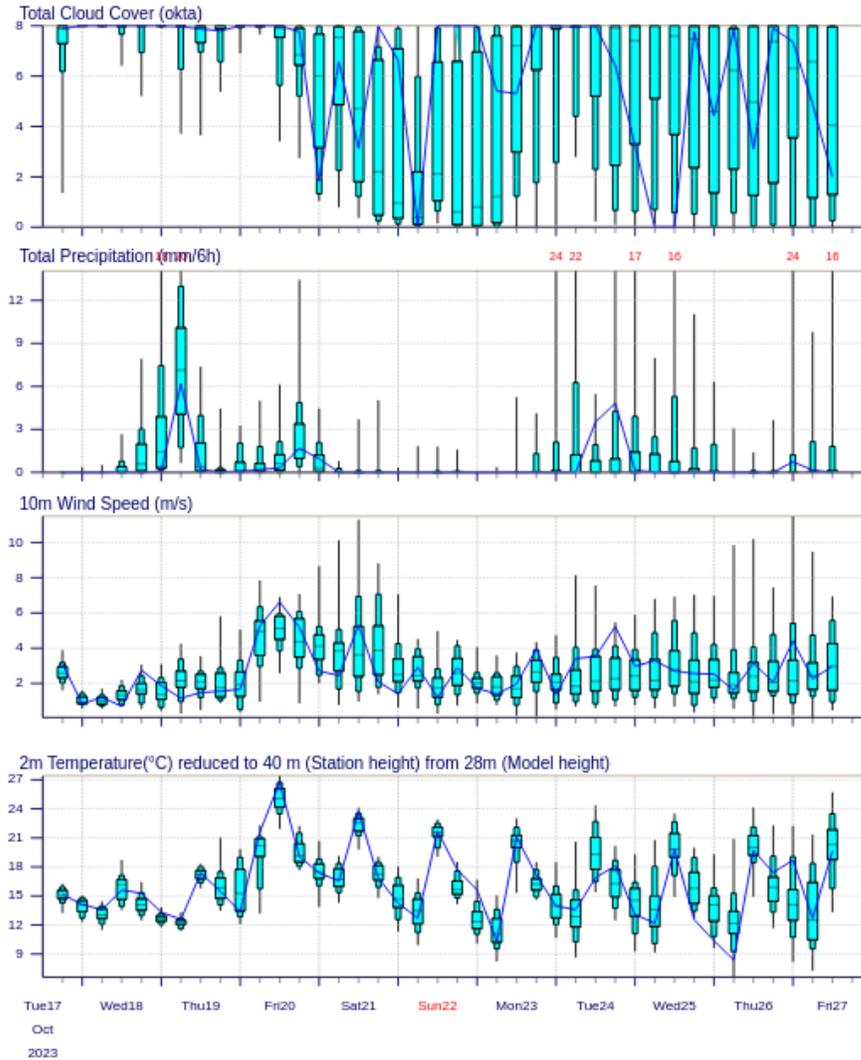
**Copertura  
nuvolosa**

**Precipitazione**

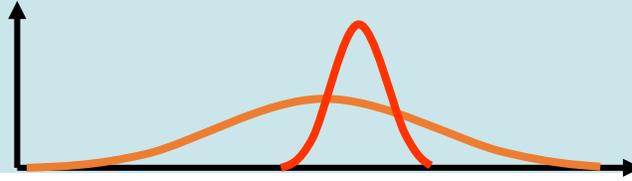
**Velocità del vento**

**Temperatura**

ENS Meteorogram  
44.53°N 11.34°E (ENS land point) 40 m  
High Resolution Forecast and ENS Distribution Tuesday 17 October 2023 12 UTC



