

# Il sistema climatico

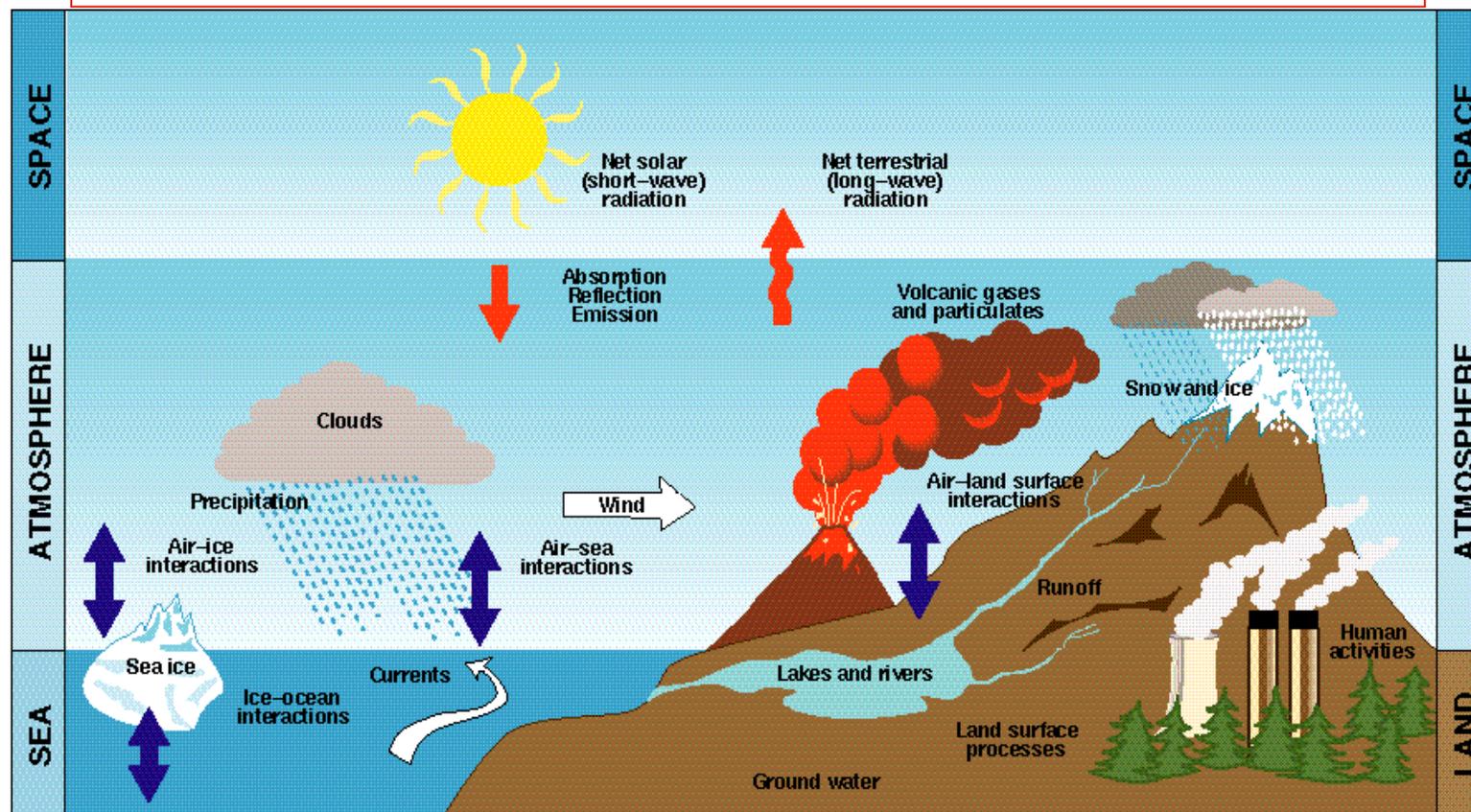
## Ringraziamenti:

- Stefano Tibaldi (dispense Cà Foscari A.A. 2019-20)
- AA.VV. (UniTo) - Lessico e Nuvole: le parole del cambiamento climatico – 2020
- C. Cassardo et al. - Temporalis e tornado – cap. 1, 2021 – Ed. AlphaTest

# Il sistema climatico: è complesso

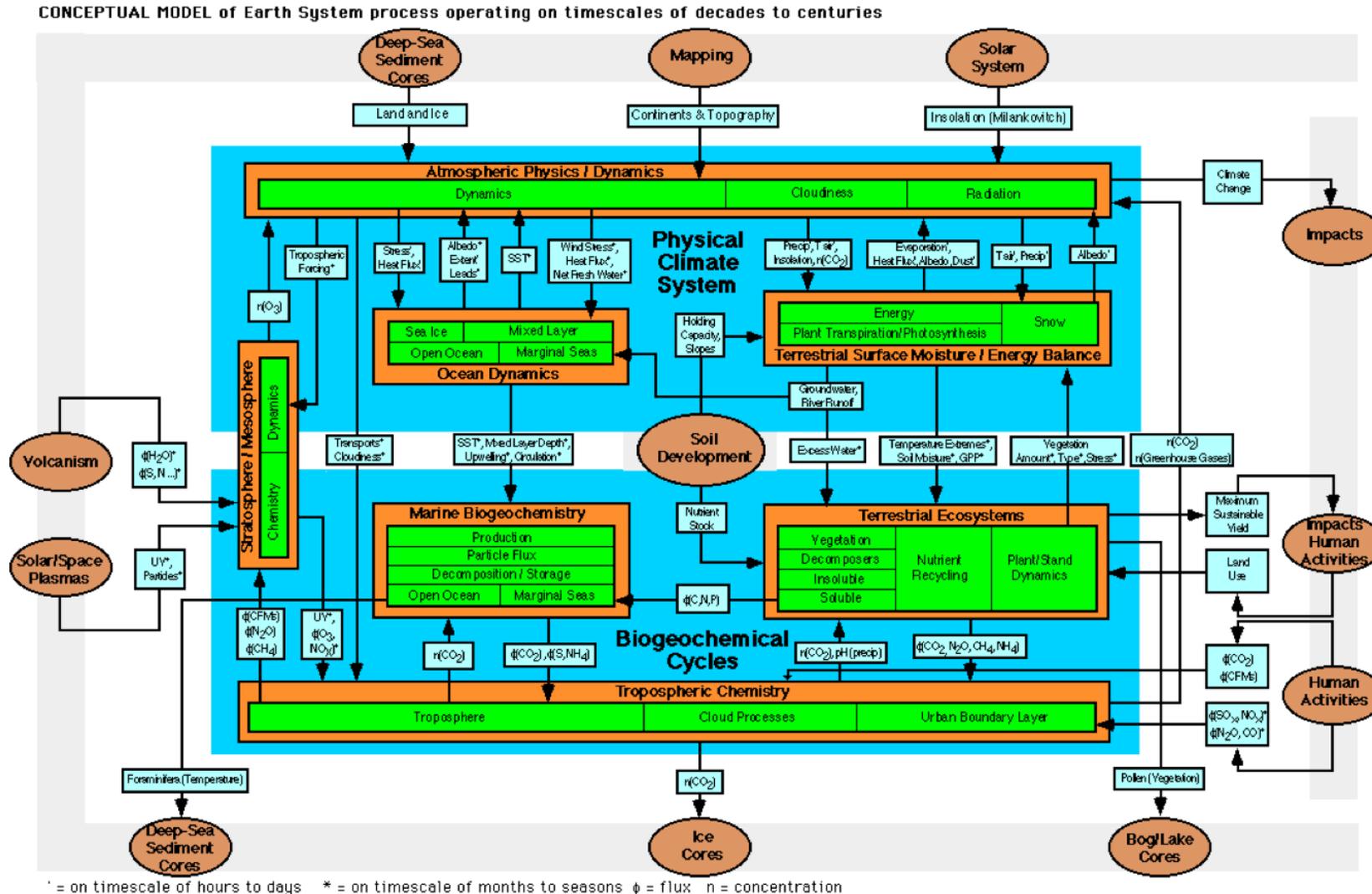


**Il Sole è l'unica importante fonte di energia (esterna)**



# Il sistema climatico

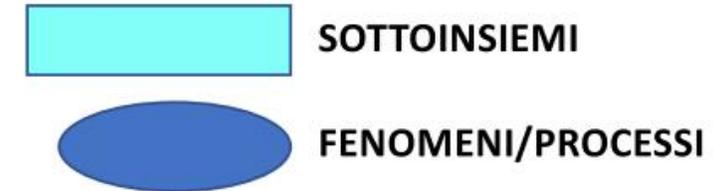
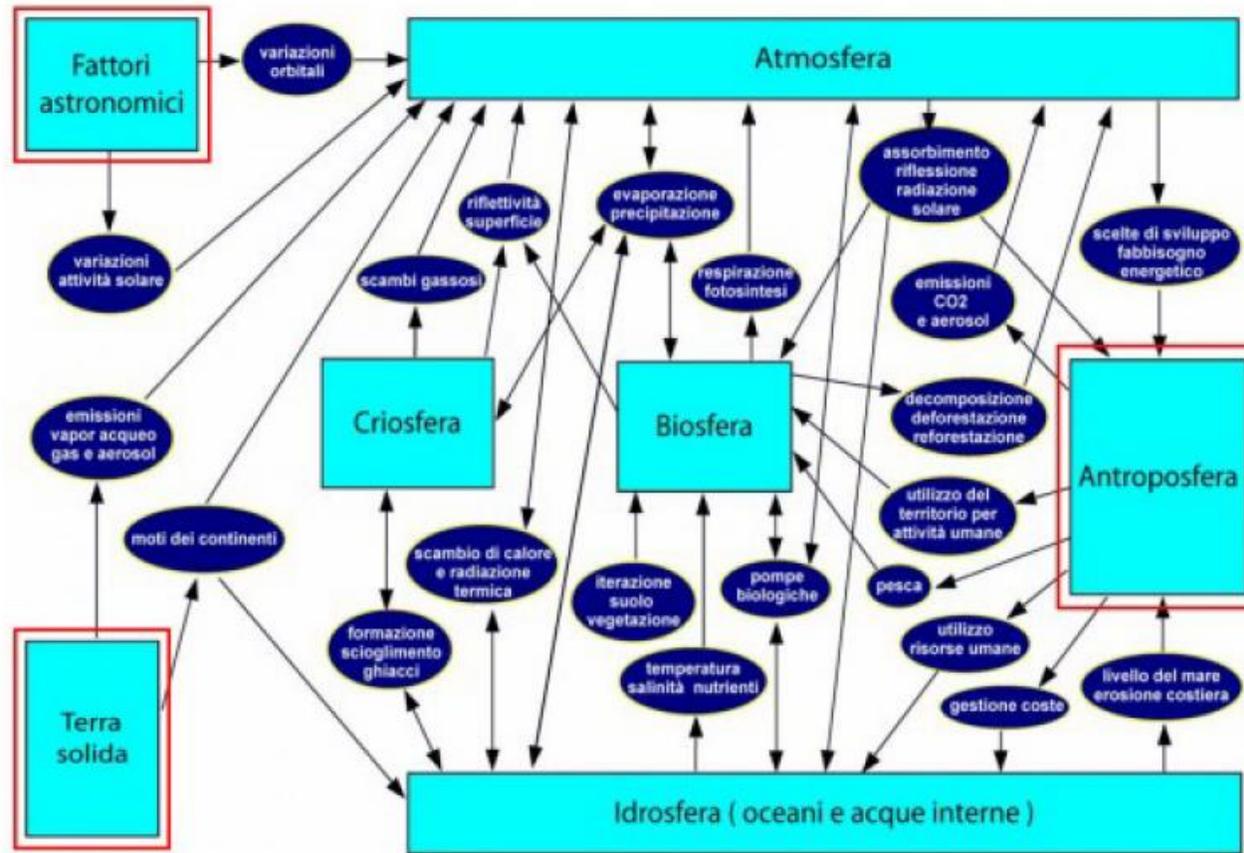
Possibili interazioni tra sottosistemi climatici: parti e processi esterni



# Definizione del sistema climatico

- GARP (Global Atmosphere Research Programme, WMO) 1975:
  - ❑ “composto dall'atmosfera, dall'idrosfera, dalla criosfera, dalla superficie terrestre e dalla biosfera”
  
- FCCC (Framework Convention on Climate Change, UN) 1992:
  - ❑ “la totalità dell'atmosfera, dell'idrosfera, della biosfera e della geosfera e le loro interazioni”
  
- IPCC AR5 (2013):
  - ❑ "il sistema dinamico **altamente complesso** è costituito da cinque componenti principali: l'atmosfera, l'idrosfera, la criosfera, la litosfera e la biosfera, e le interazioni tra loro"

# Il sistema climatico



Ogni cambiamento nei sottosistemi va ad influire sugli altri sottosistemi tramite uno o più processi ed eventualmente tornare al primo sottosistema. **Non esiste una causalità lineare ma possono crearsi catene circolari di causalità** → **feedback.**

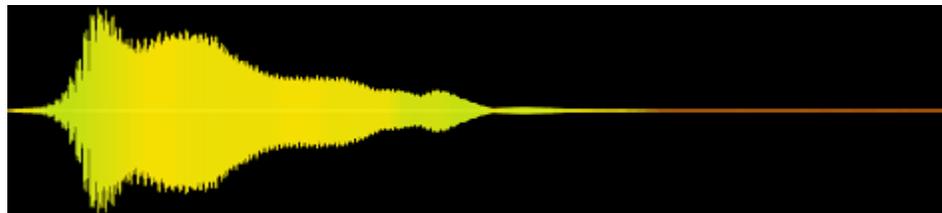
Fattori astronomici e Terra solida forzano ma non sono influenzati dagli altri sottosistemi

