

# Il clima futuro

## Ringraziamenti:

- AA.VV. (UniTo) - Lessico e Nuvole: le parole del cambiamento climatico – 2020
- C. Cassardo et al. - Temporalis e tornado – cap. 1, 2021 – Ed. AlphaTest

# Modelli

- I modelli numerici (matematici) sono solitamente indicati come "**Modelli di circolazione generale**" (GCM) dell'atmosfera o dell'oceano, o anche **Modelli Climatici Globali** (GCM)
- In realtà i modelli simulano tutte le componenti del sistema climatico, per cui ora si chiamano **Modelli del Sistema Terra** (ESM)
- Esistono anche "Modelli Climatici Regionali" (RCM) che coprono porzioni limitate del globo, utilizzati per eseguire la regionalizzazione dell'output dei GCM

# Modelli meteorologici e climatici

- I GCM (parte atmosferica) sono costruiti sul kernel costituito dagli stessi modelli utilizzati per le previsioni meteorologiche numeriche, a cui vengono aggiunti ulteriori "moduli" per renderli adatti a modellare non il tempo istantaneo di oggi e di domani, ma il tempo "medio" dei prossimi 5, 10, 50, 100, 200 anni, o più
- Il costo computazionale deve essere ridotto, poiché l'integrazione viene effettuata per anni o secoli, anziché giorni o mesi
  - ✓ La risoluzione spaziale (orizzontale e verticale) e temporale devono essere ridotte
- Conto «della serva»: un GCM meteorologico con passo griglia di  $0,1^\circ$  in latitudine e longitudine impiega tre ore per generare le uscite relative a 15 giorni. Quale risoluzione dovrebbe avere un GCM climatico per poter generare le uscite relative a un secolo in non oltre 7 giorni di corsa?
  - ✓ In un anno ci sono 24 periodi di 15 giorni (circa), e in un secolo 2400. Quindi il GCM climatico con la stessa risoluzione del GCM meteorologico impiegherebbe  $2400 * 3 = 7200$  ore = 300 giorni. Perché impieghi soltanto 7 giorni debbo fargli fare  $300/7=42,86$  volte conti in meno. Considerando che un dimezzamento della risoluzione comporta un guadagno non di 2 ma di  $2^4=16$  (tre dimensioni spaziali e una temporale – il grigliato diventerebbe di  $0,2^\circ$ ), riducendo di  $1/3$  la risoluzione (grigliato di  $0,3^\circ$ ) avrei un guadagno di  $3^4=81$  e quindi la corsa impiegherebbe  $300/81=3,7$  giorni. Con una riduzione di 2,56 volte (grigliato di  $0,256^\circ$ ) ci impiegherebbe una settimana.

# Modelli climatici

- Descrivono l'evoluzione climatica integrando numericamente un sistema di equazioni differenziali, analiticamente impossibile da risolvere.
- Le equazioni solo per l'atmosfera sono:

Vento

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \bar{V} = -\frac{\nabla p}{\rho} - 2\bar{\Omega} \times \bar{V} + \bar{g} + \bar{F}_V$$

Conservazione della  
quantità di moto

Temperatura

$$C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla T \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + Q + F_T$$

Conservazione  
dell'energia

Densità

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla \rho = -\rho \nabla \cdot \bar{V}$$

Conservazione  
della massa

Umidità  
specifica

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \bar{V} \cdot \nabla q = \frac{S_q}{\rho} + F_q$$

Conservazione  
dell'acqua

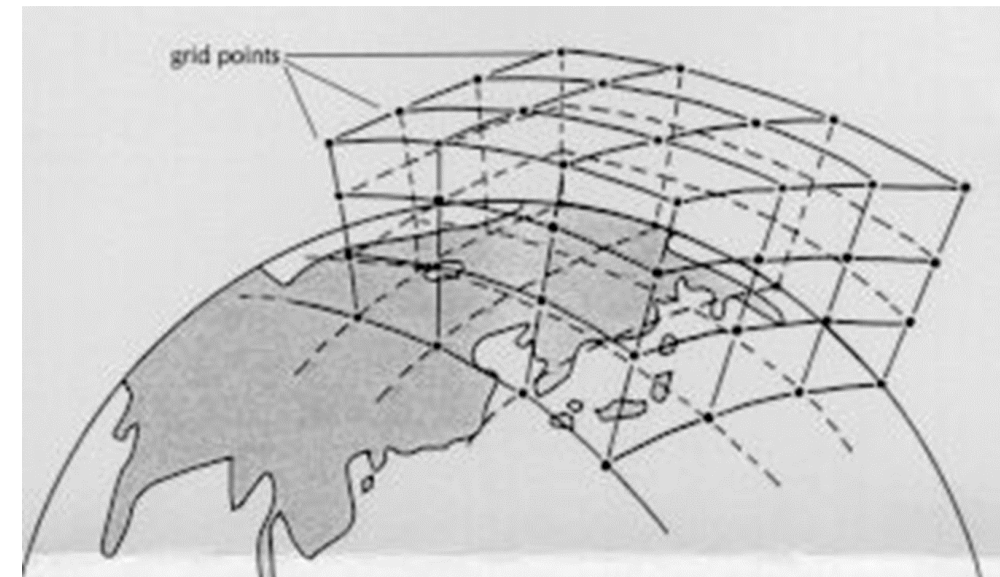
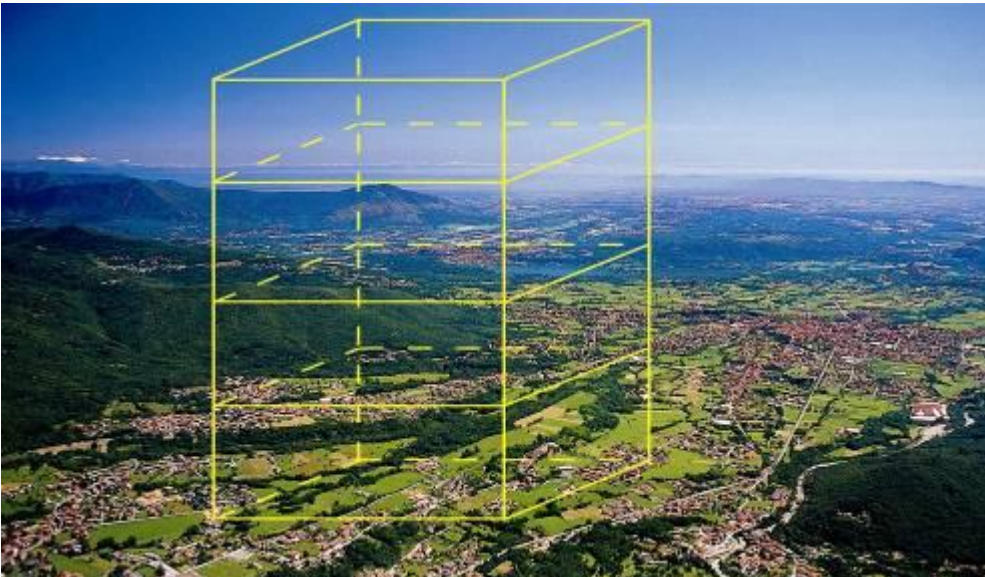
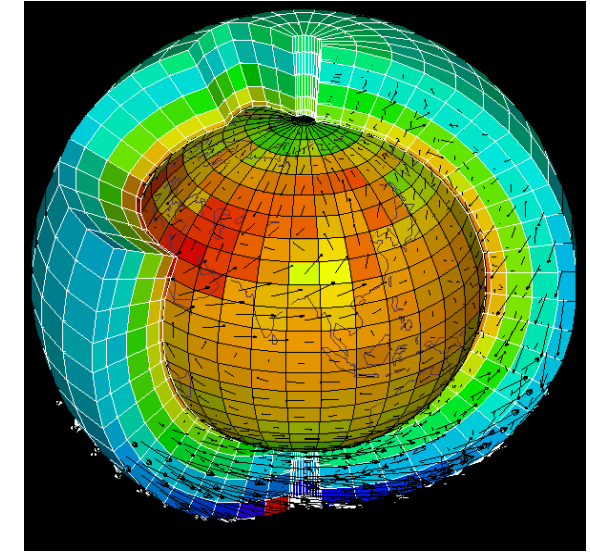
Pressione

$$p = \rho R T$$

Equazione di  
stato

# Passo griglia: cosa significa discretizzare?

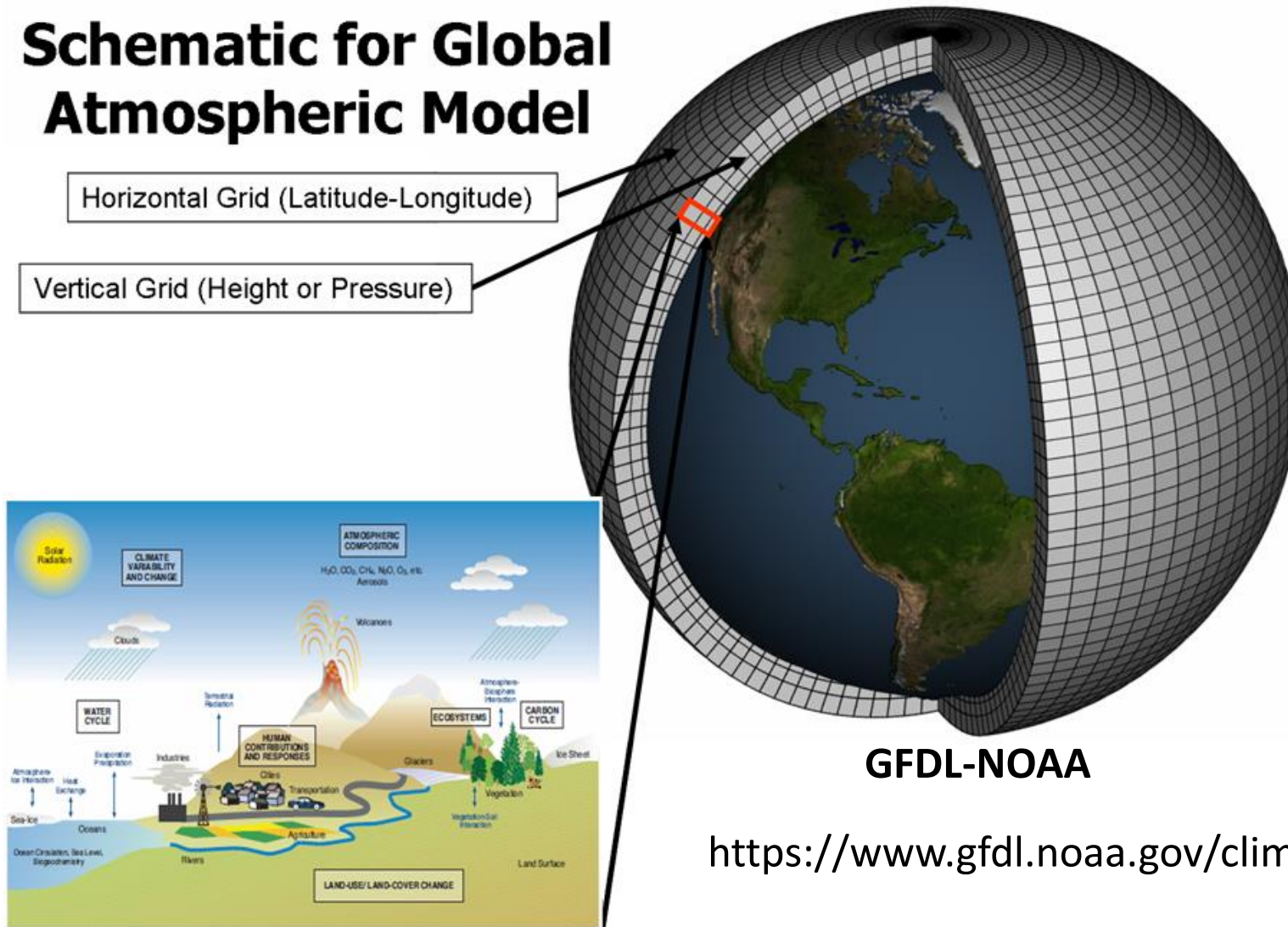
- Dividere il volume in blocchi tridimensionali
- in ogni blocco, le variabili vengono assegnate al baricentro
- Il volume del blocco può variare con l'altitudine e la latitudine
- L'ampiezza del blocco è correlata alla risoluzione del modello (minore è l'ampiezza, maggiore è la risoluzione)
- Per i modelli meteorologici globali, la risoluzione è di 10-20 km; per i modelli climatici globali, di 75-200 km (diminuisce progressivamente)



# Modelli climatici

strumenti per comprendere il clima e prevederne l'evoluzione futura

## Schematic for Global Atmospheric Model



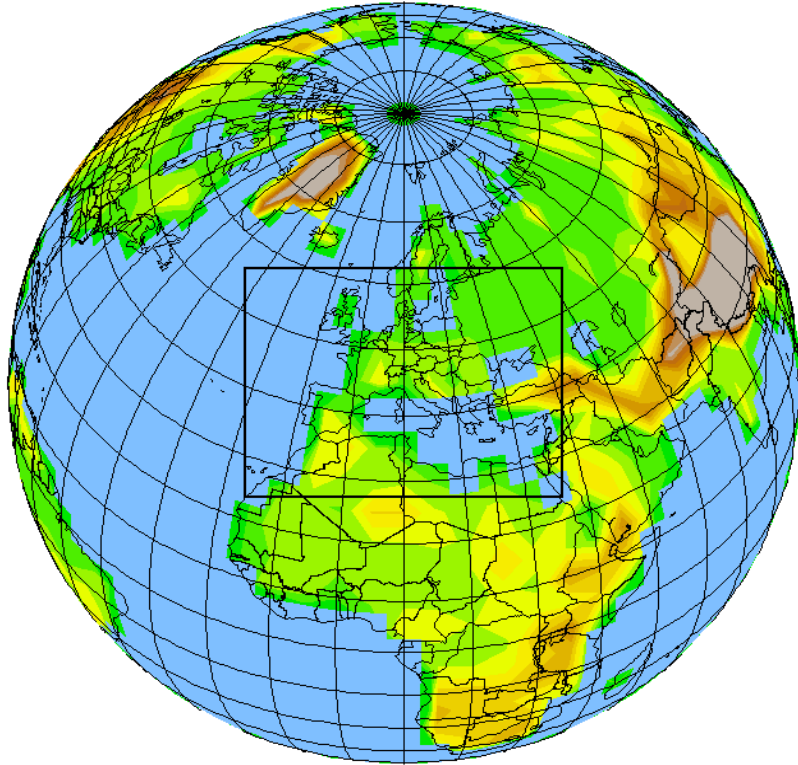
GFDL-NOAA

<https://www.gfdl.noaa.gov/climate-modeling/>

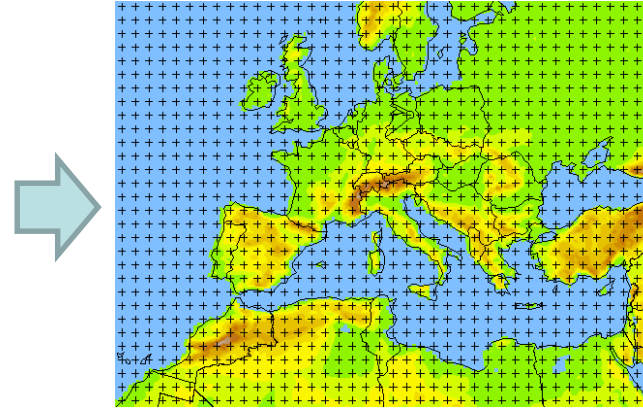
- Strumenti DIAGNOSTICI: utili per fare "esercizi" di attribuzione (comprendere la causa di un cambiamento che è stato considerato statisticamente significativo)
- Strumenti PROGNOSTICI: per realizzare proiezioni climatiche future) basati sulla variabilità climatica naturale e assumendo cambiamenti nella forzatura

# Scale dei modelli

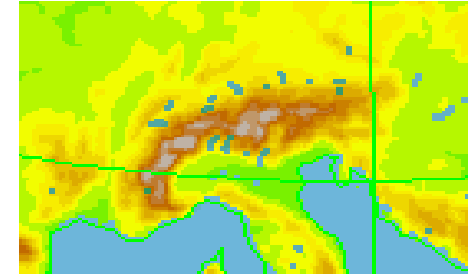
Globale (GCM, ESM)



