

# Studio e previsioni dello stato del sistema

*Federico Porcù ([federico.porcu@unibo.it](mailto:federico.porcu@unibo.it))  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Università di Bologna*

**un esempio di interazione tra sottosistemi: El nino**

**forzanti sul sistema climatico (GHG)**

**effetto serra (semplice modellino)**

**proiezioni climatiche**

## meccanismi di retroazione (feed back)

una forzatura su una componente del sistema produce un effetto che modifica l'impatto della forzatura

**feed back positivo: l'impatto aumenta**  
*instabilità*

**feed back negativo: l'impatto diminuisce**  
*stabilità*

## feed back negativo



## feed back positivo



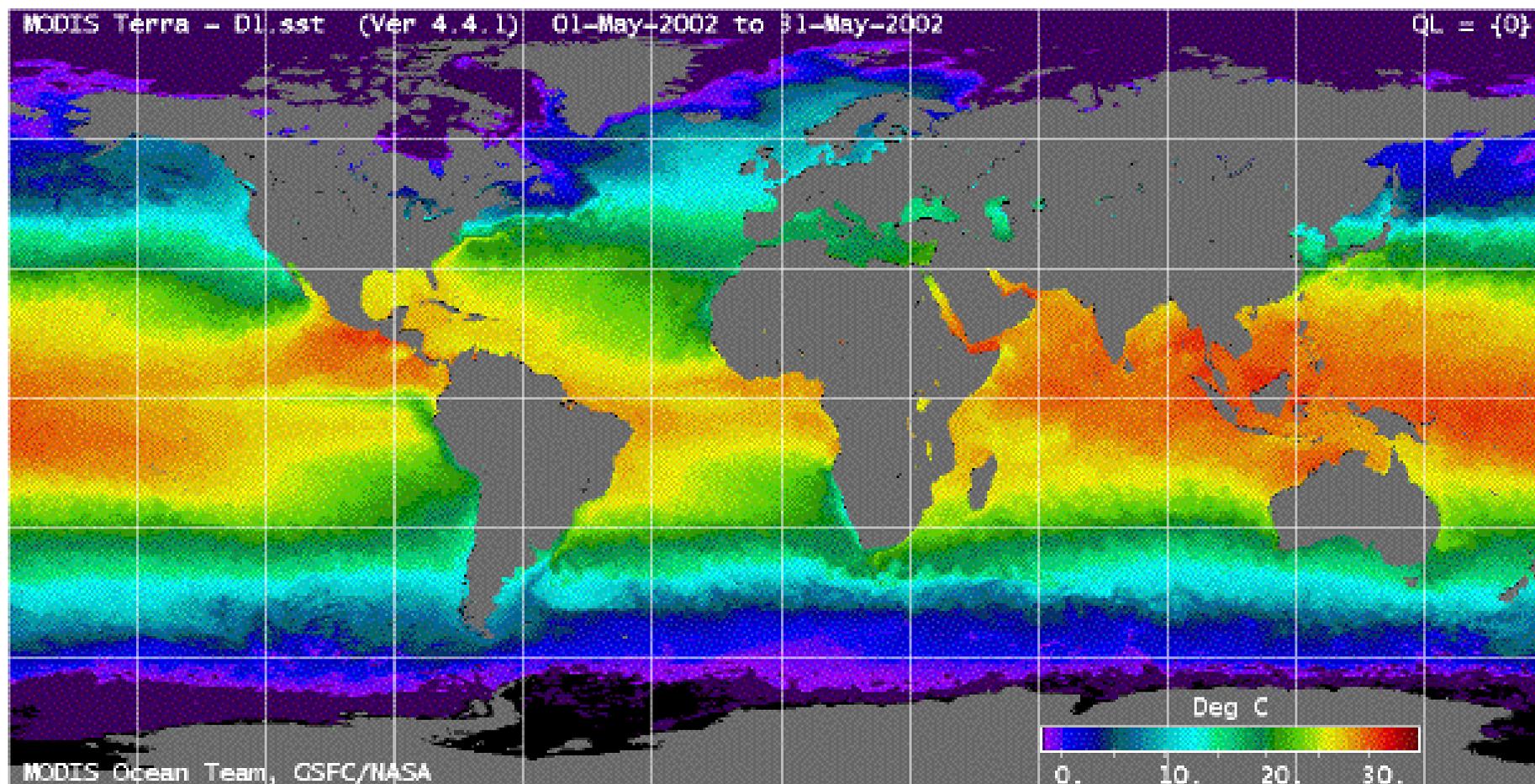
# *El Niño*

---

## **Interazione Atmosfera/Oceano**

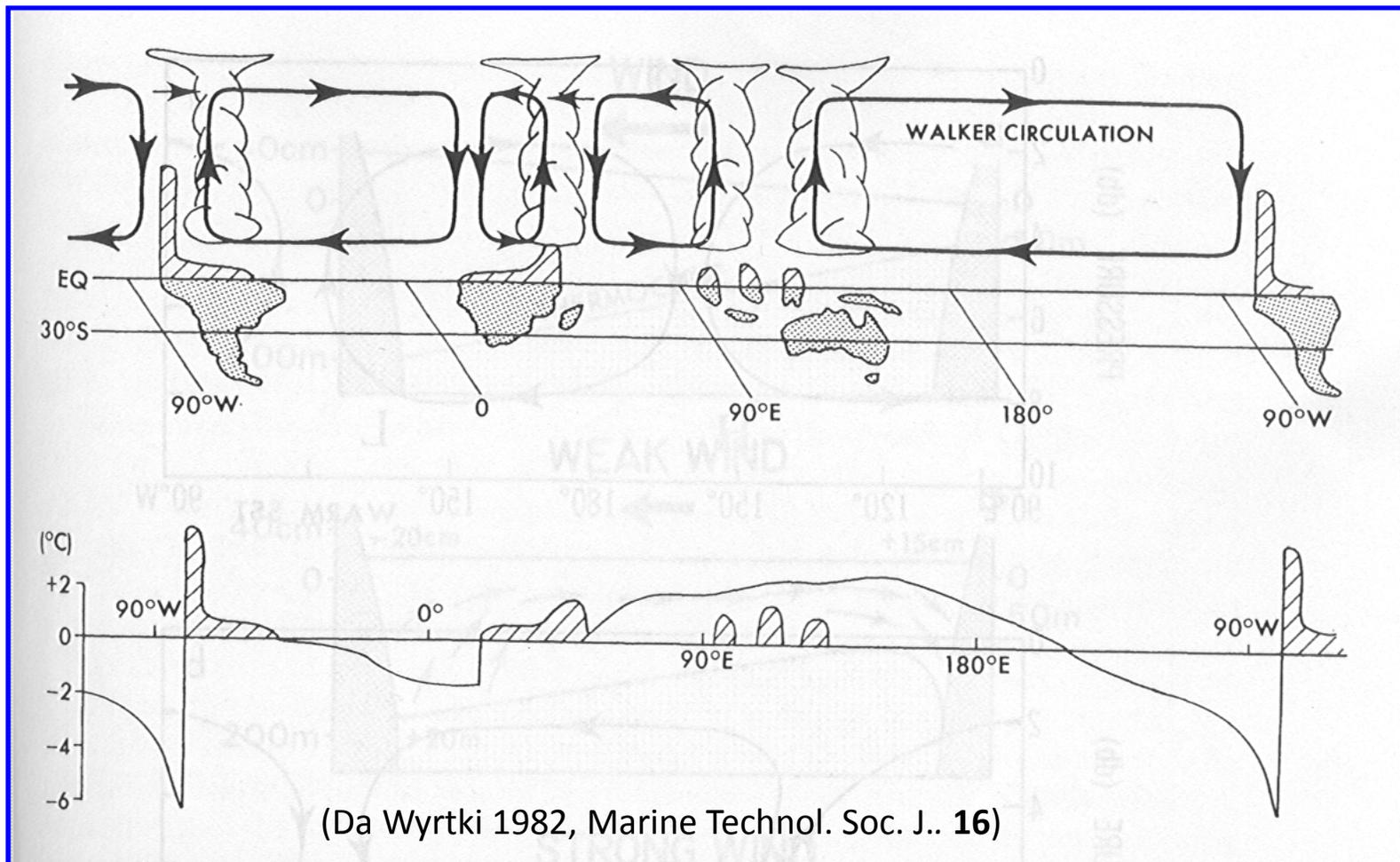
- l'atmosfera influenza l'oceano principalmente a causa dello stress del vento superficiale;**
  
- l'oceano influenza l'atmosfera principalmente a causa di anomalie nella temperatura della sua superficie (*Sea Surface Temperature SST*) e del conseguente flusso verticale di calore sensibile e latente.**

# temperatura media oceanica

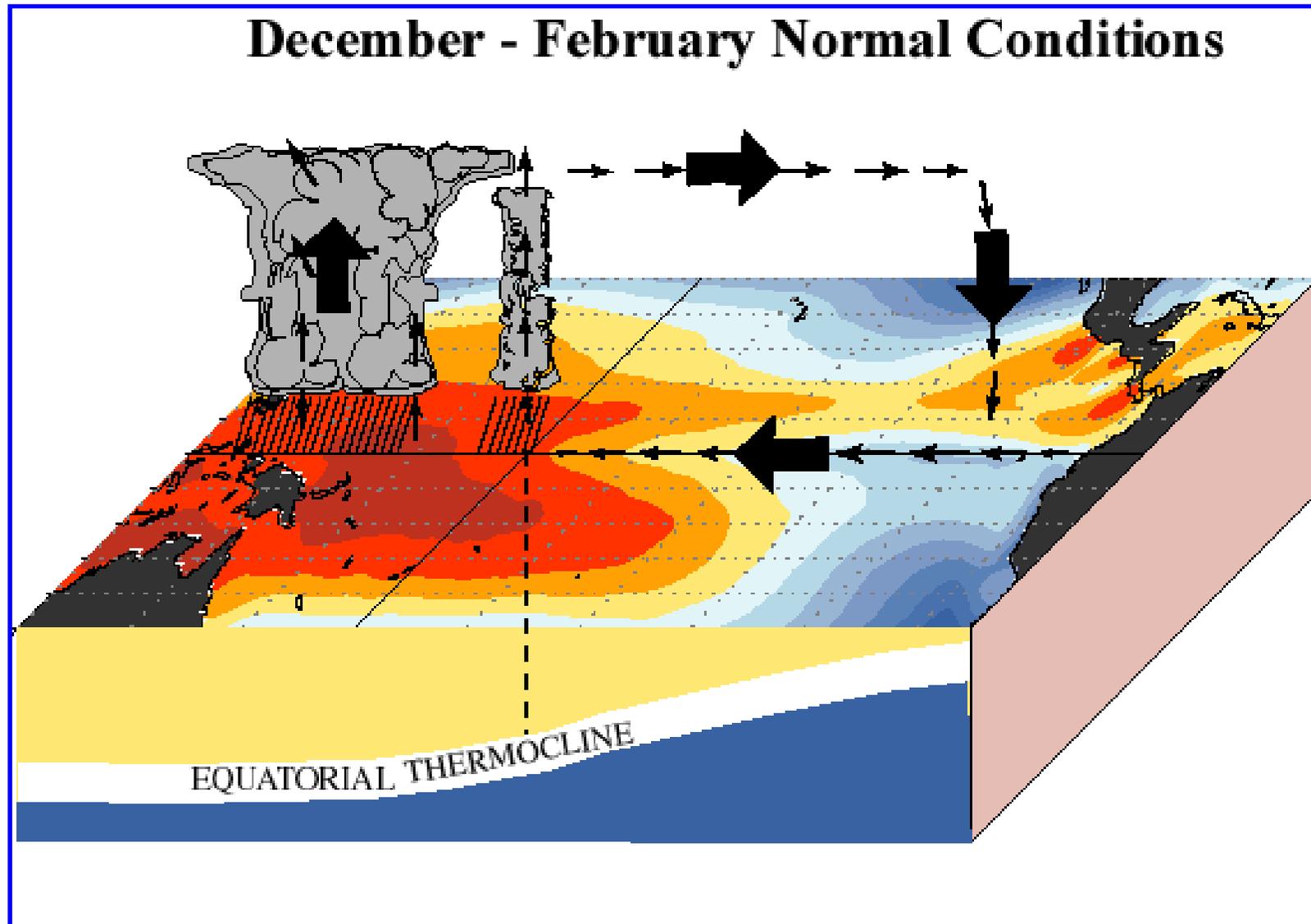


## Circolazione Atmosferica Equatoriale

Schema della normale circolazione di Walker lungo l'equatore. Risalita di aria e pioggia insistente sul Indonesia, Pacifico occidentale, Africa sud orientale e Amazonia, mentre condizioni di scarsa precipitazione nel Pacifico orientale e nell'Africa sud-occidentale. Il grafico in basso mostra inoltre il profilo dell'anomalia di temperatura lungo l'equatore.