# Clima = sistema complesso

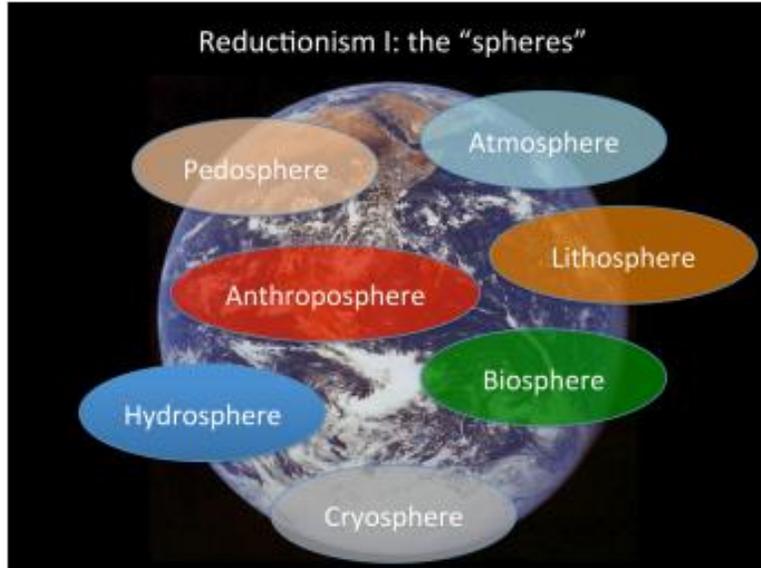
- **La sensibilità alle condizioni iniziali**, che può in certi casi portare a una imprevedibilità dello stato futuro del sistema (pensiamo all'atmosfera e alla previsione meteorologica)
- **Non vale il principio di sovrapposizione** (l'effetto finale di due cause non è la somma delle cause di ciascun effetto preso singolarmente)
- La presenza di **meccanismi di retroazione** (catene non lineari causa-effetto)

# Feedback (retroazioni)

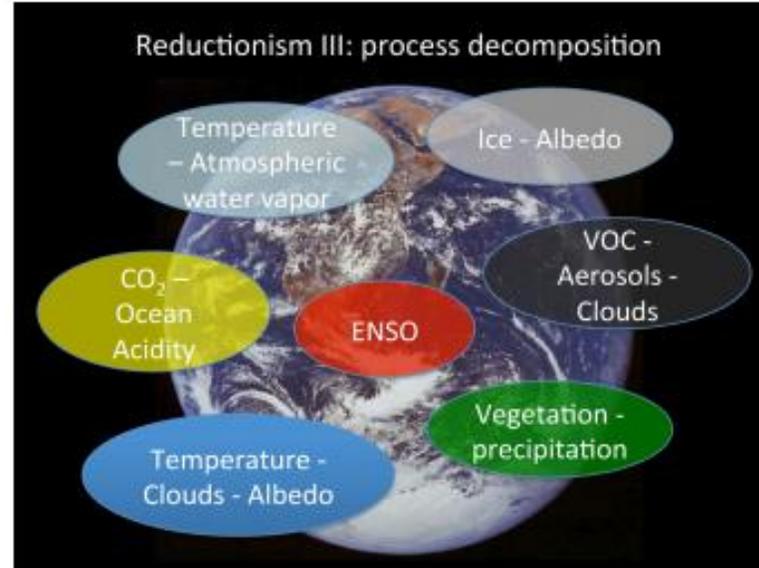
- Il clima terrestre contiene molti cicli di feedback. I circuiti di feedback possono essere descritti come un sistema simile a un circuito, in cui un disturbo iniziale genera un'uscita nel sistema, che a sua volta influenza il disturbo iniziale alterando l'uscita stessa
- In un ciclo di **feedback positivo**, l'uscita del sistema amplifica gli effetti del disturbo iniziale
- In un ciclo di **feedback negativo**, l'uscita del sistema limita gli effetti del disturbo iniziale
- Positivo (negativo) qui si riferisce all'amplificazione (attenuazione) del cambiamento, e non sono un giudizio di desiderabilità
- In generale, i feedback positivi riscaldano la terra e quelli negativi la raffreddano
- Un esempio di feedback è quello **microfono-altoparlante**, ed è positivo
- Avvicinando un microfono all'altoparlante, il suono dagli altoparlanti viene captato dal microfono e viene amplificato e inviato nuovamente agli altoparlanti. Si innesca un ciclo continuo che produce il tipico ululato/rimbombo



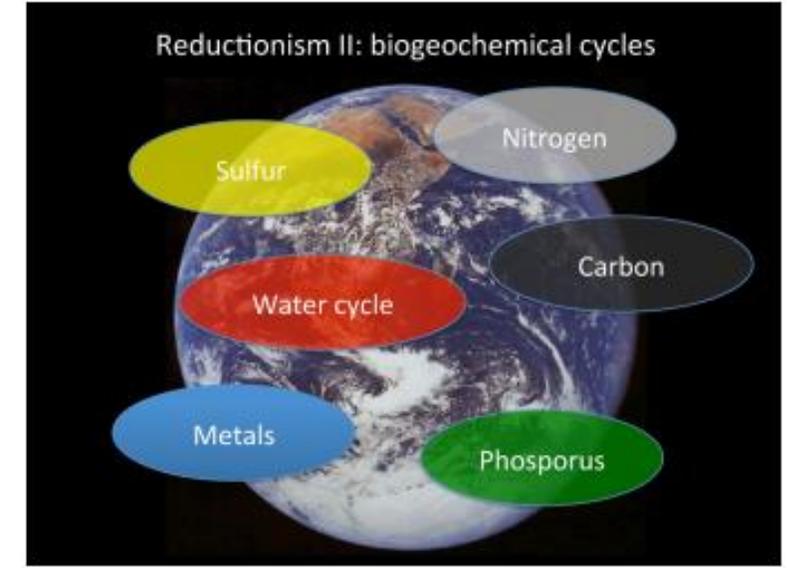
# Un approccio per lo studio del clima: il riduzionismo



Separazione in sottosfere (modelli)



Analisi dei processi di feedback

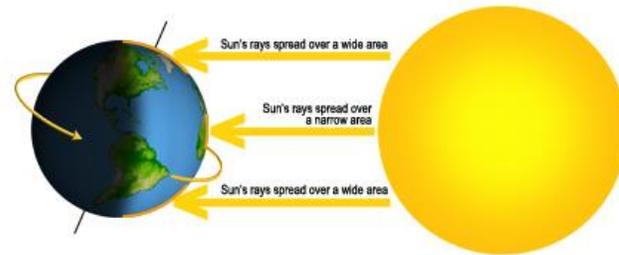


Trasformazione di cicli biogeochimici

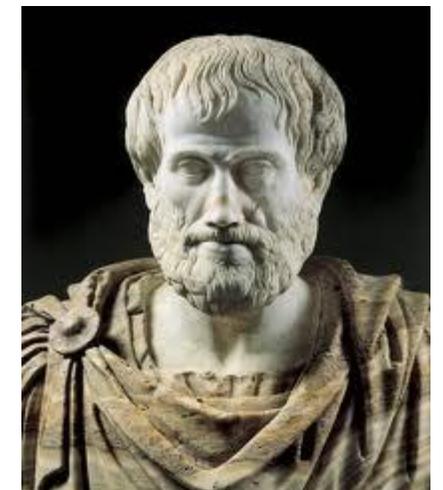
- Considerare ogni sottosistema separatamente e descriverlo (tipico dei modelli)
- Problema: si perdono le interazioni tra i sottosistemi

# Clima e meteorologia: etimologia

- **κλίμα** (clima): inclinazione, tendenza
  - ❑ da cui il concetto di **clima** come legato all'inclinazione (dei raggi solari con la latitudine)



- **μετέωρα** (metèora): cose che sono sopra di noi (da **μετά** + **αείρω**)
- **λόγος** (lògos): discussione, discorso
  - ❑ da cui **meteorologia** (parola coniata da Aristotele), **meteore**, **aria**, **aeroplano**, ...
- **σύν** (sun): insieme
- **όψις** (òpsis): vista
  - ❑ da cui **sinottica** (vista d'insieme)
- **ατμός** [atmós] = aria, pressione, vapore
- **σφαίρα** [sfaira] = sfera
  - ❑ da cui **atmosfera**



# Meteorologia, NON meteREOlogia



μετέωρα (metèora):



È scritto errato l'1,4 % delle volte  
Per confronto, aereoalano l'1,1 %  
delle volte...

Un meteorologo non è meteREOlogo perché non è REO (=colpevole) di nulla, se non di sbagliare ogni tanto le previsioni...  
(A. Corigliano)

# Clima e meteorologia

## ➤ WEATHER

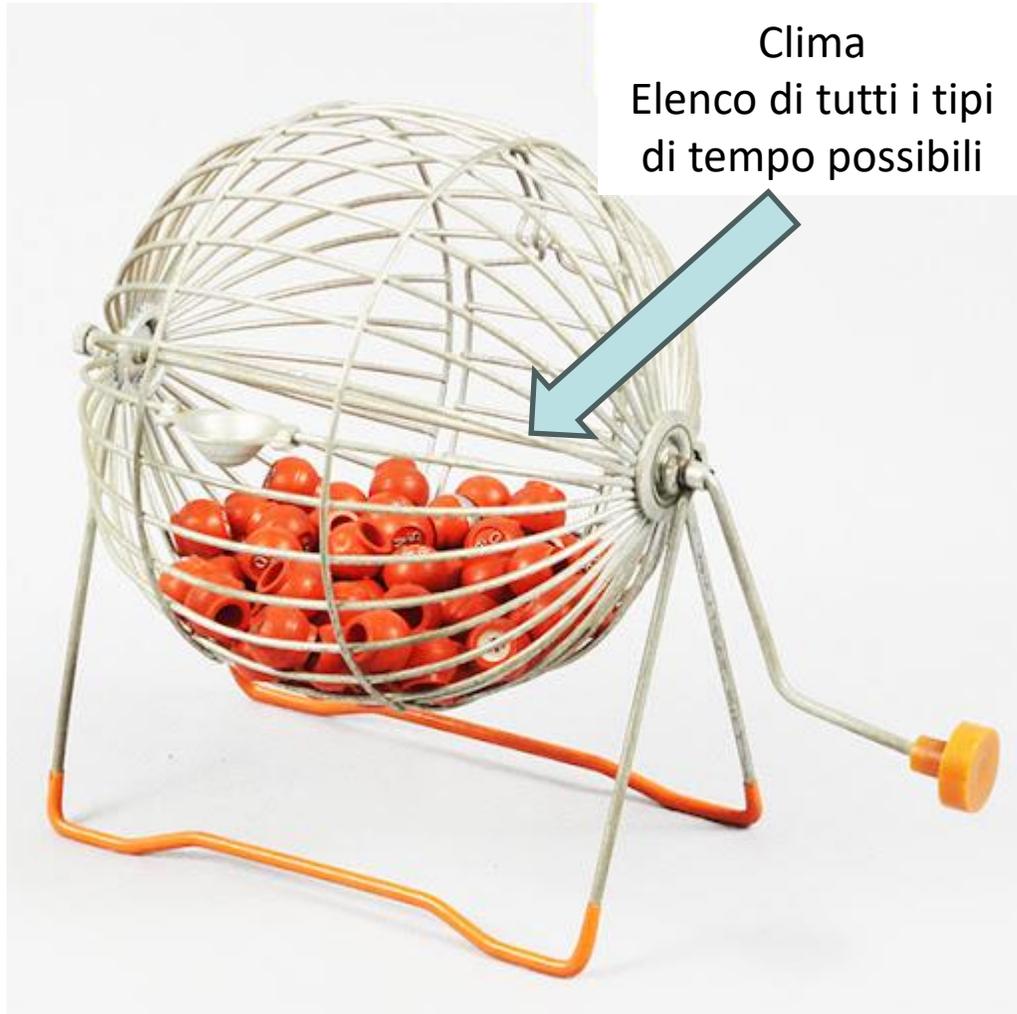
## ➤ TEMPO METEOROLOGICO

È definito da condizioni istantanee (o medie su «brevi» periodi, da minuti a anni) delle variabili atmosferiche come temperatura, pressione, umidità, nuvolosità, precipitazioni, vento, ecc., in un dato luogo

## ➤ CLIMATE / CLIMA

Analisi statistica, in termini di valori medi e variabilità, delle condizioni meteorologiche medie di una data regione e sulla base dei dati disponibili per un periodo di tempo sufficientemente lungo (almeno 30 anni, secondo la WMO – Organizzazione Meteorologica Mondiale)