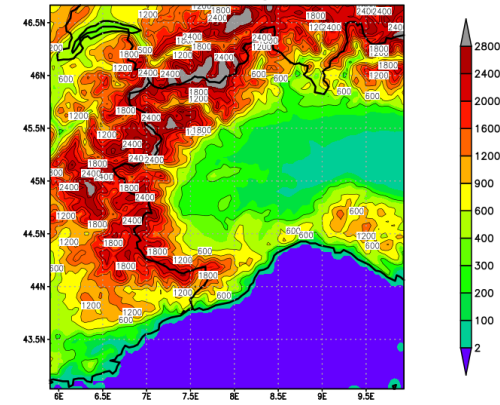
Continentale (RCM)



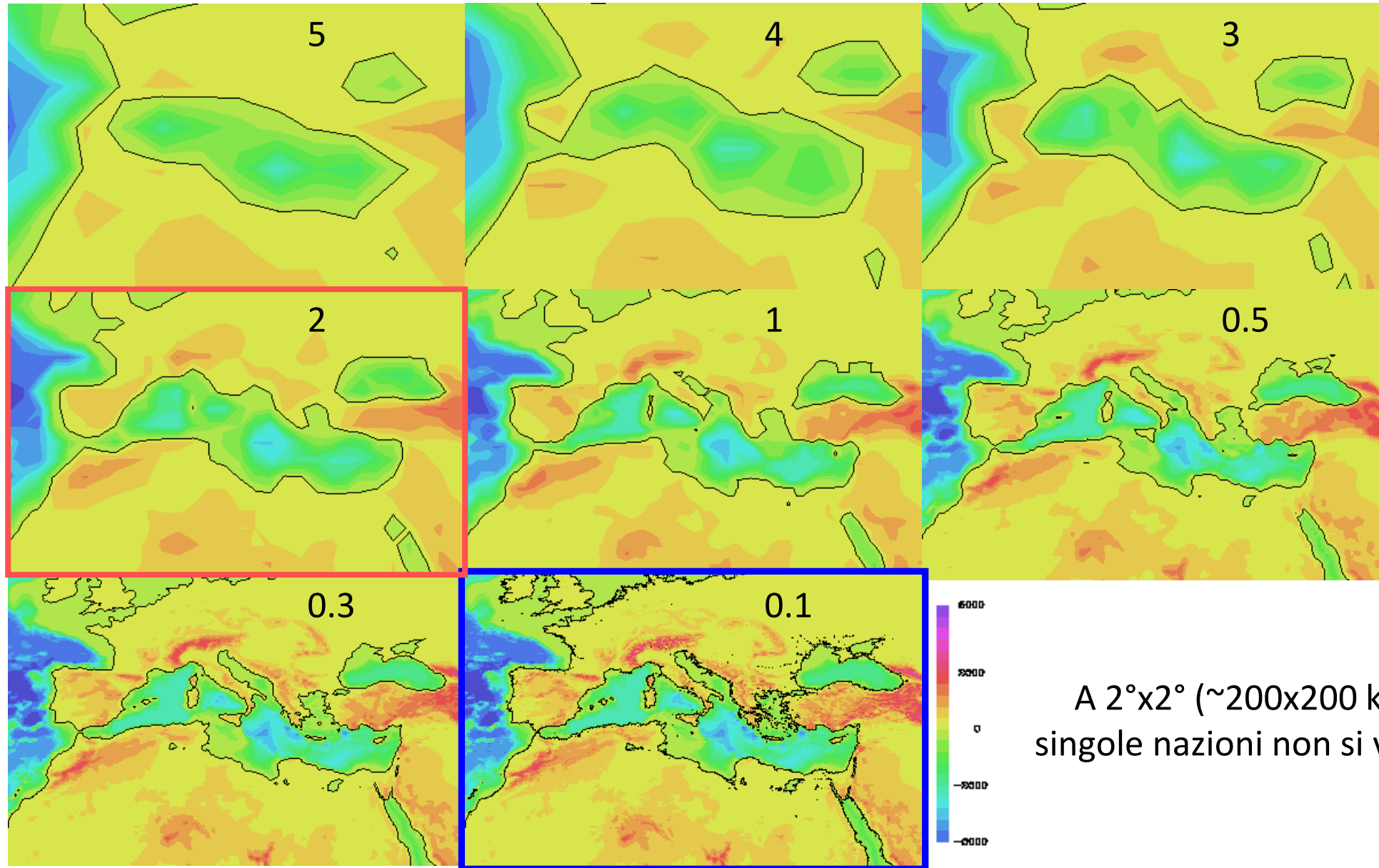
Regionale (RCM)



Locale



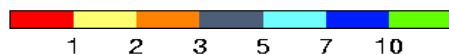
# L'effetto della risoluzione



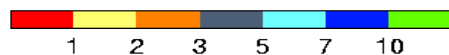
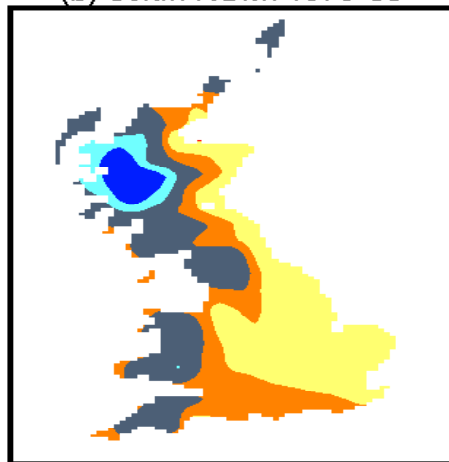
# Il valore aggiunto dei modelli regionali

## Precipitazioni invernali sul Regno Unito

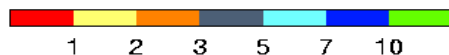
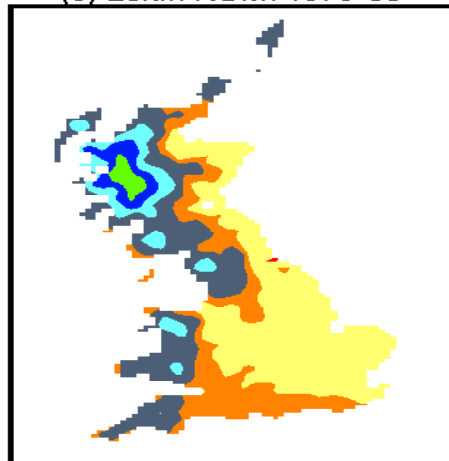
(a) 300km GCM: 1979-83



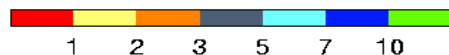
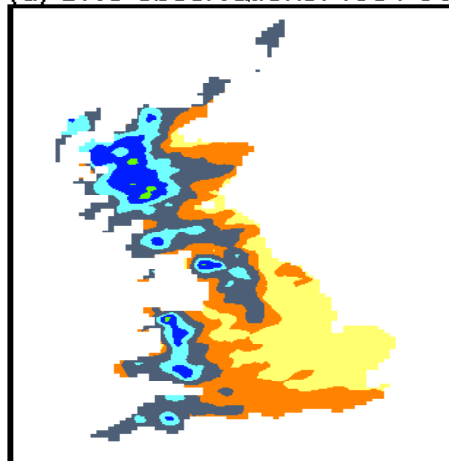
(b) 50km RCM: 1979-83



(c) 25km RCM: 1979-83



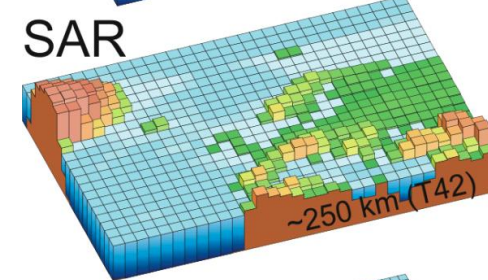
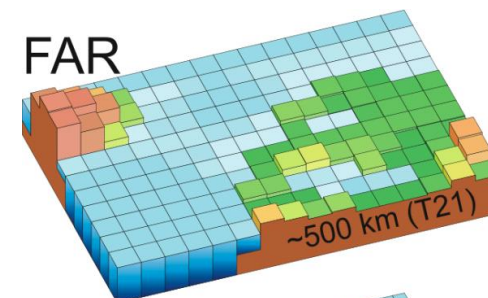
(d) CRU observations: 1961-90



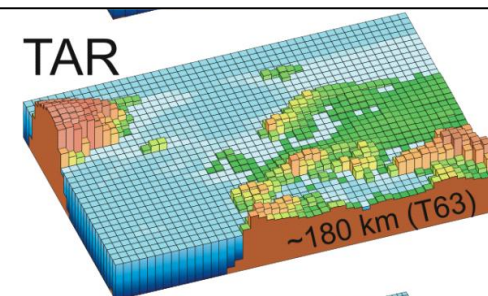
Modello  
regionale  
50 km

Dati

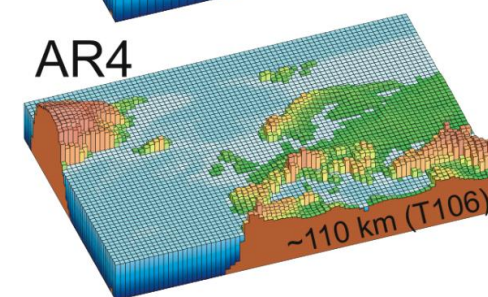
FAR



TAR



AR4

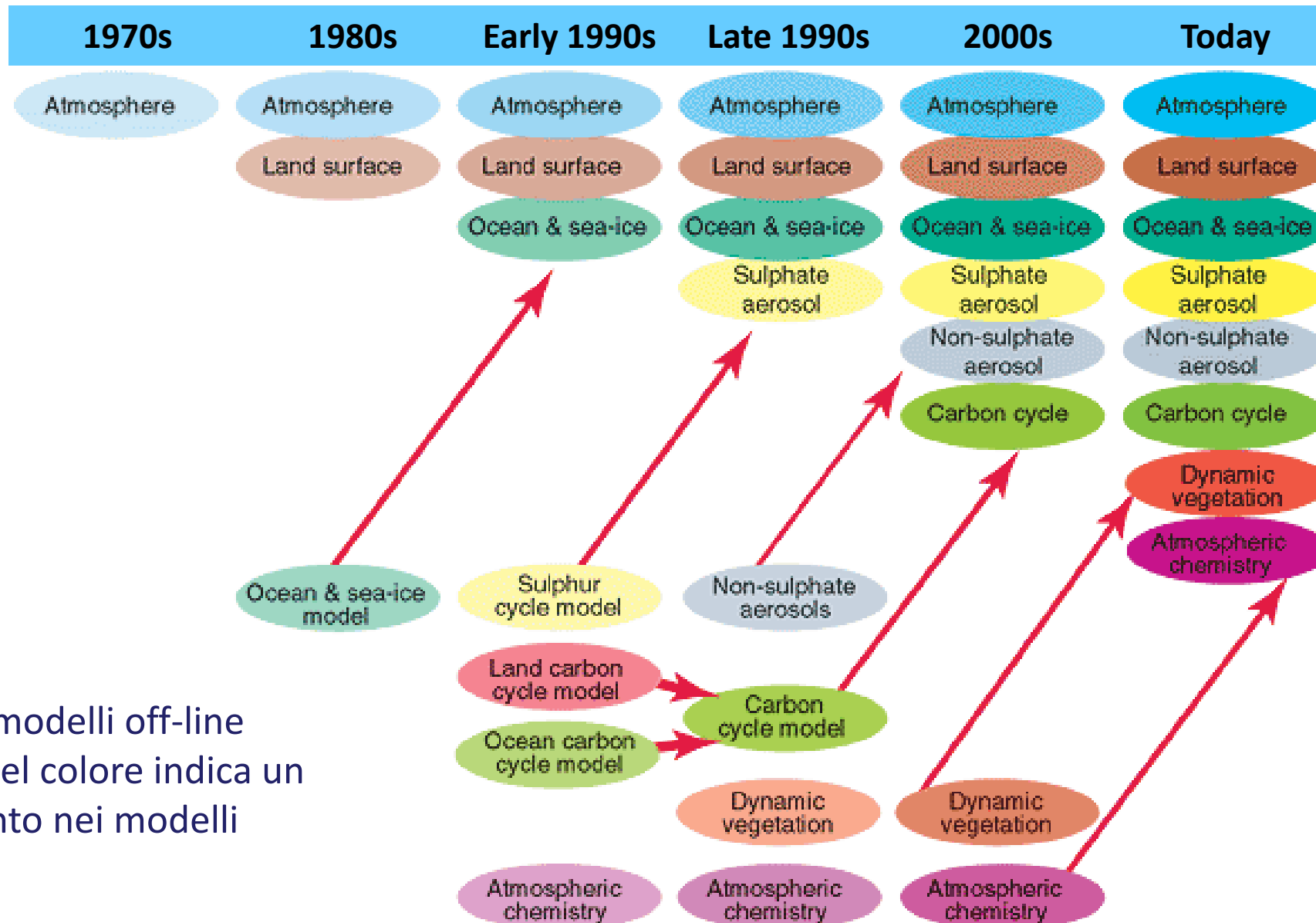


Modello  
globale  
300 km

Modello  
regionale  
25 km

# L'evoluzione dei GCM e ESM nel tempo

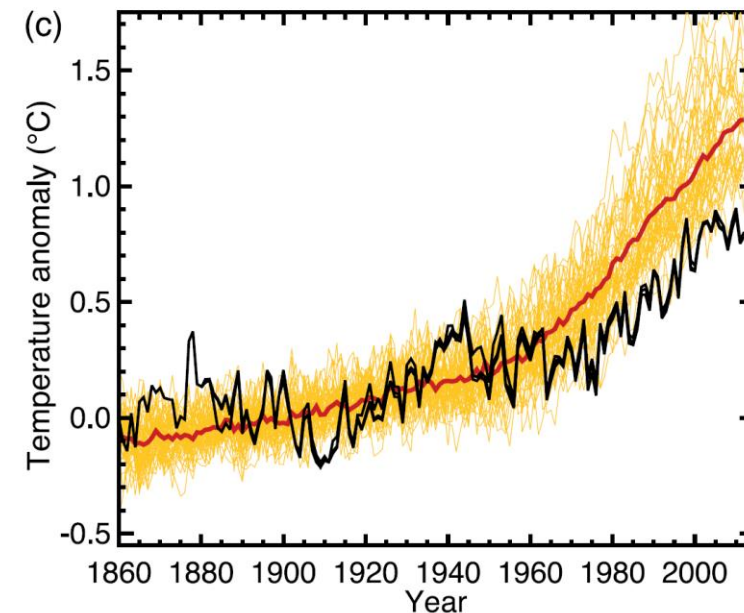
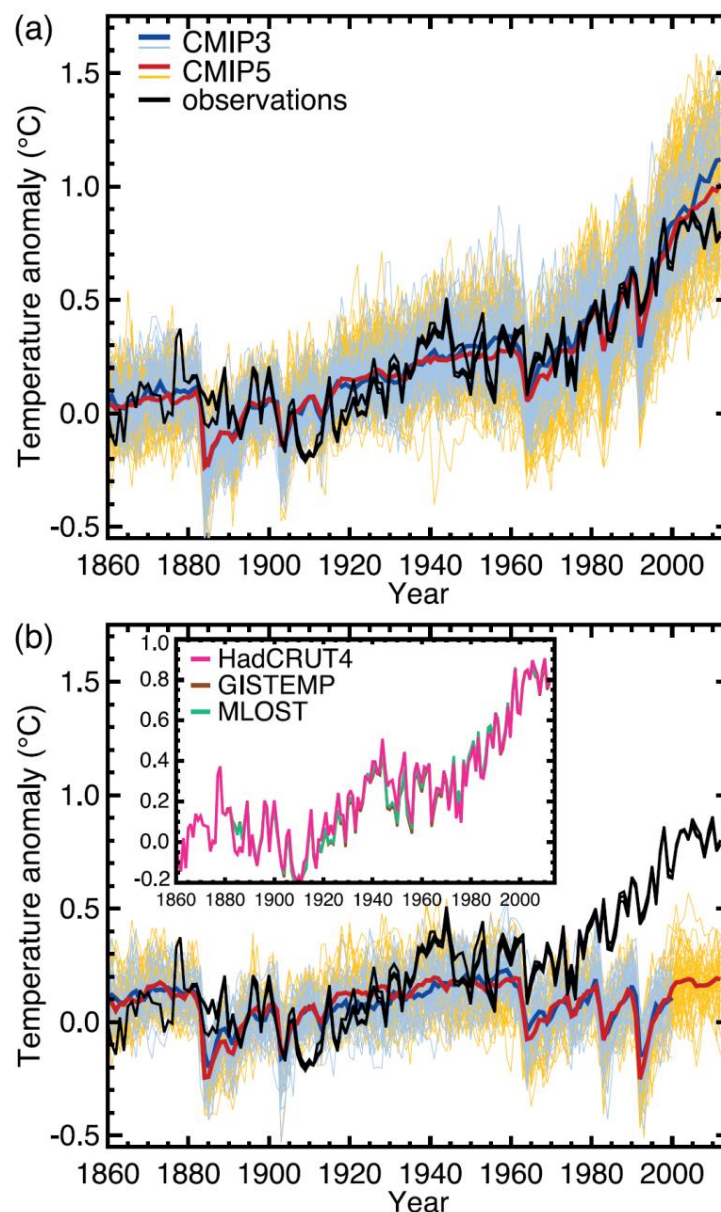
(sempre più complessi e complicati)