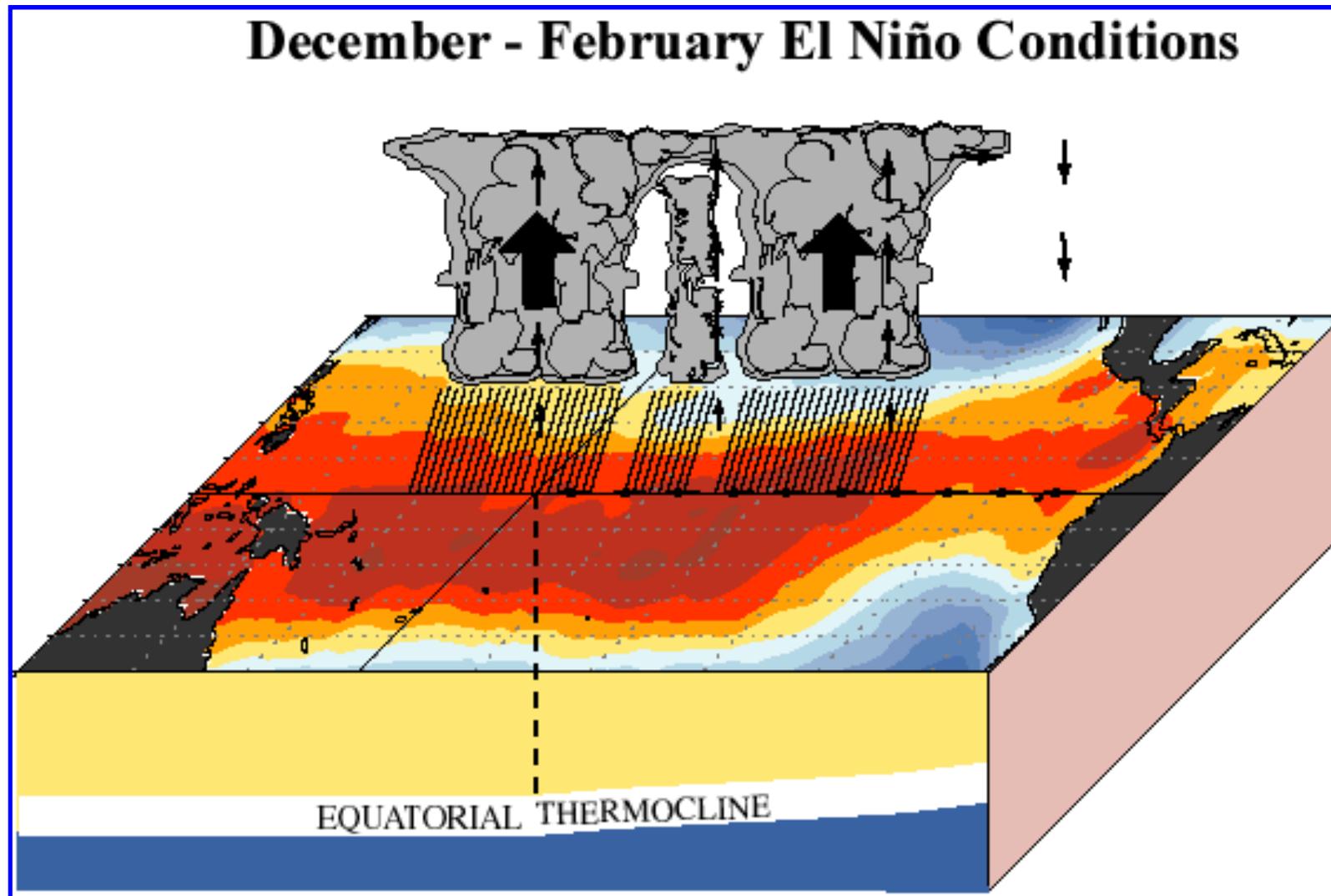


## *Circolazione Atmosferica Equatoriale*



# *Circolazione Atmosferica Equatoriale*

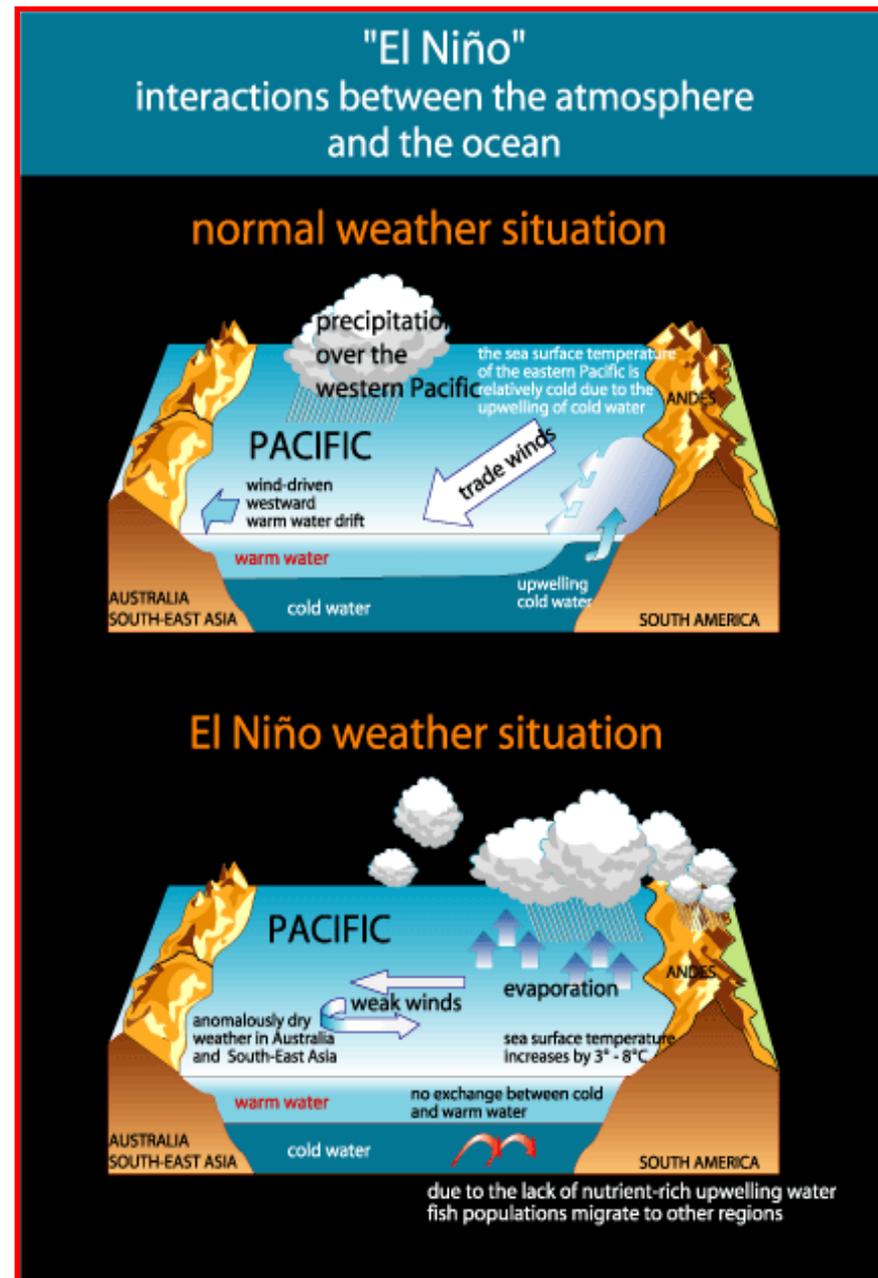
## Condizione ENSO – El Niño



## Circolazione Atmosferica Equatoriale - Condizione ENSO

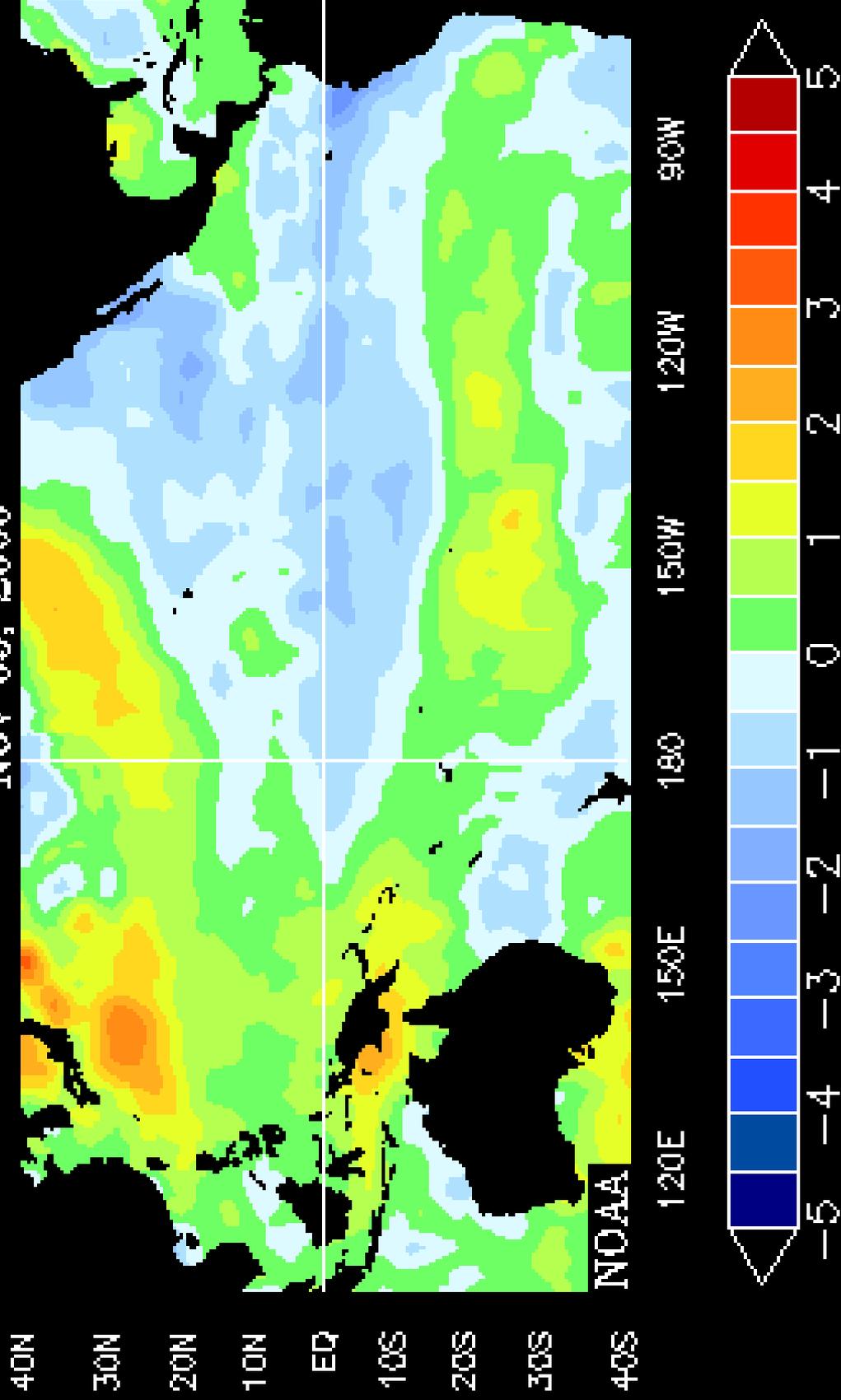
Negli anni “normali” il forte gradiente di temperatura superficiale (freddo a est caldo a ovest) nel Pacifico equatoriale è accompagnato da **forti venti alisei** che spingono le acque superficiali verso ovest permettendo a quelle più fredde e profonde di risalire in superficie. La **risalita delle acque** rafforza a sua volta il gradiente di temperatura superficiale mantenendo gli alisei.