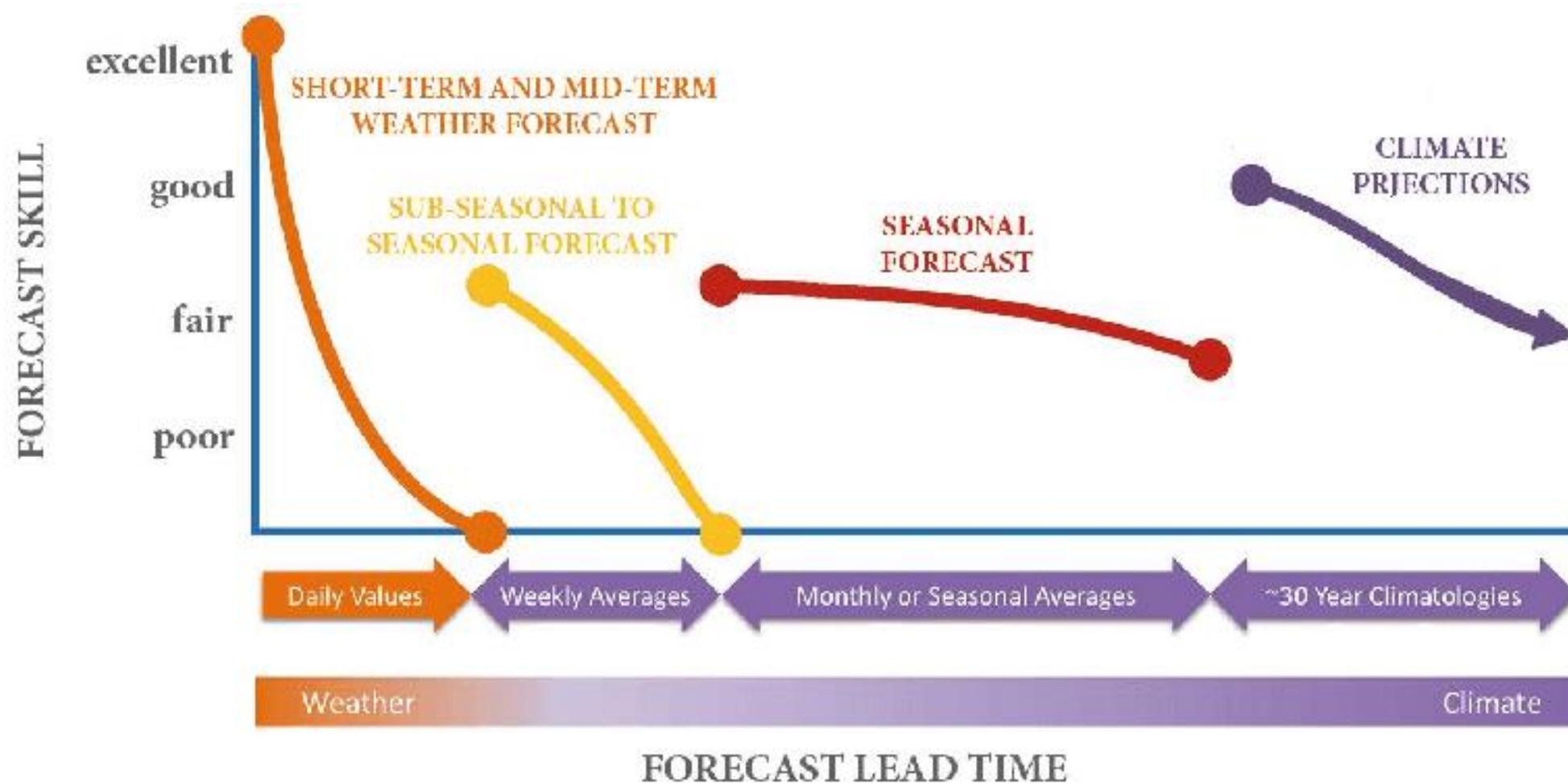
# «Weather is what you get, climate is what you expect»



Tempo  
Uni dei tipi di  
tempo possibili



# Tra tempo e clima c'è il «territorio incognito» delle previsioni stagionali



Scala temporale con la progressione delle skill dalle previsioni meteorologiche e stagionali, e le proiezioni climatiche. Fonte: DOI: 10.4236/acs.2021.111010

# Tempo ...

 **Stazione Meteorologica di Fisica dell'Atmosfera**  
Dipartimento di Fisica - Università degli Studi di Torino  
Via Pietro Giuria, 1 - Torino  
( Lat: 45°03'07,15" Nord , Long: 007°40'53,30" Est , Alt: 254 m s.l.m. )

meteo dati radioattività modello WRF link contatti

### dati principali

Dati rilevati alle ore **20:23** ora solare (**21:23** ora legale) del giorno **20/04/2020**

grandezza	valore	estremi giornalieri	
		minima di oggi	massima di oggi
temperatura dell'aria	11.9 °C	11.9 °C (ore 20:18) <sup>[1]</sup>	14.2 °C (ore 03:21) <sup>[1]</sup>
umidità relativa	93 %	85 % (ore 00:19) <sup>[1]</sup>	93 % (ore 18:42) <sup>[1]</sup>
velocità del vento	3.6 m/s (12.9 km/h)	massima di oggi 7.9 m/s (28.5 km/h) (ore 17:11) <sup>[1]</sup>	
pressione atmosferica	984.1 hPa	981.1 hPa (ore 05:24) <sup>[1]</sup>	984.1 hPa (ore 20:23) <sup>[1]</sup>
pressione atmosferica ridotta al livello del mare	1014.3 hPa	1011.0 hPa (ore 05:24) <sup>[1]</sup>	1014.3 hPa (ore 20:23) <sup>[1]</sup>
pioggia cumulata	32.6 mm		
rateo orario della pioggia	0.0 mm/h	massima di oggi 6.0 mm/h (ore 07:27) <sup>[1]</sup>	

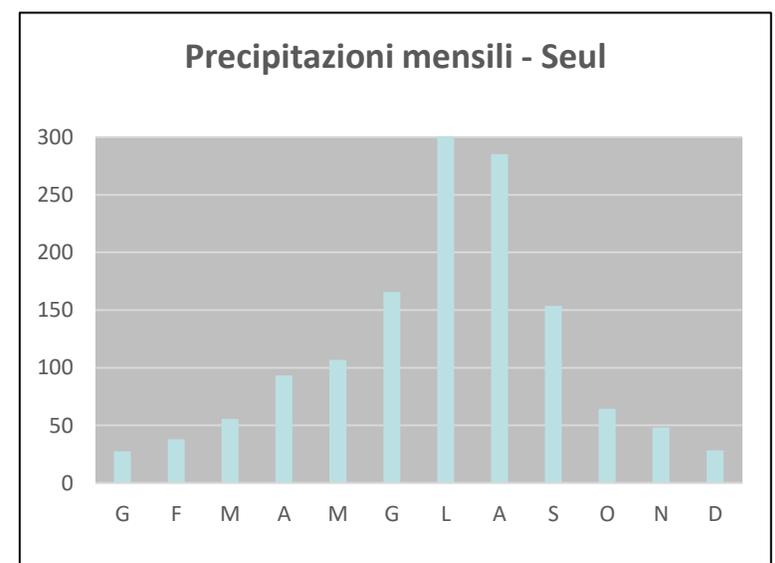
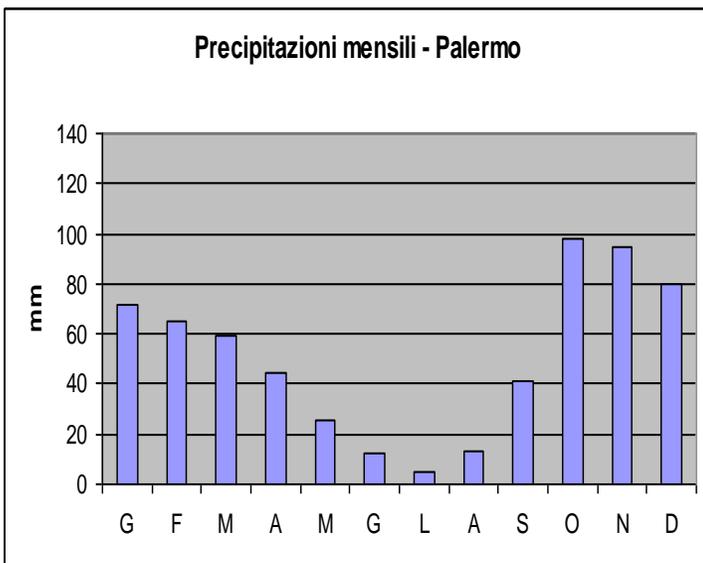
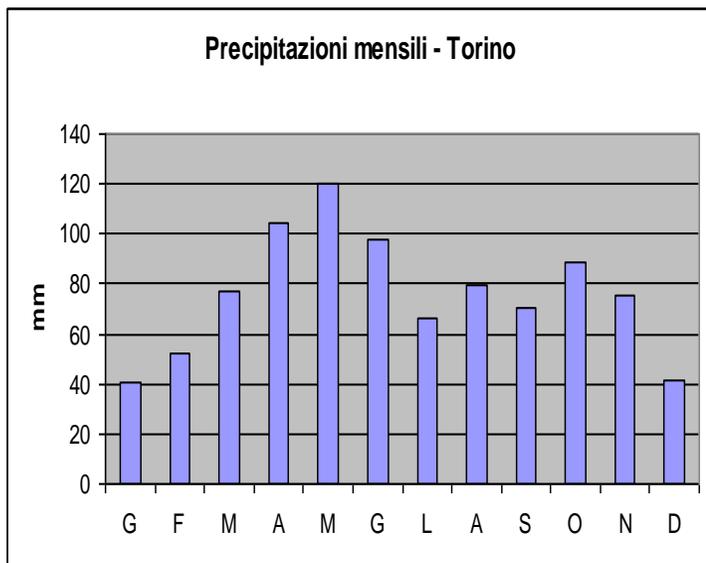
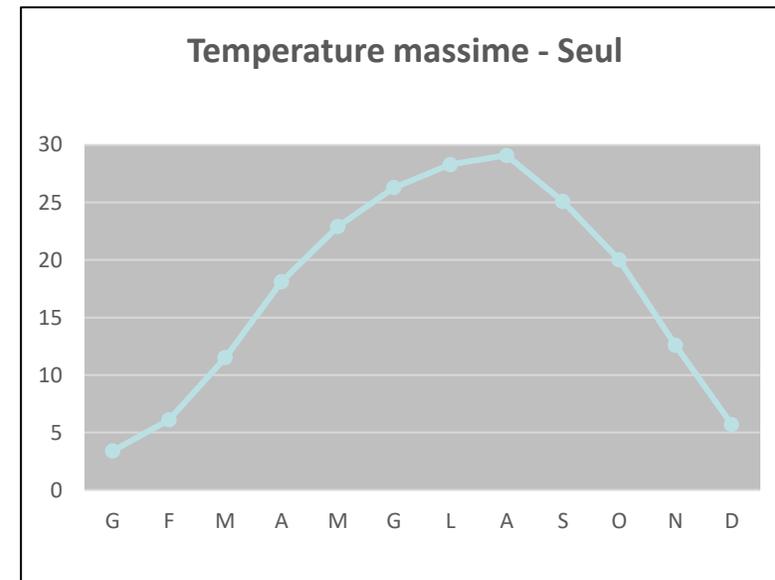
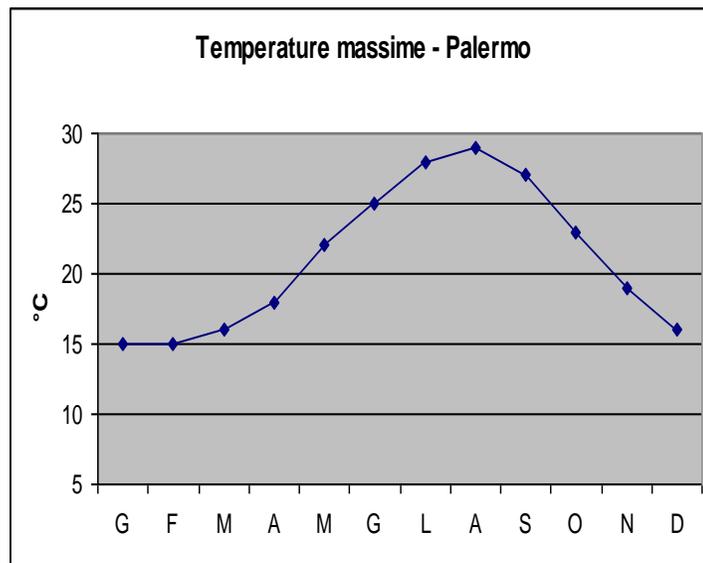
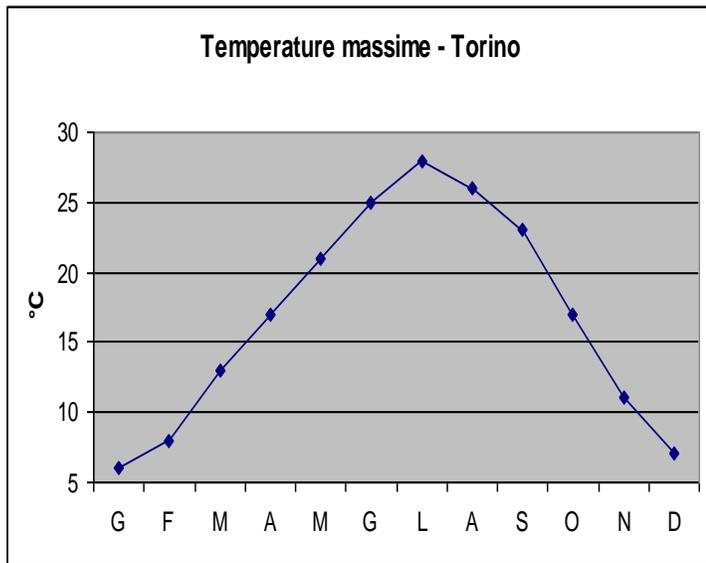
<sup>[1]</sup> valori calcolati, a partire dai dati mediati ogni minuto, dalle ore 00:00 alle 20:23 di oggi (ore solari)  
**I dati riportati sono quelli forniti dagli strumenti e non validati.**