Sviluppo di modelli off-line  
L'intensità del colore indica un  
miglioramento nei modelli

# I modelli (ESM) sono affidabili?

Solo quando si utilizza in input l'effetto serra prodotto dall'uomo, è possibile riprodurre il riscaldamento osservato negli ultimi 50 anni



**Figure TS.9** | Three observational estimates of global mean surface temperature (black lines) from the Hadley Centre/Climatic Research Unit gridded surface temperature data set 4 (HadCRUT4), Goddard Institute for Space Studies Surface Temperature Analysis (GISTEMP), and Merged Land–Ocean Surface Temperature Analysis (MLOST), compared to model simulations (CMIP3 models—thin blue lines and CMIP5 models—thin yellow lines) with anthropogenic and natural forcings (a), natural forcings only (b) and greenhouse gas forcing only (c). Thick red and blue lines are averages across all available CMIP5 and CMIP3 simulations respectively. All simulated and observed data were masked using the HadCRUT4 coverage (as this data set has the most restricted spatial coverage), and global average anomalies are shown with respect to 1880–1919, where all data are first calculated as anomalies relative to 1961–1990 in each grid box. Inset to (b) shows the three observational data sets distinguished by different colours. {Figure 10.1}

# Quante emissioni in futuro?

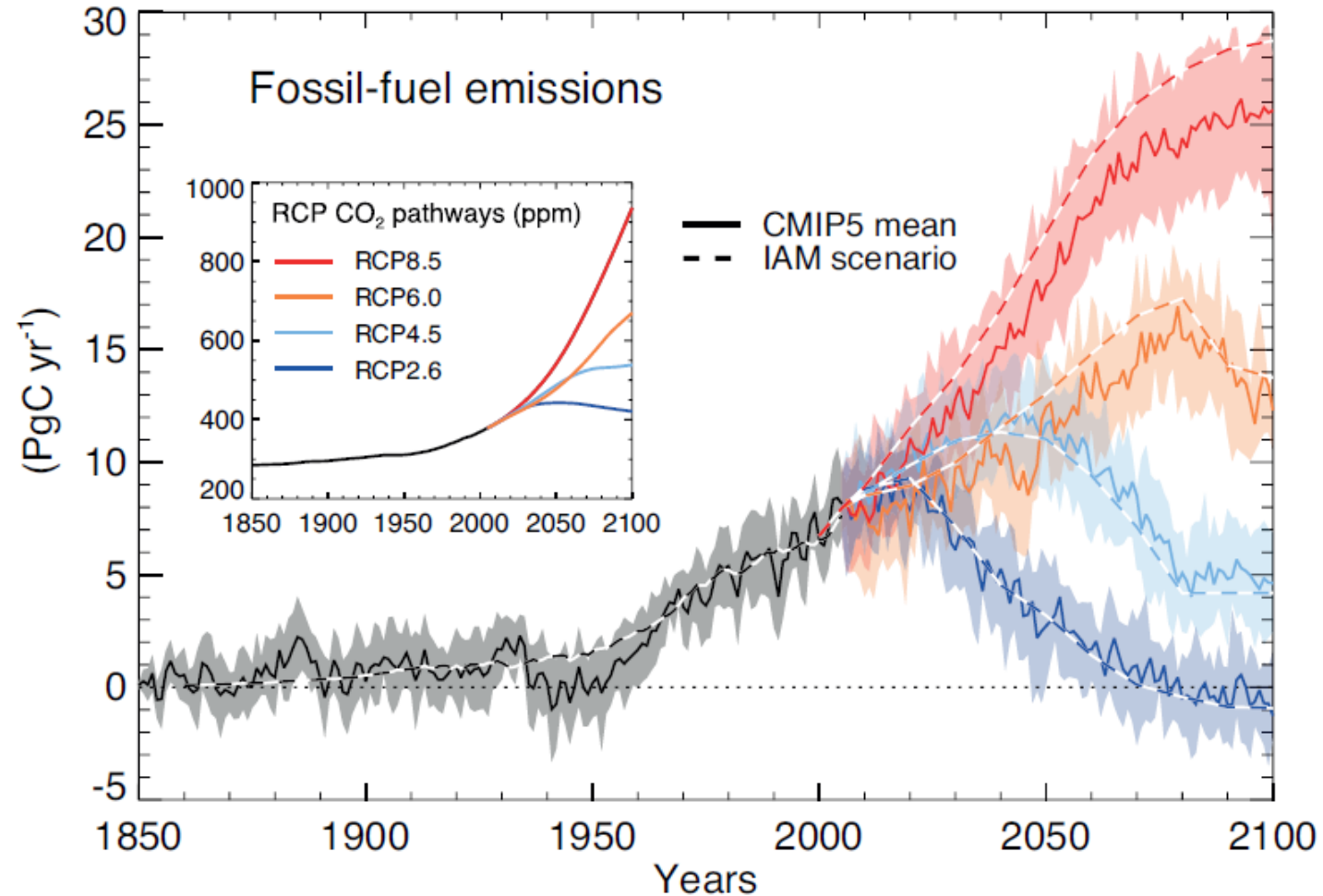
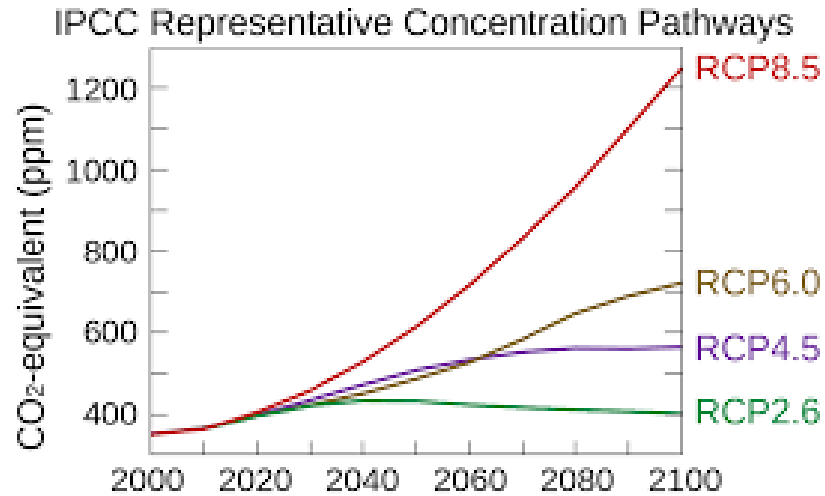


Figura TS.19 | Emissioni di combustibili fossili simulate dai modelli CMIP5 per i quattro scenari RCP. Serie temporali di emissione annuale (PgC all'anno). Le linee tratteggiate rappresentano le stime storiche e le emissioni RCP calcolate dai modelli di valutazione integrata (IAM) utilizzati per definire gli scenari RCP. Le linee solide (valori medi) e le aree colorate (una deviazione standard) mostrano i risultati degli ERS dell'esperimento CMIP5

# Proiezioni climatiche future

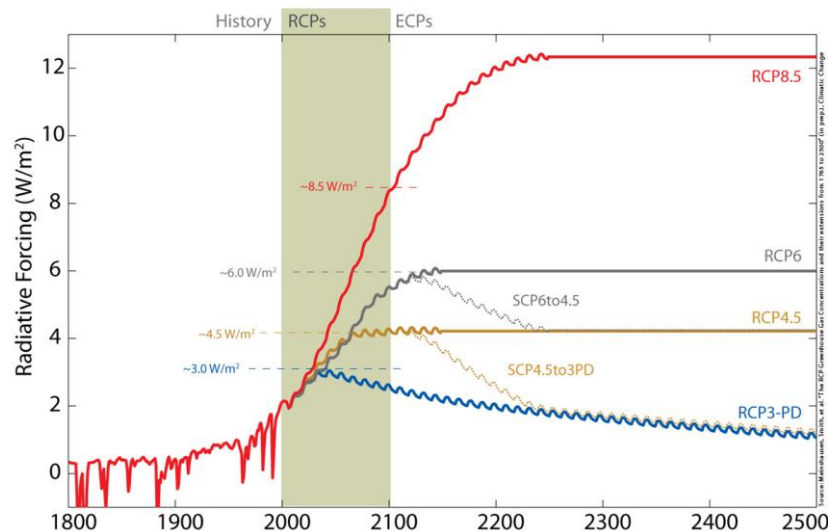
Nell'AR5 e AR6 si usano quattro scenari principali: i

## **Representative Concentration Pathways (RCP)**



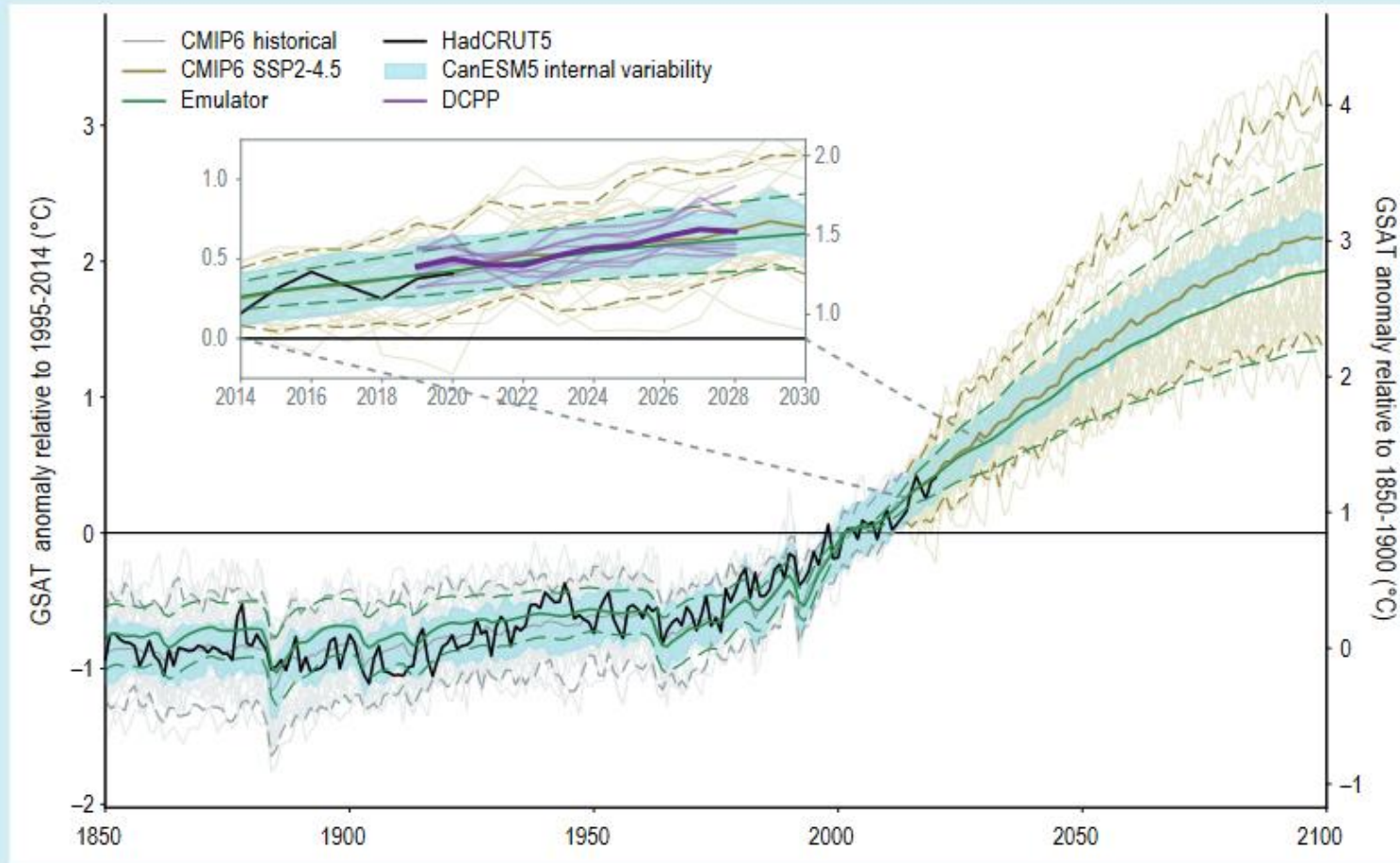
➤ 4 nuovi scenari: RCP identificati dalle forzanti radiative nel 2100:

- **RCP2.6:** perchè  $+2.6 \text{ Wm}^{-2}$  nel 2100
  - RF raggiunge un picco e poi decresce – questo è uno scenario di mitigazione forte
  - È richiesto un trattato con forte riduzione delle emissioni
- **RCP4.5:** perchè  $+4.5 \text{ Wm}^{-2}$  nel 2100
  - RF si stabilizza nel 2100 – questo è uno scenario di mitigazione debole
- **RCP6.5:** perchè  $+6.5 \text{ Wm}^{-2}$  nel 2100
  - RF continua a crescere dopo il 2100, per alcuni decenni
- **RCP8.5:** perchè  $+8.5 \text{ Wm}^{-2}$  nel 2100
  - RF è ancora in forte aumento dopo il 2100 e richiederà un secolo aggiuntivo per stabilizzarsi