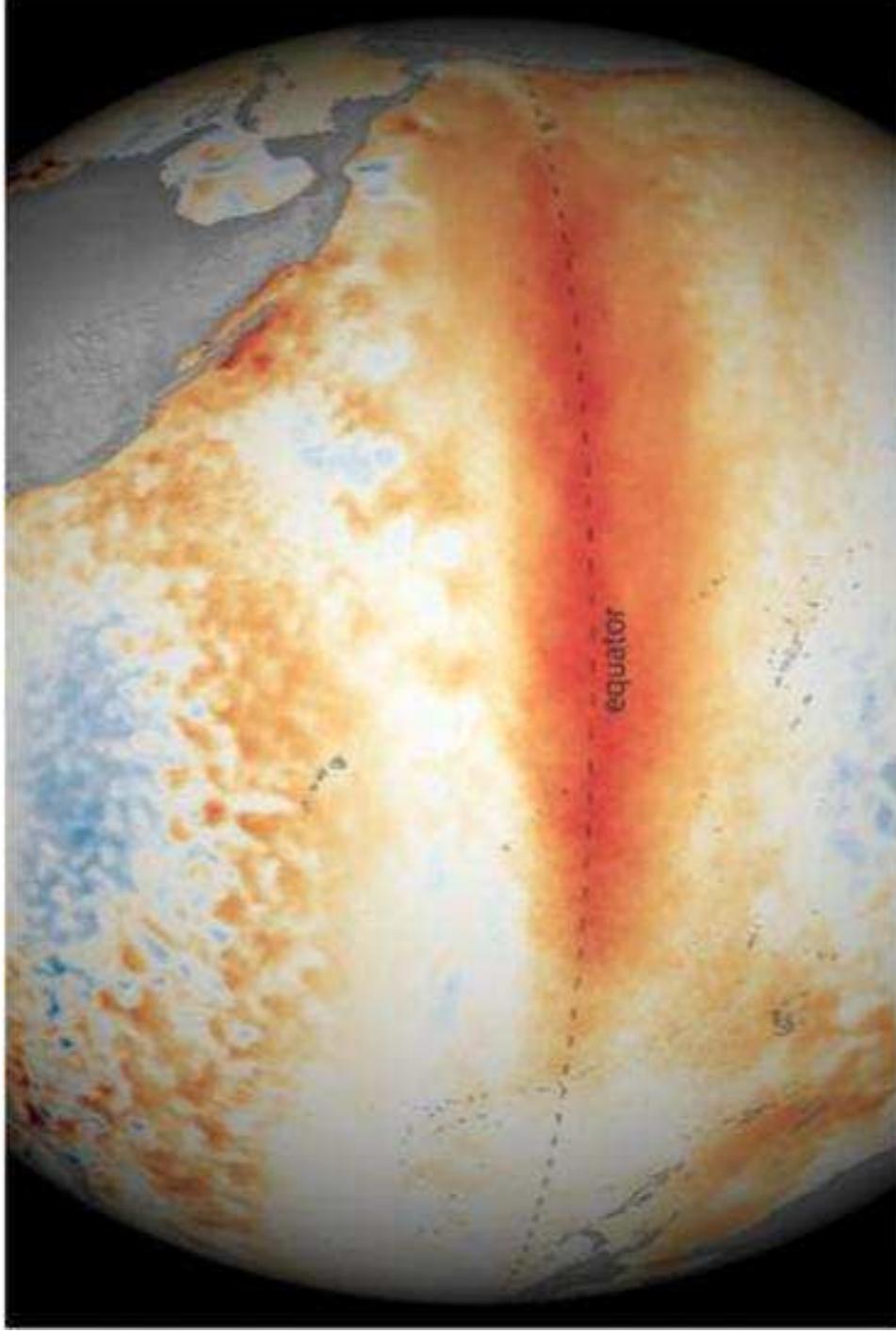
Un **indebolimento degli alisei** nel Pacifico centrale **indebolisce l'upwelling** e fa aumentare la temperatura del Pacifico orientale. Questo fenomeno contribuisce a indebolire ulteriormente gli alisei. Il rafforzarsi vicendevole di questi effetti contribuisce all'instaurarsi di un El Niño.



# SST ANOMALIES °C

NOV 05, 2000





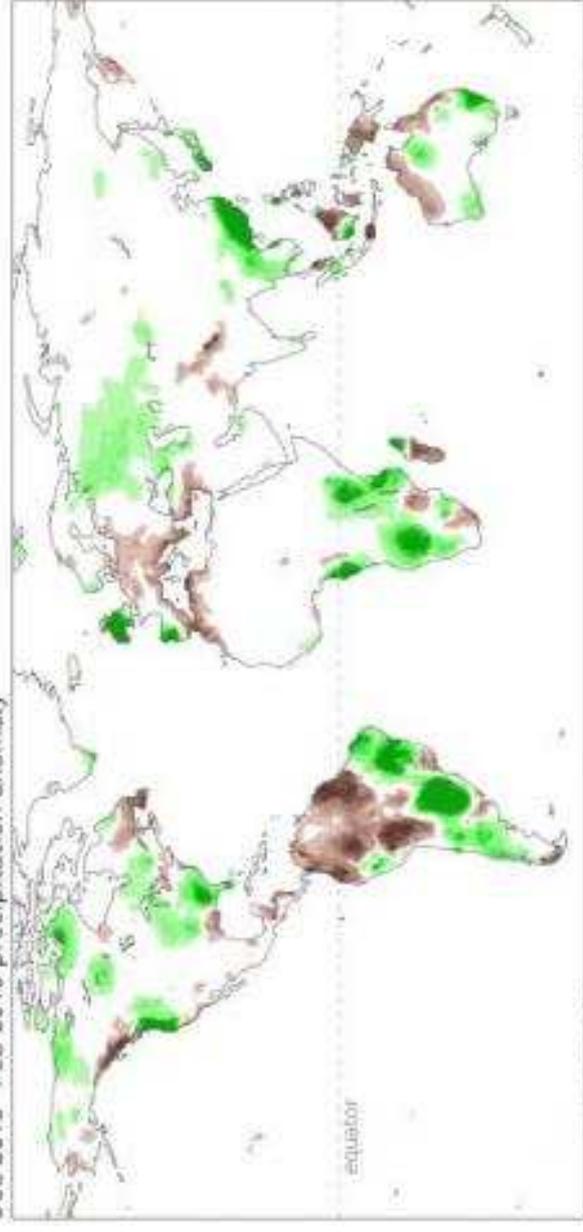
February 2016  
compared to 1981-2010

Difference from average temperature (°F)

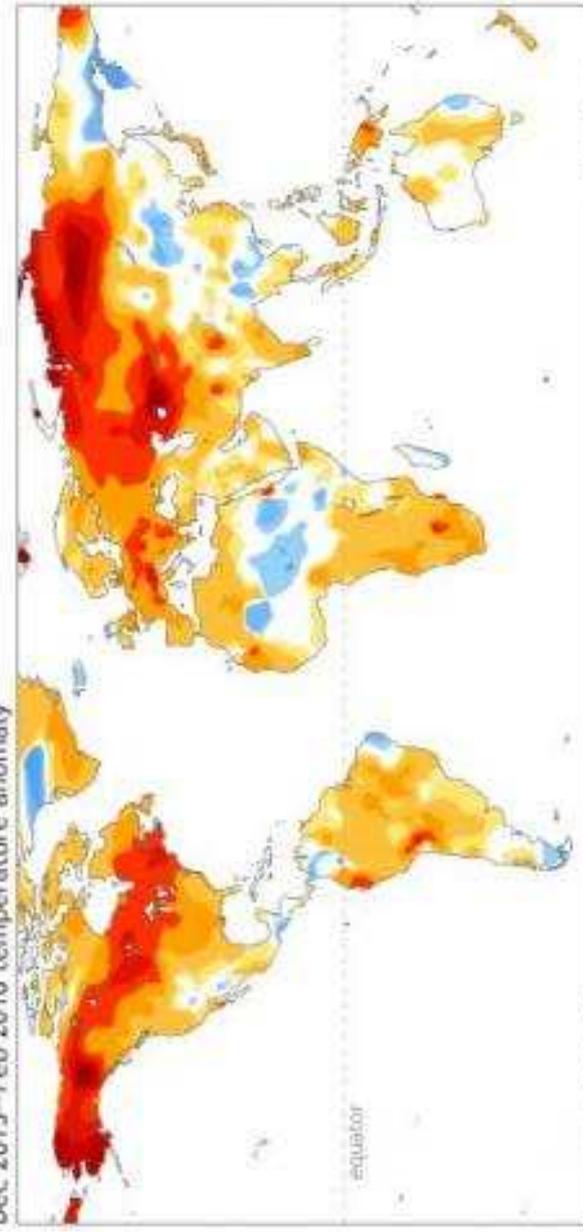
-9 0 9

Climate.gov/NNVL  
Data: Geo-Polar SST

Dec 2015–Feb 2016 precipitation anomaly



Dec 2015–Feb 2016 temperature anomaly



# FORZANTI NATURALI

## VARIAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE

Diretta



Attività Solare

Indiretta



Milankovitch

## INTERAZIONI TRA DIVERSE COMPONENTI

El Niño

ERUZIONI VULCANICHE

DERIVA DEI CONTINENTI

# **FORZANTI ANTROPICHE**

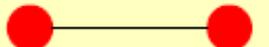
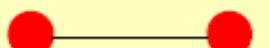
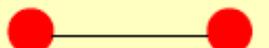
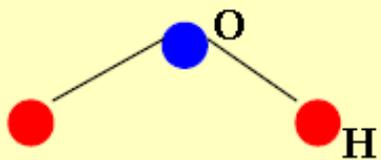
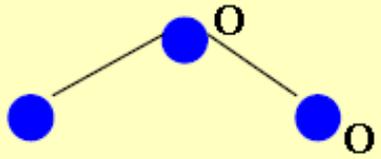
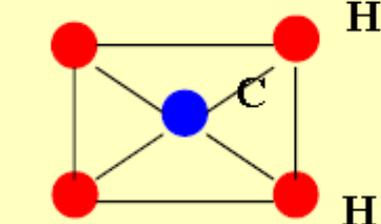
**IMMISSIONE DI GAS IN ATMOSFERA**