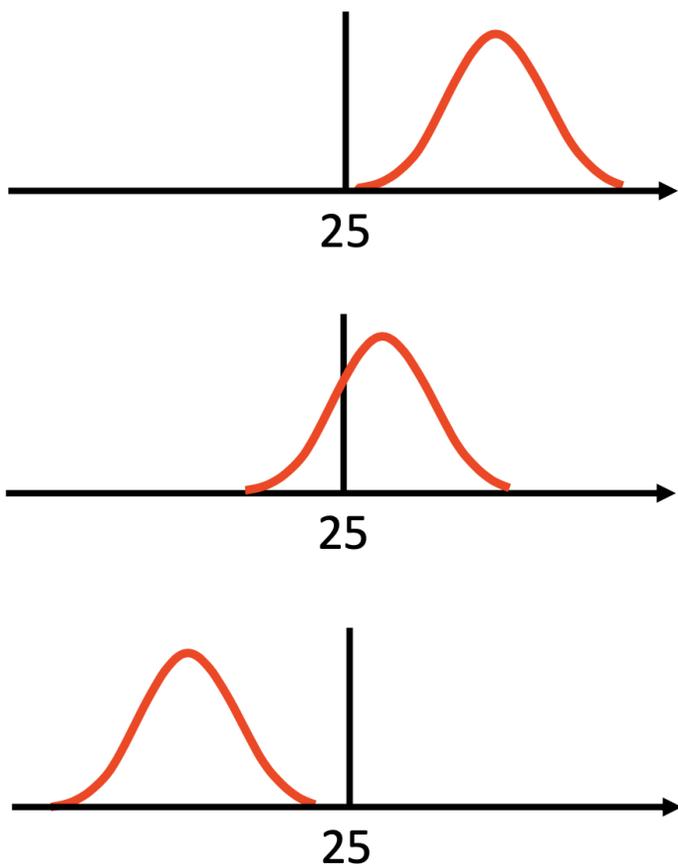
- Un sistema di previsione è affidabile se:
  - statisticamente, le probabilità previste per un evento concordano con le frequenze osservate
  - prendendo tutti i casi in cui l'evento è previsto con una probabilità del  $x\%$ , quell'evento dovrebbe verificarsi esattamente nel  $x\%$  di questi casi; né di più, né di meno.
- Un **diagramma di affidabilità** ci dice se un sistema di previsione è affidabile (non distorto) oppure se invece tende a sovrastimare (troppo sicuro di sé) o sottostimare (troppo insicuro) la sua capacità di previsione.
- Un diagramma di affidabilità fornisce anche informazioni sulla risoluzione (e precisione) di un sistema di previsione.



- Un sistema di previsione è affidabile se:
  - statisticamente, le probabilità previste per un evento concordano con le frequenze osservate
  - prendendo tutti i casi in cui l'evento è previsto con una probabilità del  $x\%$ , quell'evento dovrebbe verificarsi esattamente nel  $x\%$  di questi casi; né di più, né di meno.
- Un **diagramma di affidabilità** ci dice se un sistema di previsione è affidabile (non distorto) oppure se invece tende a sovrastimare (troppo sicuro di sé) o sottostimare (troppo insicuro) la sua capacità di previsione.
- Un diagramma di affidabilità fornisce anche informazioni sulla risoluzione (e precisione) di un sistema di previsione.

# Affidabilità: come si costruisce un *reliability diagram*?

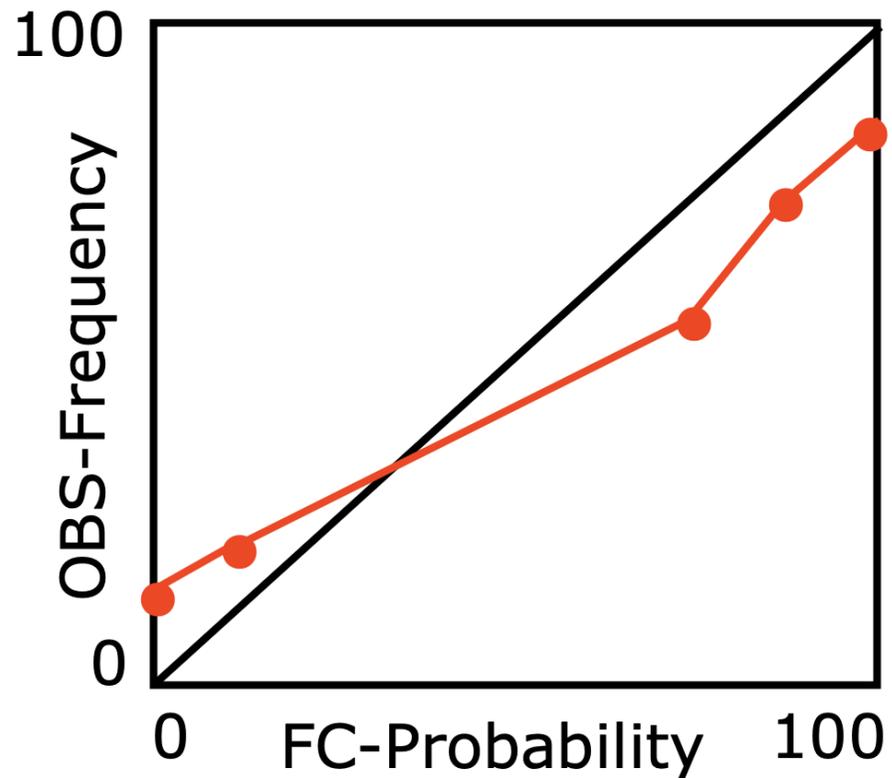
Prendiamo un campione di previsioni probabilistiche: ad esempio, 66000 previsioni  
 Quante volte è stata prevista l'occorrenza **dell'evento** ( $T > 25$ ) con probabilità  $X$ ?