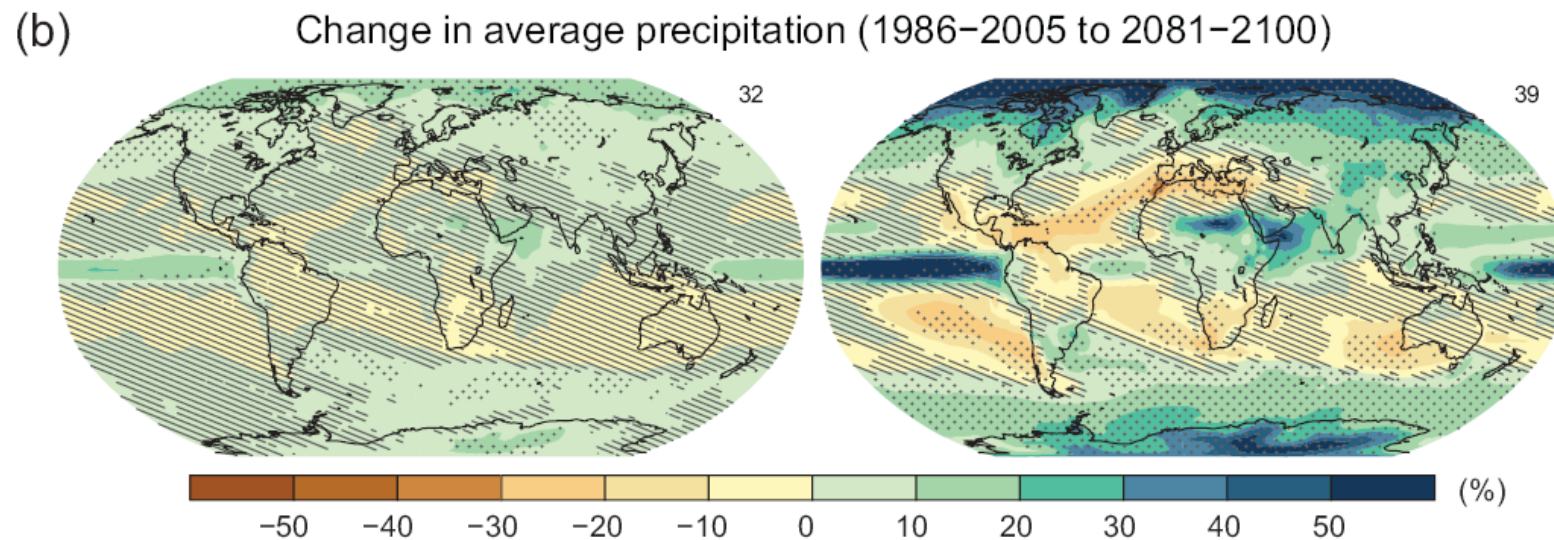
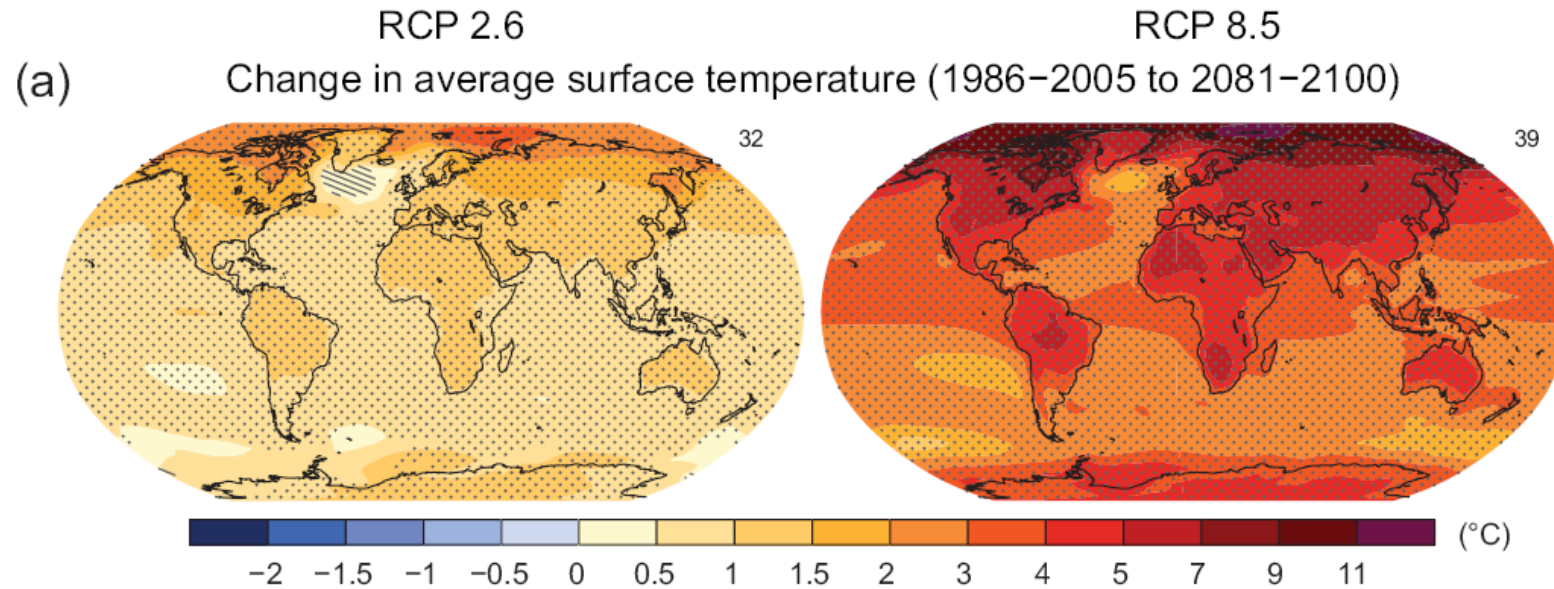
# Temperatura media globale

Box 4.1 (continued)



**Box 4.1 Figure 1 | CMIP6 annual mean global surface air temperature (GSAT) simulations and various contributions to uncertainty in the projections ensemble.** The figure shows anomalies relative to the period 1995–2014 (left y-axis), converted to anomalies relative to 1850–1900 (right y-axis); the difference between the y-axes is 0.85°C (Cross-Chapter Box 2.3). Shown are historical simulations with 39 CMIP6 models (grey) and projections following scenario SSP2-4.5 (dark yellow; thin lines: individual simulations; heavy line: ensemble mean; dashed lines: 5% and 95% ranges). The black curve shows the observations-based estimate (HadCRUT5; Morice et al., 2021). Light blue shading shows the 50-member ensemble CanESM5, such that the deviations from the CanESM5 ensemble mean have been added to the CMIP6 multi-model mean. The green curves are from the emulator and show the central estimate (solid) and *very likely* range (dashed) for GSAT. The inset shows a cut-out from the main plot and additionally in light purple for the period 2019–2028 the initialized forecasts from eight models contributing to DCP (Boer et al.,

# Distribuzione della temperature media globale (2 scenari)



# 2100: temperatura superficiale

(2 scenari)

Figure SPM.8

**1 – 1,5 °C Aumento**



RCP 2.6

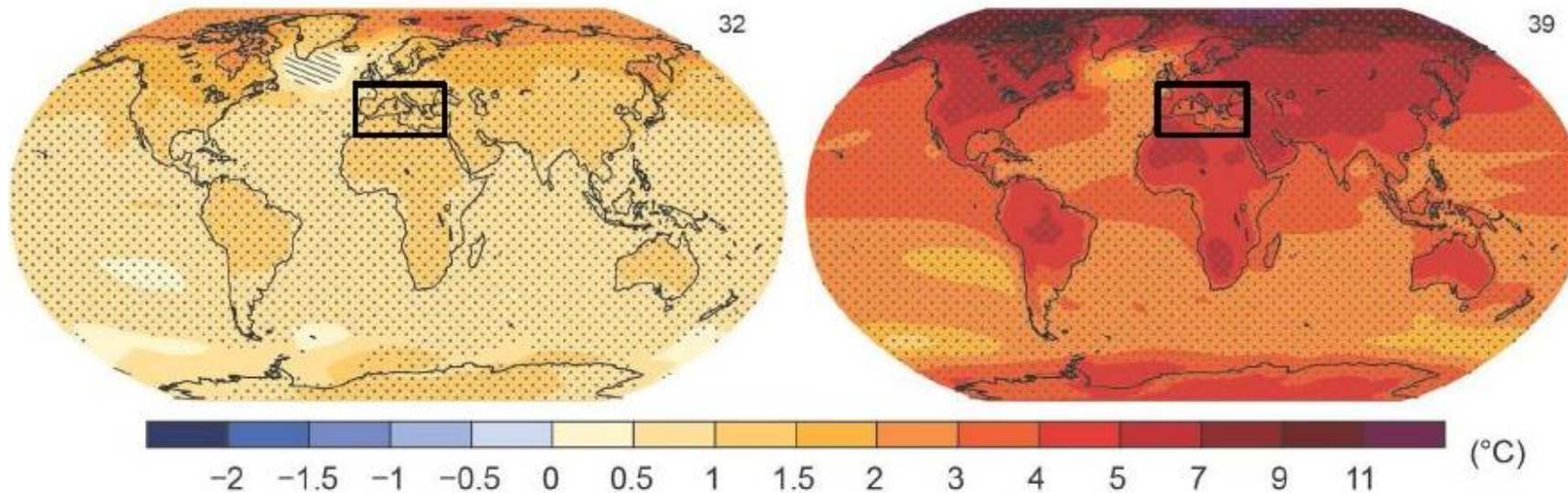
**4 – 7 °C Aumento**



RCP 8.5

(a)

Change in average surface temperature (1986–2005 to 2081–2100)



(°C)

ipcc

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

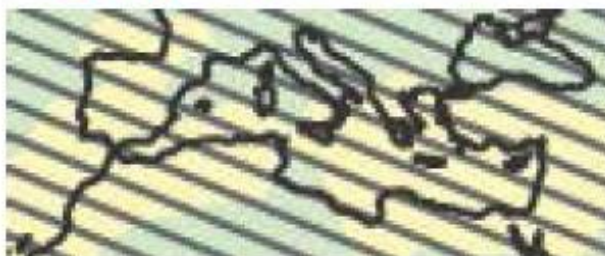
# 2100: precipitazione media

Figure SPM.8

(2 scenari)

ipcc  
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change

**10% Riduzione**



RCP 2.6

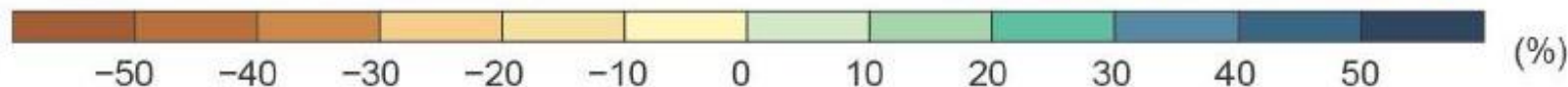
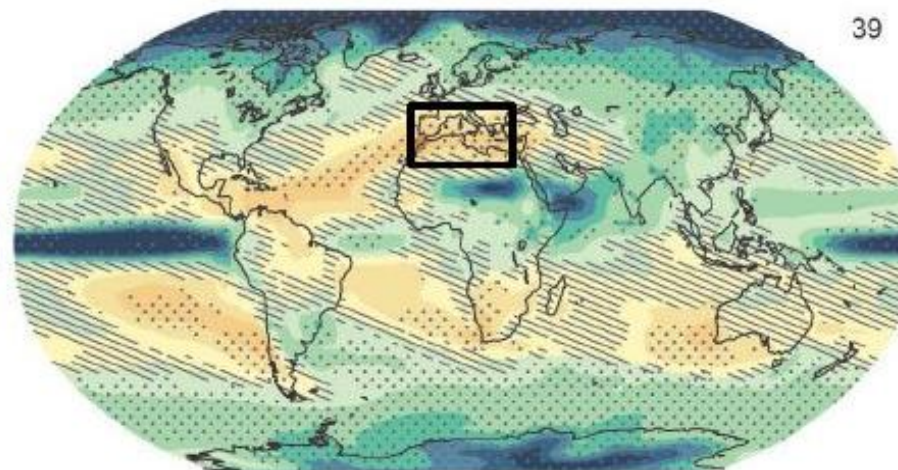
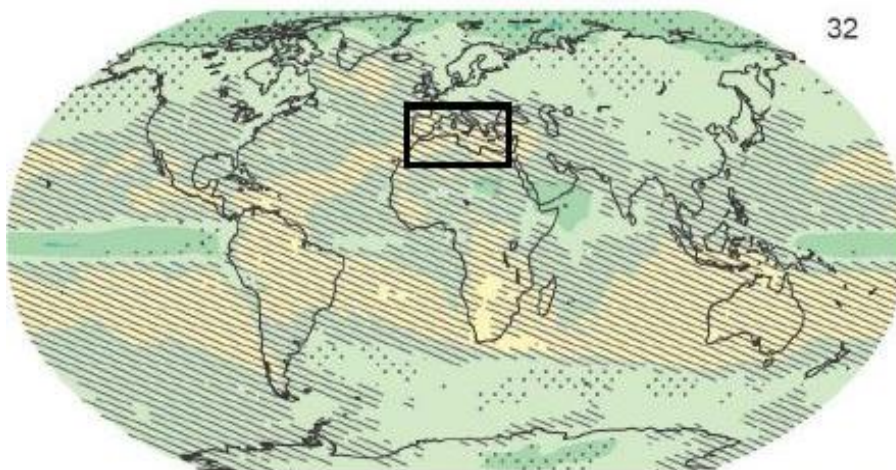
**10-20% Riduzione**



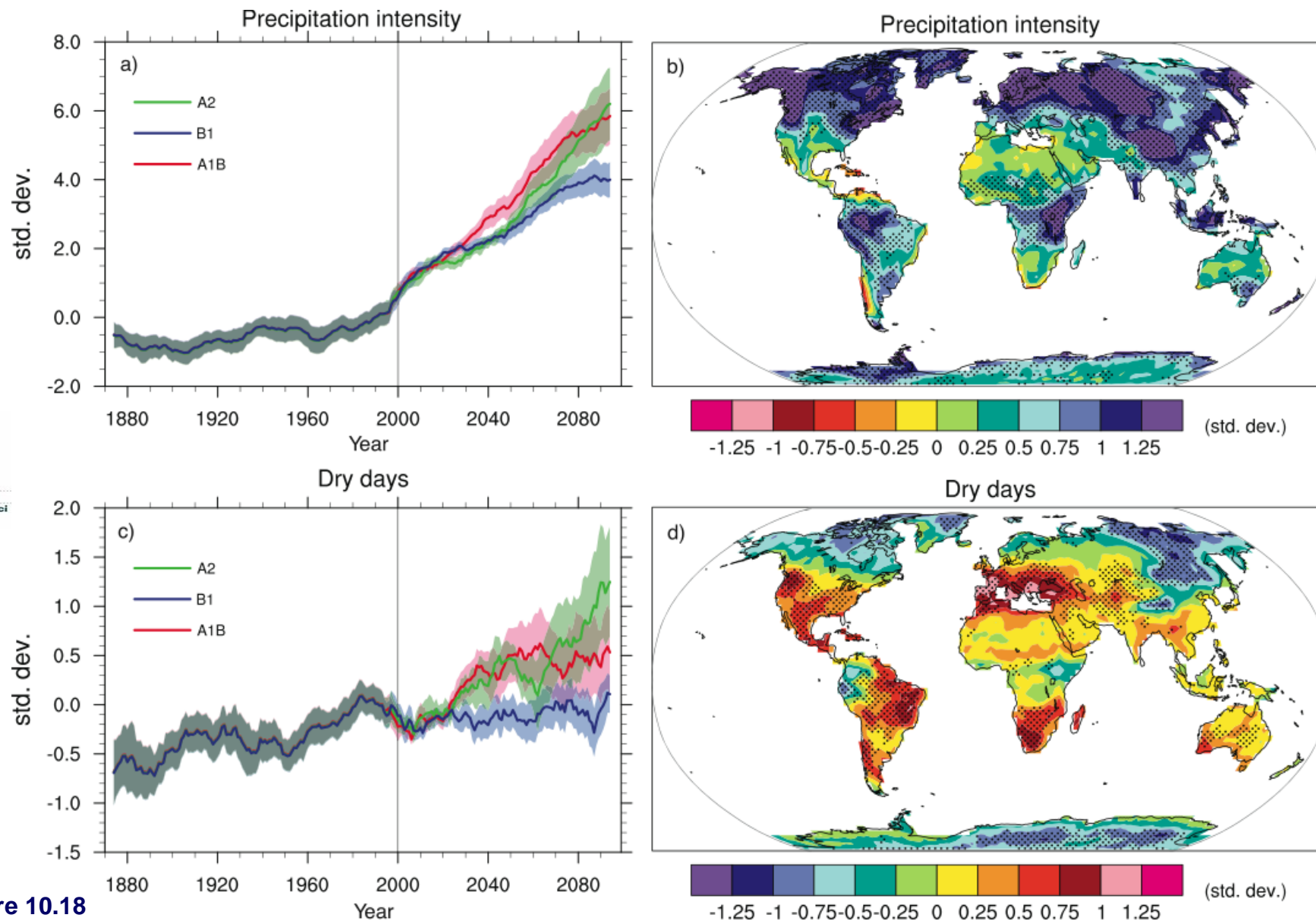
RCP 8.5

(b)

Change in average precipitation (1986–2005 to 2081–2100)