**IMMISSIONE DI AEROSOL IN ATMOSFERA**

**SFRUTTAMENTO DEL TERRENO**

# forzanti - GHG I

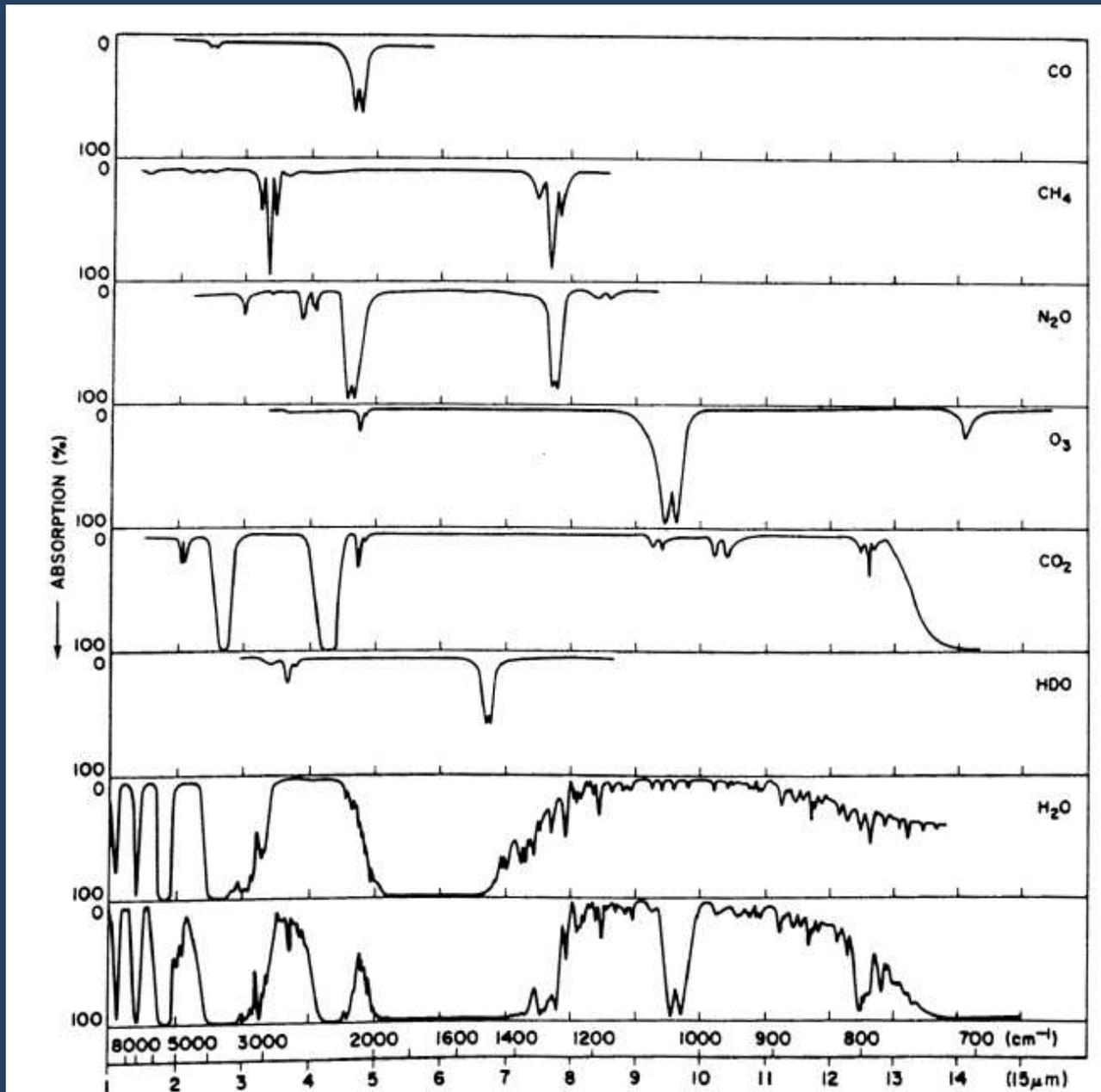
## interazione tra radiazione e costituenti atmosferici

Molecule	Structure	Permanent dipole moment	May acquire dipole moment
N <sub>2</sub>	N  N	No	No
O <sub>2</sub>	O  O	No	No
CO	C  O	Yes	Yes
CO <sub>2</sub>	O  O	No	Yes (in two vibrational modes)
N <sub>2</sub> O	N  N O	Yes	Yes
H <sub>2</sub> O	 O H H	Yes	Yes
O <sub>3</sub>	 O O O	Yes	Yes
CH <sub>4</sub>	 C H H H H	No	Yes (in two vibrational modes)

Peixoto and Oort (1998)

## forzanti - GHG II

### *spettri di assorbimento dei gas atmosferici*

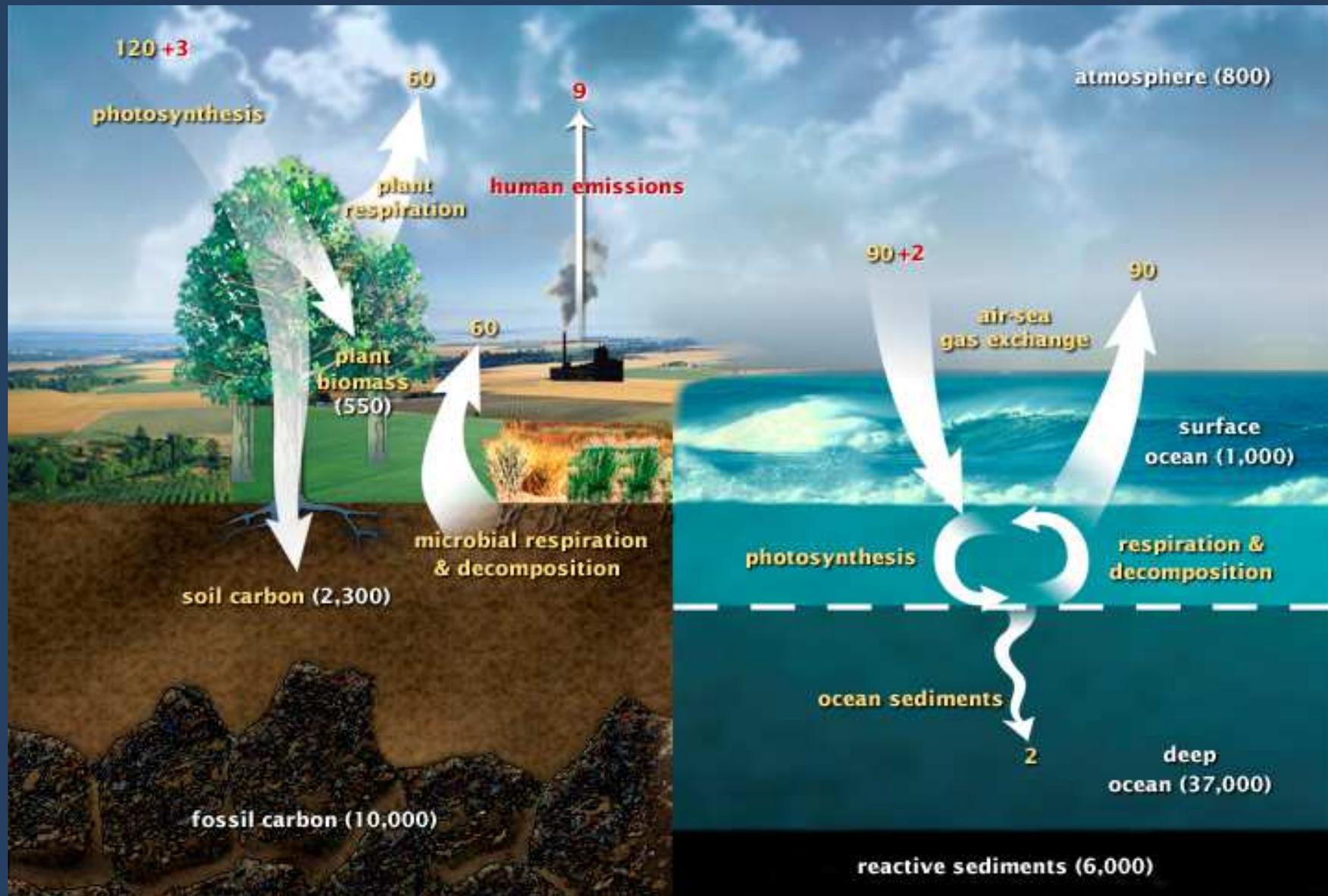


(Valley, 1965)