questa pagina si autoricarica ogni 60 secondi



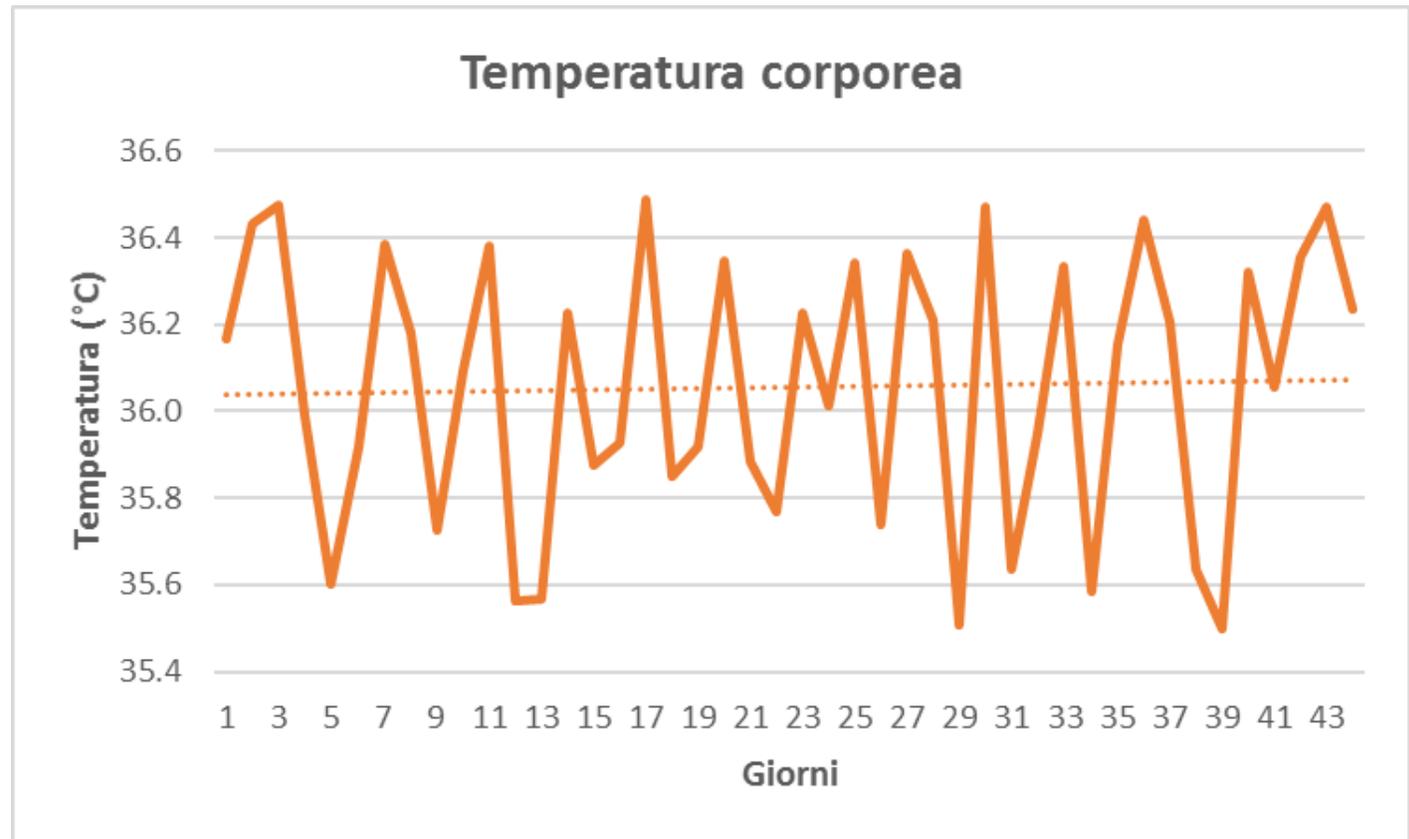
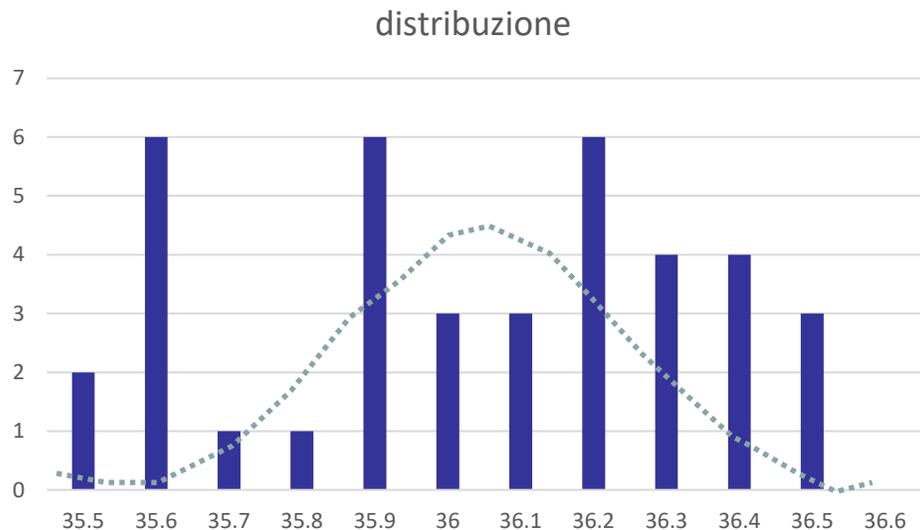


# ... e clima



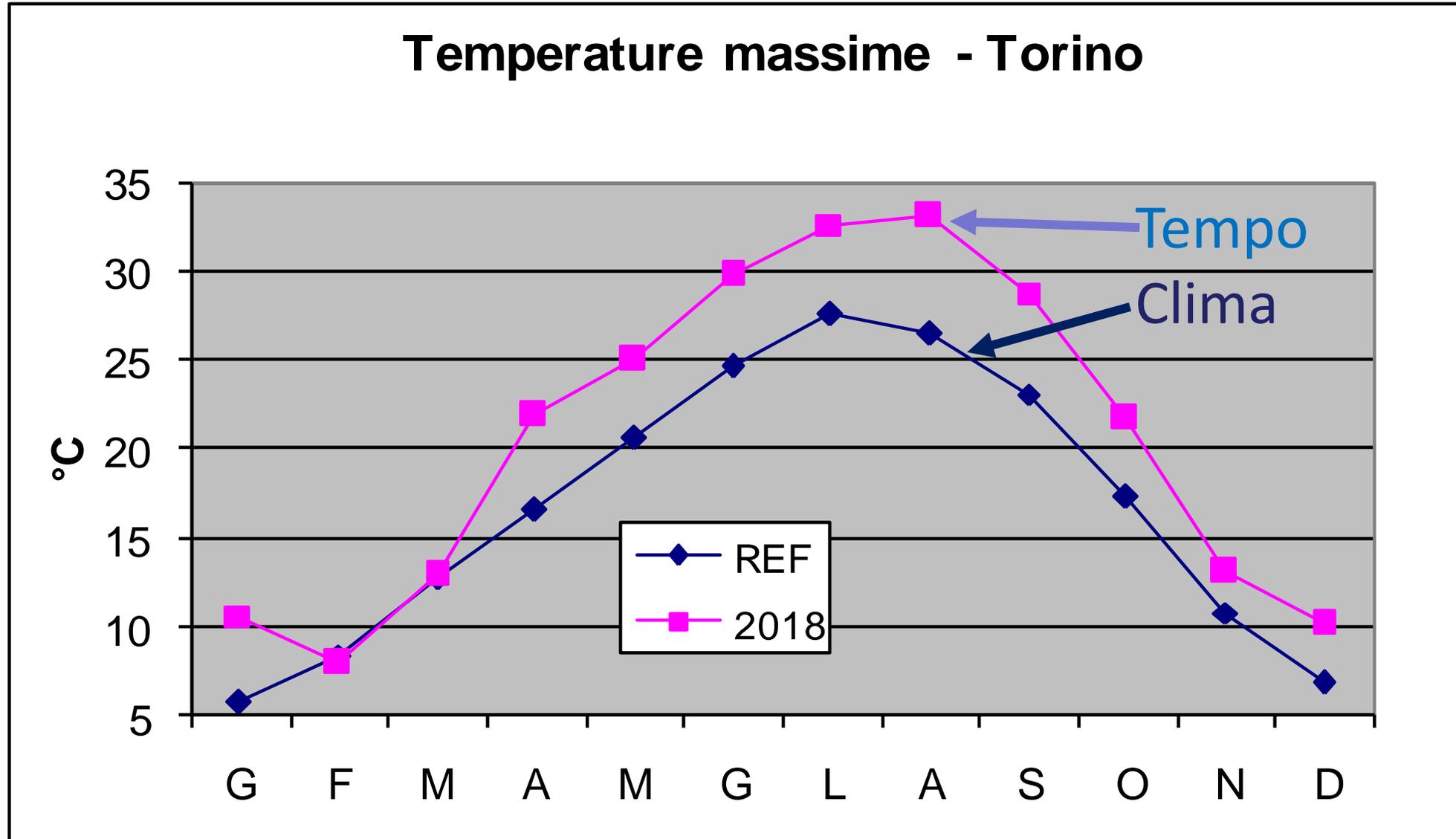
# Tempo e clima nelle misure di temperatura corporea

- **Tempo:** la misura del singolo momento (o giorno)
  - ❑ Le temperature oscillano tra una minima di 35,5 °C e una massima di 36,5 °C
- **Clima:** il trend delle temperature
  - ❑ Il trend è lievemente crescente ma al di sotto dell'errore: 0.00 °C/giorno

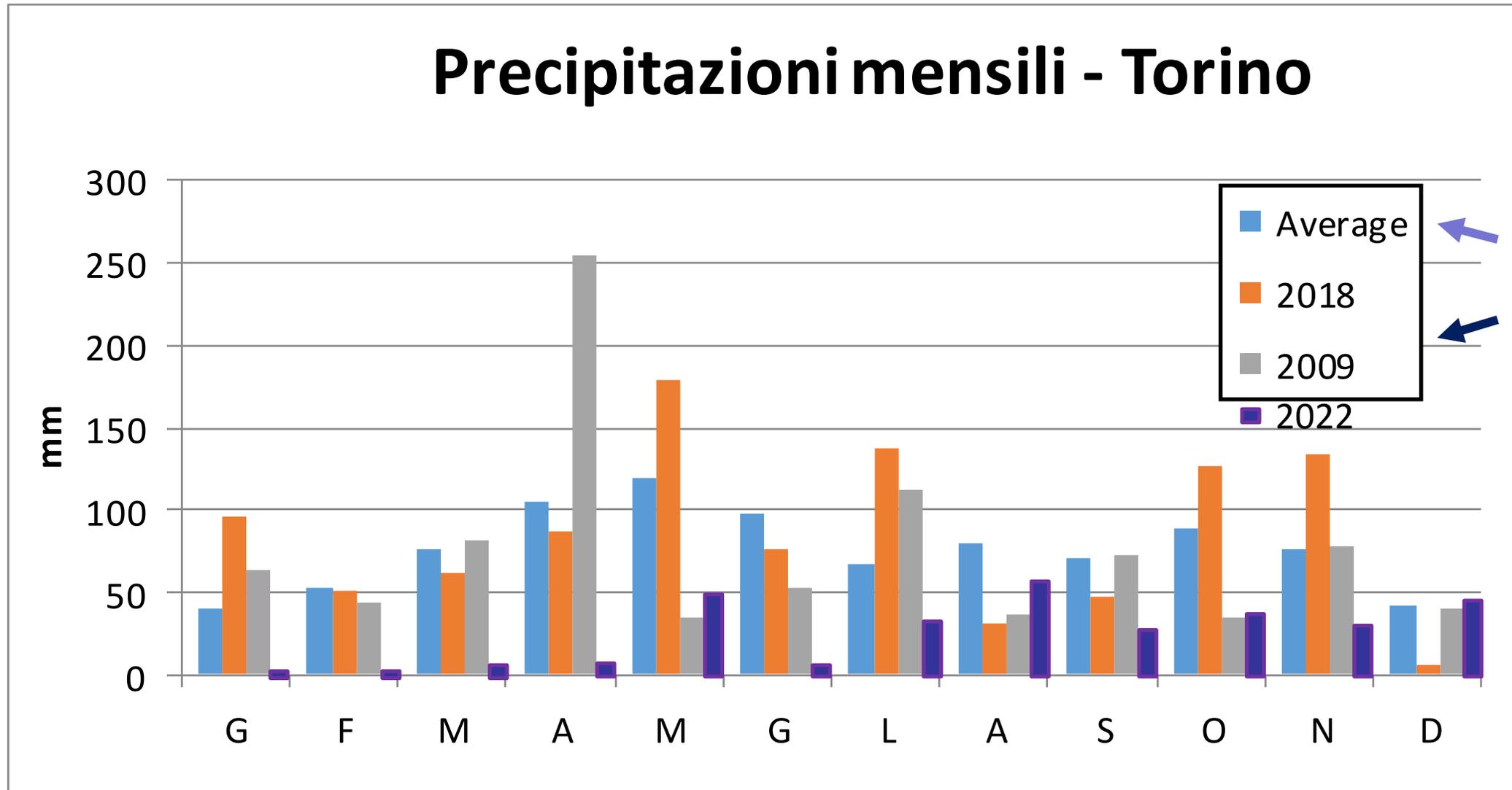


- **Distribuzione dei valori**
  - Si allontana da una distribuzione normale perchè ci sono troppo pochi dati

# Tempo e clima



# Tempo e clima



Clima  
Tempo

# Climatologia: Torino



1788 - 5/1802  
Accademia delle Scienze - biblioteca



6/1802 - 6/1865  
Accademia delle Scienze - Specola



7-11 / 1865  
Castello del Valentino  
Club Alpino Italiano



12/1865 - 1918  
Palazzo Madama



3/1915-12/1958  
Istituzione di Fisica  
Posizione della stazione  
"storica"



1919 - 1953  
Moncalieri -Real Collegio Carlo Alberto



1954 - oggi  
Caselle Aeroporto



1988 - oggi  
Istituzione di Fisica  
La stazione attuale

# Climatologia: temperature a Torino

## Il clima di Torino in cifre

Medie (calcoli eseguiti sul trentennio di riferimento 1961-90)

- Temperatura media annua: 13,1 °C
- Precipitazioni medie annue (pioggia e neve fusa): 833 mm
  - Numero medio di giorni piovosi: 76
  - Mese più piovoso: maggio, 114 mm
  - Mese più secco: gennaio, 37 mm
  - Quantità media annua di neve: 29