FC Prob.	# FC	"perfect FC" OBS-Freq.	"real" OBS-Freq.
100%	8000	8000 (100%)	7200 (90%)
90%	5000	4500 ( 90%)	4000 (80%)
80%	4500	3600 ( 80%)	3000 (66%)
....	....	....	....
....	....	....	....
....	....	....	....
10%	5500	550 ( 10%)	800 (15%)
0%	7000	0 ( 0%)	700 (10%)

# Affidabilità: come si costruisce un *reliability diagram*?

Prendiamo un campione di previsioni probabilistiche: ad esempio, 66000 previsioni  
 Quante volte è stata prevista l'occorrenza **dell'evento** ( $T > 25$ ) con probabilità  $X$ ?

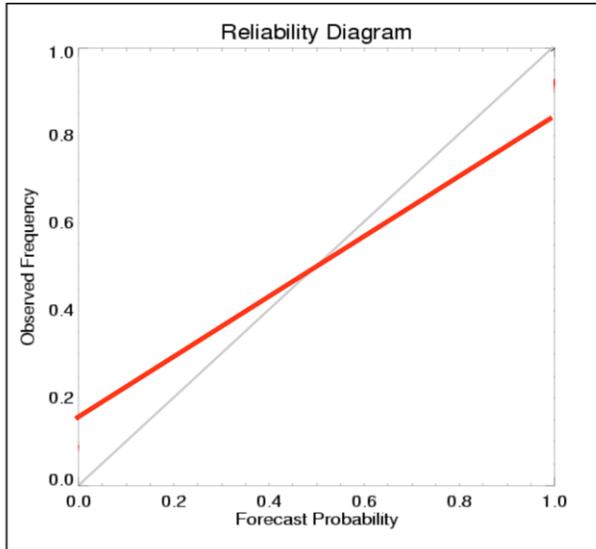


FC Prob.	# FC	"perfect FC" OBS-Freq.	"real" OBS-Freq.
100%	8000	8000 (100%)	7200 (90%)
90%	5000	4500 ( 90%)	4000 (80%)
80%	4500	3600 ( 80%)	3000 (66%)
....	....	....	....
....	....	....	....
....	....	....	....
10%	5500	550 ( 10%)	800 (15%)
0%	7000	0 ( 0%)	700 (10%)

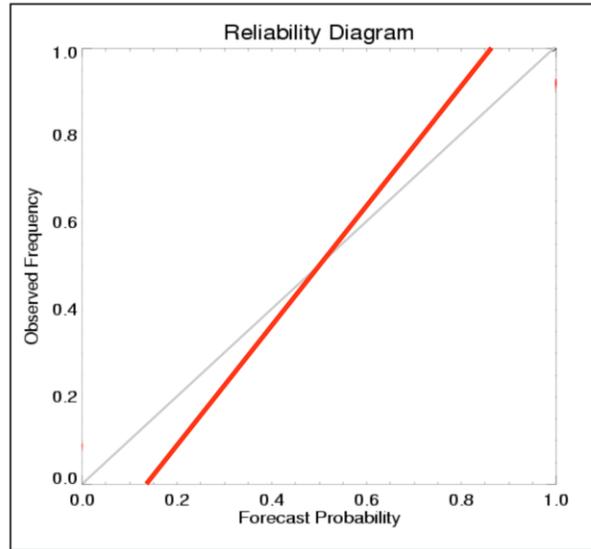
# Affidabilità – sistemi troppo o troppo poco sicuri di sé