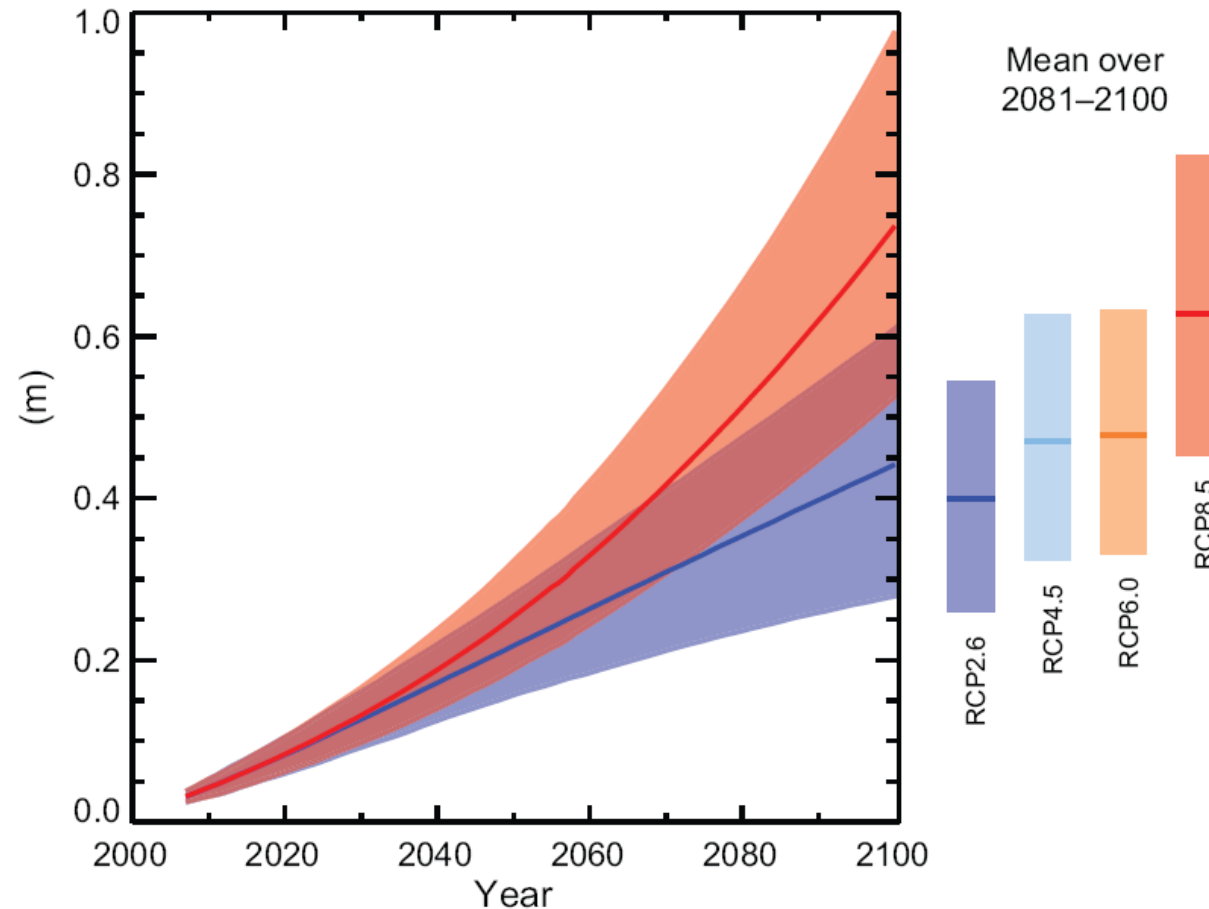
# Continua la «tropicalizzazione» dei regimi di precipitazioni



IPCC WG1-AR4, Figure 10.18

# Il livello degli oceani

continuerà ad aumentare durante questo secolo e oltre (*praticamente certo*):



**RCP2.6** (2081-2100): *likely range:* **26 to 55 cm**

**RCP8.5** (2081-2100): *likely range:* **45 to 82 cm**

# Le medie annue sull'Europa

Figura 1: Variazione della temperatura media annua entro la fine del secolo<sup>1</sup>

Temperatura: variazione della temperatura media annua [°C]

Temperature: change in mean annual temperature [°C]

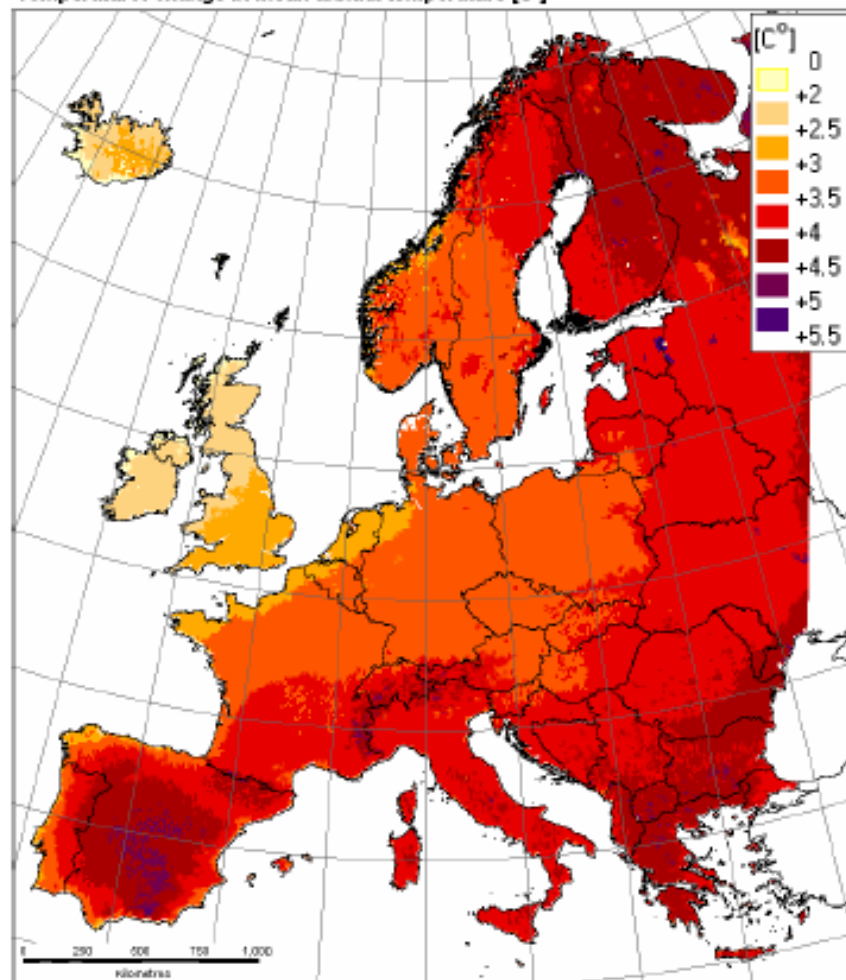
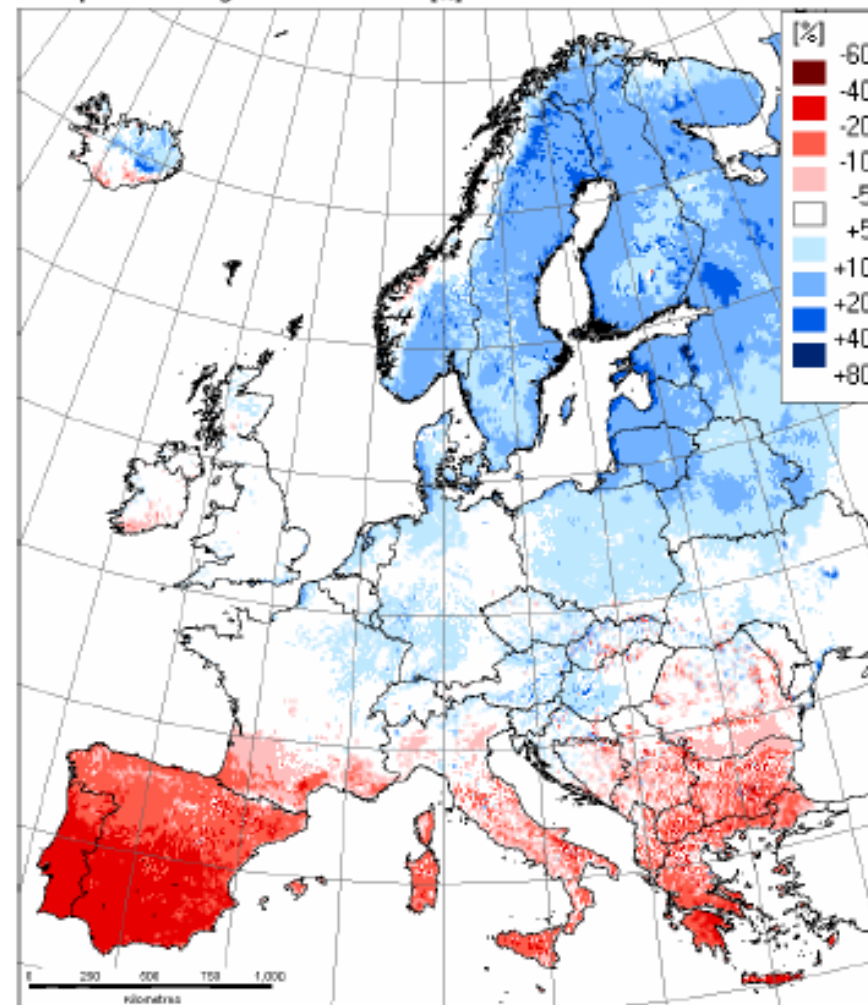


Figura 2: Variazione delle precipitazioni medie annue entro la fine del secolo

Precipitazioni: variazione del volume annuo [%]

Precipitation: change in annual amount [%]

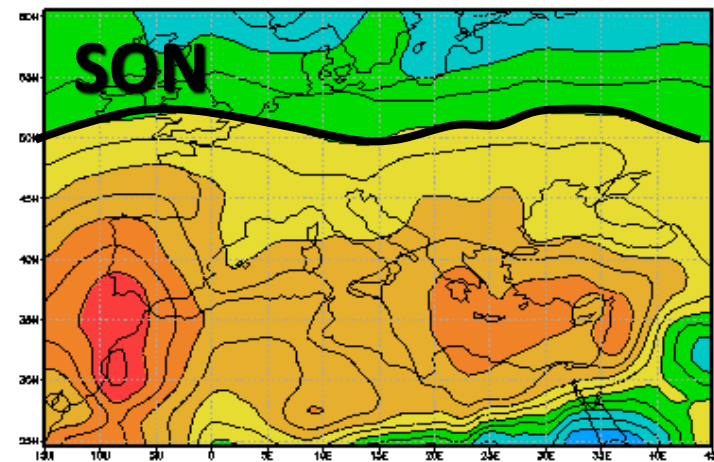
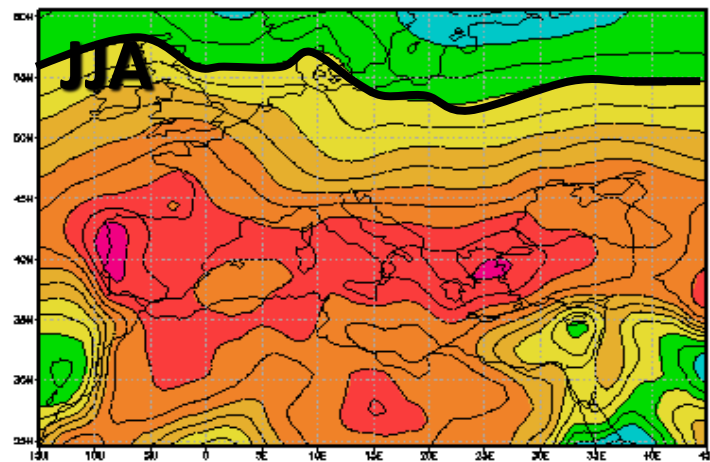
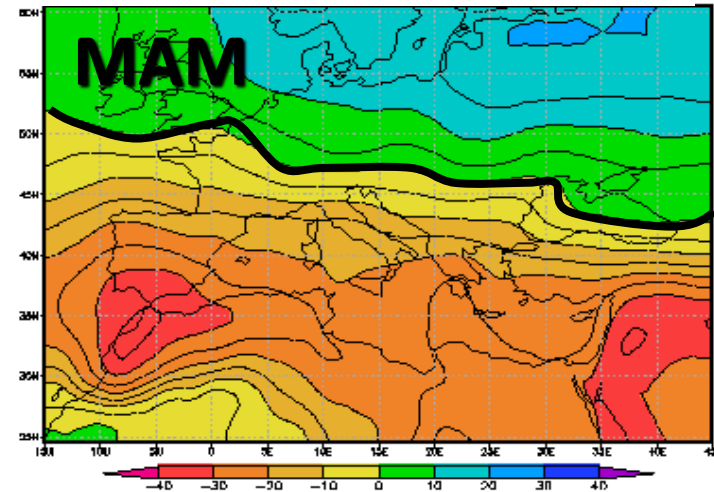
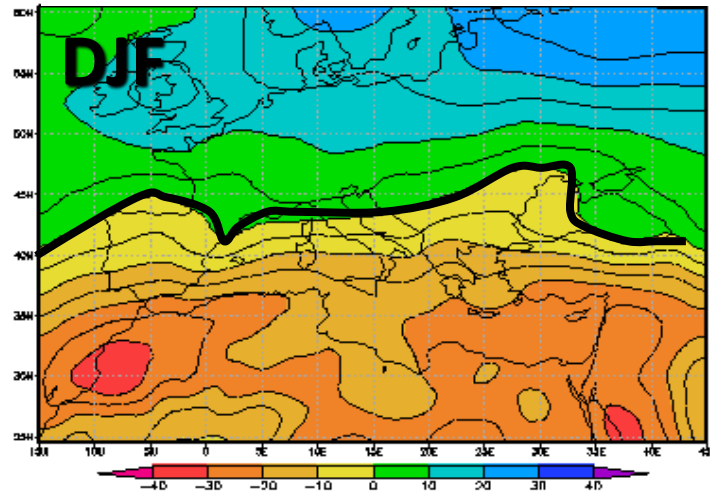


**Scenario A2: (2071-2100) – (1961-1990)**

# Variazione delle precipitazioni stagionali

(%, 2071-2100 meno 1961-1990)

Media ensemble MGME, scenario A1B

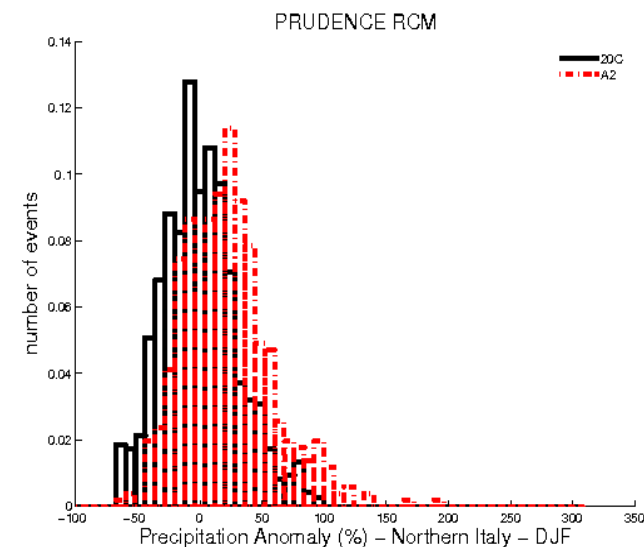
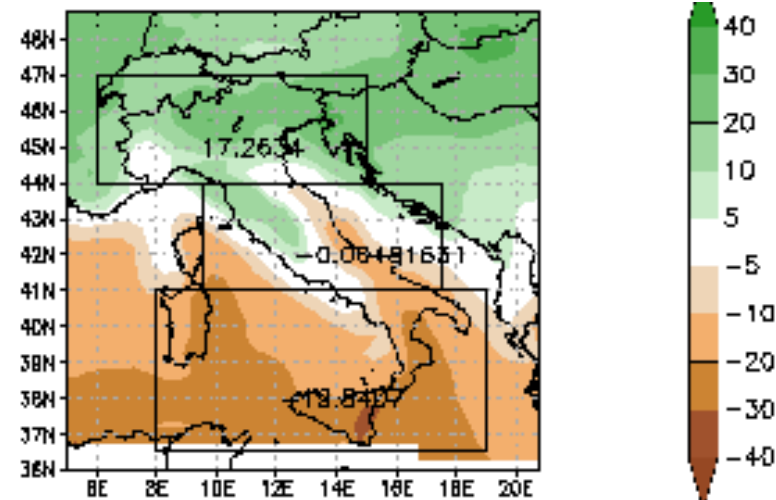


*Giorgi and Lionello, 2007*

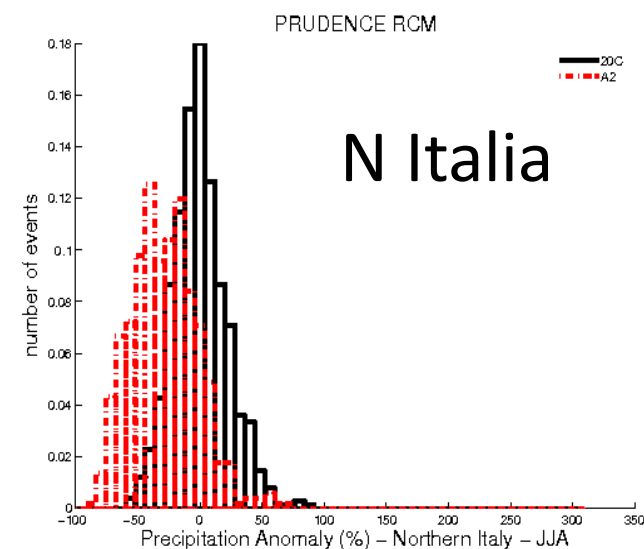
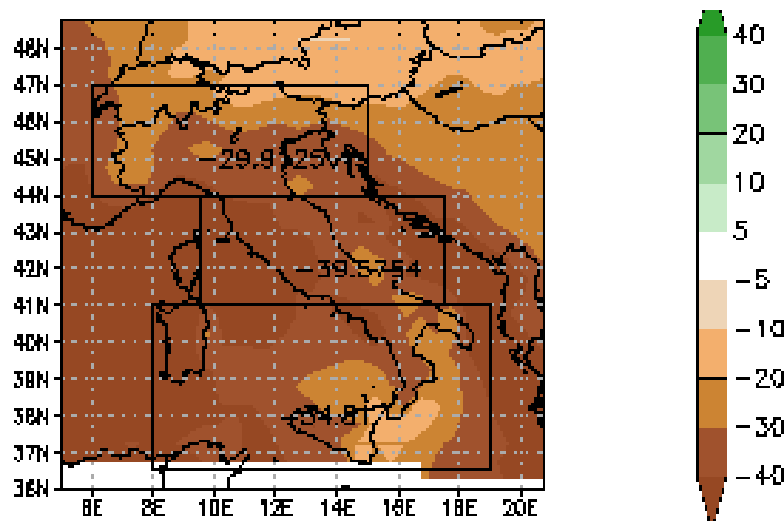
# L'Italia: anomalie di precipitazione