# forzanti - GHG VIII

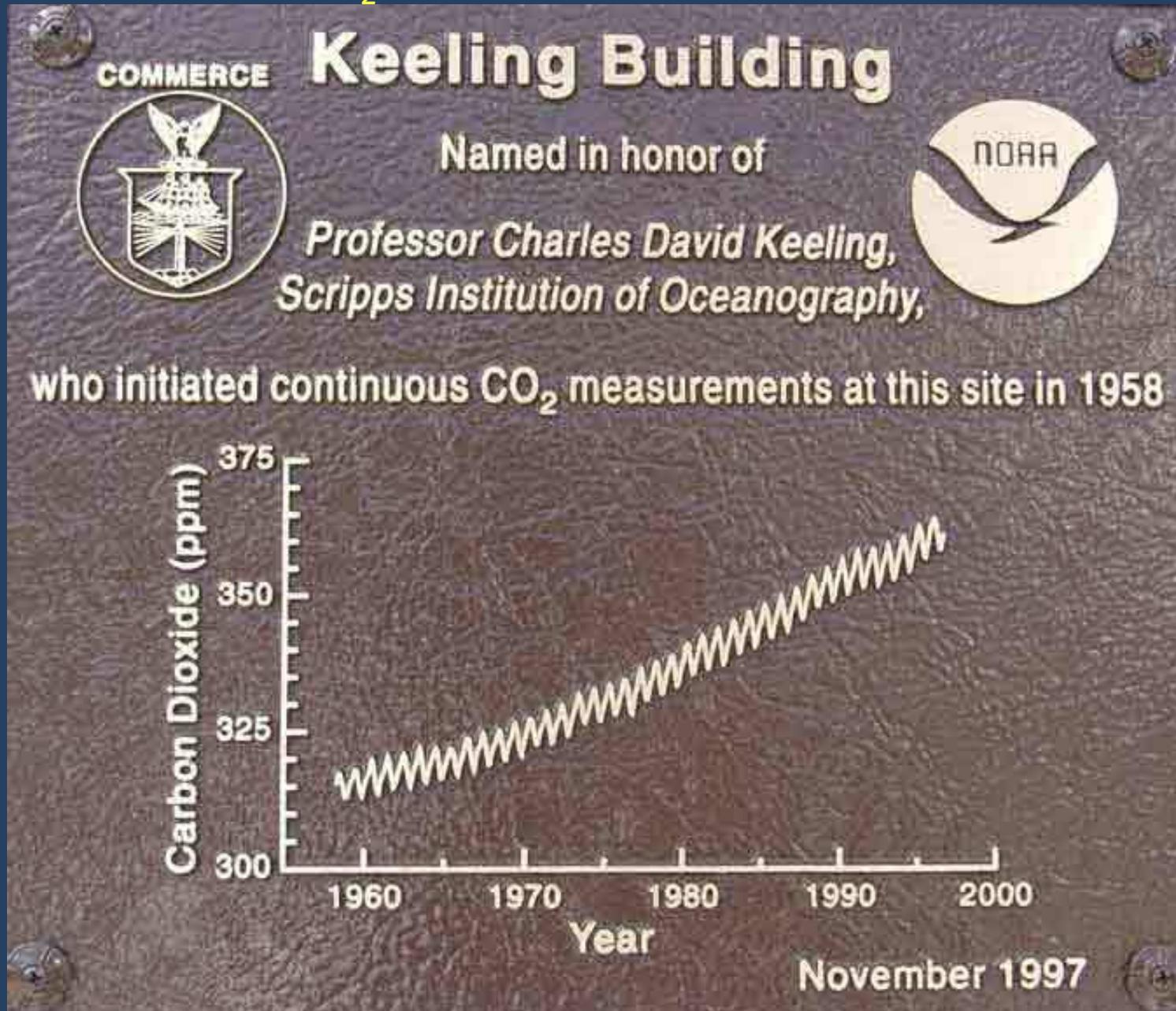
*ciclo veloce del carbonio*

*flussi naturali (GtC/anno) flussi antropici (GtC/anno) riserve (GtC)*



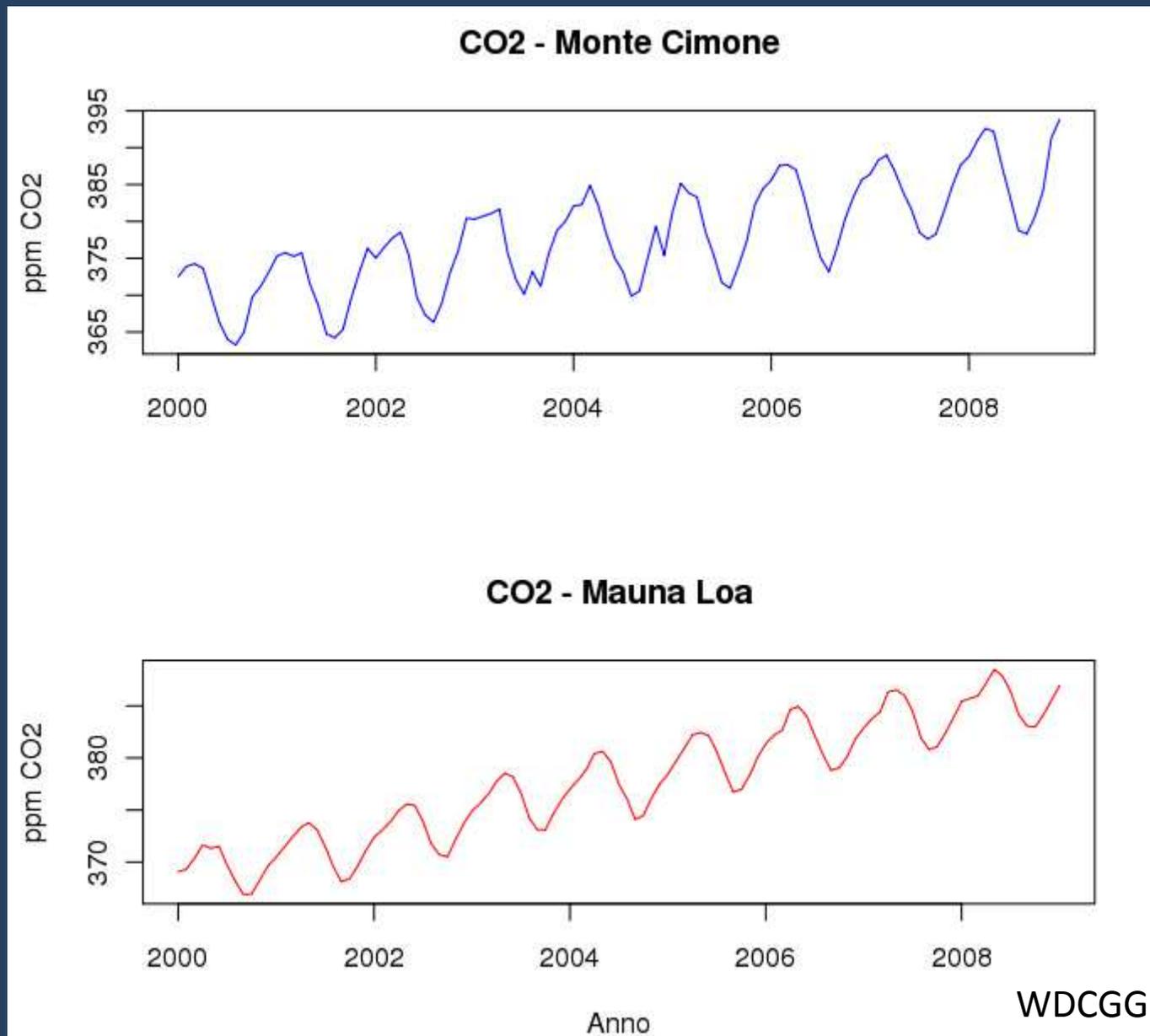
## forzanti - GHG IX

*misure di contenuto di CO<sub>2</sub>*



## forzanti - GHG XI

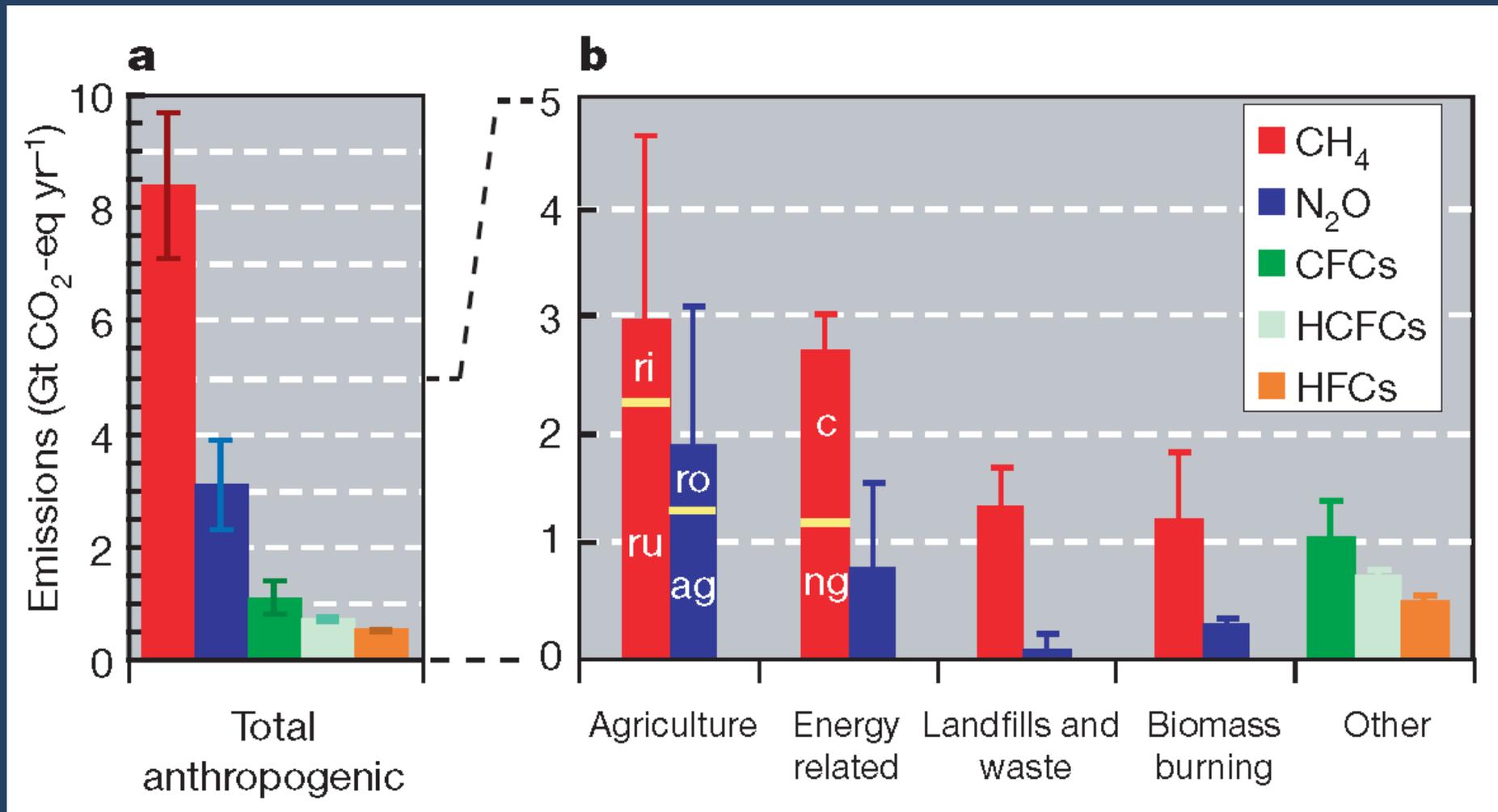
*misure di contenuto di CO<sub>2</sub>*



## forzanti - GHG XII

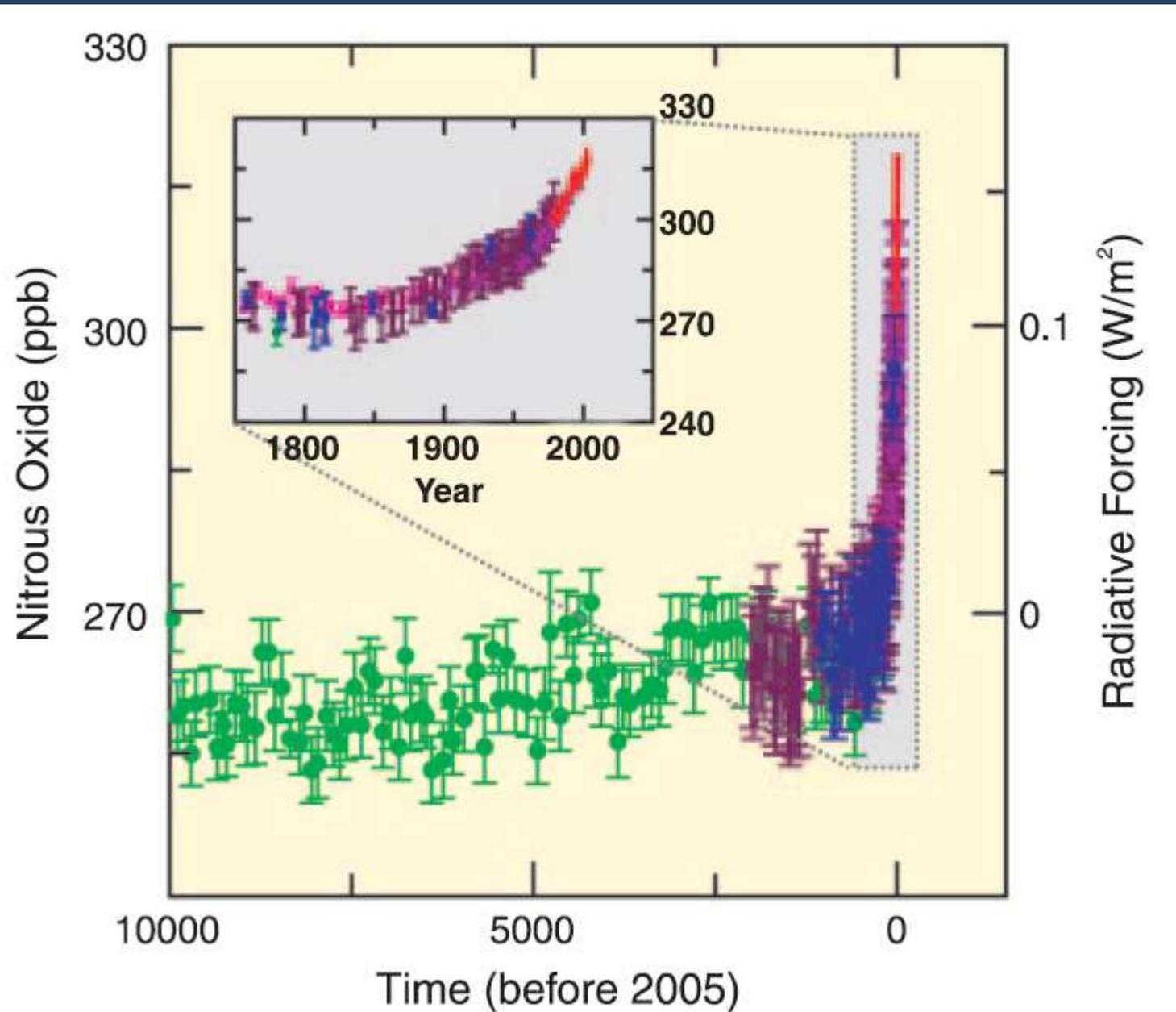
### meccanismi di produzione e distruzione di altri GHG

ri: coltivazione del riso; ru: ruminanti; ng: gas naturali; c: miniere  
ro: run-off; ag: agricoltura