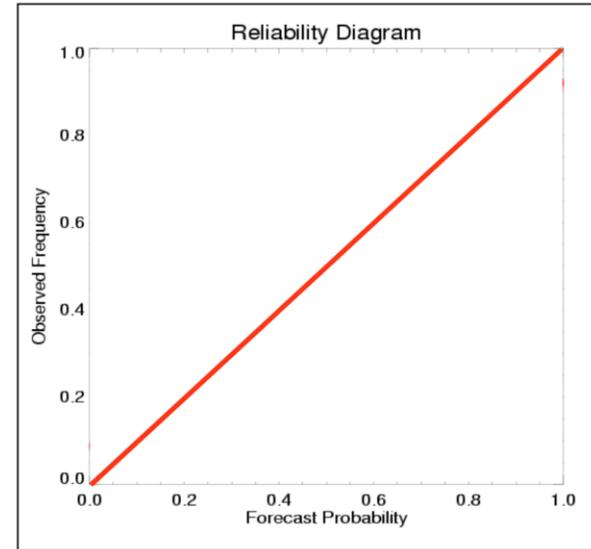
over-confident model



under-confident model



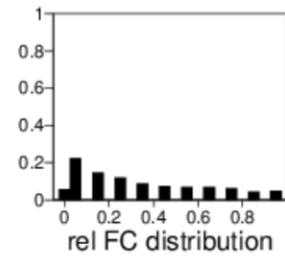
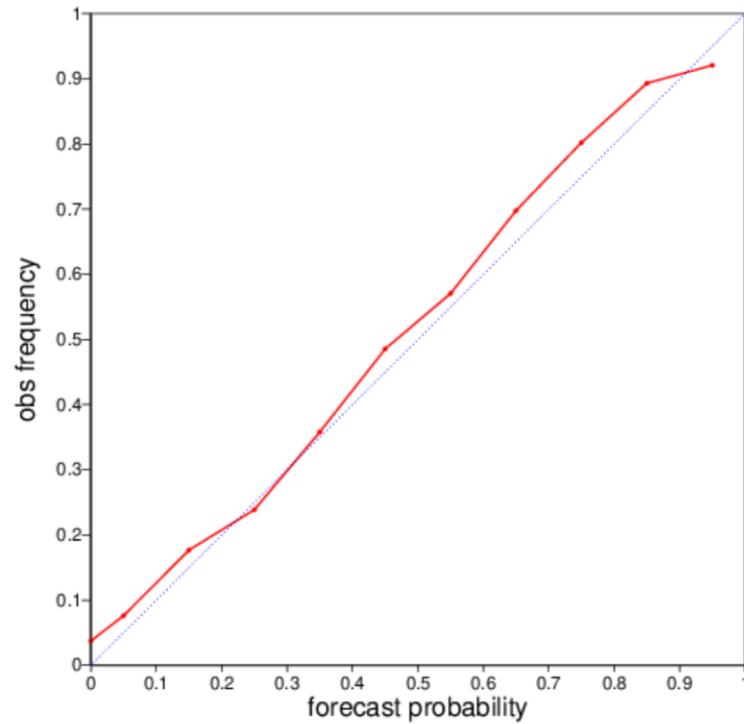
perfect model



# Affidabilità – sistemi troppo o troppo poco sicuri di sé

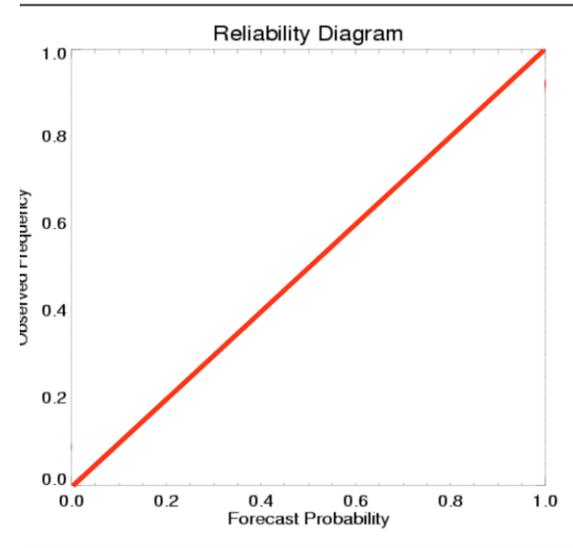
## Reliability

ECMWF Monthly Forecast, Precip in upper tercile , Area:Europe  
 Day 5-11 20210608-20230608  
 BrSc = 0.148 LCBrsSc= 0.36 Uncertainty= 0.231