Scenario A2, 10 modelli: (2071-2100) vs (1961-1990) - PRUDENCE

## Inverno



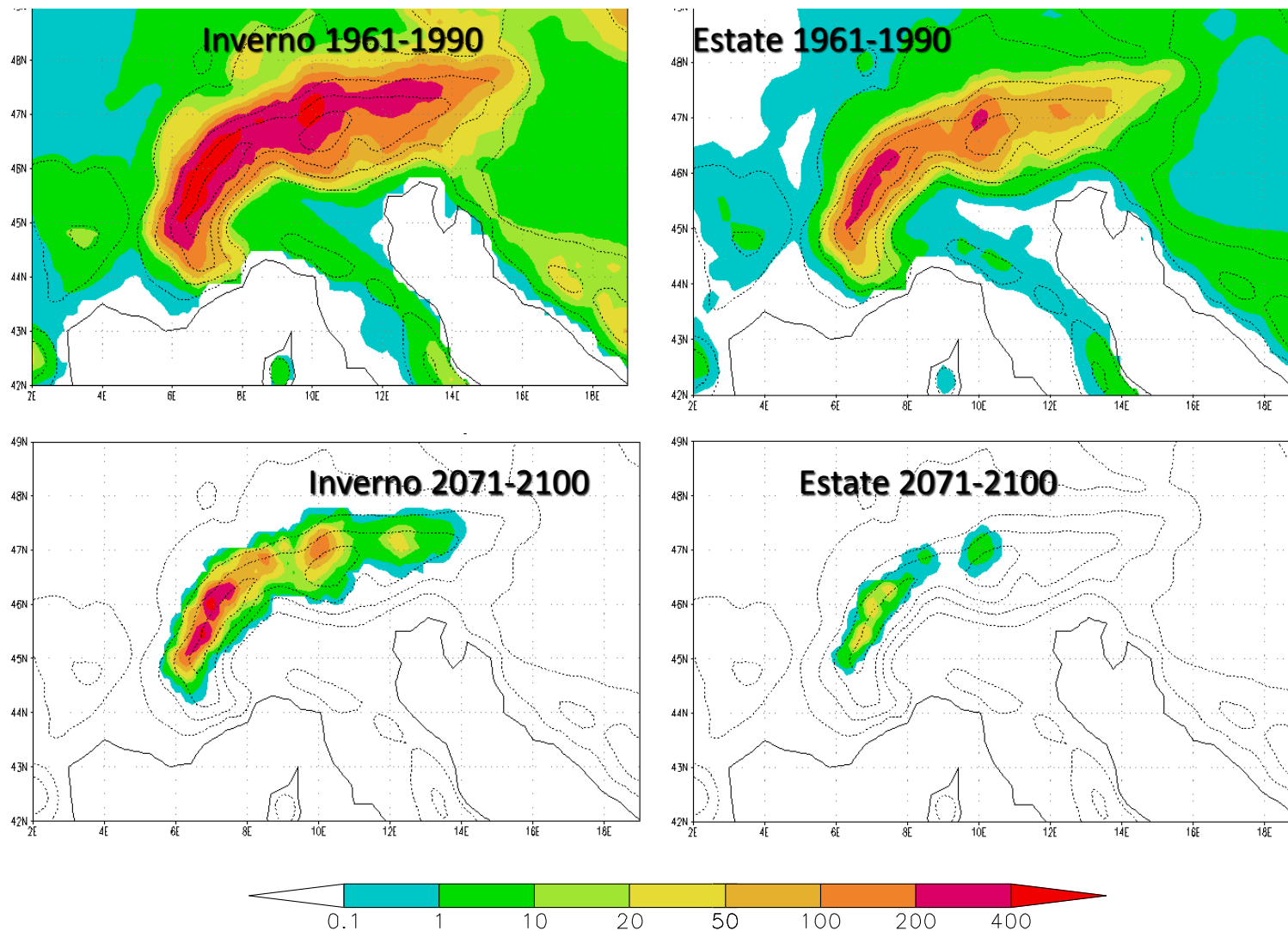
## Estate



N Italia

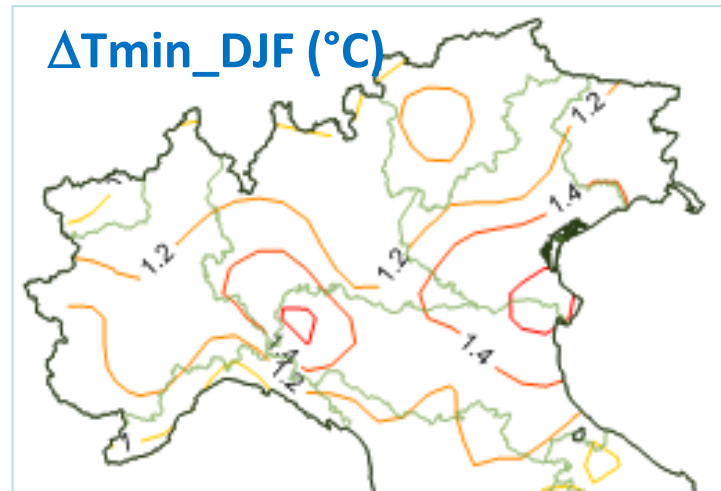
# Copertura neve/ghiaccio sulle Alpi

(RegCM, 20 km, Scenario A2, F. Giorgi, ICTP)

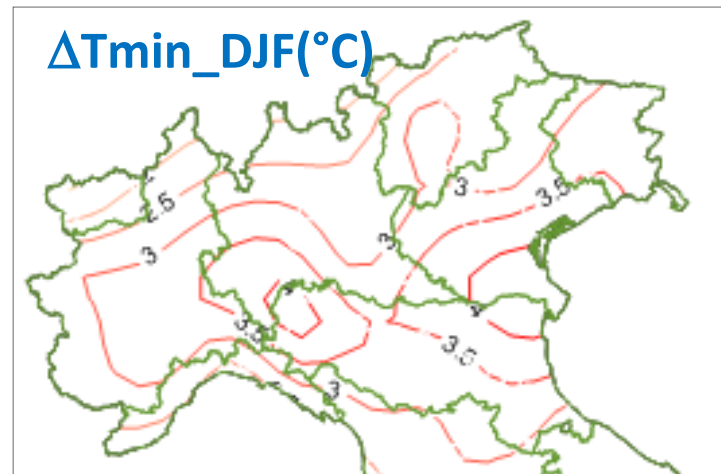
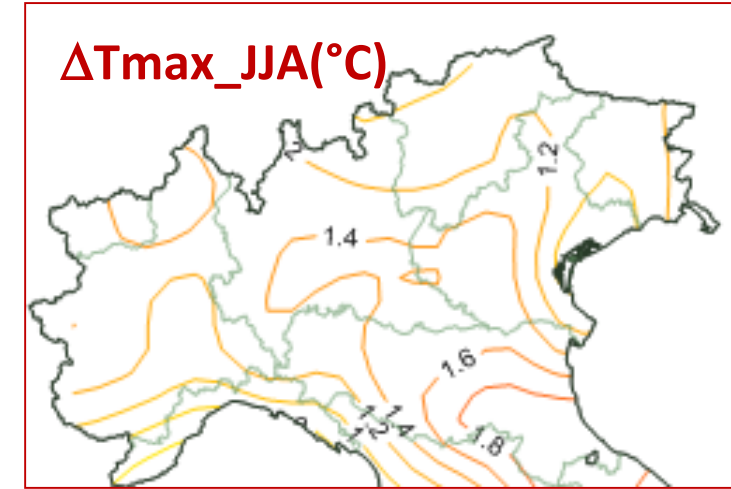


# Variazioni termiche previste

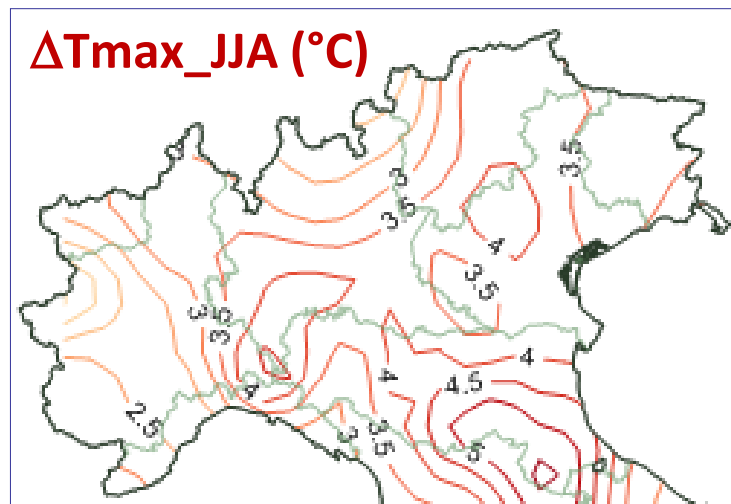
EM 2021-2050 e 2070-2099, scenario A1B



2021-2050



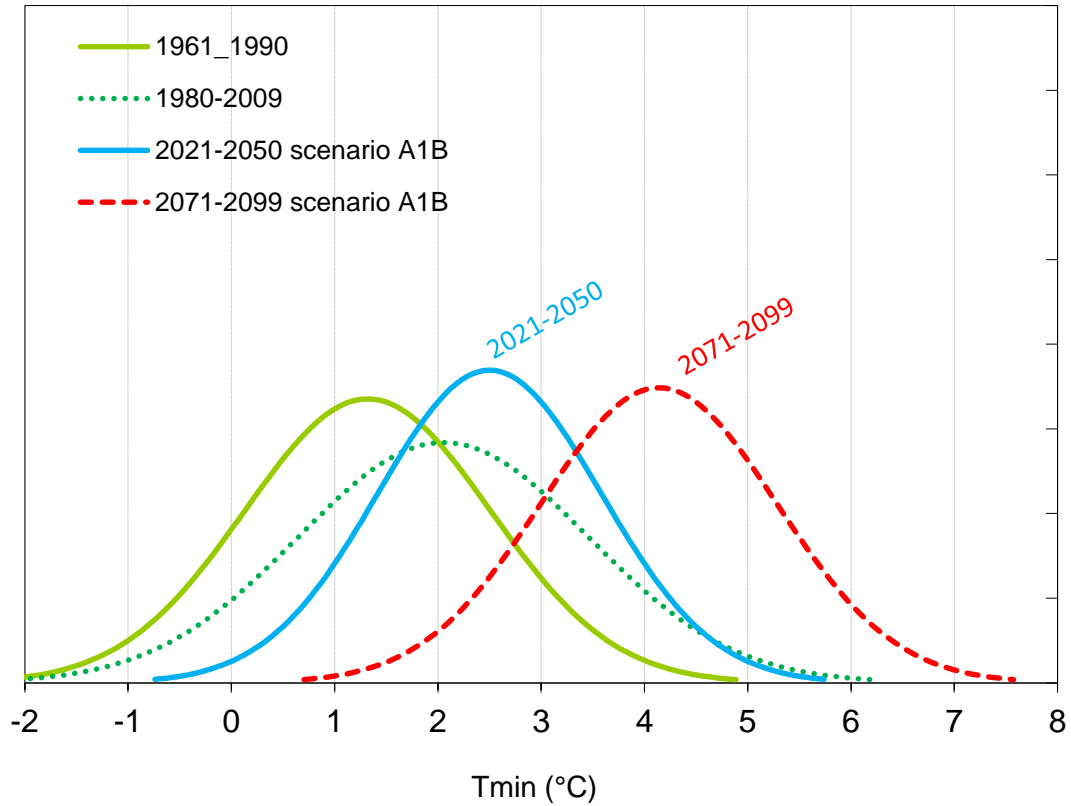
2070-2099



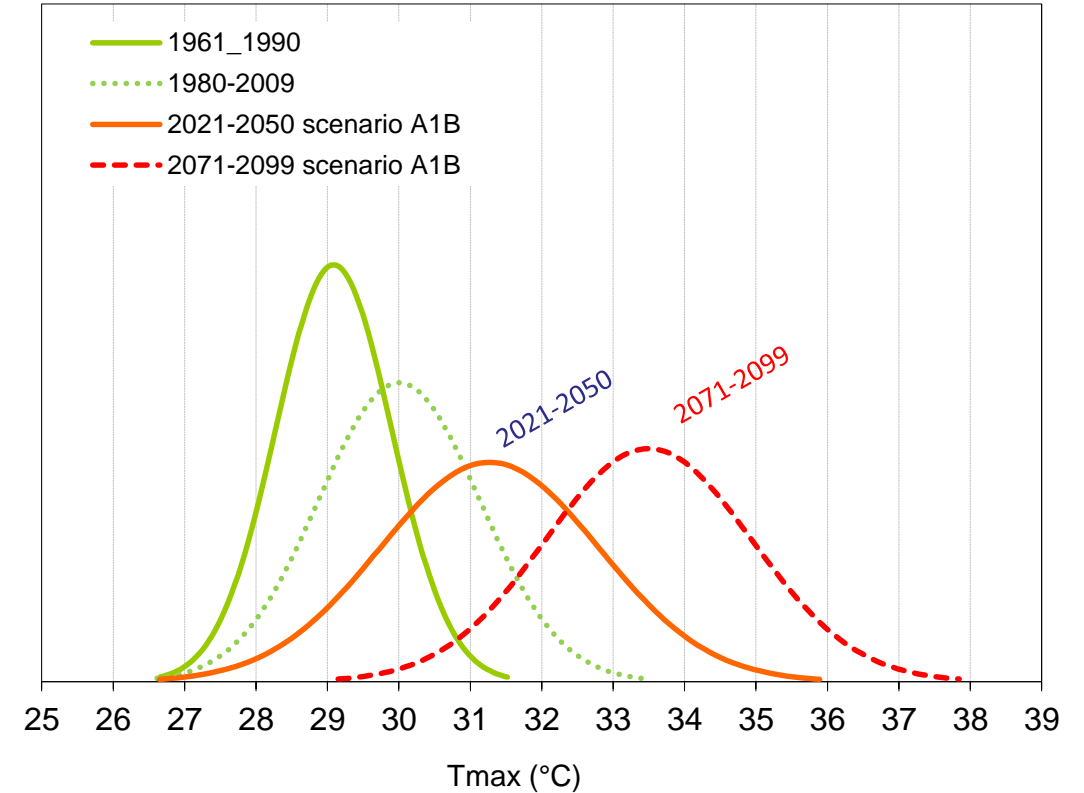
# Distribuzione delle temperature stagionali