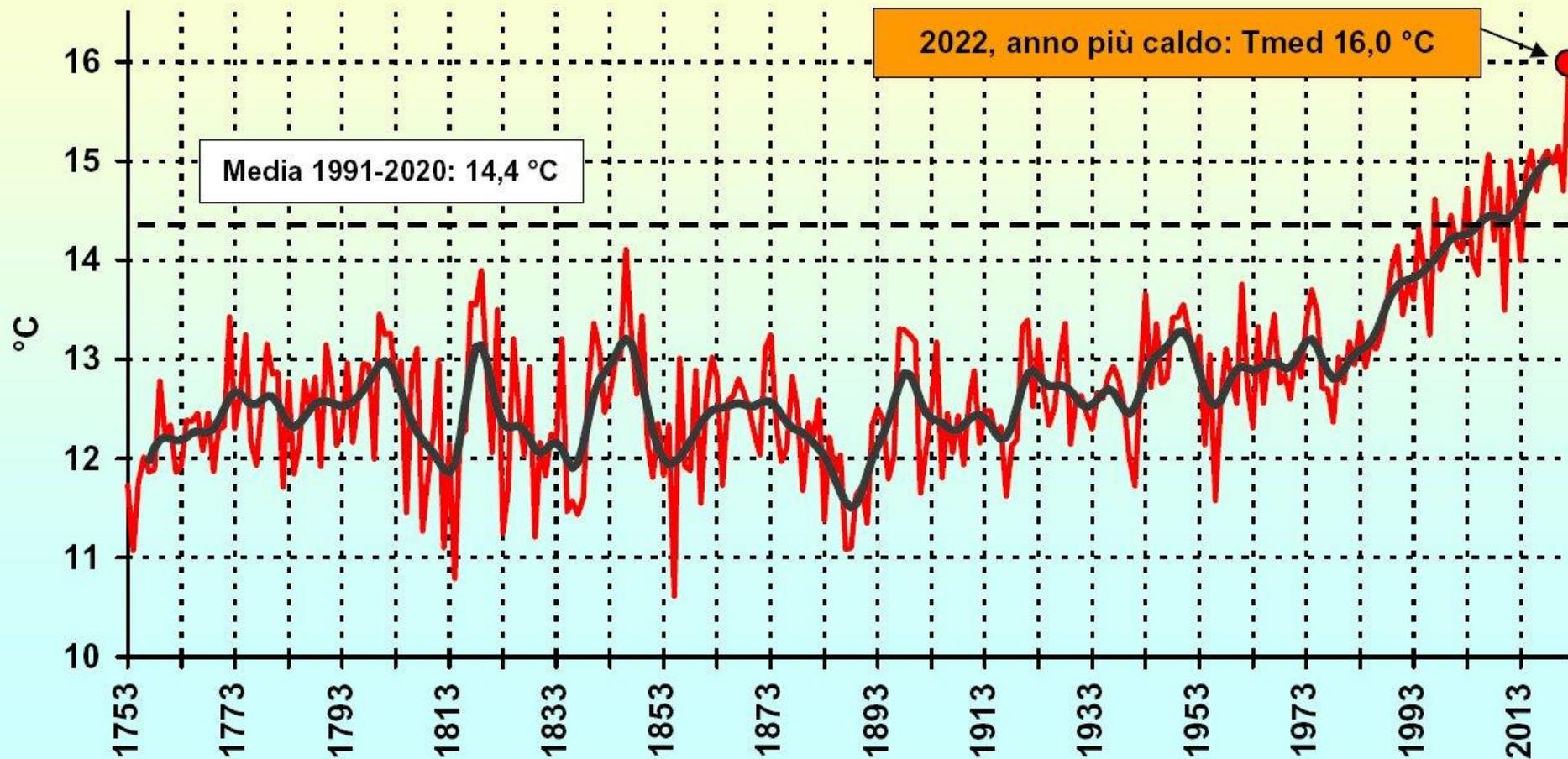
Estremi (intera serie di misura)

- Giorno più freddo: 3 febbraio 1754 (-19,1 °C)
- Giorno più caldo: 11 agosto 2003 (41,8 °C)
- Giorno più piovoso: 30 maggio 1818 (174 mm di pioggia in 24 ore)
- Giorno più nevoso: 4 dicembre 1844 (54 cm di neve fresca in 24 ore)
  - Anno più piovoso: 1810 (1756 mm)
  - Anno meno piovoso: 1871 (405 mm)
  - Inverno più nevoso: 1808-09 (159 cm)
- Inverni meno nevosi: 5 stagioni senza neve, 3 dei quali negli ultimi 20 anni (1845-46, 1924-25, 1988-89, 1989-90, 2006-07)

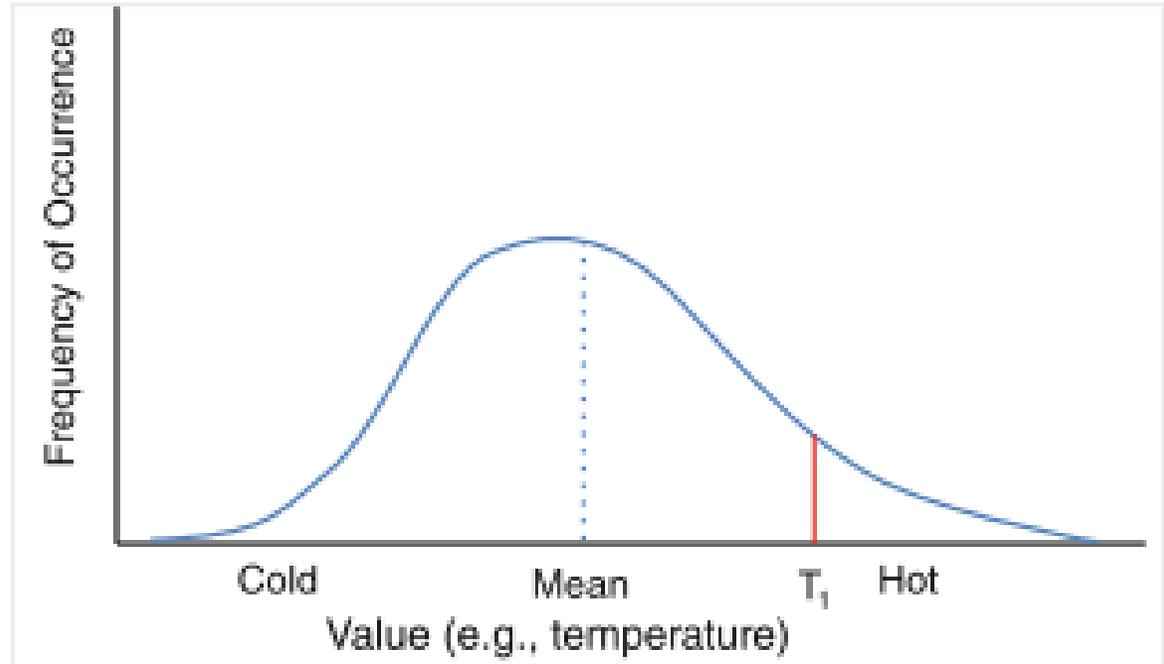
# Climatologia: temperature a Torino



Torino centro - Temperature medie annue (°C) dal 1753 al 2022  
(dati attuali: Arpa Piemonte; analisi storica: SMI / Nimbus)

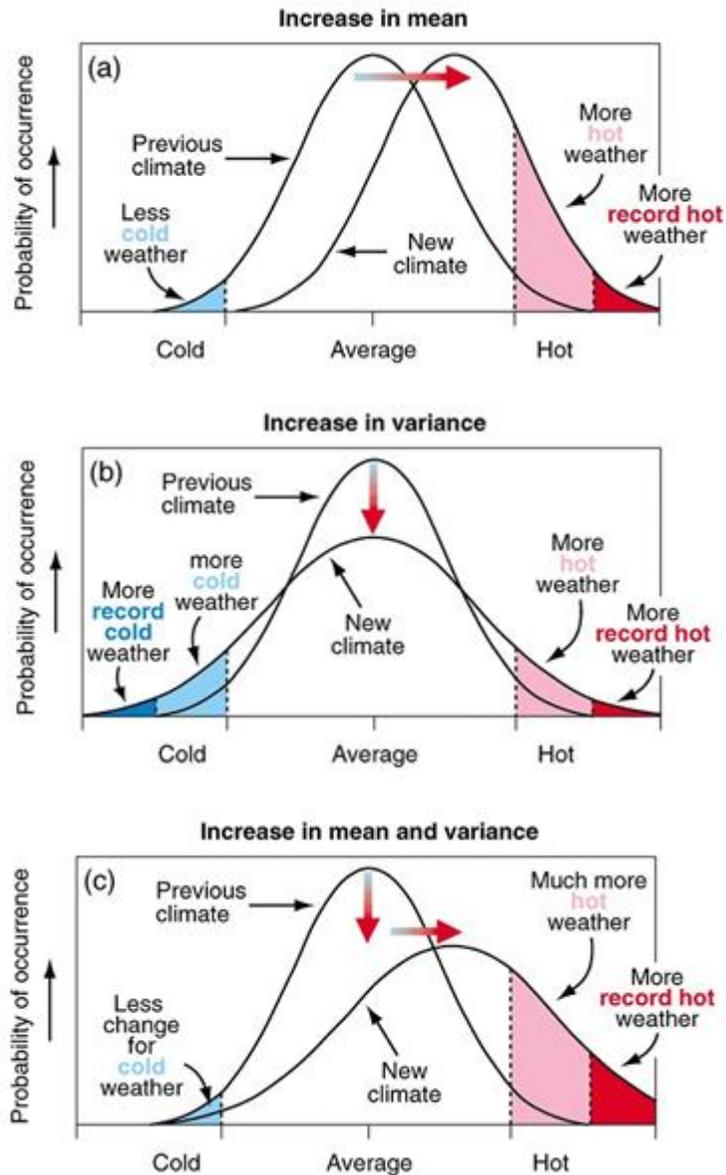


# La natura statistica del clima



**Clima:** la media del tempo meteorologico, o più rigorosamente la descrizione statistica in termini di valore medio, distribuzioni e variabilità di quantità rilevanti come la temperatura, la precipitazione, il vento, ecc., su un periodo di tempo variabile tra mesi e migliaia o milioni di anni (il periodo classico per mediare le variabili è il **trentennio**, così come definito dal WMO)  
[IPCC 2013, Glossario]

# La natura statistica del clima



**Cambiamento climatico:** la media del tempo meteorologico, o una variazione nello stato del clima che può essere identificata (ad es. usando test statistici) da variazioni nella media e/o nella variabilità delle sue proprietà e che persiste per un periodo lungo (tipicamente, decenni o più)

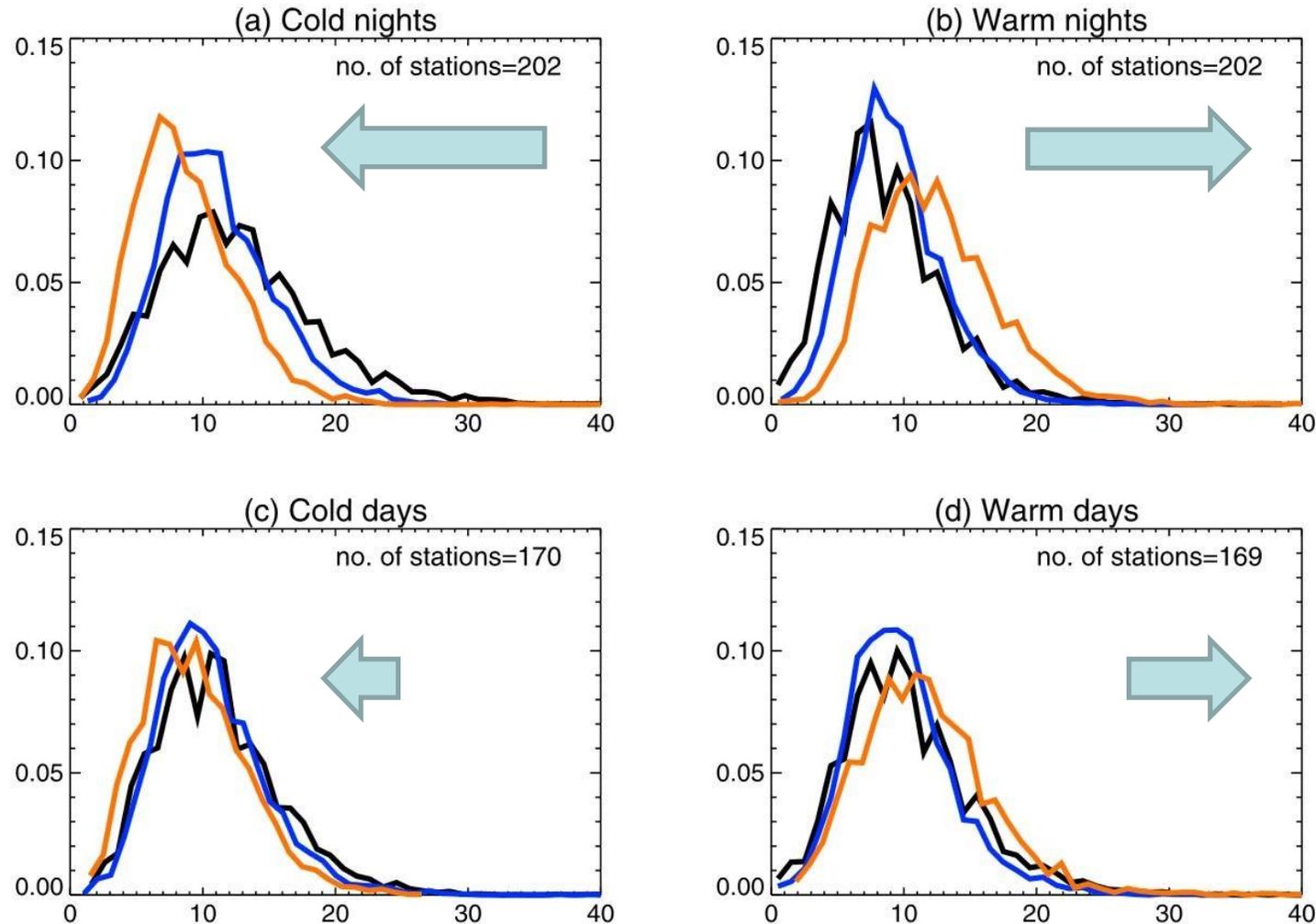
[IPCC 2013, Glossario]

**Aumento della media:** i valori aumentano tutti della stessa quantità. La distribuzione trasla verso valori maggiori ma mantiene la stessa forma. Meno eventi freddi, più eventi caldi.