B(S)S\_RSL= 0.083 ( 0.36)  
 B(S)S\_REL= 0.001 ( 1.00)

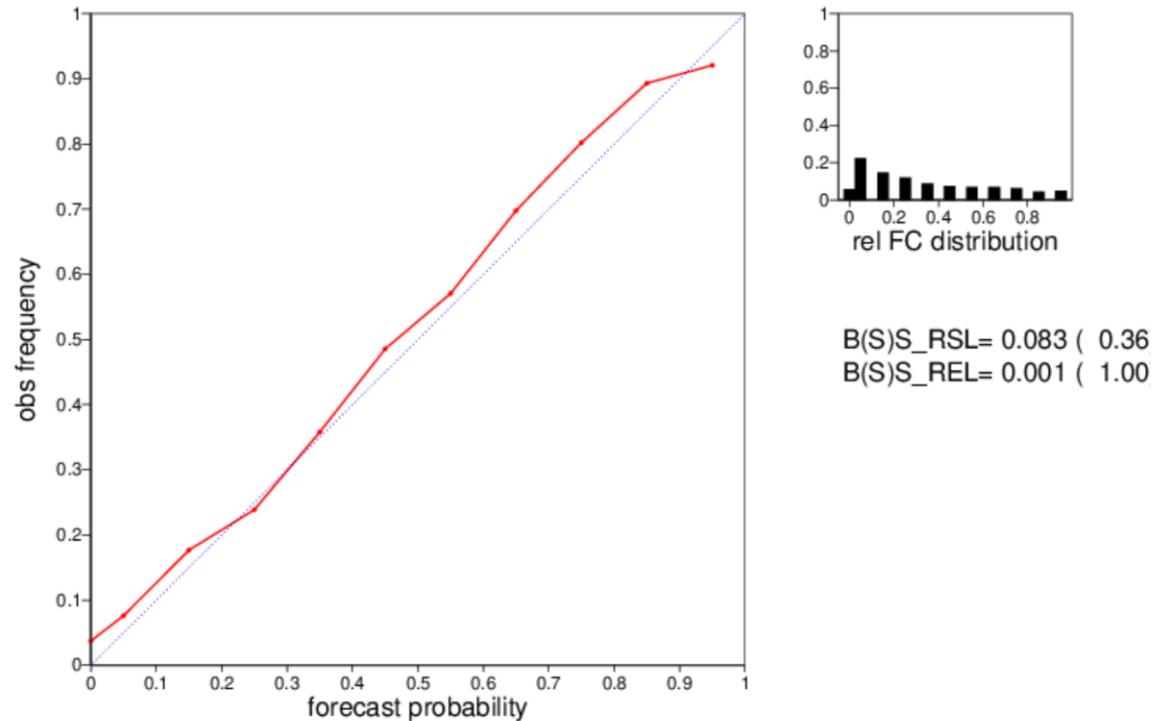
perfect model



# Affidabilità – sistemi troppo o troppo poco sicuri di sé

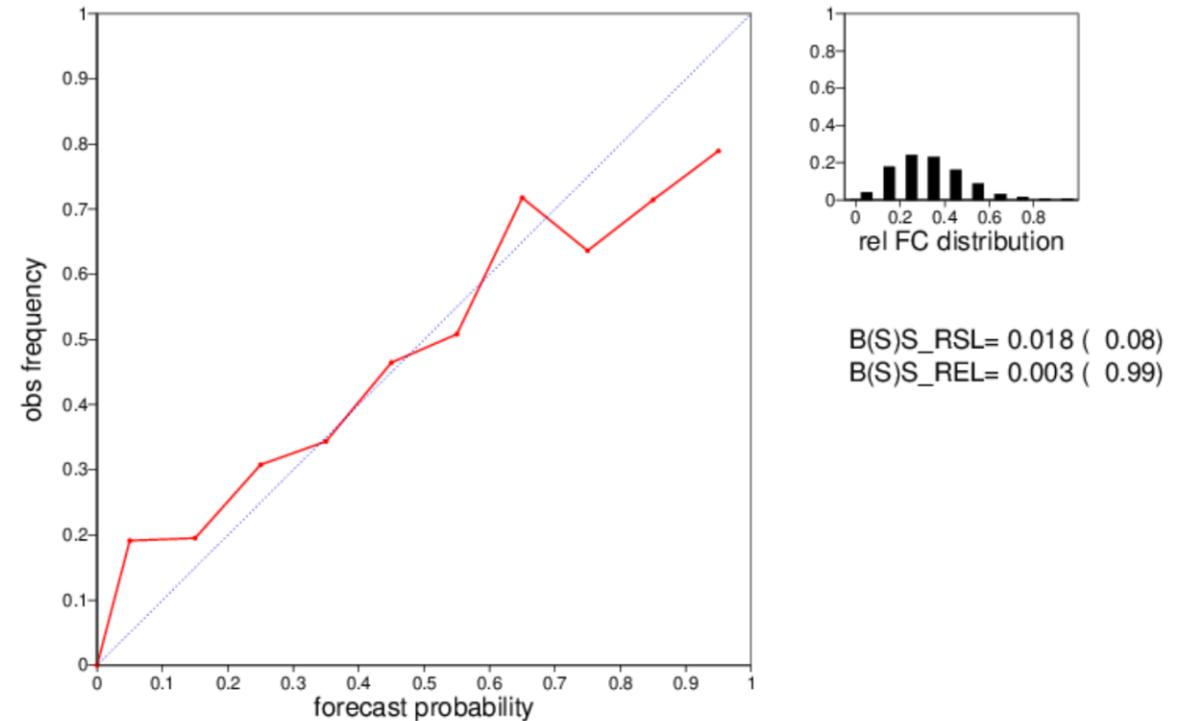
## Reliability

ECMWF Monthly Forecast, Precip in upper tercile , Area:Europe  
 Day 5-11 20210608-20230608  
 BrSc = 0.148 LCB rSkSc= 0.36 Uncertainty= 0.231



## Reliability

ECMWF Monthly Forecast, Precip in upper tercile , Area:Europe  
 Day 12-18 20210608-20230608  
 BrSc = 0.214 LCB rSkSc= 0.07 Uncertainty= 0.230



# Uso delle previsioni di insieme



Se **D** è il danno stimato nel caso di un evento estremo **E**.

E il costo della misura precauzionale è **C**  
*Strategia decisionale con una sola previsione deterministica:*

Si intraprende la misura precauzionale se **l'evento E** viene previsto

*Strategia decisionale con un ensemble di previsioni :*

Si intraprende la misura precauzionale se il **rischio dell'evento E è maggiore del costo C:**  
 **$pD > C$**

# Uso delle previsioni di insieme



Le previsioni probabilistiche in teoria permetterebbero di concepire strategie decisionali basate sulla probabilità di occorrenza degli eventi previsti. Ovvero la decisione di prendere (o non prendere) misure precauzionali dipende dal costo delle misure precauzionali comparato con il costo del danno causato dall'evento moltiplicato per la probabilità che ha l'evento in questione di accadere.