## Bologna

### Temperature minime invernali (DJF)

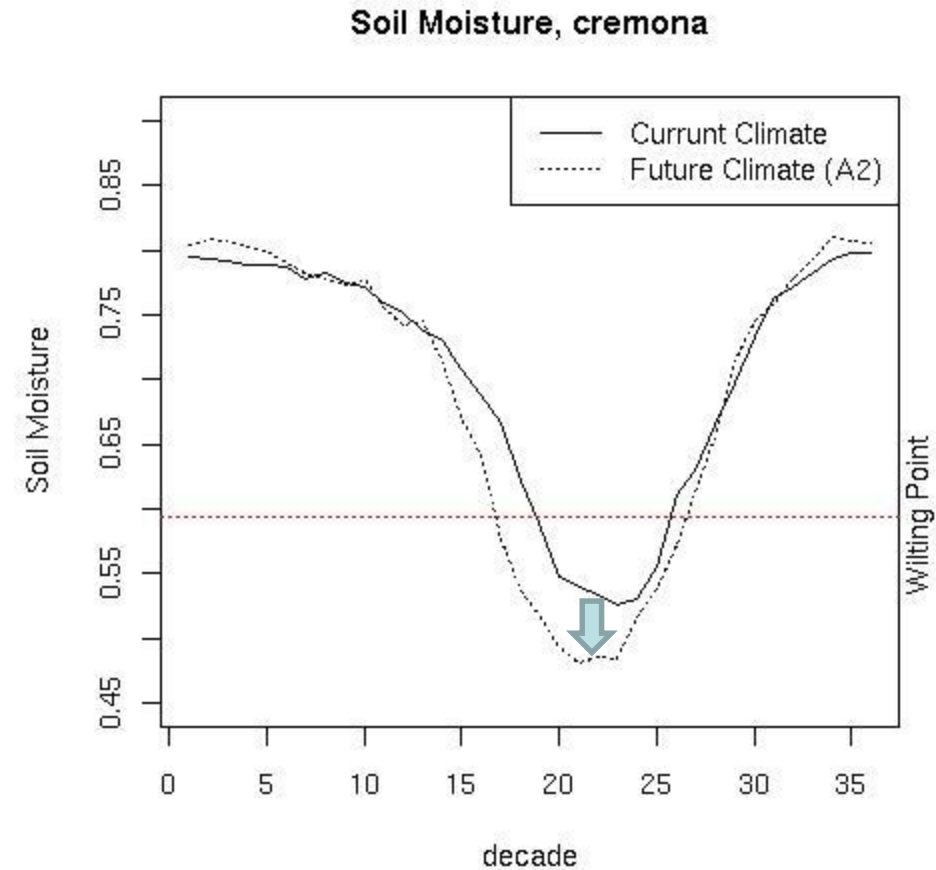
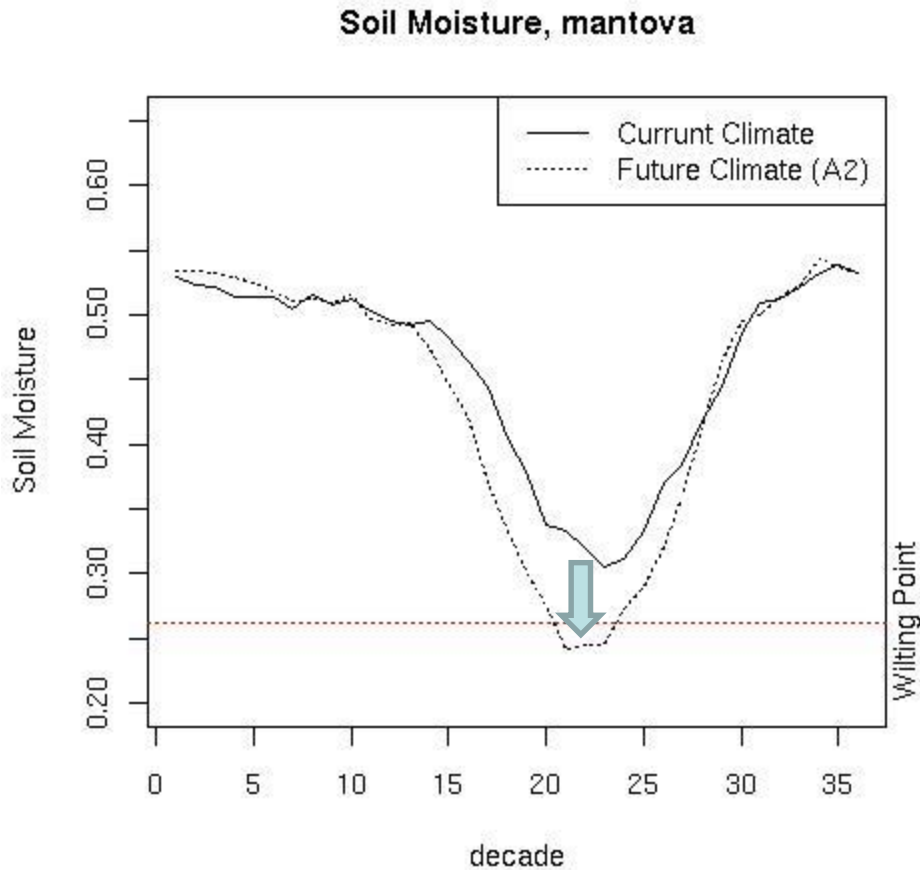


### Temperature massime estive (JJA)



Source: Arpa Emilia-Romagna

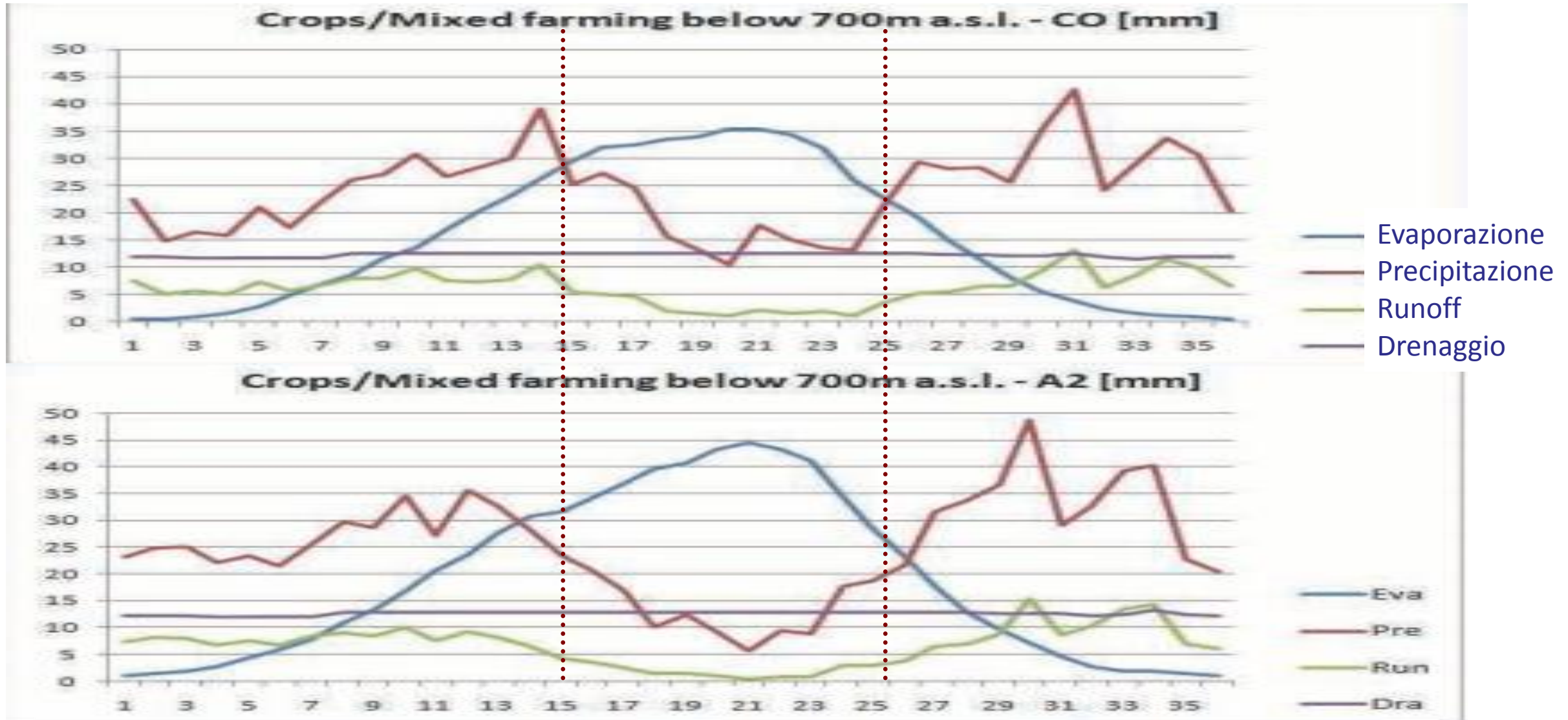
# Umidità del suolo (pianura padana)



- D'estate l'umidità del suolo diminuisce al di sotto del punto di appassimento, o rimane al di sotto del punto di appassimento per un periodo più lungo

Cassardo et al., 2018. Climate change over the high-mountain versus plain areas: Effects on the land surface hydrologic budget in the Alpine area and northern Italy. HESS

# Bilancio idrologico: terreni coltivati in Pianura Padana

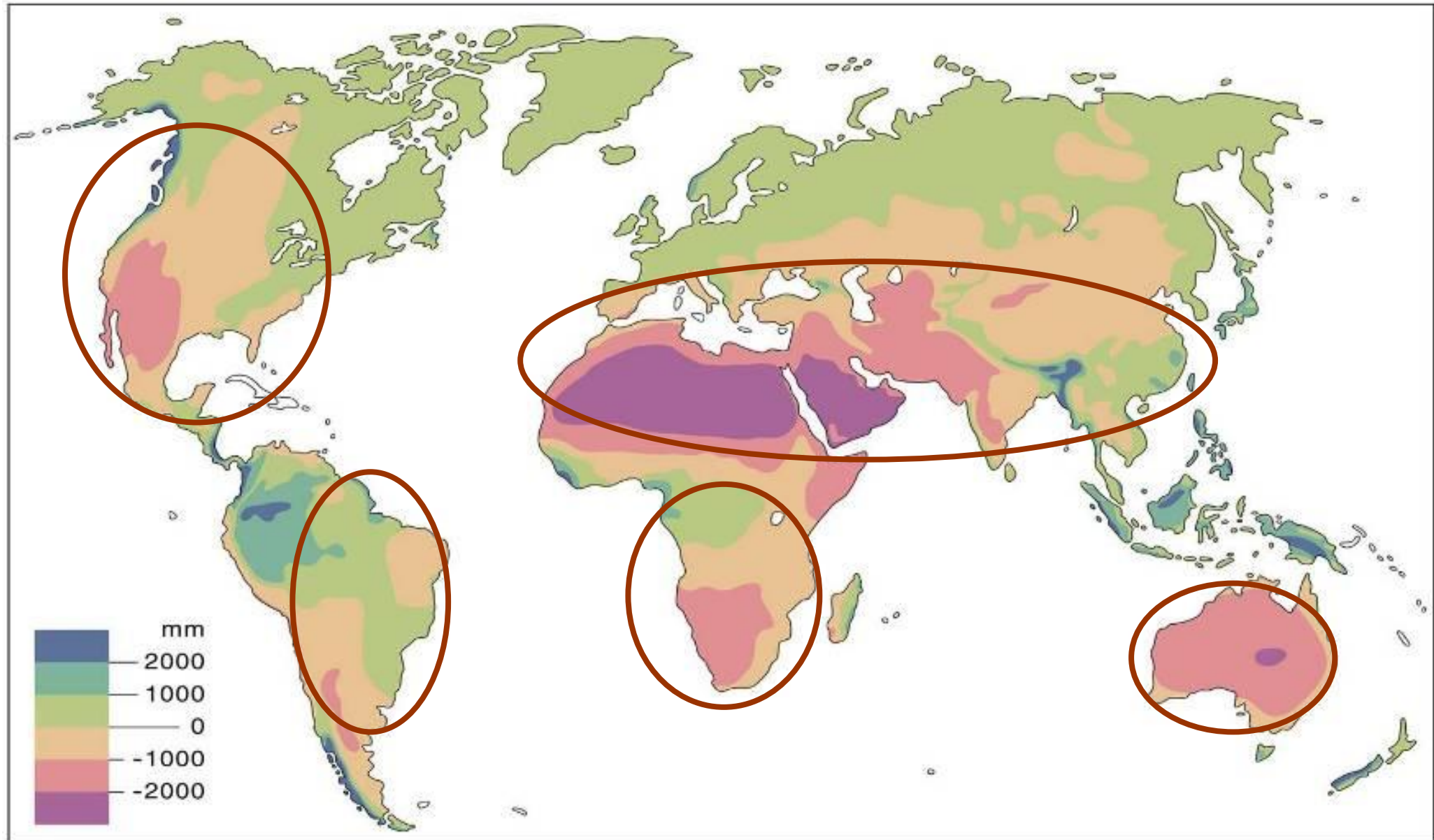


Cassardo et al., 2018. Climate change over the high-mountain versus plain areas: Effects on the land surface hydrologic budget in the Alpine area and northern Italy. HESS

# Effetti dei cambiamenti climatici legati alle risorse idriche

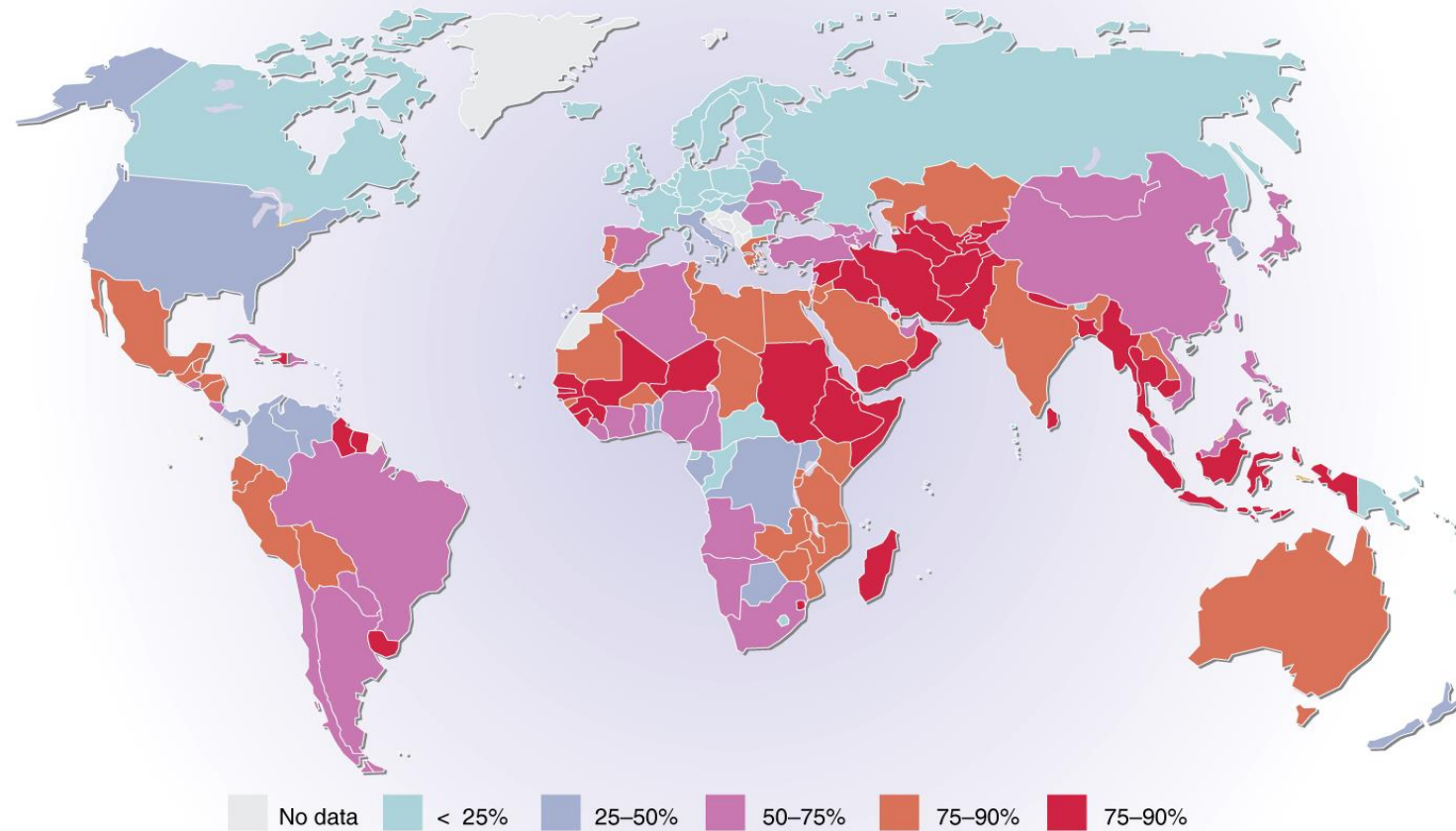
- Diminuzione del manto nevoso e aumento della massa di ghiaccio persa dai ghiacciai e dalle calotte glaciali
- Alluvioni e tempo più instabile
- Diminuzione dei livelli di acque sotterranee
- Aumento dell'erosione e del trasporto di sedimenti dovuto all'acqua
- Aumento della frequenza delle piogge forti
- Aumento del rischio di siccità
- Implicazioni sulla qualità dell'acqua

