



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

Studio e previsioni dello stato del sistema

*Federico Porcù (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

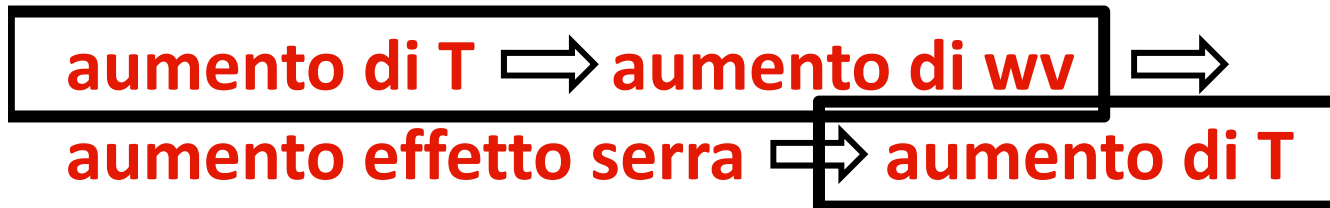
feed back positivo: l'impatto aumenta
instabilità

feed back negativo: l'impatto diminuisce
stabilità

feed back negativo



feed back positivo



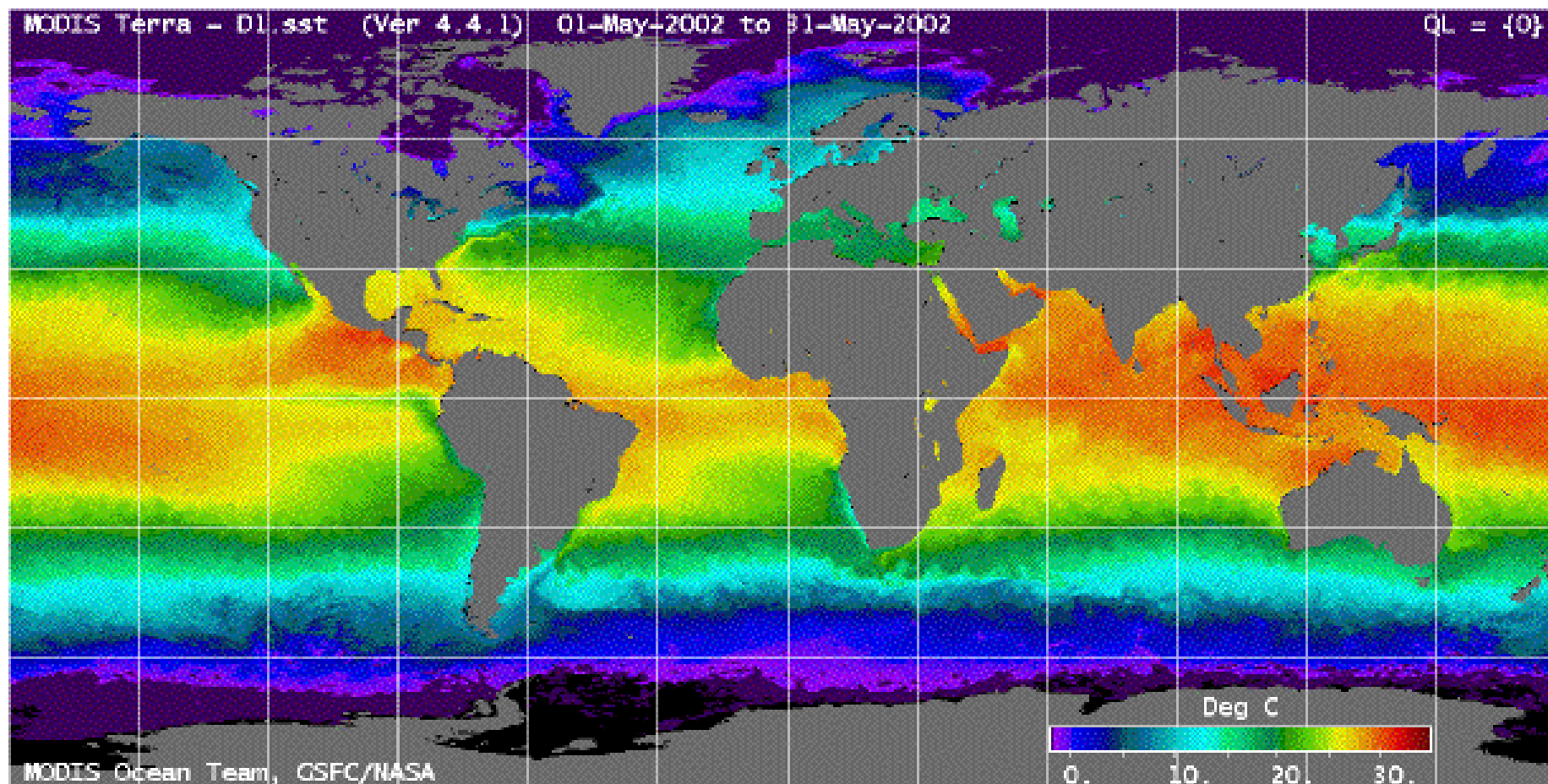
El Niño

Interazione Atmosfera/Oceano

- l'atmosfera influenza l'oceano principalmente a causa dello stress del vento superficiale;**

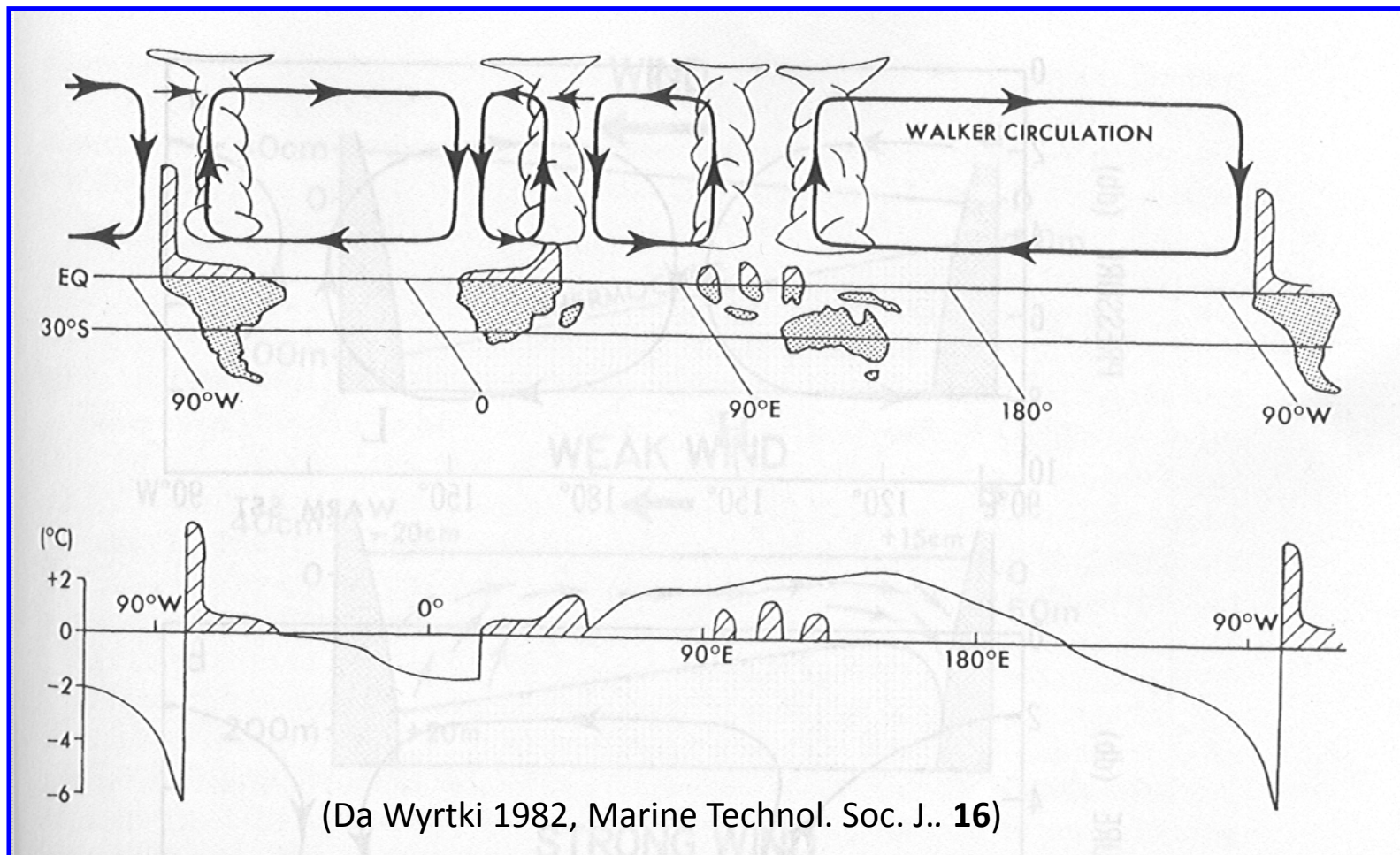
- l'oceano influenza l'atmosfera principalmente a causa di anomalie nella temperatura della sua superficie (*Sea Surface Temperature SST*) e del conseguente flusso verticale di calore sensibile e latente.**

temperatura media oceanica

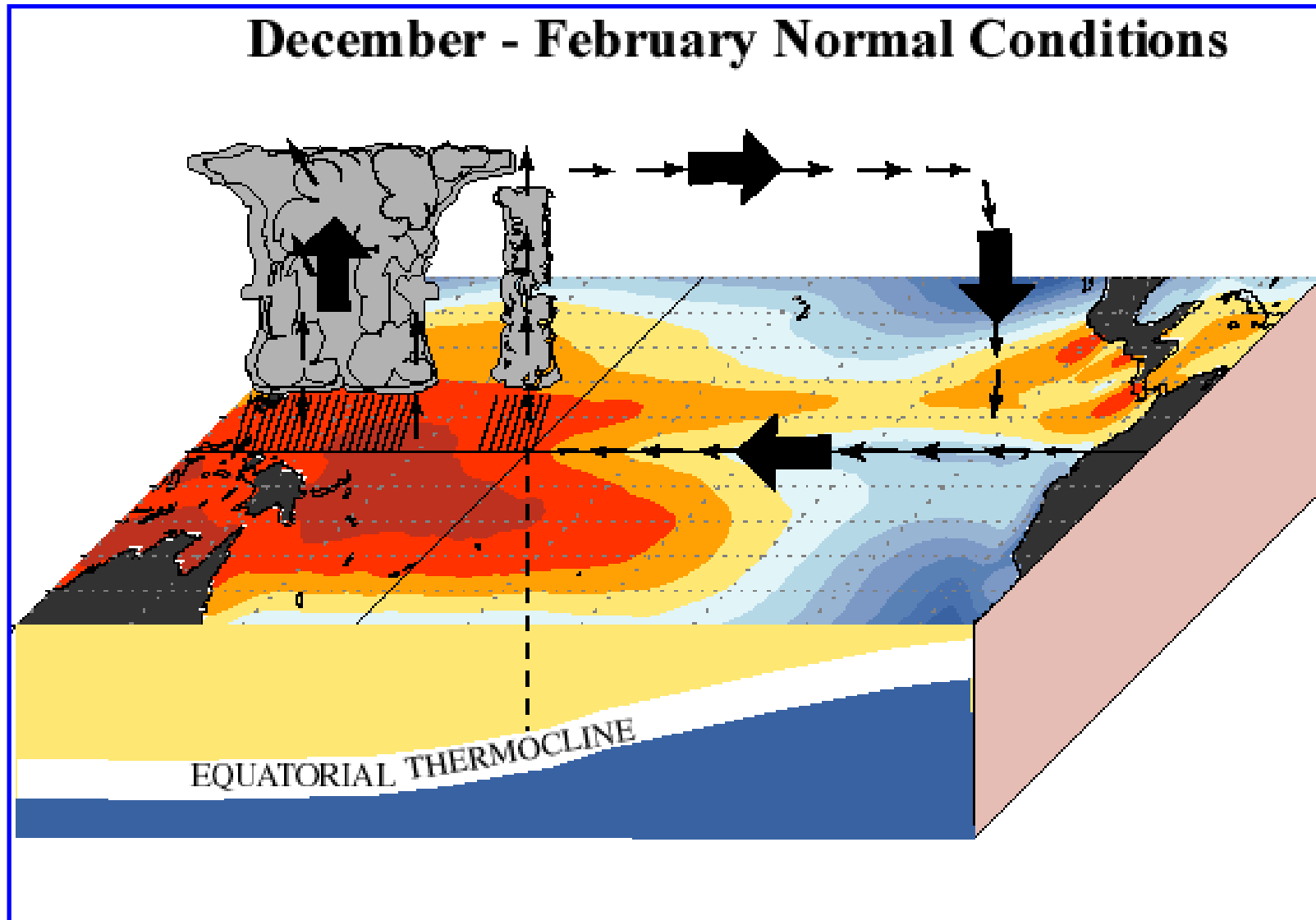


Circolazione Atmosferica Equatoriale

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.