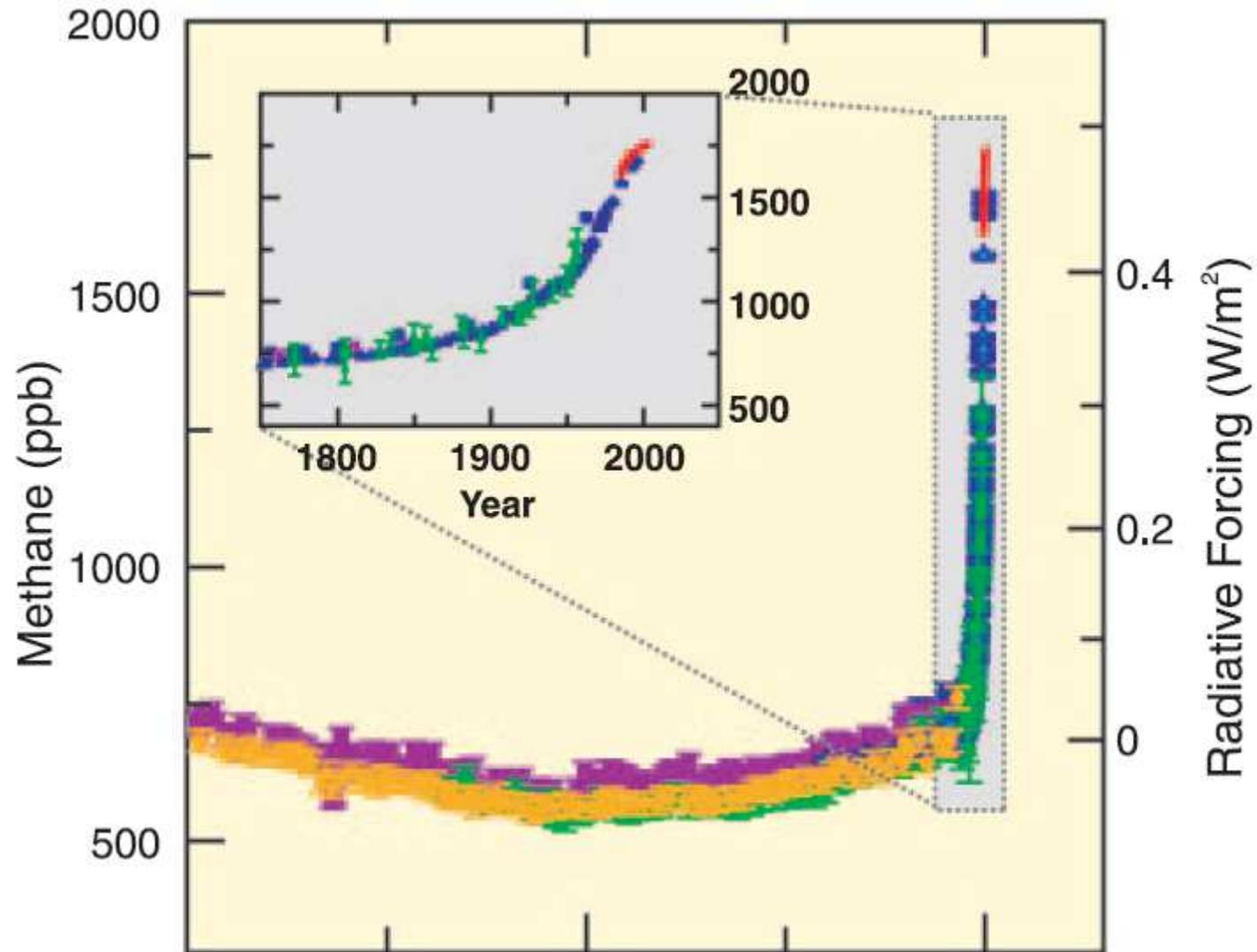
(Montzka et al, 2011)

forzanti - GHG XIII  
record storici (ice cores)



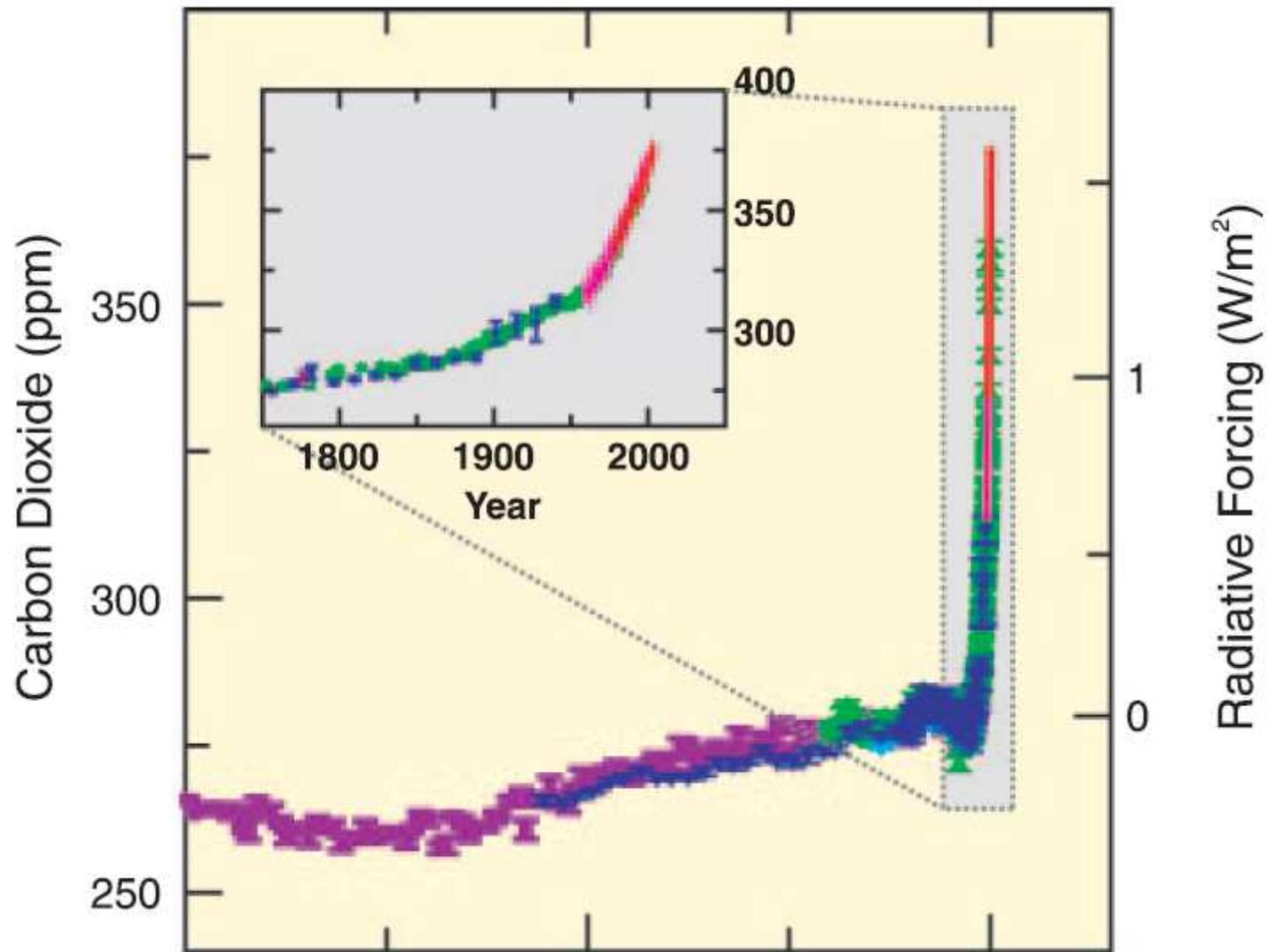
# forzanti - GHG XIII

record storici (ice cores)



# forzanti - GHG XIII

record storici (ice cores)



# un modello di bilancio energetico terrestre I

l'unica sorgente di energia significativa per sistema terrestre è il sole ( $T_{Sole} = 6000K$ ),

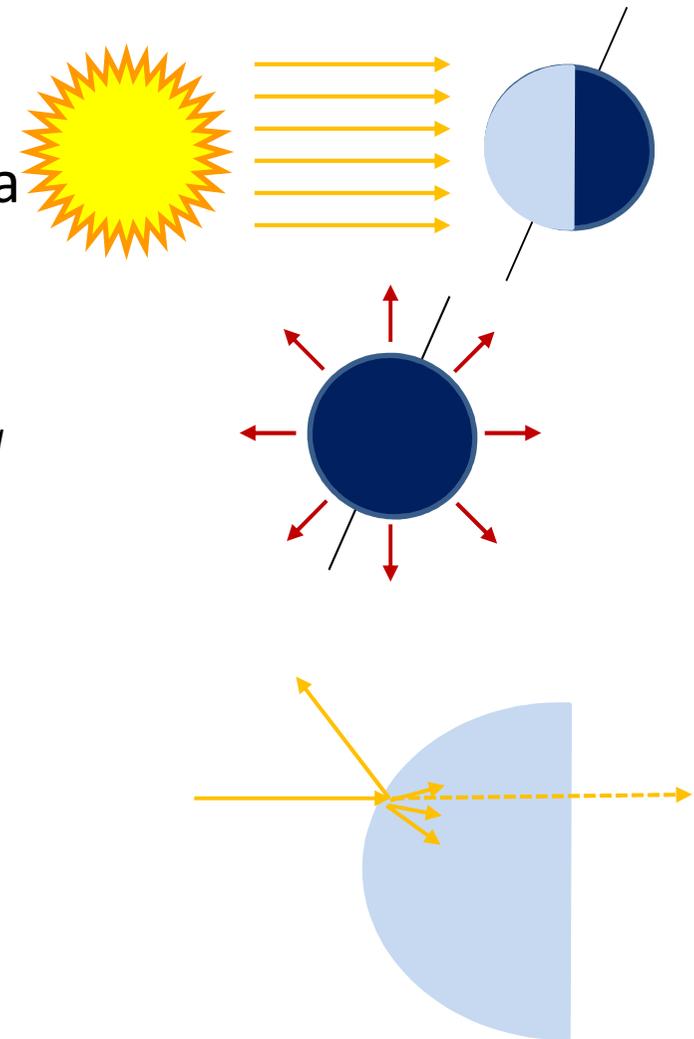
la frazione di superficie planetaria illuminata dal sole riceve questa energia,

anche la terra emette energia secondo  $T_{Terra}$  attraverso l'intera superficie,

l'energia ricevuta dal sistema può essere riflessa, trasmessa o assorbita,

assumiamo il sistema all'equilibrio termico

$$E_{in} = E_{out}.$$



## un modello di bilancio energetico terrestre II

fatte queste ipotesi (piuttosto ben verificate) costruiamoci un modello per studiare la temperatura terrestre di equilibrio  $T_e$

Cominciamo da una terra sferica, isoterma, priva di atmosfera, opaca, con un'albedo planetaria  $\alpha=0.3$  ( $\alpha=E_{in}/E_{rif}$ )

Usiamo la legge di Stefan e Boltzman per l'irradianza  $L$  (in  $\text{W m}^{-2}$ ) di un corpo nero in equilibrio termodinamico a temperatura  $T$   $L = \sigma T^4$  ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ )

mentre l'irradianza solare viene assunta costante

$$S_o = 1370 \text{ W m}^{-2}$$

# un modello di bilancio energetico terrestre III

potenza ricevuta dal sole su mezza superficie terrestre

imponiamo l'equilibrio energetico

$$\pi R_T^2 (1-\alpha) S_o = 4 \pi R_T^2 \sigma T_e^4$$

potenza emessa dalla terra su tutta la superficie

che possiamo risolvere per l'incognita  $T_e$ ,

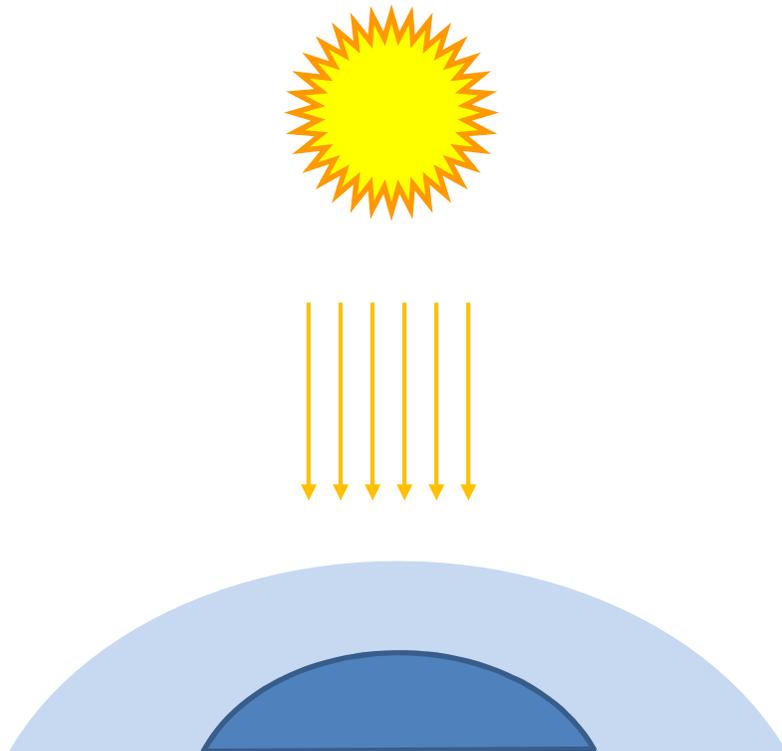
$$T_e = ((1-\alpha)S_o/4\sigma)^{1/4}$$

che, con i valori del modello, risulta in  $T_e \approx 255\text{K}$

se la terra fosse completamente sommersa dall'oceano ( $\alpha = 0.06$ ) risulterebbe  $T_e \approx 274\text{K}$ .