# Risorse idriche effettive «oggi»

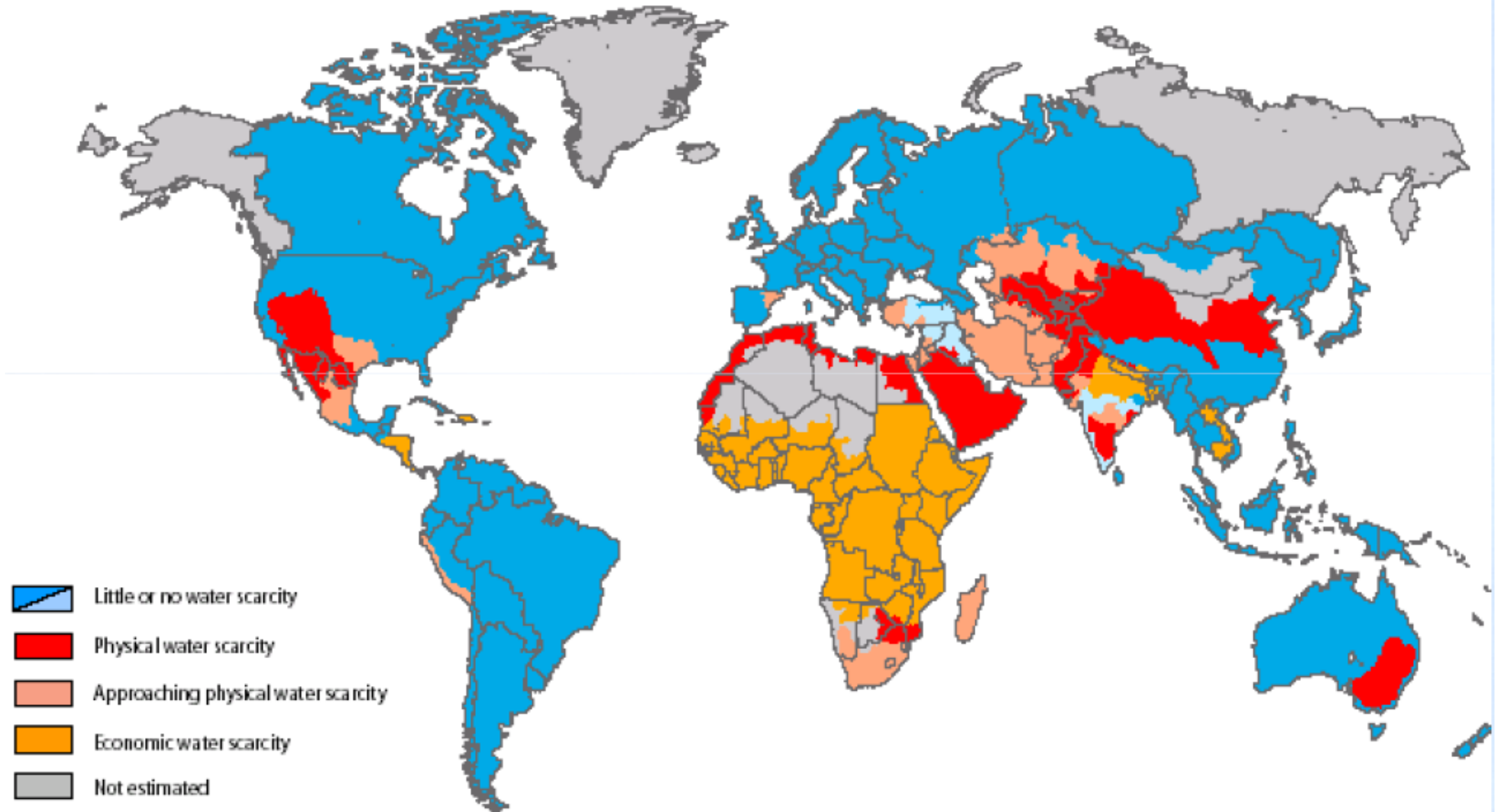


# Consumo di acqua in agricoltura

## Proportion of water withdrawal for agriculture, 2001

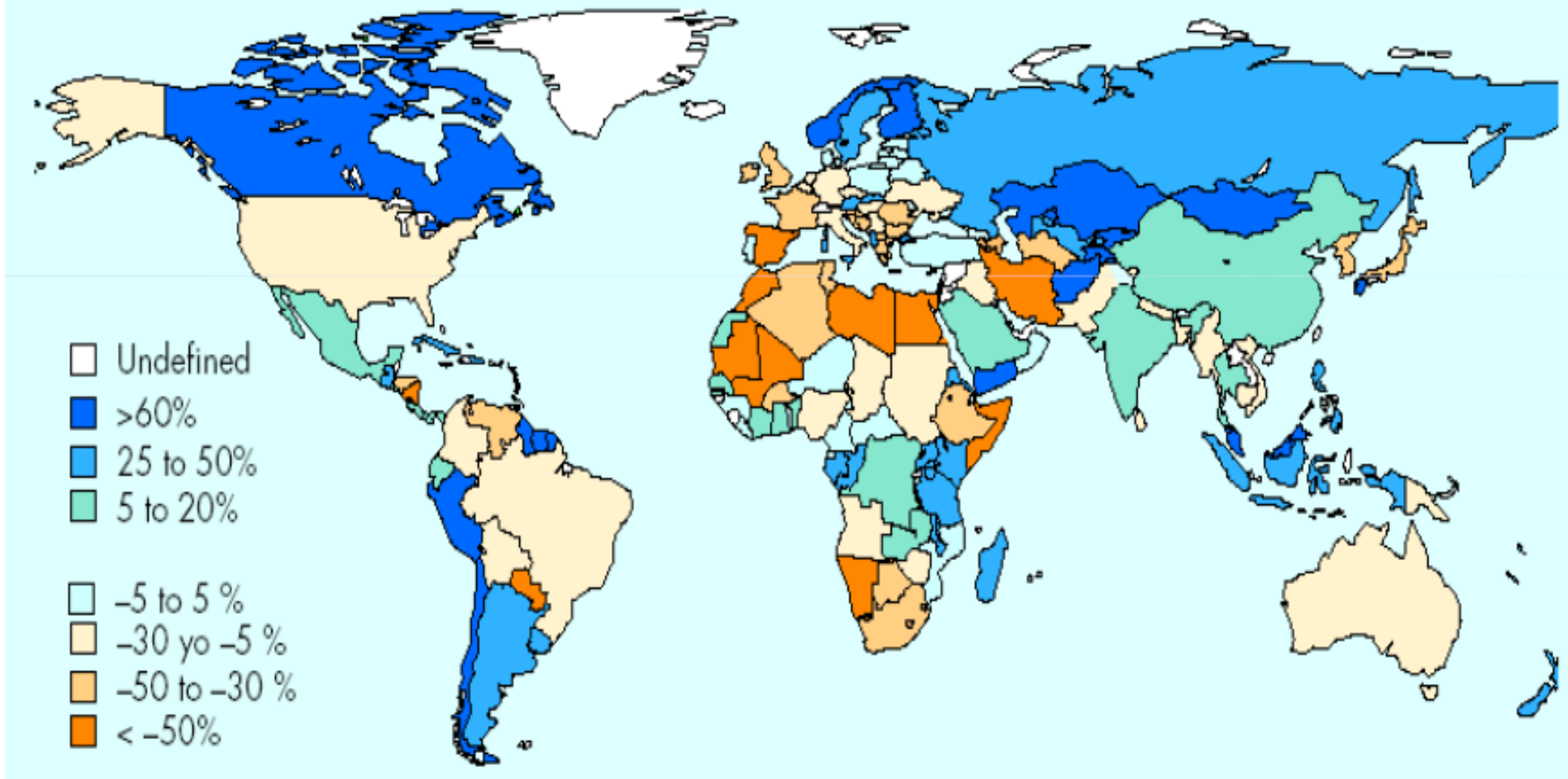


# Aree con scarsità d'acqua «oggi»

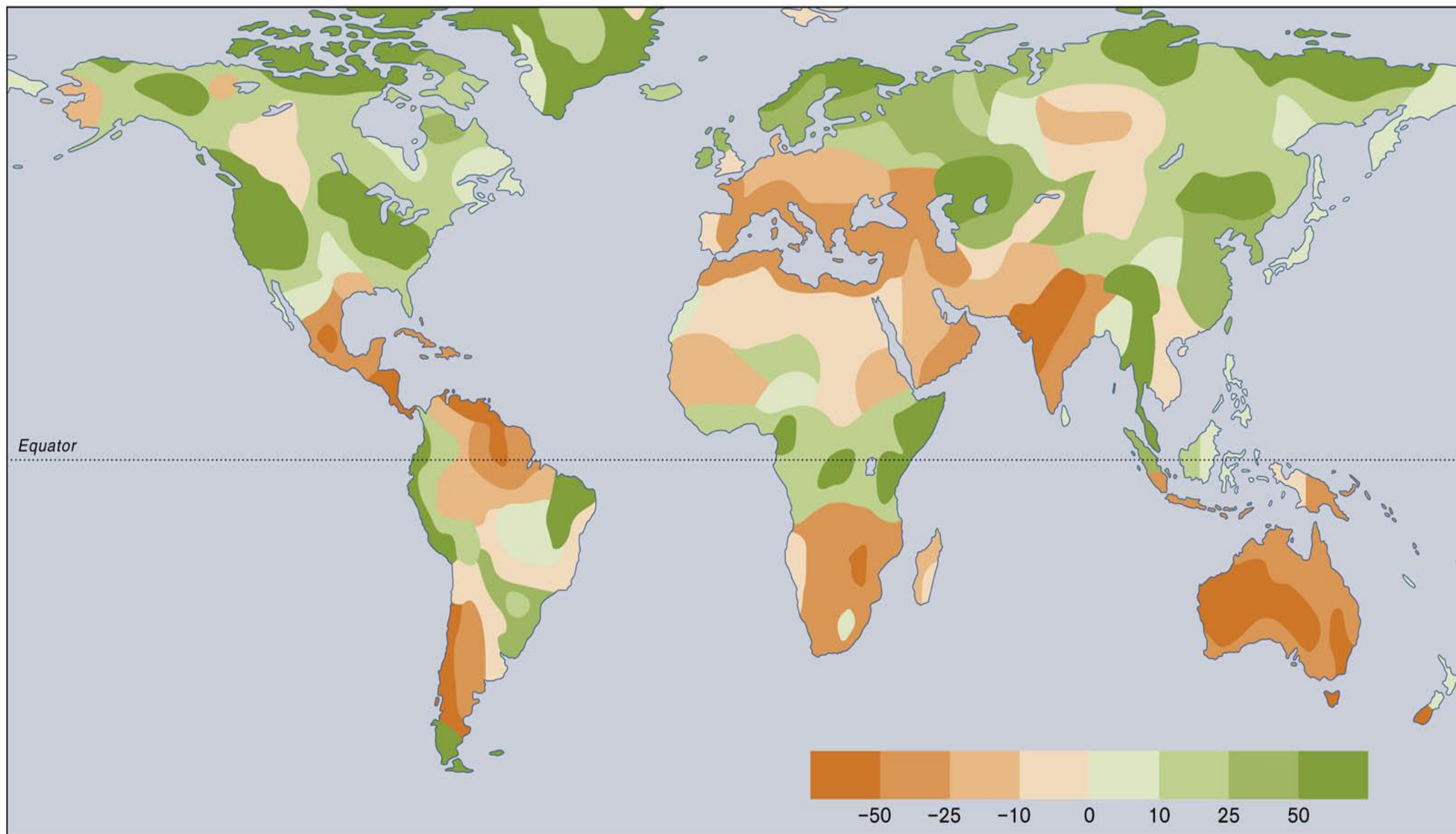


# Variazioni delle precipitazioni nel 2100

## Projected Impacts of Climate Change



# Conseguenze sulle risorse idriche future



# Acqua e cambiamenti climatici



*Water, its availability and quantity will be the most important issues that will put pressure on society and environment as a result of climate change*

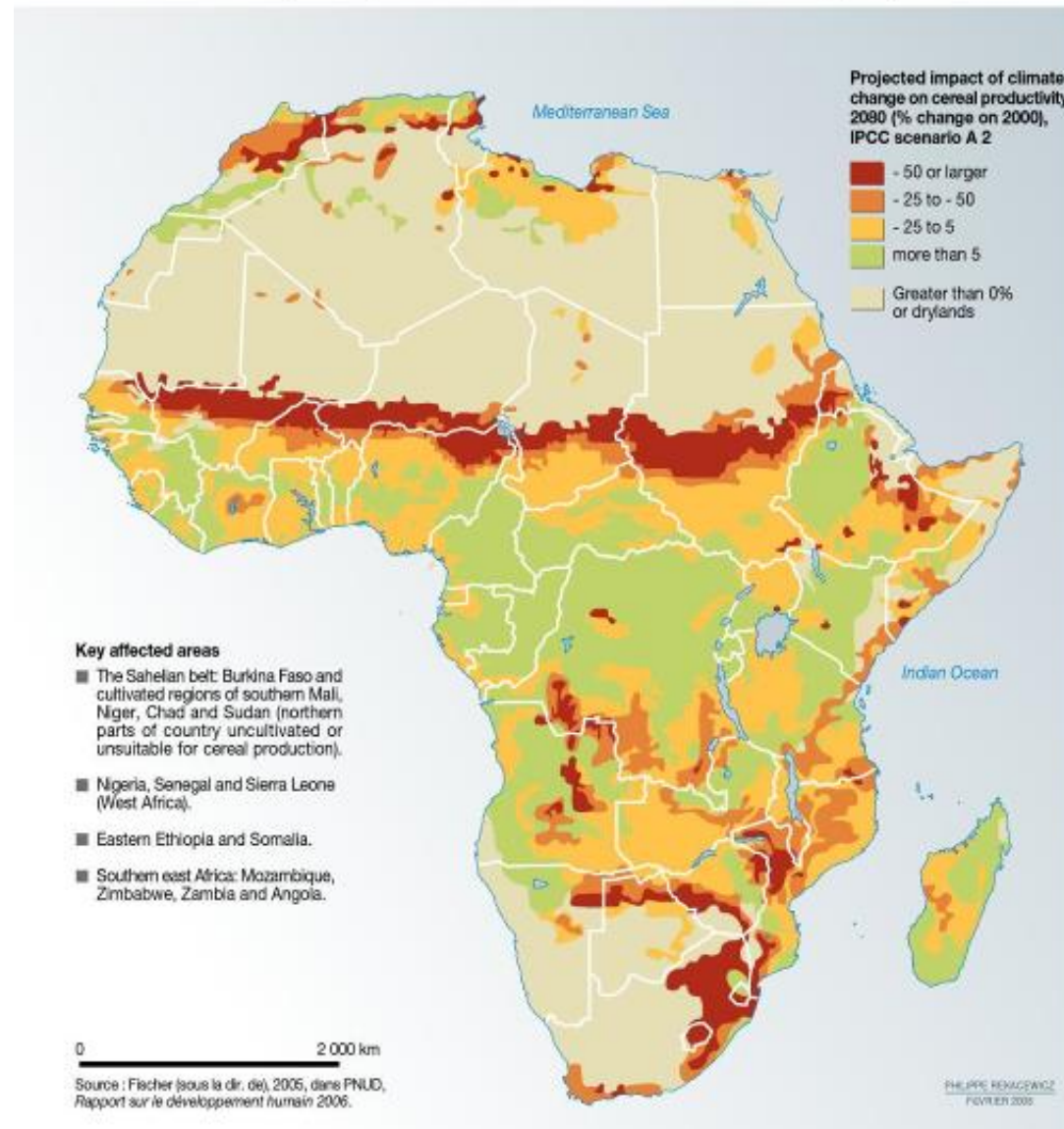
*(IPCC, 2007)*

*L'acqua, la sua disponibilità e quantità saranno le questioni più importanti che metteranno sotto pressione la società e l'ambiente a causa del cambiamento climatico*

# Impatti sulla produttività agricola

Cereal productivity in Sub-Saharan Africa under a scenario of the IPCC that shows CO<sub>2</sub> atmospheric concentrations a level at 520-640 ppm by 2050

## Scenario A2



# Nel frattempo, in Antartide...