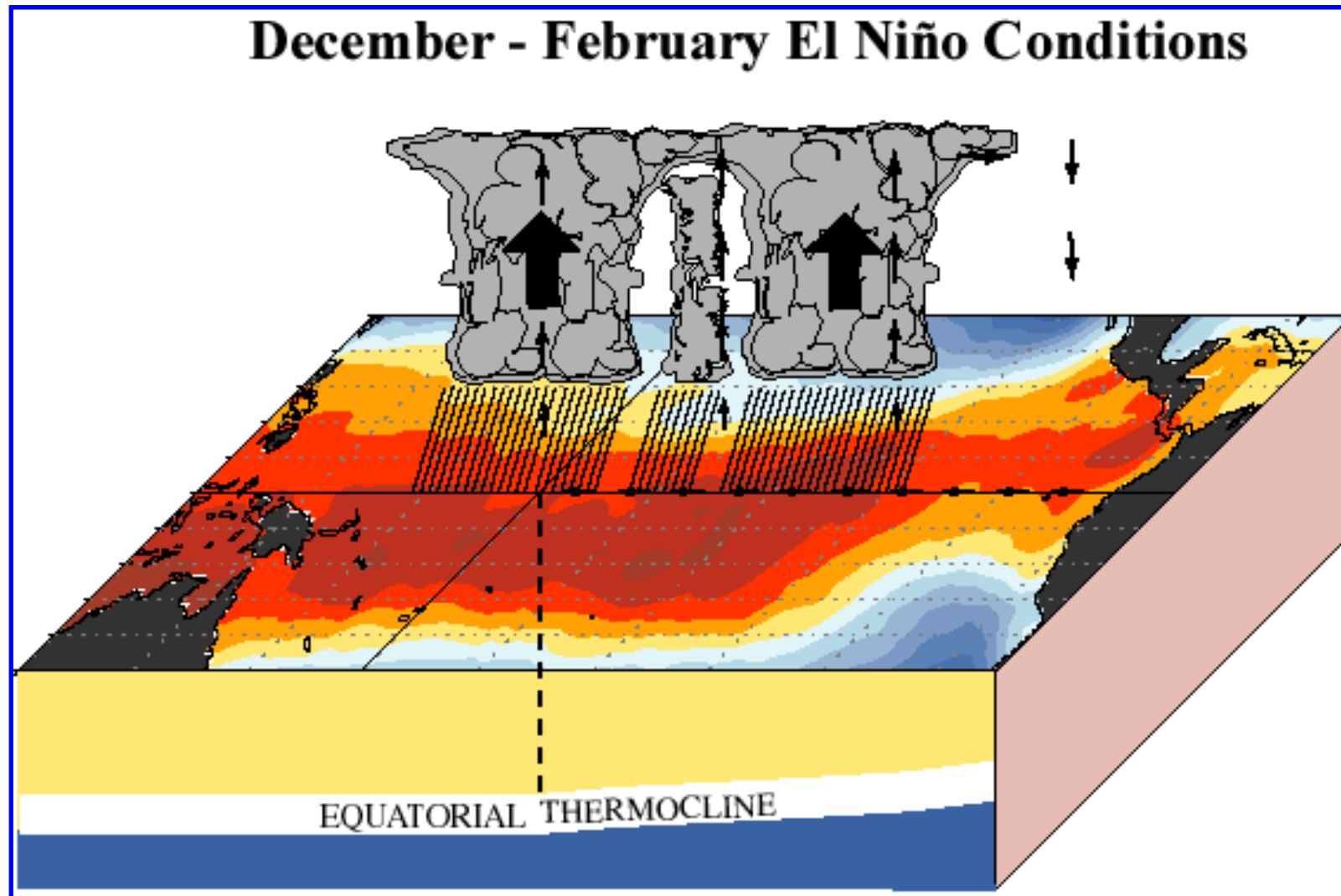


Circolazione Atmosferica Equatoriale



Circolazione Atmosferica Equatoriale

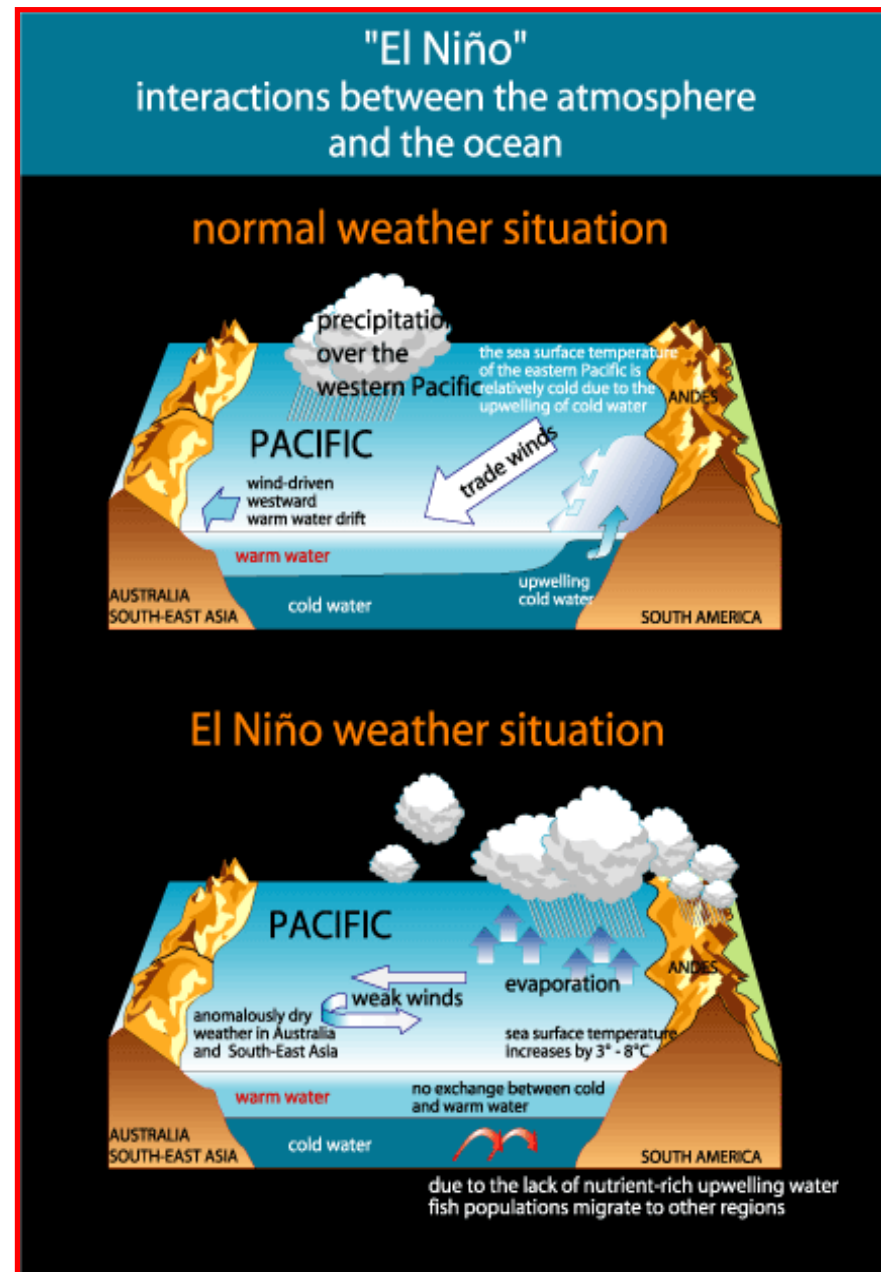
Condizione ENSO – El Niño



Circolazione Atmosferica Equatoriale - Condizione ENSO

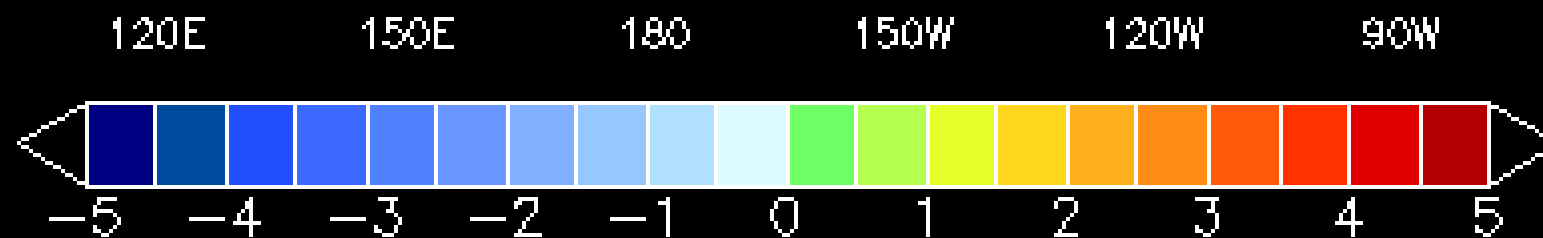
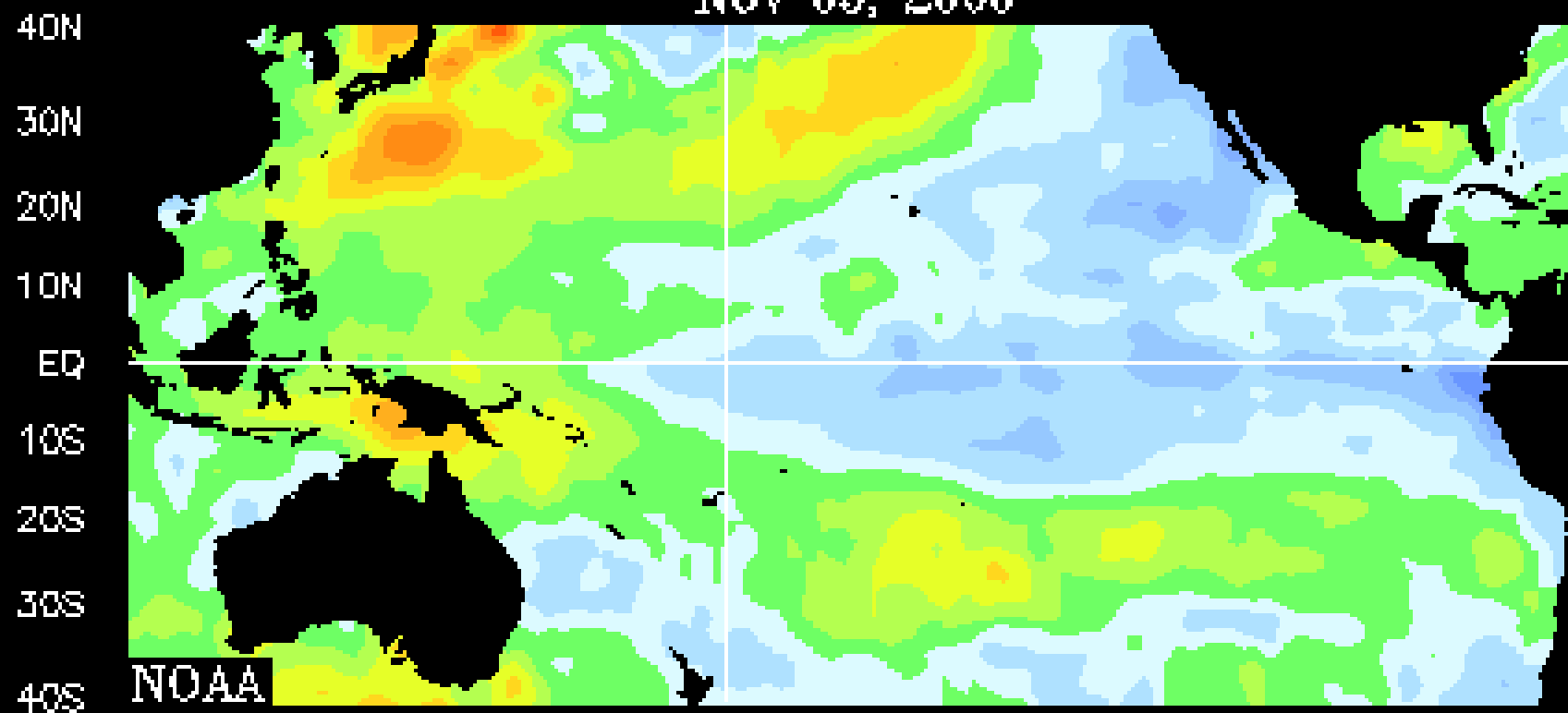
Negli anni “normali” il forte gradiente di temperatura superficiale (freddo a est caldo a ovest) nel Pacifico equatoriale è accompagnato da **forti venti alisei** che spingono le acque superficiali verso ovest permettendo a quelle più fredde e profonde di risalire in superficie. La **risalita delle acque**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