**Aumento della varianza:** la distribuzione cambia forma. La media non cambia ma le code sono più popolate. Più eventi freddi, più eventi caldi.

**Aumento della media e della varianza:** la distribuzione cambia forma e trasla. Un po' meno eventi freddi, molti più eventi caldi.

# La natura statistica del clima



Funzioni annuali di distribuzione di probabilità (PDF) per (a) notti fredde, (b) notti calde, (c) giorni freddi e (d) giorni caldi per un sottoinsieme di stazioni con almeno l'80% di dati completi tra il 1901 e il 2003 per tre periodi di tempo: 1901–1950 (nero), 1951–1978 (blu) e 1979–2003 (rosso). L'asse x rappresenta la percentuale di tempo durante l'anno in cui gli indicatori erano inferiori al 10° o al 90° percentile. Le PDF sono normalizzate a 1. Il numero di stazioni in ciascun caso è indicato nell'angolo in alto a destra. Adattato da Alexander et al. (2006).

# La natura statistica del clima

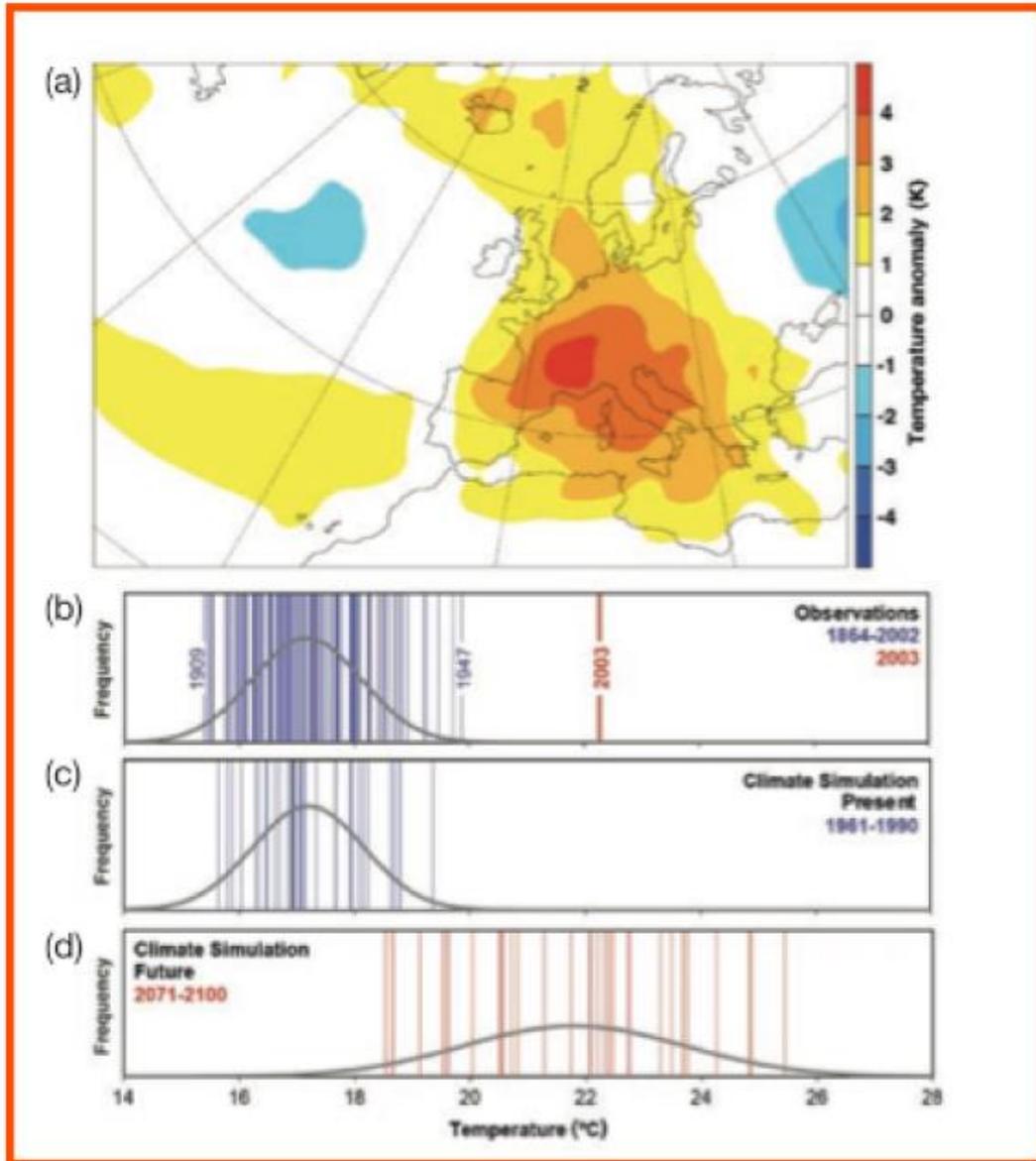
## Ondata di calore, estate 2003

a. Anomalia della temperatura giugno-luglio-agosto rispetto alla media 1961-1990

b. Temperature medie estive misurate in Svizzera nel periodo 1864-2003

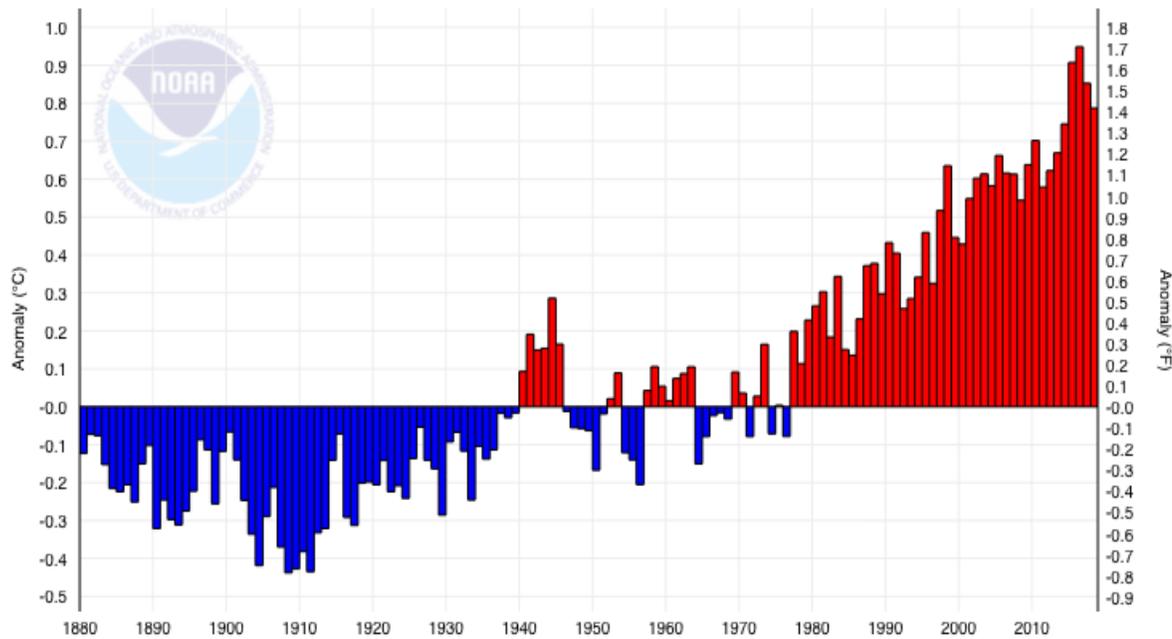
c. Temperature simulate utilizzando un modello climatico regionale del clima nel periodo 1961-1990

d. Temperature simulate con lo stesso modello nel periodo 2071-2100 per un possibile scenario futuro