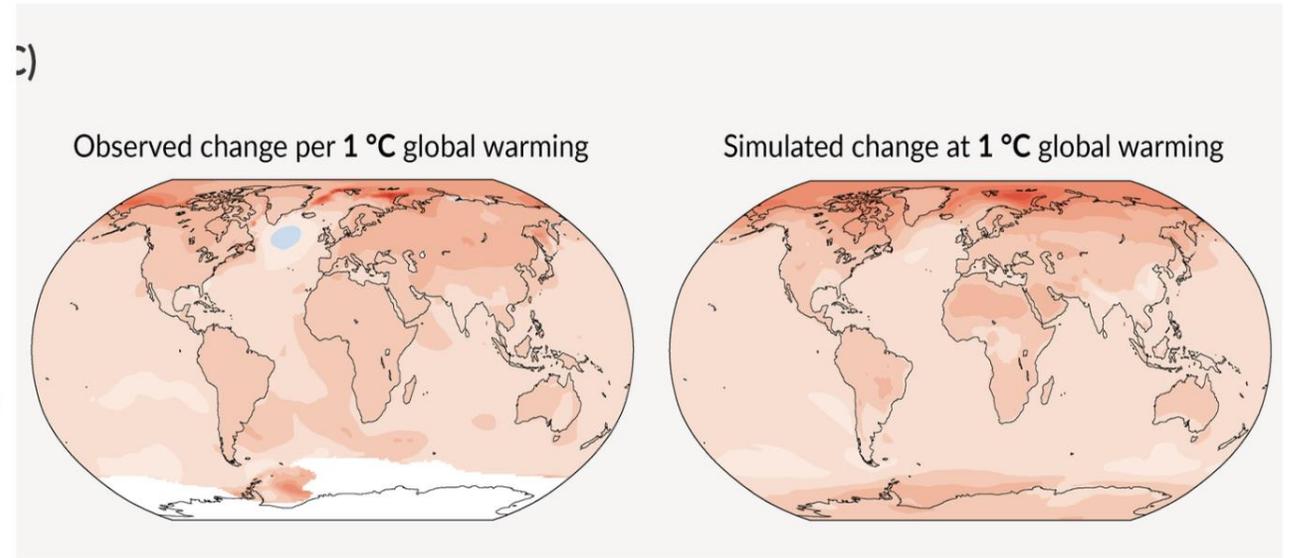
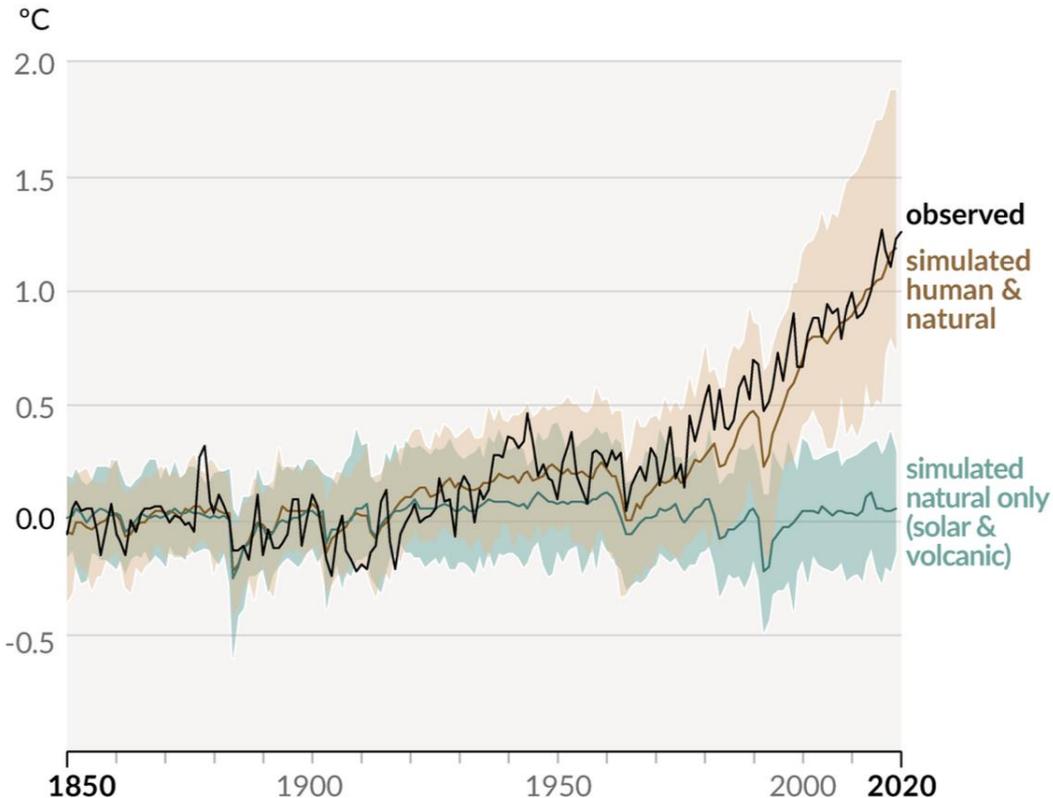
# Verifica delle previsioni di insieme

Per poter applicare in maniera sistematica una strategia decisionale di questo tipo è necessario **verificare sistematicamente l'affidabilità di tali previsioni** per diversi tipi di eventi e per diverse scale temporali e verificare **come si ripercuotono le "imprecisioni"** nelle previsioni meteorologiche sugli **impatti in diversi settori.**

# Ricostruzioni climatiche di insieme per la stima dell'incertezza

## L'influenza umana ha riscaldato il clima a un ritmo che non ha precedenti negli ultimi 2000 anni (almeno).

b) Change in global surface temperature (annual average) as **observed** and simulated using **human & natural** and **only natural** factors (both 1850-2020)



**Le emissioni future causeranno un ulteriore riscaldamento. Il riscaldamento totale è per la maggior parte dovuto alle emissioni di CO2 passate e future**

a) Global surface temperature change relative to 1850-1900