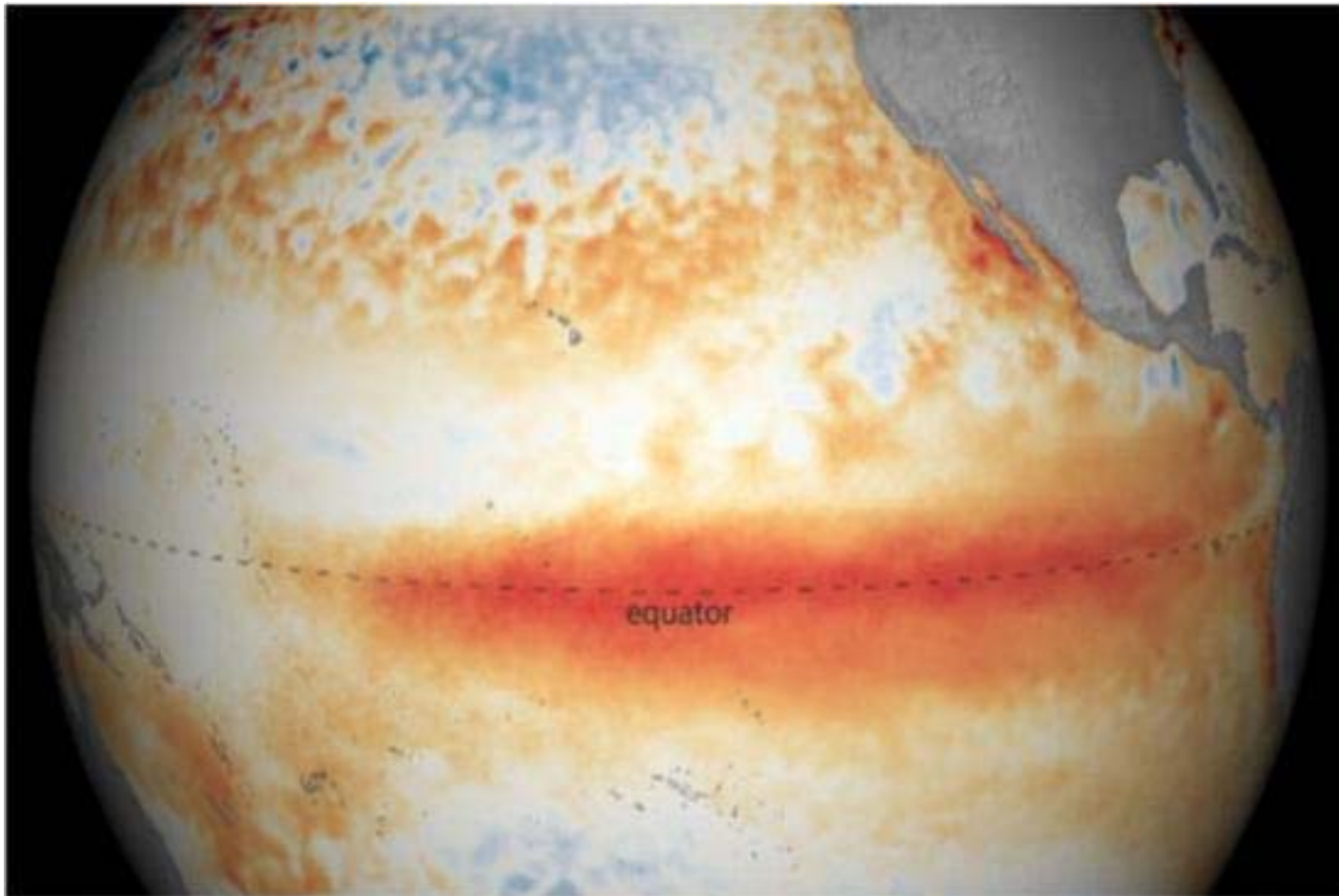
Un **indebolimento degli alisei** nel Pacifico centrale **indebolisce l'upwelling** e fa aumentare la temperatura del Pacifico orientale. Questo fenomeno contribuisce a indebolire ulteriormente gli alisei. Il rafforzarsi vicendevole di questi effetti contribuisce all'instaurarsi di un El Niño.



SST ANOMALIES °C

NOV 05, 2000





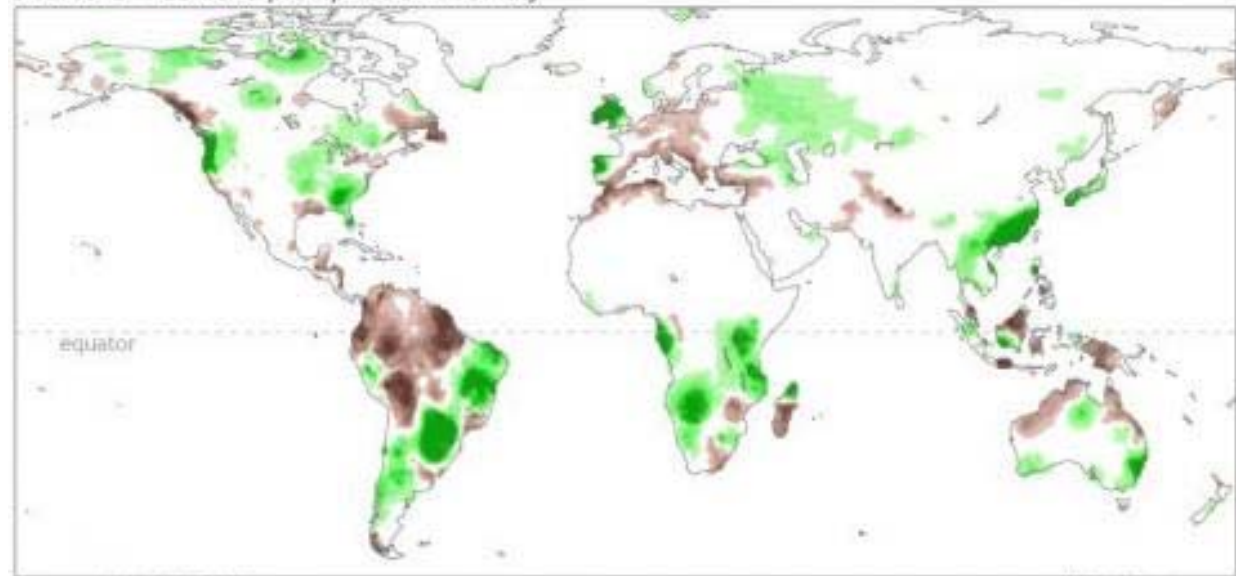
February 2016
compared to 1981-2010

Difference from average temperature (°F)

-9 0 9

Climate.gov/NNVL
Data: Geo-Polar SST

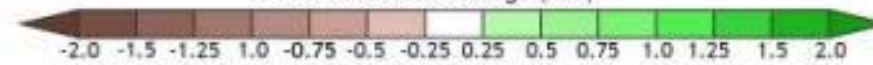
Dec 2015–Feb 2016 precipitation anomaly



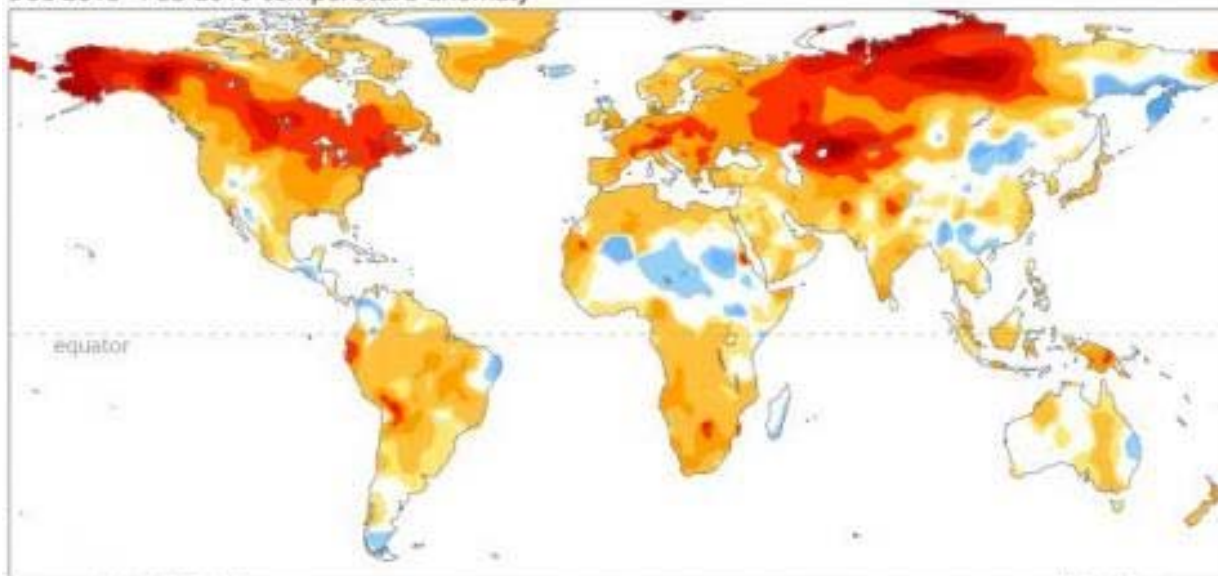
Compared to 1981–2010

Difference from average (mm)

NOAA Climate.gov
Data: CPC



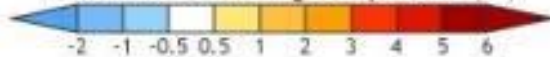
Dec 2015–Feb 2016 temperature anomaly



Compared to 1981–2010

Difference from average temperature (°C)