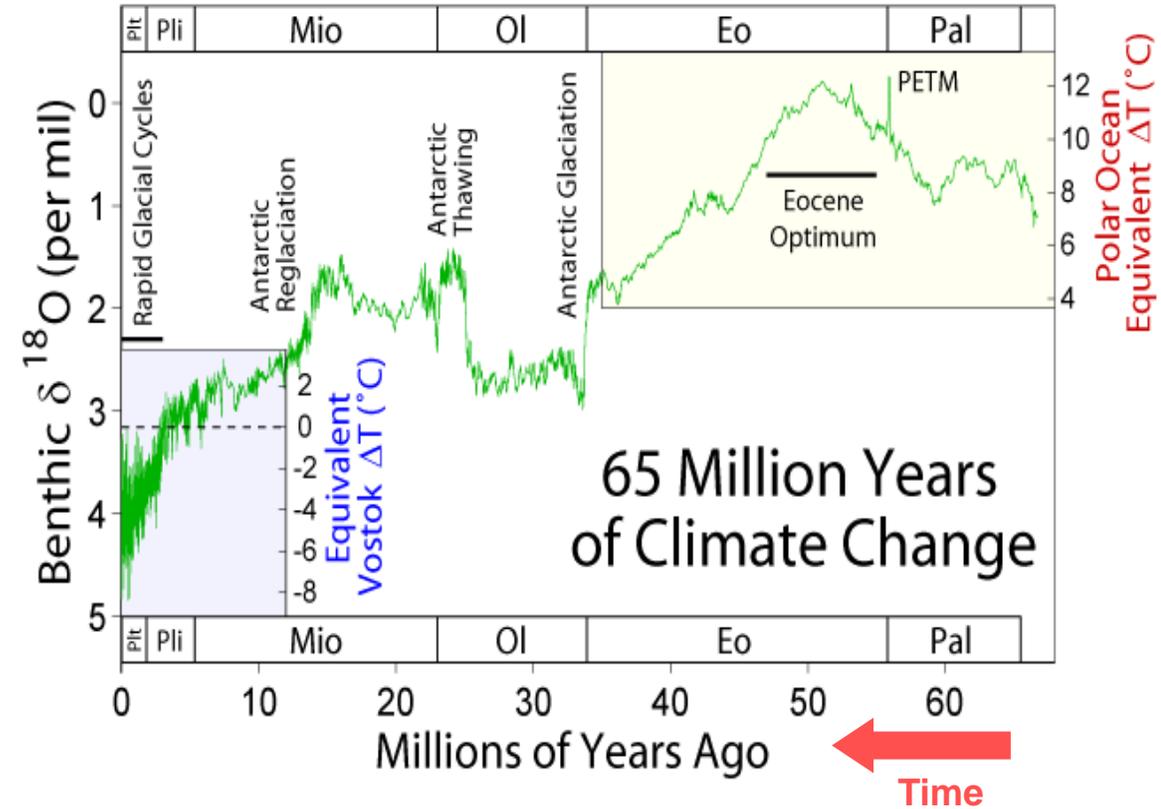


# Altri esempi di climatologia

Departure of Global Temperature From Average, 1880 - 2018



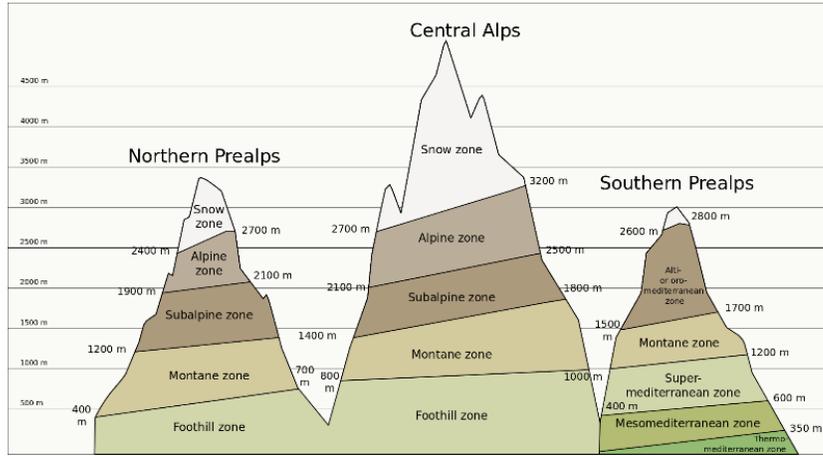
Time →



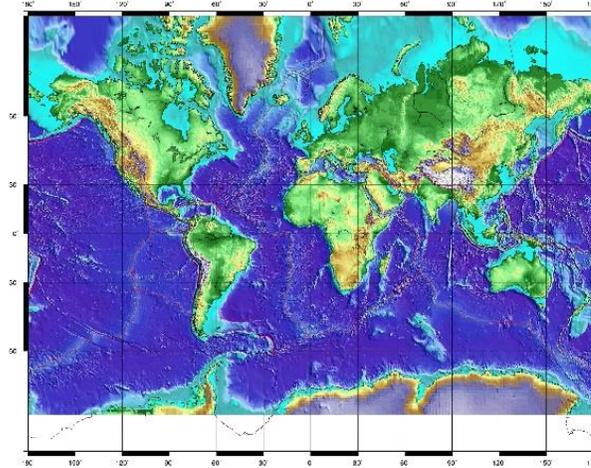
65 Million Years of Climate Change

← Time

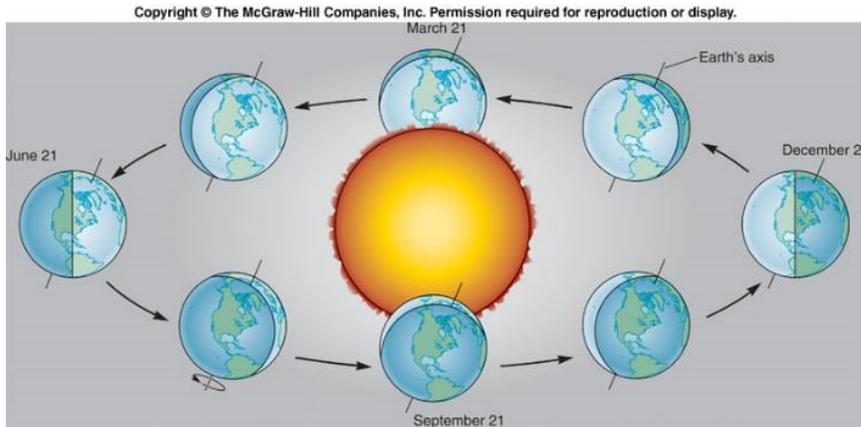
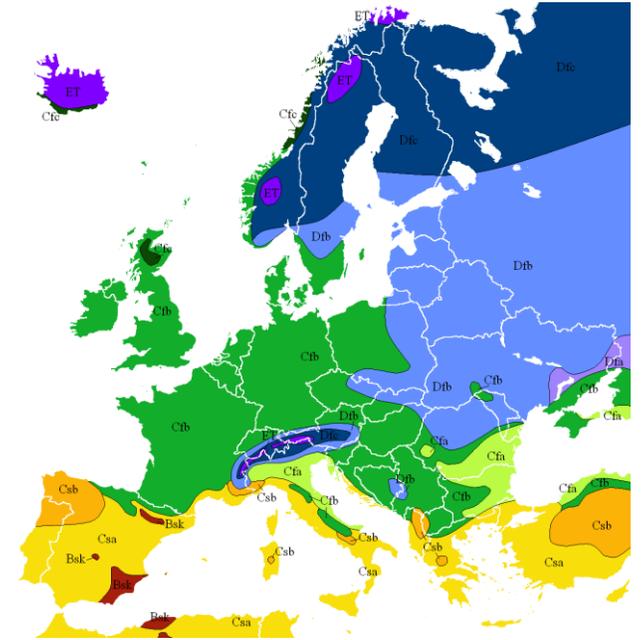
# Fattori climatici



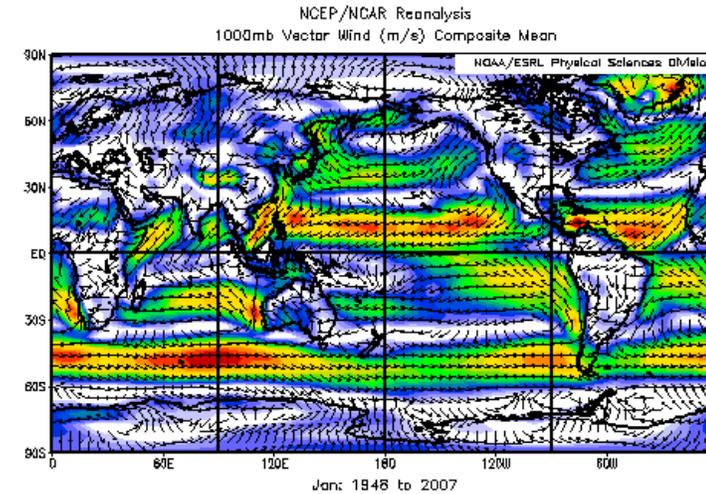
Altitudine



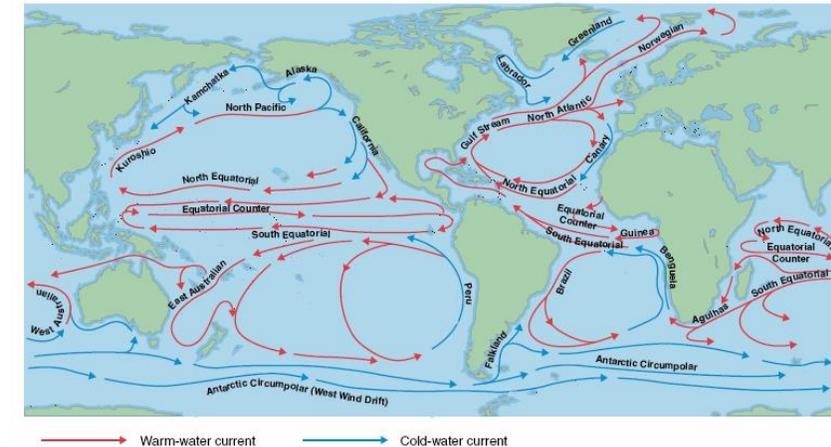
Topografia



Latitudine e stagioni

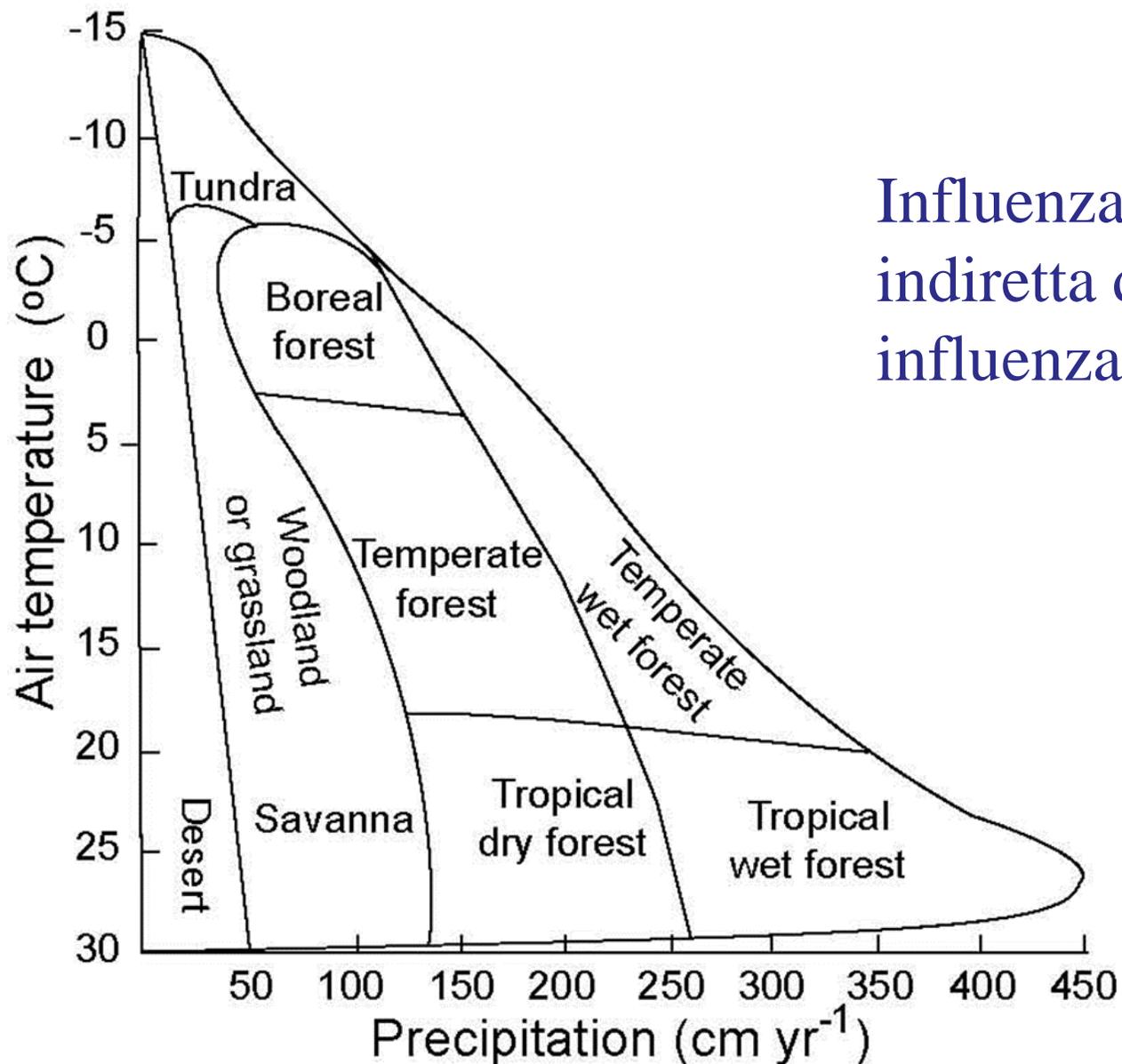


Venti



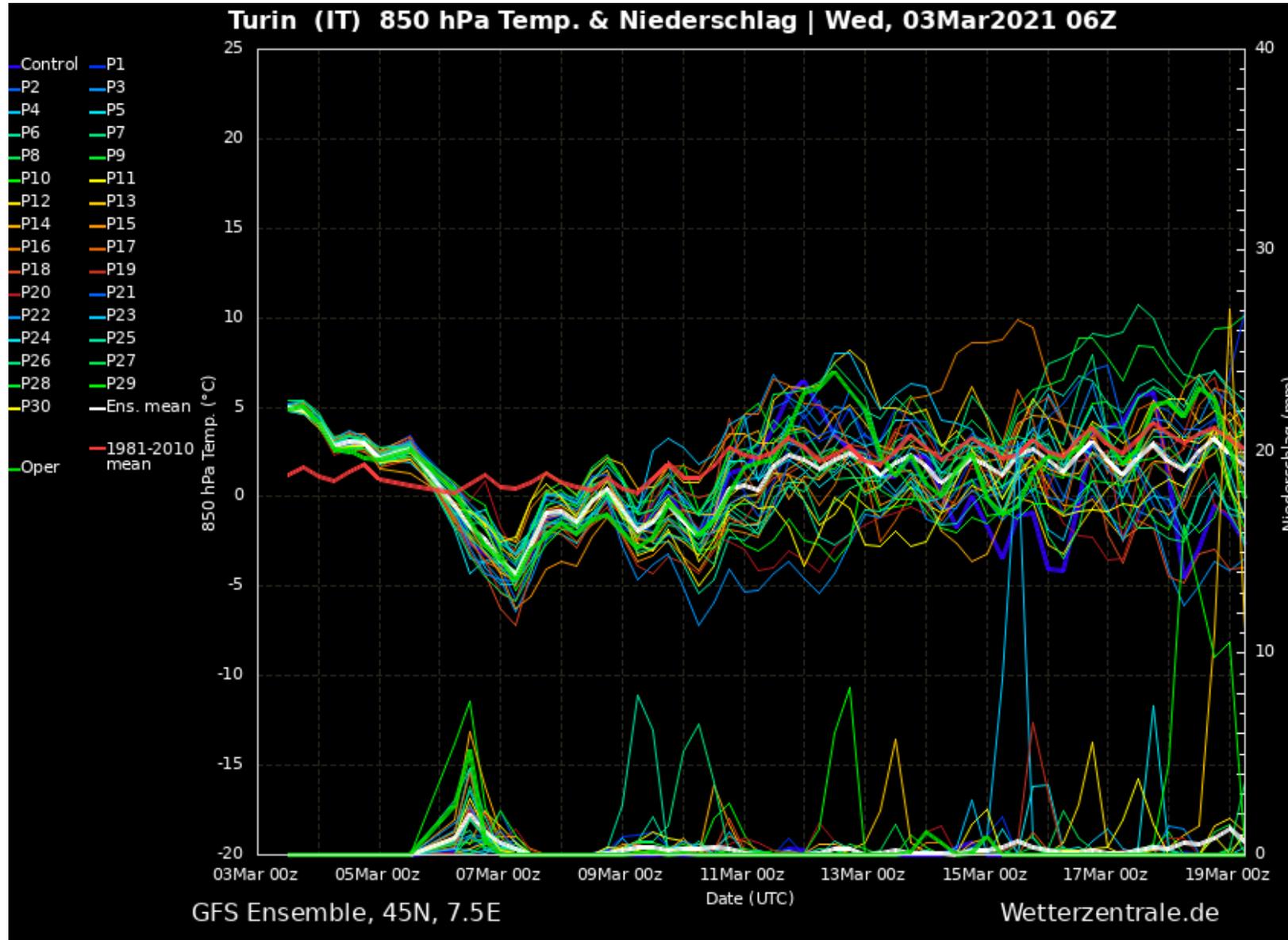
Correnti oceaniche

# Es.: influenza dei fattori climatici sulla vegetazione



Influenza diretta della precipitazione e indiretta della temperatura (che influenza il rateo di evapotraspirazione)