# un modello di bilancio energetico terrestre IV

modello insoddisfacente, allora aggiungiamo una atmosfera isoterma ( $T_A$ ) parzialmente assorbente con coefficiente  $\alpha$



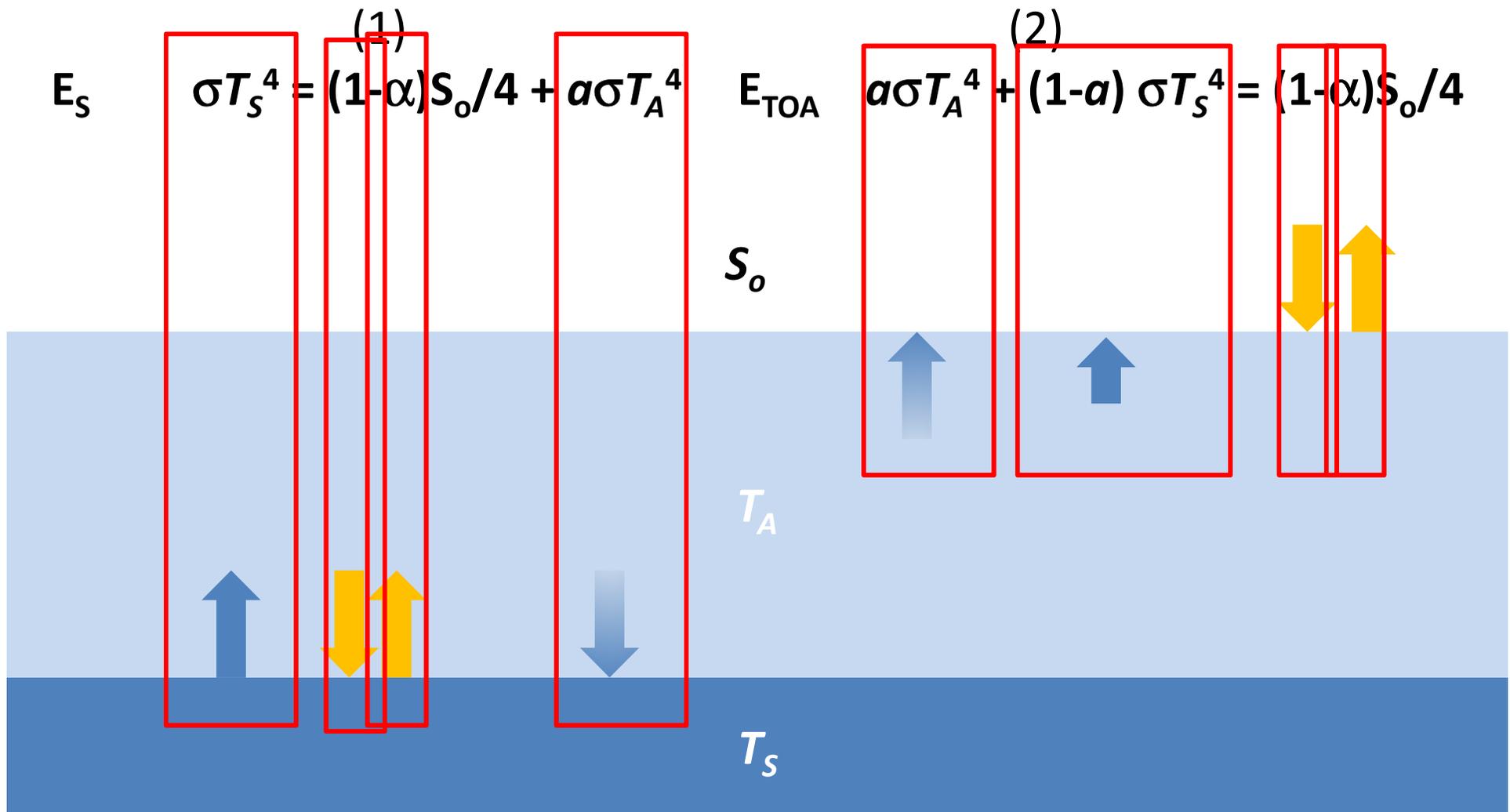
Legge di Kirchhoff:

**il potere emissivo di un corpo è uguale al suo potere assorbitivo**



# un modello di bilancio energetico terrestre V'

in questo caso dobbiamo imporre due condizioni di equilibrio: (1) alla superficie terrestre, (2) alla sommità dell'atmosfera



## un modello di bilancio energetico terrestre VI

$$E_S \quad \sigma T_S^4 = (1-\alpha)S_o/4 + a\sigma T_A^4 \quad E_{TOA} \quad a\sigma T_A^4 + (1-a)\sigma T_S^4 = (1-\alpha)S_o/4$$

sostituendo l'equazione trovata per  $T_e$ :  $T_e = ((1-\alpha)S_o/4\sigma)^{1/4}$  nella equazione alla superficie otteniamo:

$$\sigma T_S^4 = \sigma T_e^4 + a\sigma T_A^4$$

che dice che la temperatura superficiale in questo caso è maggiore di quella di equilibrio senza atmosfera del termine  $a\sigma T_A^4$ .

Sottraendo (2) da (1) otteniamo invece:

$a\sigma T_S^4 = 2a\sigma T_A^4$  che indica che la superficie è più calda dell'atmosfera.

Sostituendo  $T_A$  da questa equazione nella relazione per l'equilibrio alla superficie, possiamo ricavare  $T_S$ :

$$T_S = \sqrt[4]{\left[ \frac{(1-\alpha)S_o}{\left(1-\frac{a}{2}\right)4\sigma} \right]}$$

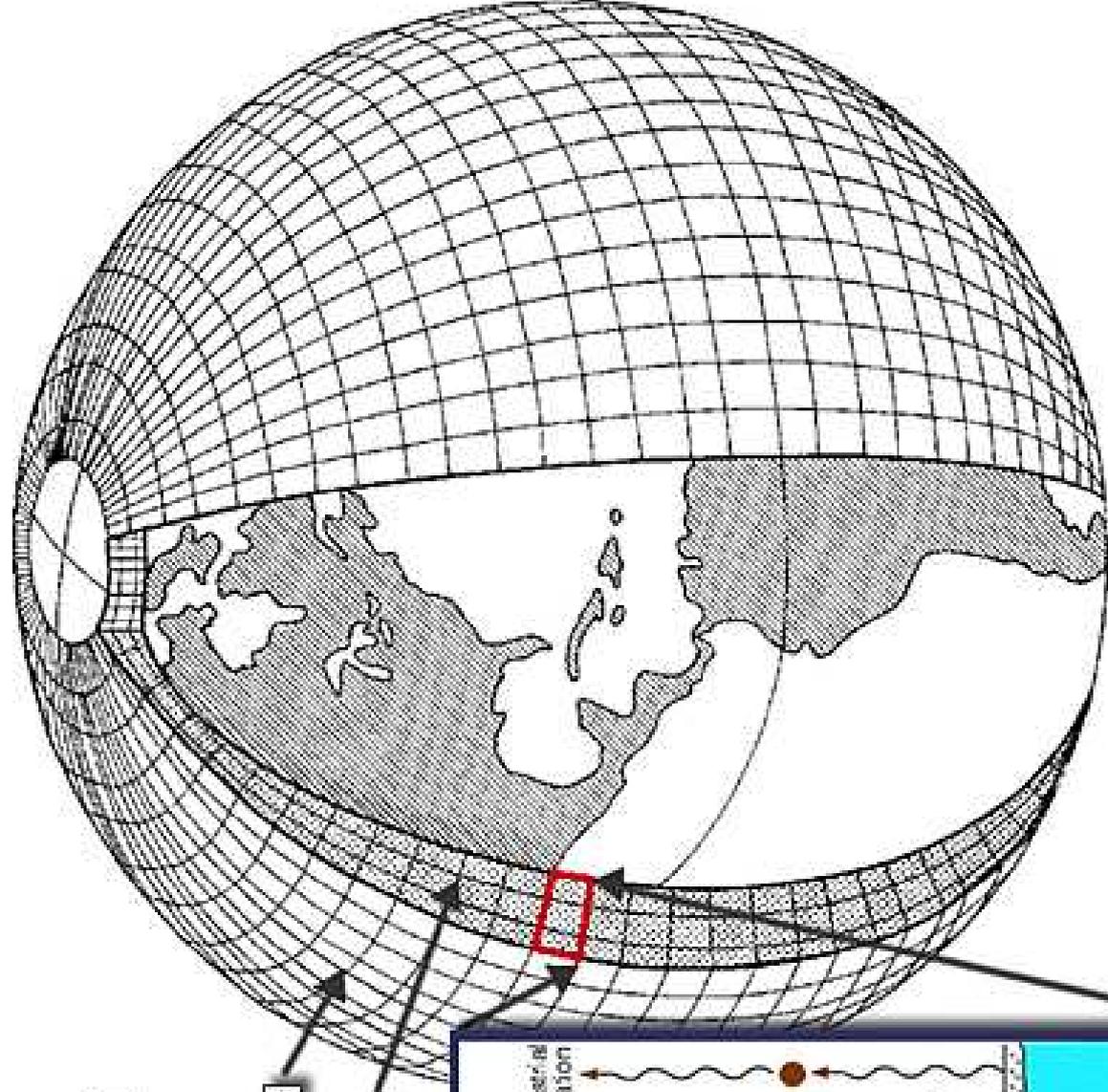
## un modello di bilancio energetico terrestre VII

$$T_S = \sqrt[4]{\left[ \frac{(1 - \alpha) S_o}{\left(1 - \frac{a}{2}\right) 4\sigma} \right]}$$

per  $T_S = 288\text{K}$ ,  $\alpha = 0.78$ ,  $T_A = 242\text{K}$

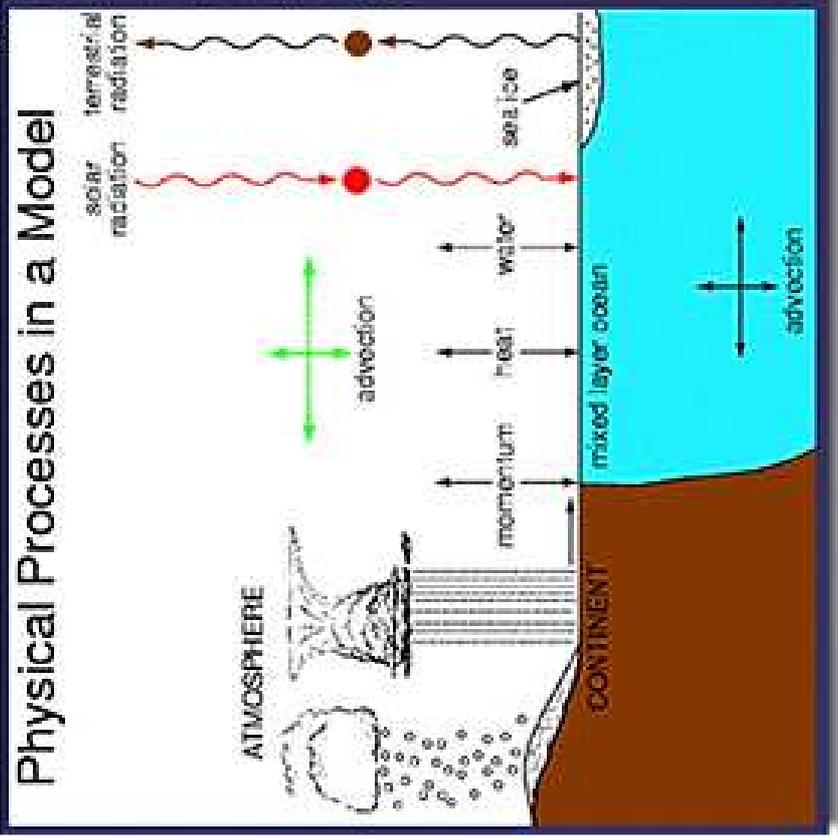
288K-255K = 33K effetto serra: all'aumentare di  $\alpha$ ,  $T_S$  aumenta...