NOAA Climate.gov
Data: CPC



FORZANTI NATURALI

VARIAZIONE DELLA RADIAZIONE SOLARE

Diretta



Attività Solare

Indiretta



Milankovitch

INTERAZIONI TRA DIVERSE COMPONENTI

El Niño

ERUZIONI VULCANICHE

DERIVA DEI CONTINENTI

FORZANTI ANTROPICHE

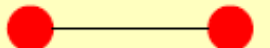
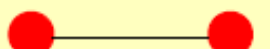
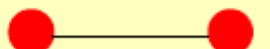


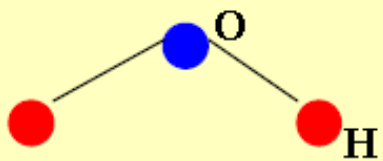
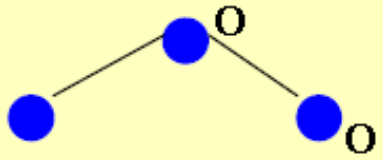
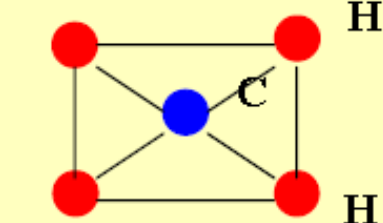
IMMISSIONE DI GAS IN ATMOSFERA

IMMISSIONE DI AEROSOL IN ATMOSFERA

SFRUTTAMENTO DEL TERRENO

forzanti - GHG I

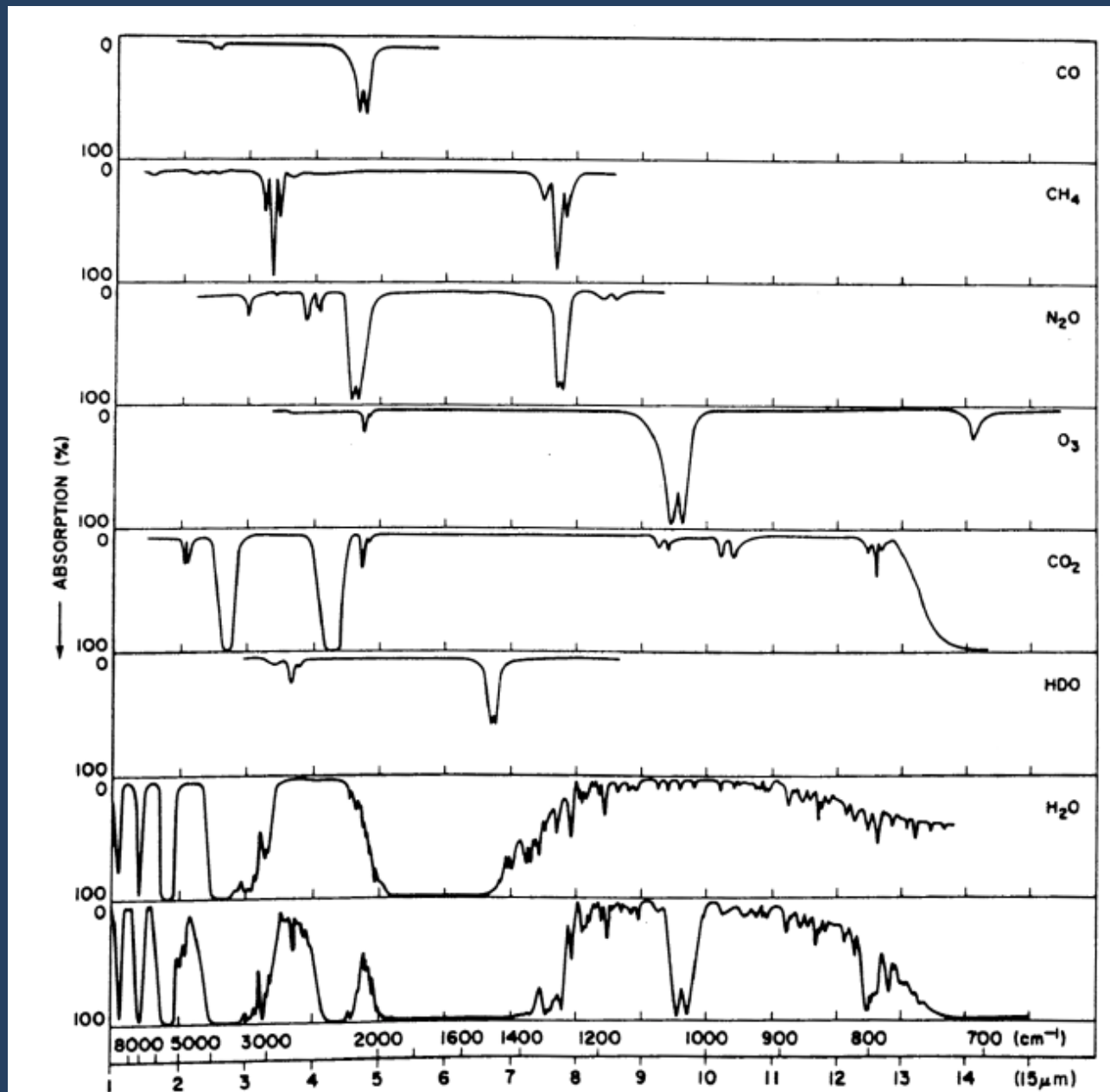
interazione tra radiazione e costituenti atmosferici

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

Peixoto and Oort (1998)

forzanti - GHG II

spettri di assorbimento dei gas atmosferici

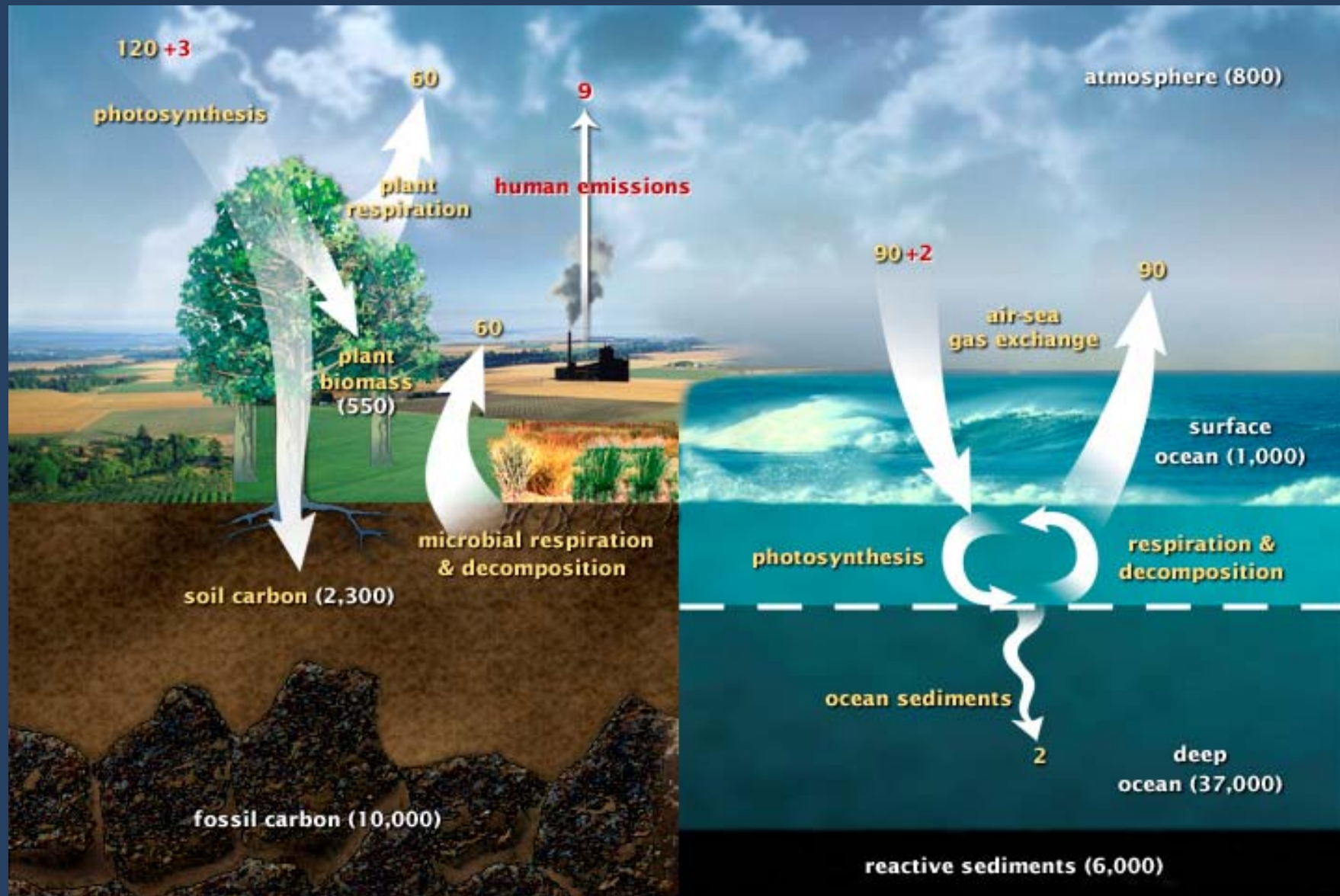


(Valley, 1965)