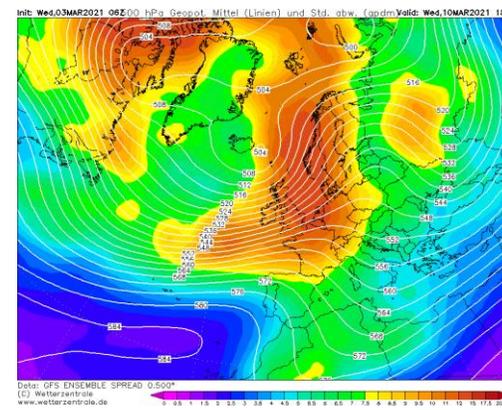
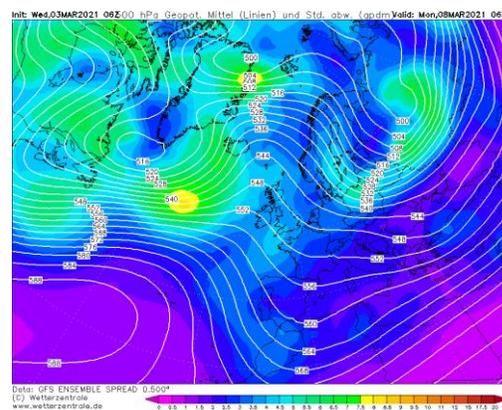
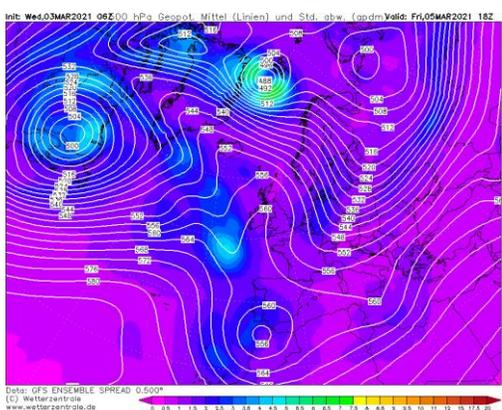
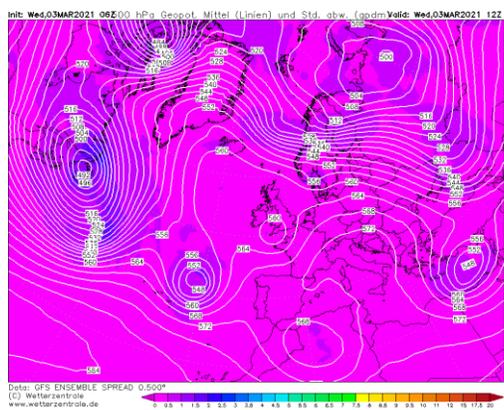
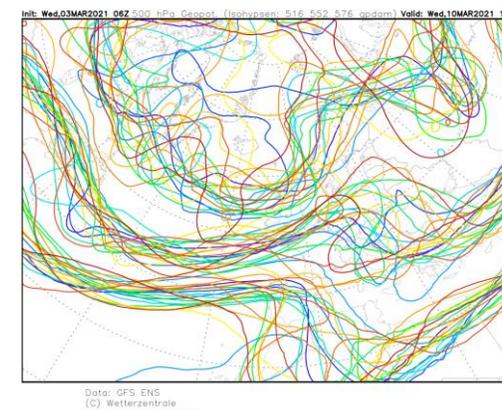
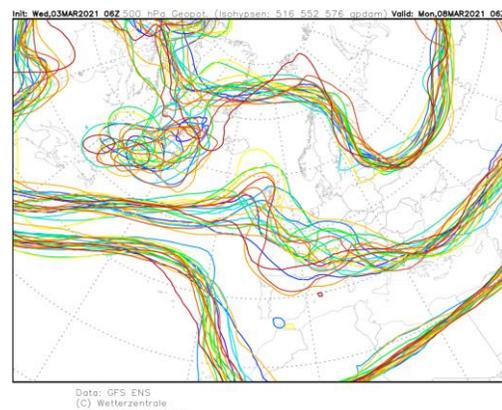
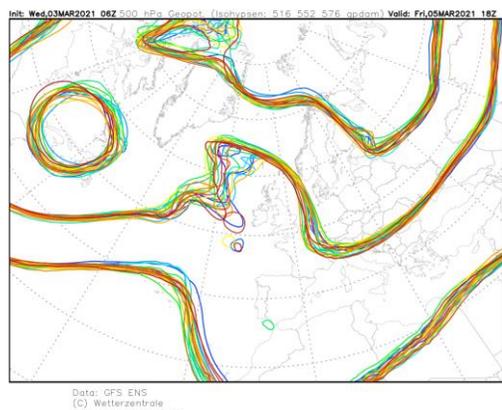
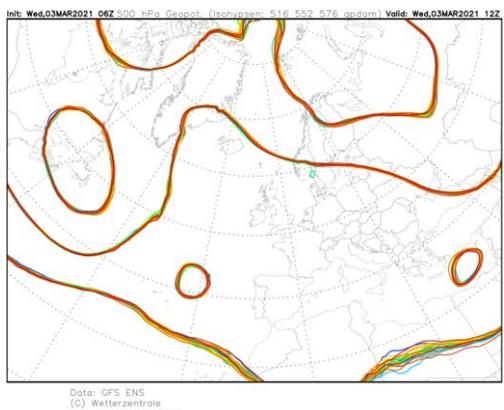
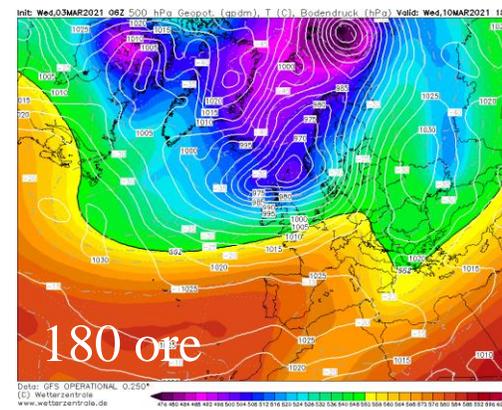
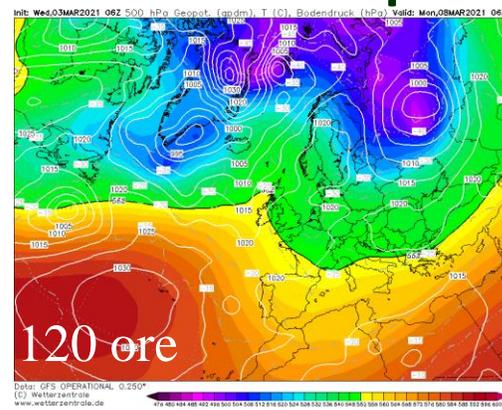
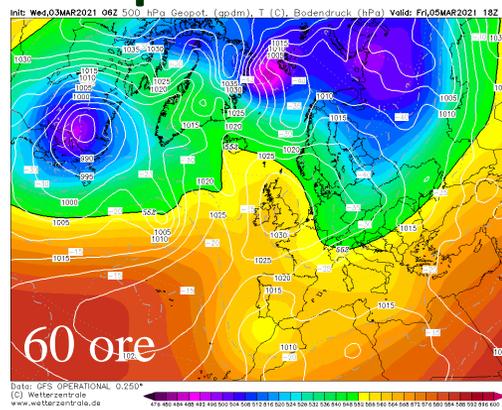
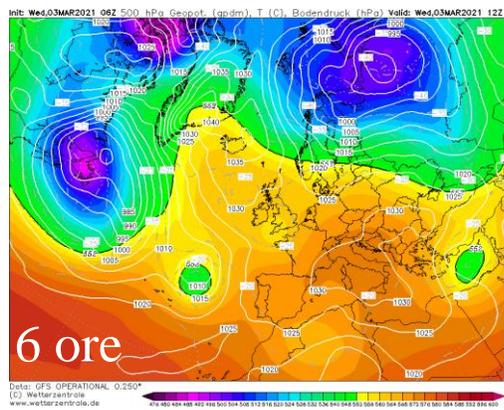
# La prevedibilità del tempo



## La modellistica di insieme

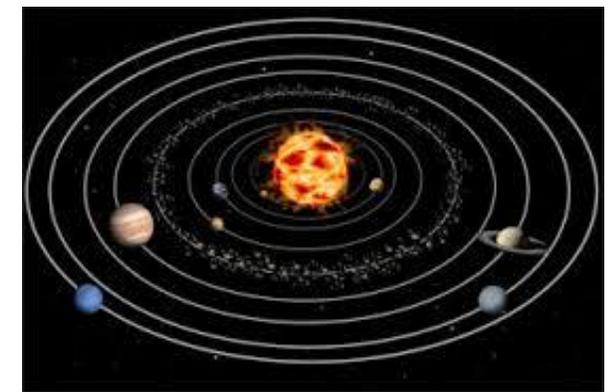
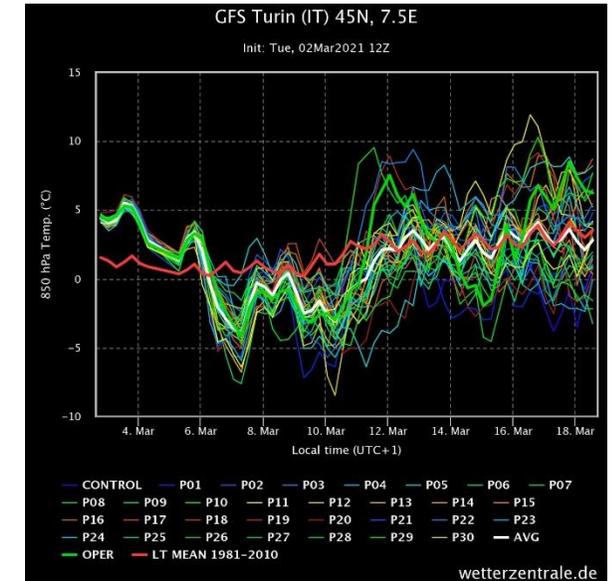
- 30 (+1) simulazioni, ognuna con condizioni iniziali lievemente diverse l'una dall'altra
- Per un po' di tempo le soluzioni sono simili, ma dopo alcuni giorni si notano delle differenze, che tendono a crescere nel tempo
- È possibile assegnare una probabilità a determinate classi di eventi
- Esiste un limite temporale oltre il quale è impossibile reputare affidabili i valori

# La prevedibilità del tempo



# Previsione meteorologica e climatica

- **Previsioni di primo tipo:** previsione dell'evoluzione temporale delle singole "traiettorie" di un sistema.
  - ❑ Sono «problemi ai valori iniziali» che richiedono la conoscenza dello stato del sistema ad un certo istante iniziale fissato, e una qualche legge del moto deterministica per far evolvere le traiettorie nel tempo
  - ❑ Esempi: Atmosfera: previsioni meteorologiche; Oceano: previsioni stagionali dello stato di El Niño)
- **Previsione di secondo tipo:** previsione di come variano le proprietà statistiche di un sistema al variare di un qualche parametro esterno (che chiameremo forzanti).
  - ❑ Sono «problemi ai valori al contorno», meno dipendenti dalle condizioni iniziali di un sistema soggetto a variazioni della forzatura esterna
  - ❑ Esempi: Previsioni delle variazioni climatiche dovute a fattori esterni di origine naturale o antropica



# Previsione meteorologica vs simulazione climatica

- Nelle **simulazioni meteorologiche** il sistema che viene descritto dinamicamente è l'atmosfera
  - ❑ Tutto ciò che sta alla sua interfaccia e può influenzarne il comportamento è trattato come condizione al contorno (es: la quantità di radiazione emessa dal Sole, la temperatura media superficiale del mare, la concentrazione dei gas serra, la copertura glaciale, la vegetazione e l'«uso del suolo») che si ritiene invariante (o poco variabile) per il periodo della previsione meteorologica (tipicamente 7-10 giorni).
- Una **simulazione climatica** riguarda periodi più lunghi di quelli che caratterizzano la previsione meteorologica, durante i quali **le condizioni al contorno non possono più essere considerate costanti**, ma seguono una loro dinamica che interagisce con la dinamica atmosferica
  - ❑ Occorre quindi che ogni sottosistema abbia il suo modello, la cui simulazione deve procedere parallelamente a quella atmosferica. Per questo motivo oggi i modelli di clima vengono chiamati **Earth System Models**
  - ❑ Inoltre **occorre dare un valore (ignoto) alle variabili al contorno**
    - Per alcune di esse si ricorre a scenari di previsione

# Effetto farfalla e clima

**Se non riusciamo a prevedere il tempo da ora a 15 giorni, come possiamo prevedere il clima da ora a 30 anni, o da ora a fine secolo?**

- Una delle caratteristiche principali di un sistema complesso è la **sensibilità alle condizioni iniziali** che, in certi casi, può determinare un'impredicibilità del suo stato futuro. Questa caratteristica fu scoperta dal meteorologo-matematico Ed Lorenz.
  - ❑ **Trascurare una condizione iniziale o commettere errori nella determinazione dello stato iniziale di un sistema, può far sì che non si riesca a prevedere correttamente un evento futuro.**
  - ❑ Commettiamo per forza errori nella determinazione dello stato iniziale dell'atmosfera e questo, unito ad altre incertezze, è sostanzialmente il fatto per cui non riusciamo a prevedere il tempo meteorologico entro i 7-10 giorni.
  - ❑ Questo effetto fu sintetizzato dallo scopritore Ed Lorenz con la frase «Il battito d'ali di una farfalla in Brasile può scatenare un tornado in Texas»
- Questo effetto ha una qualche influenza sui modelli climatici, e in generale sulla previsione dei modelli climatici?

# Effetto farfalla e clima

- Tempo meteorologico e clima sono due concetti diversi
  - ❑ Non dimentichiamo che alla base del clima c'è un concetto statistico che valuta il tempo medio e la sua variabilità in un arco di tempo lungo
- Non importa quale è stata l'evoluzione dei diversi tempi meteorologici nell'arco di tempo studiato, ma contano il valor medio e la variabilità degli stati del sistema, ovvero delle varie situazioni meteorologiche createsi al passare del tempo
- Questa statistica può essere ottenuta facendo «girare» il modello per molto tempo (un tempo di rilevanza climatica)
- Nel caso in cui cambino le «forzanti climatiche», il nostro Earth System Model risponderà in maniera diversa raggiungendo un nuovo punto di equilibrio caratterizzato da valori diversi, che rappresenterà il nuovo clima
  - ❑ Pensare all'alternanza dei cicli glaciali e interglaciali nelle ultime glaciazioni