# Schematic for Global Atmospheric Model

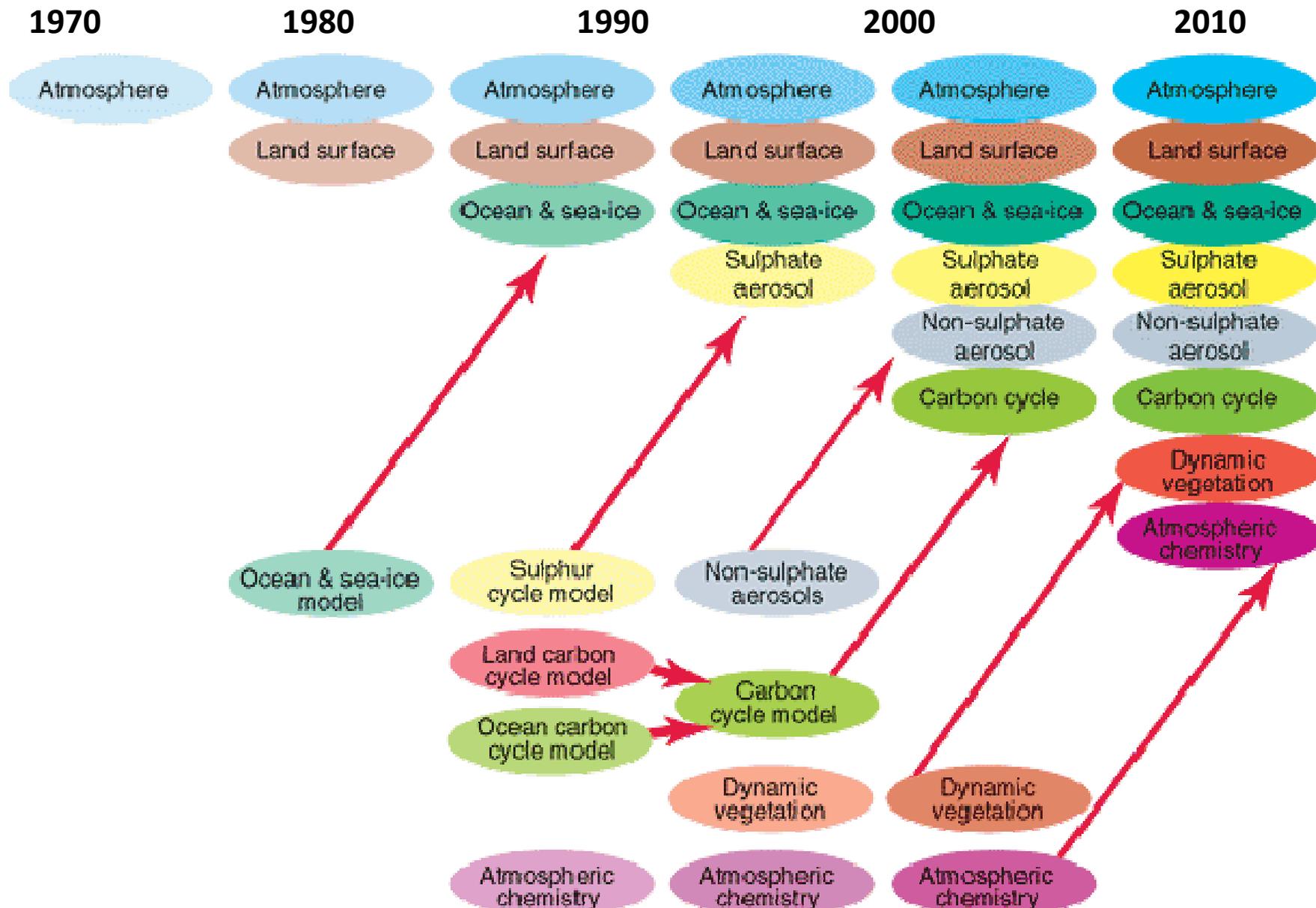


Horizontal Grid (latitude - longitude)

Vertical Grid (height or pressure)

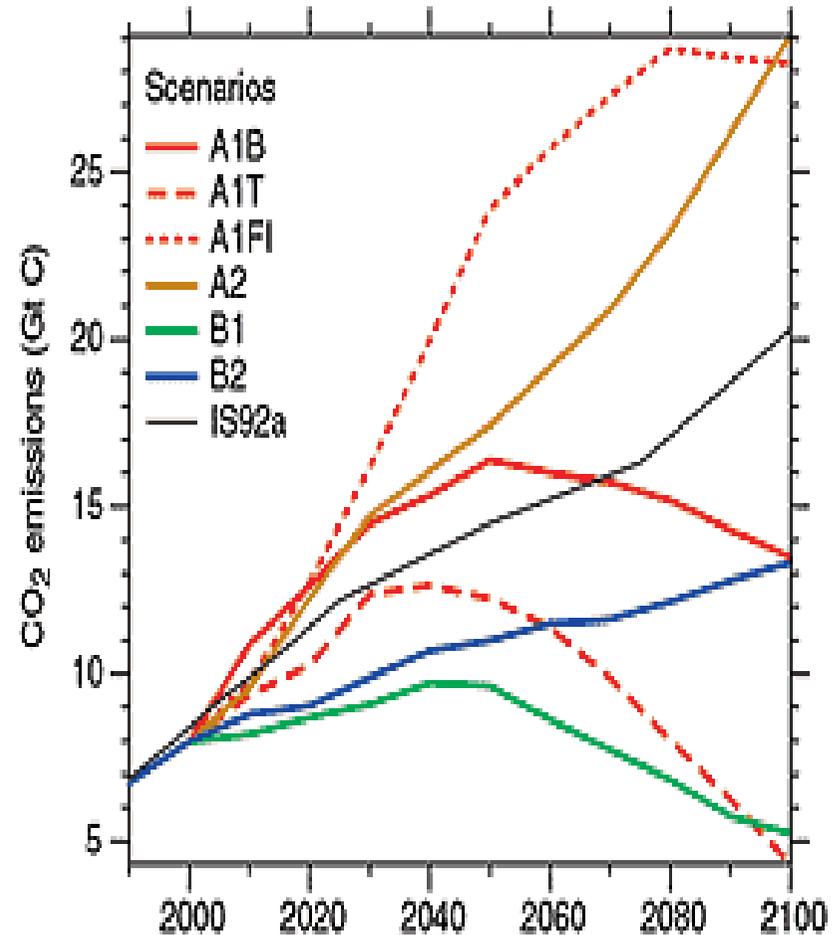


# evoluzione dei modelli climatici

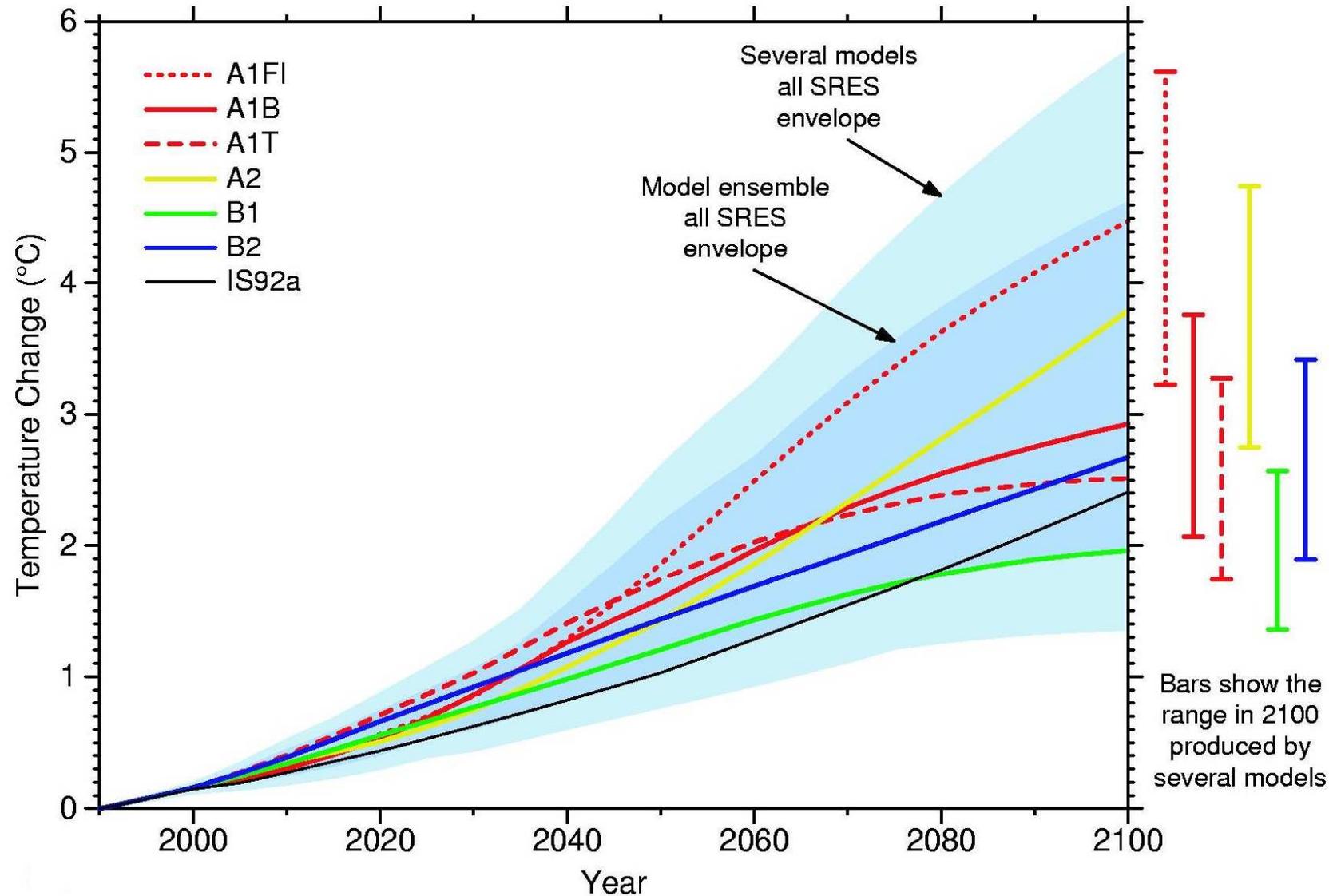


# Future Climate Change

- A1: rapida crescita economica con sviluppo tecnologico
  - A1FI: uso intensivo di combustibili fossili
  - A1T: uso di combustibili non-fossili
  - A1B: bilancio di fonti di energia
- A2: espansione demografica
- B1: piu' attenzione ai problemi ambientali
- B2: piu' attenzione alle tematiche locali



per la **temperatura globale** si prevede una **crescita** da **1.4** a **5.8°C** nel periodo **1990-2100**



**Prediction is very  
difficult, especially if  
it's about the future.**

*-Nils Bohr-*