forzanti - GHG VIII

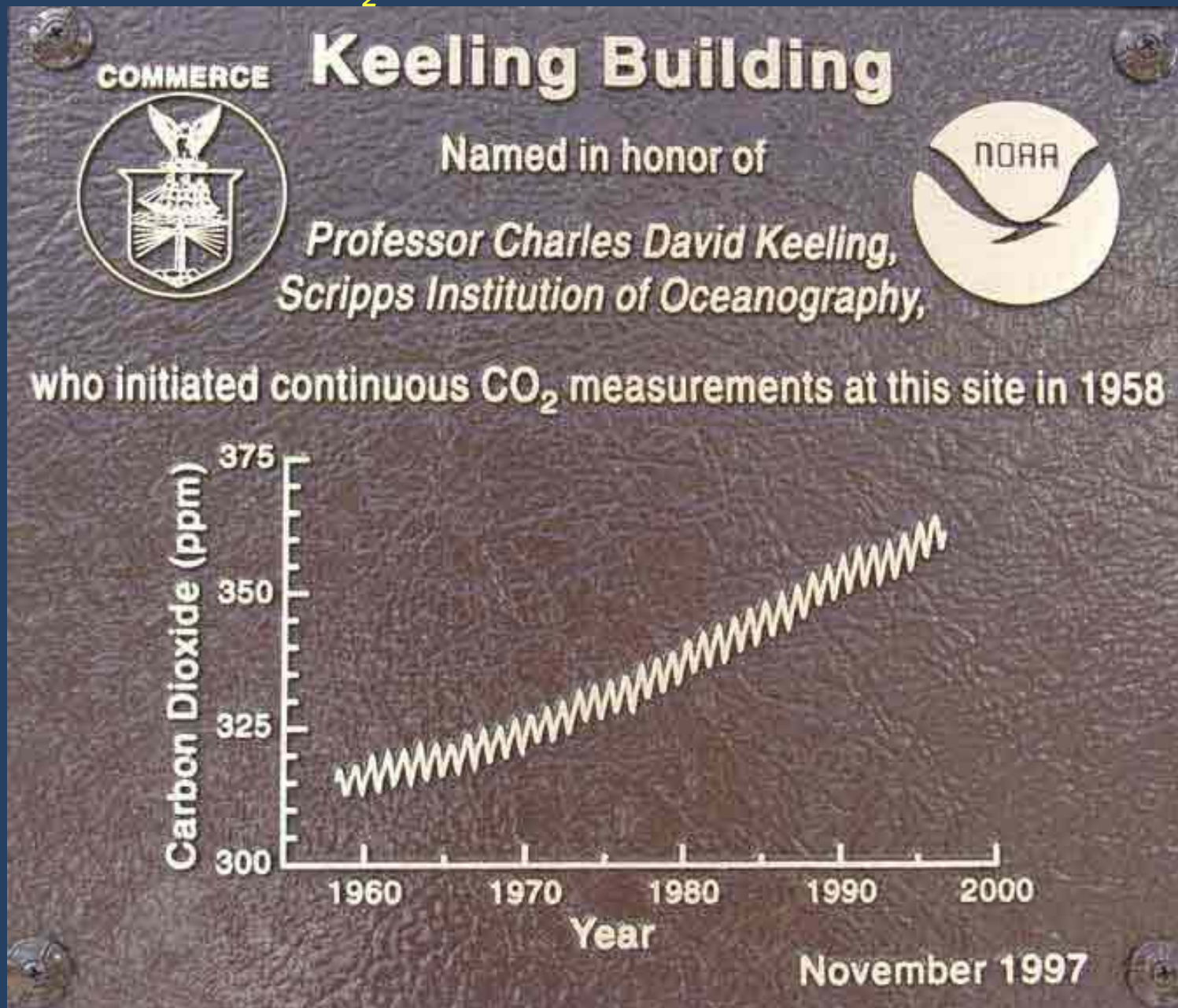
ciclo veloce del carbonio

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



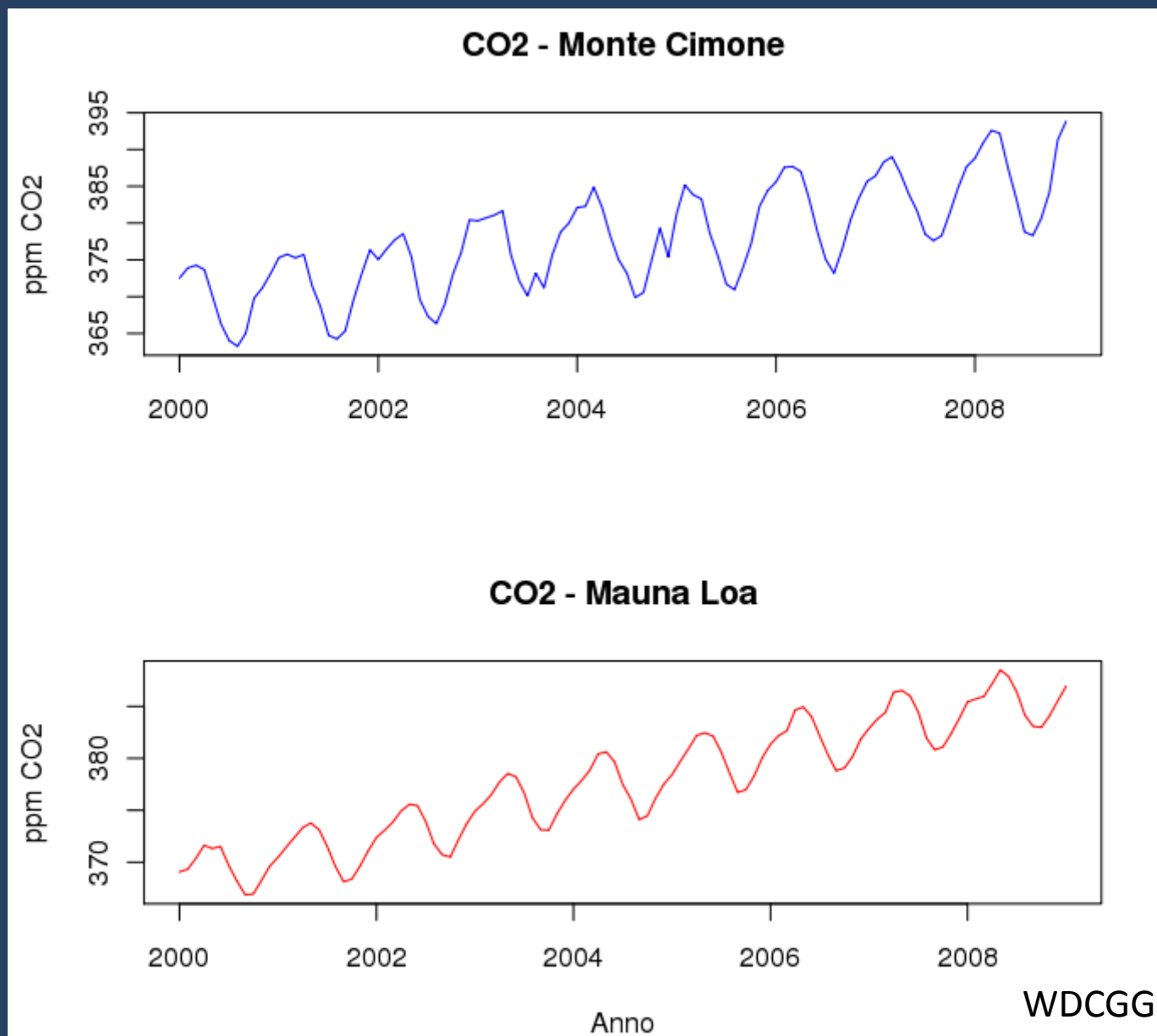
forzanti - GHG IX

misure di contenuto di CO₂



forzanti - GHG XI

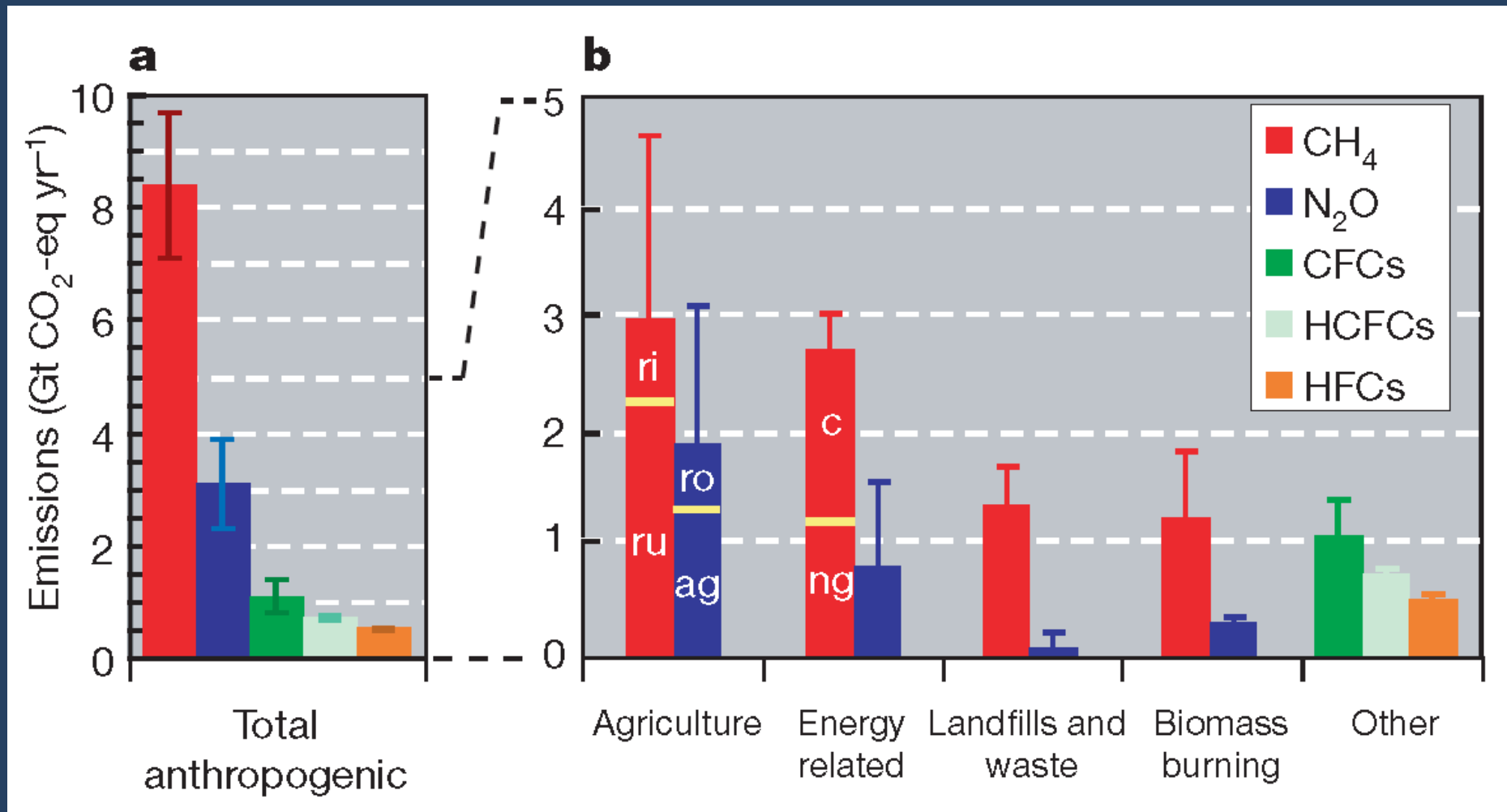
misure di contenuto di CO₂



forzanti - GHG XII

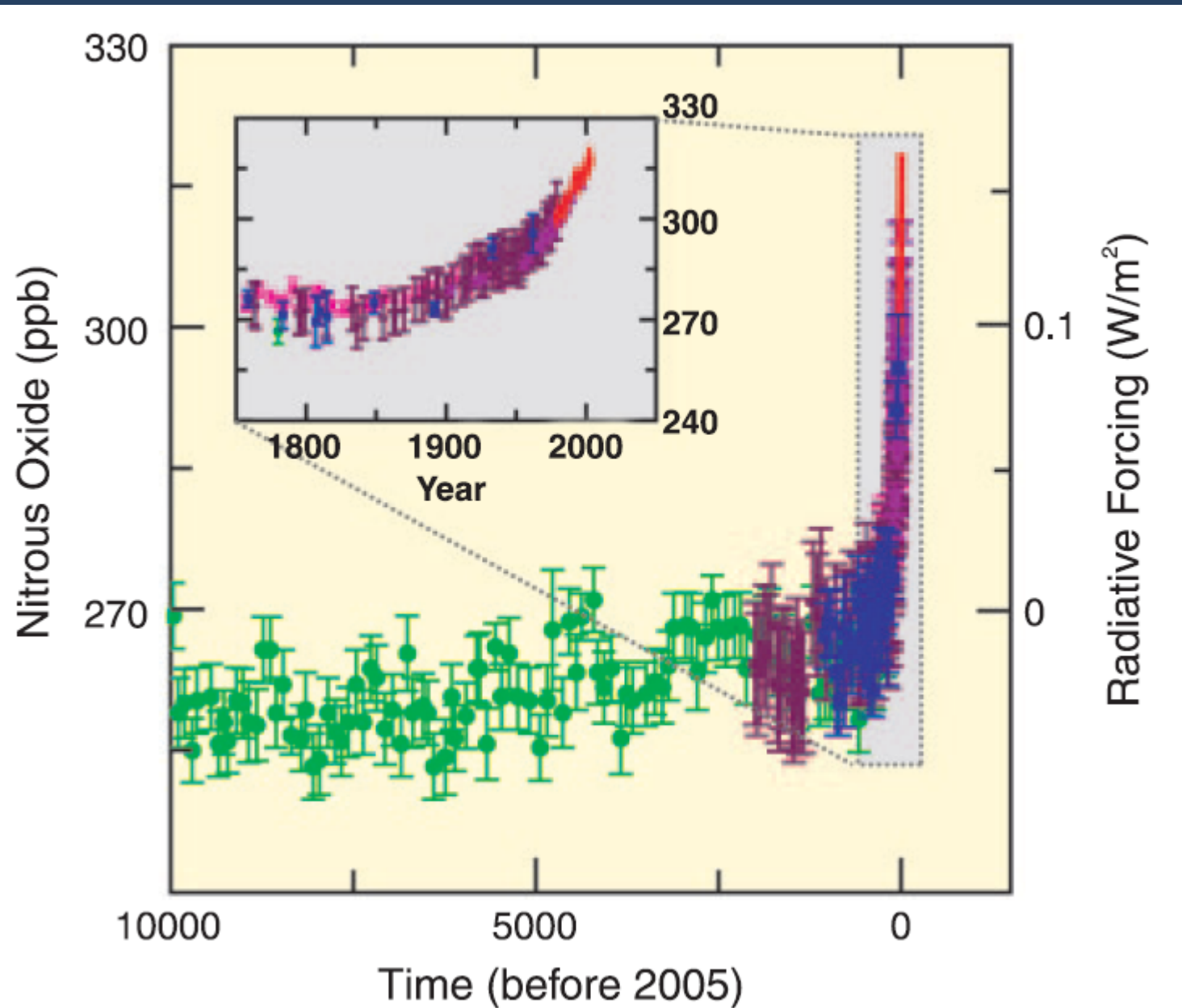
meccanismi di produzione e distruzione di altri GHG

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



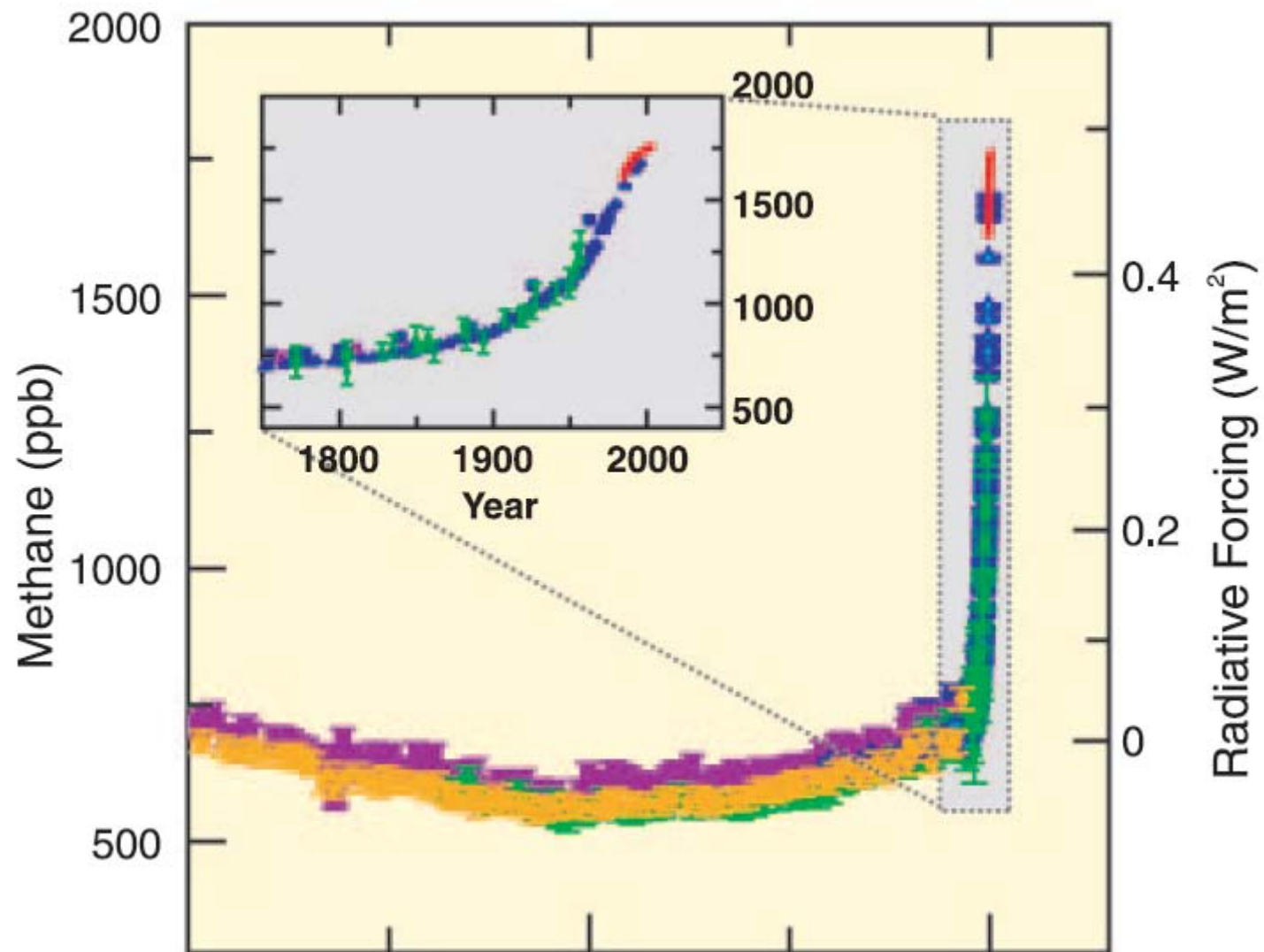
(Montzka et al, 2011)

forzanti - GHG XIII
record storici (ice cores)



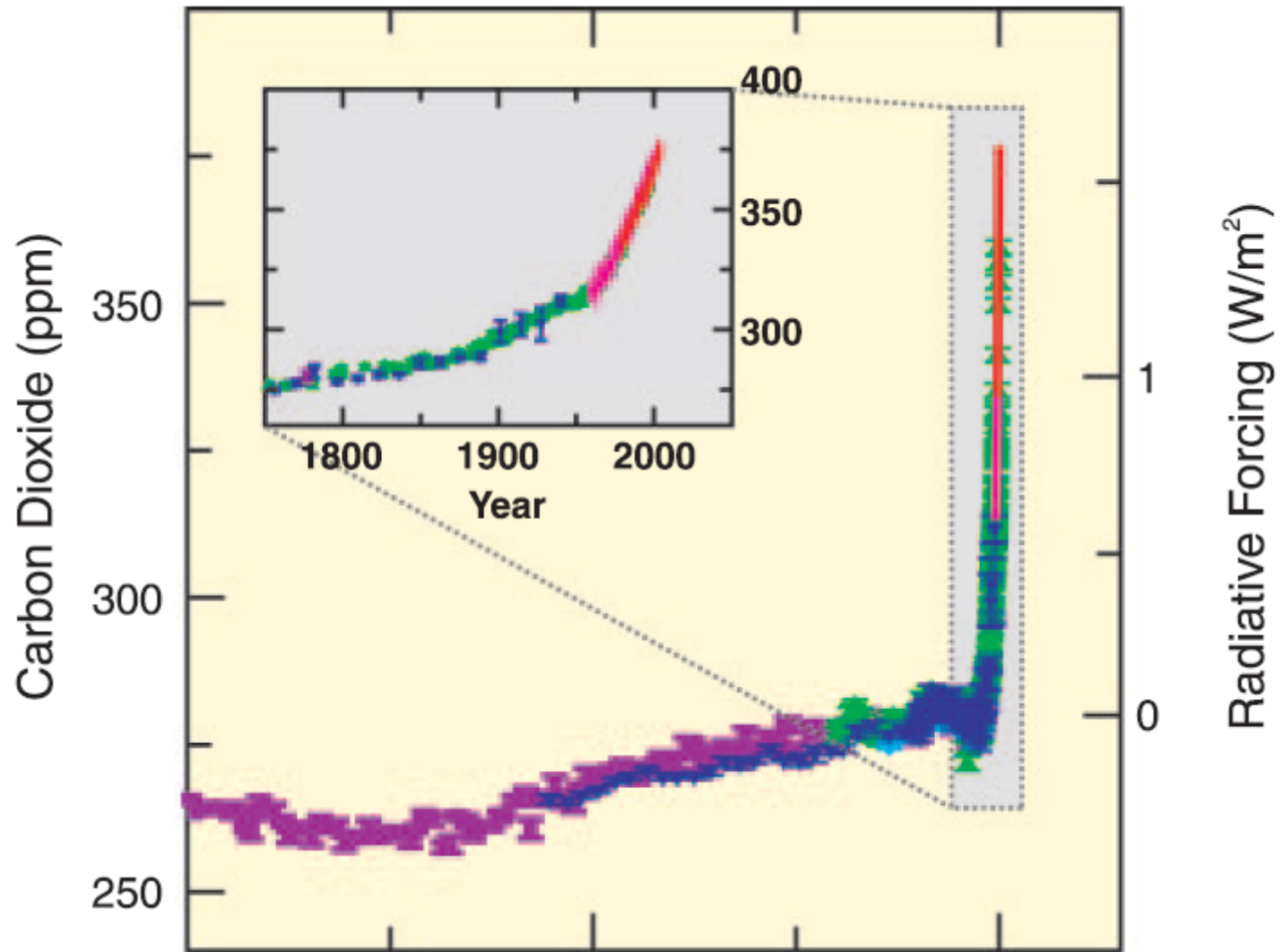
forzanti - GHG XIII

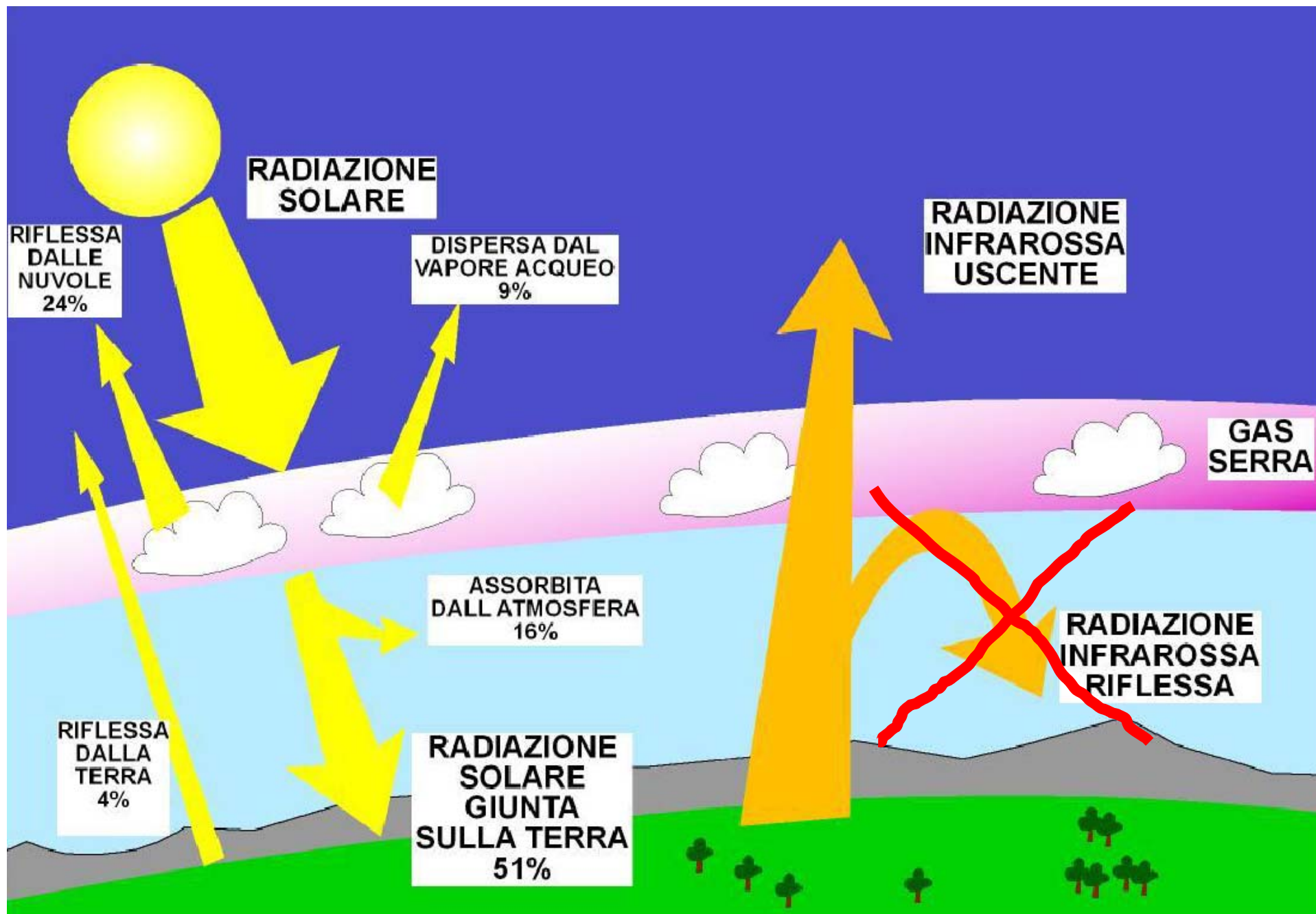
record storici (ice cores)



forzanti - GHG XIII

record storici (ice cores)





L'effetto serra

Energia Solare

Circa il 30%
delle radiazioni
infrarosse
si diffonde
nello spazio

I gas serra lasciano passare l'energia solare e intrappolano parte del calore creato dai raggi del sole

Radiazione
solare
assorbita
dalla Terra

Calore
intrappolato
e riradiato
dai gas serra



Anidride
carbonica
rilasciata
dagli aerei



Le navi
bruciano
combustibile

Mari e oceani
si riscaldano,
l'acqua evapora
e il calore così
formato viene
intrappolato
dai gas serra



Le industrie
rilasciano
anidride
carbonica

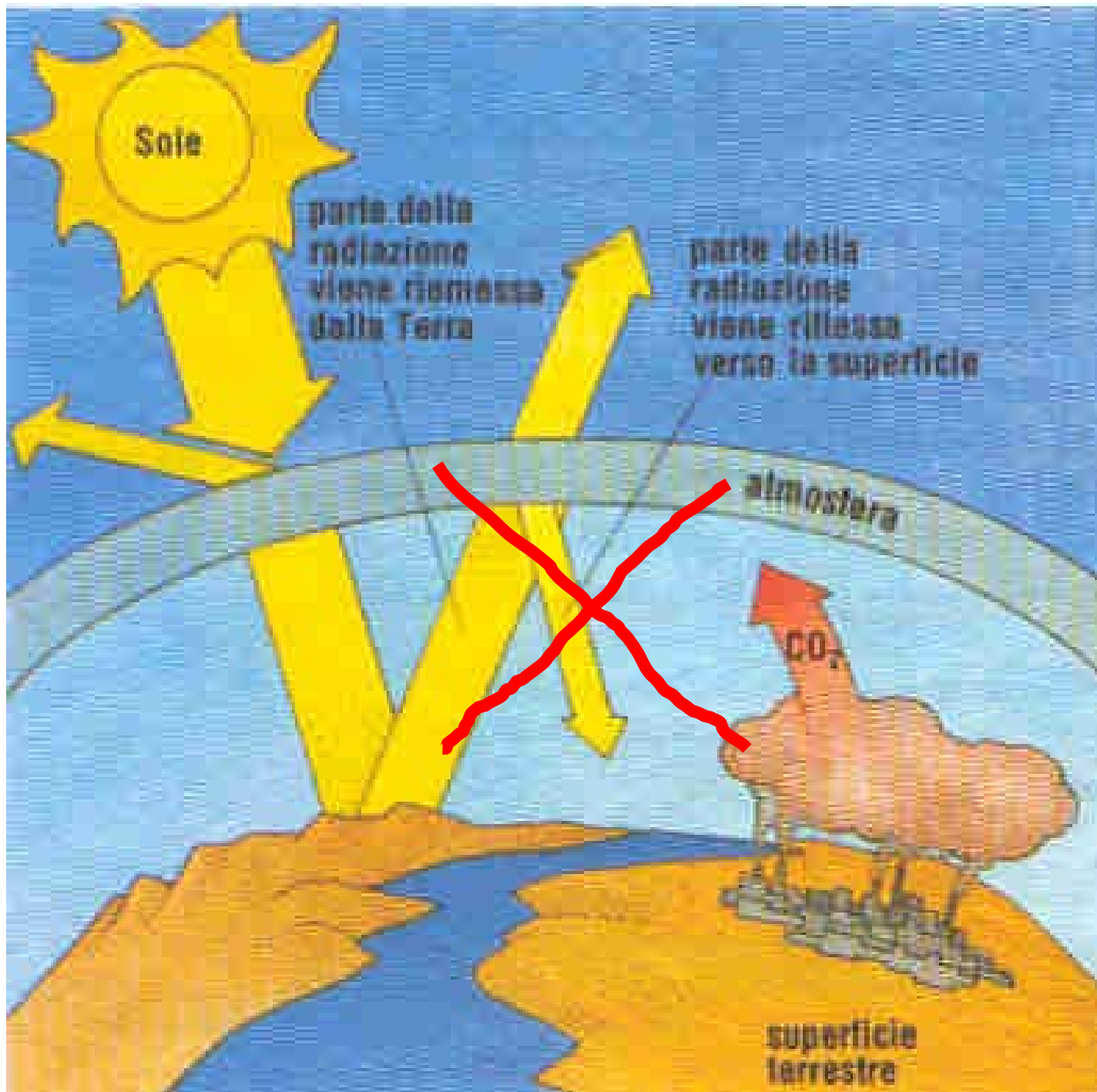


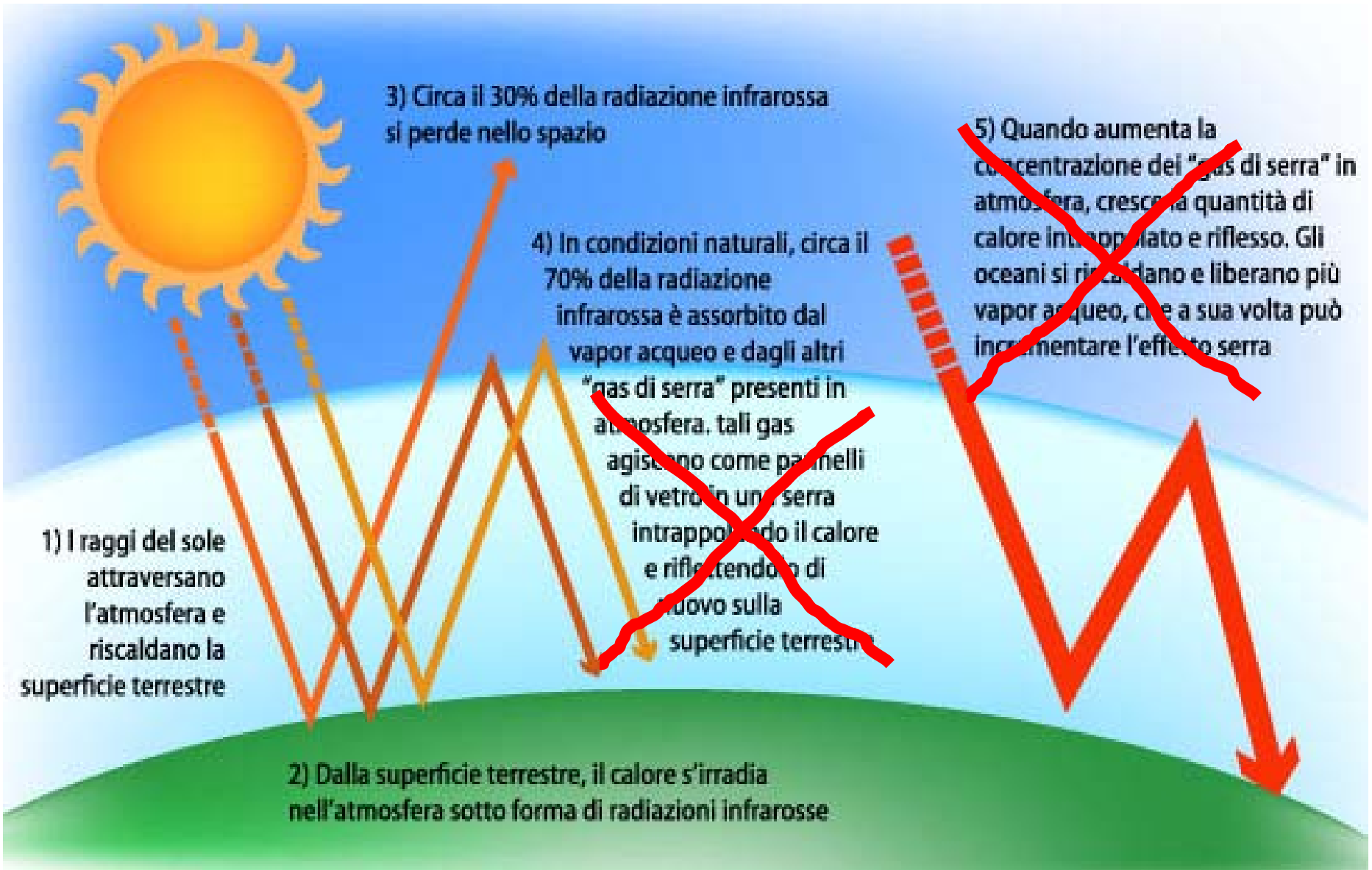
Taglio
delle
foreste



Consumo
di combustibili
fossili









L'effetto serra

A T M O S F E R A



un modello di bilancio energetico terrestre I

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

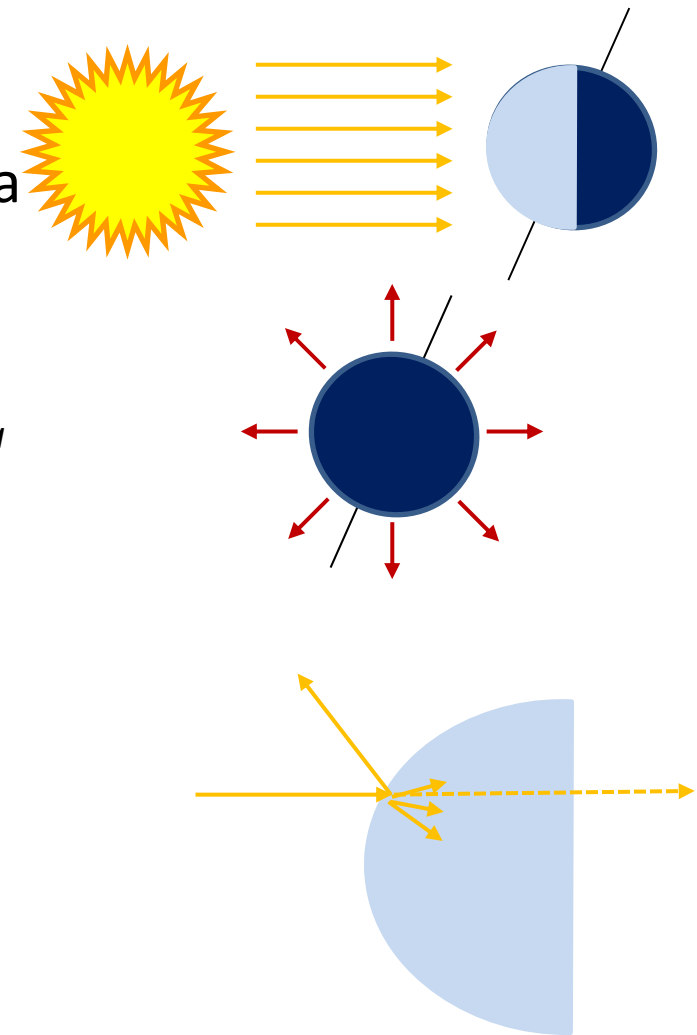
la frazione di superficie planetaria illuminata dal sole riceve questa energia,

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 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

imponiamo l'equilibrio energetico

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

che possiamo risolvere per l'incognita T_e ,

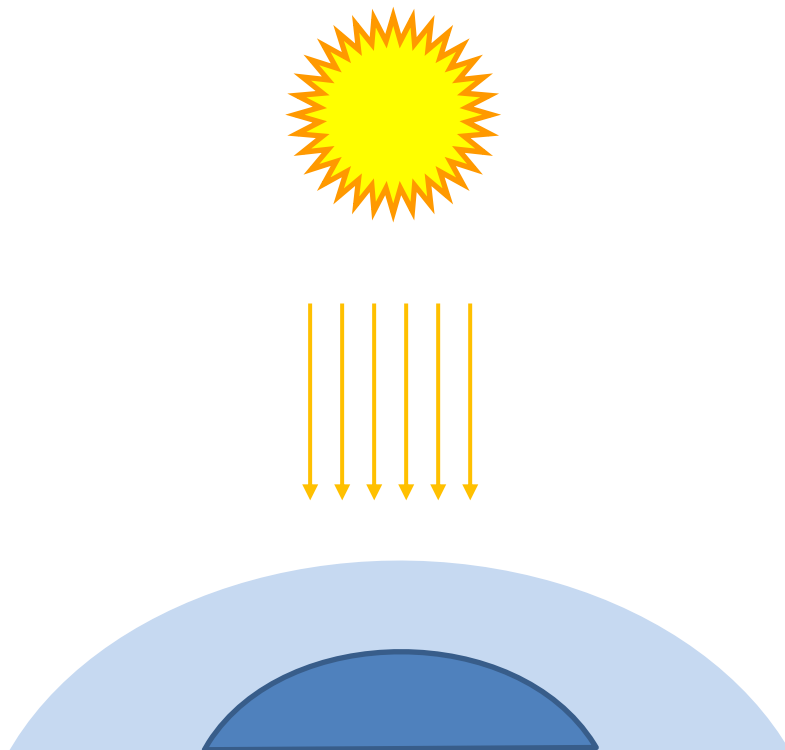
$$T_e = ((1-\alpha)S_o/4\sigma)^{1/4}$$

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 α

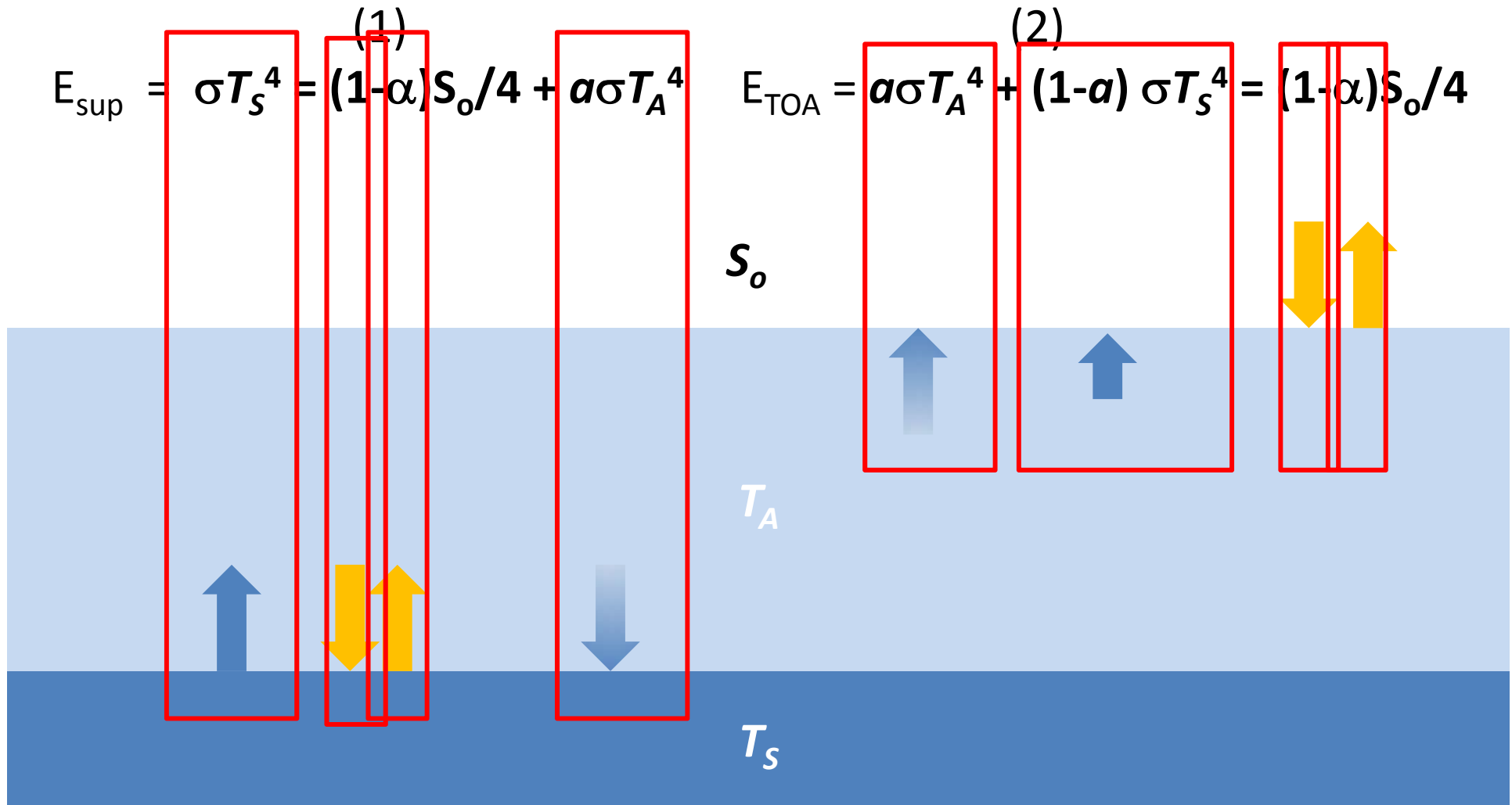


Legge di Kirchhoff:

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

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

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

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

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

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

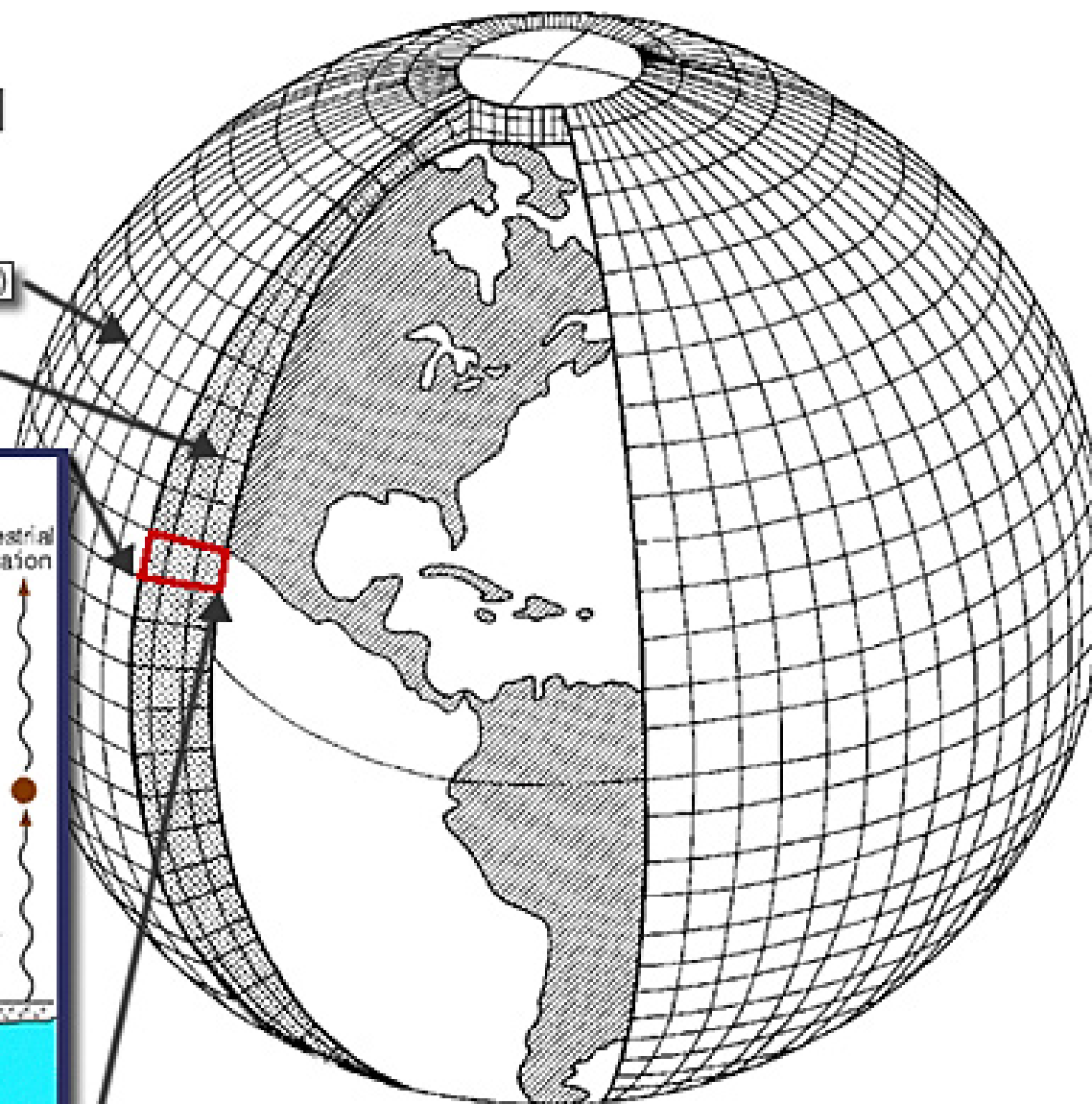
per $T_S = 288\text{K}$, $\alpha = 0.78$, $T_A = 242\text{K}$

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

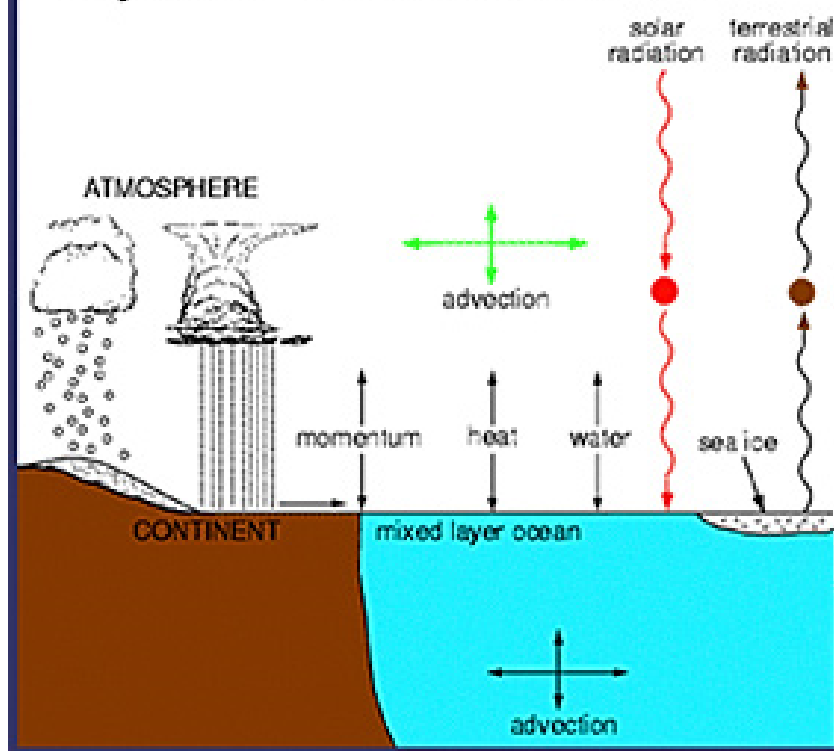
Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (latitude - longitude)

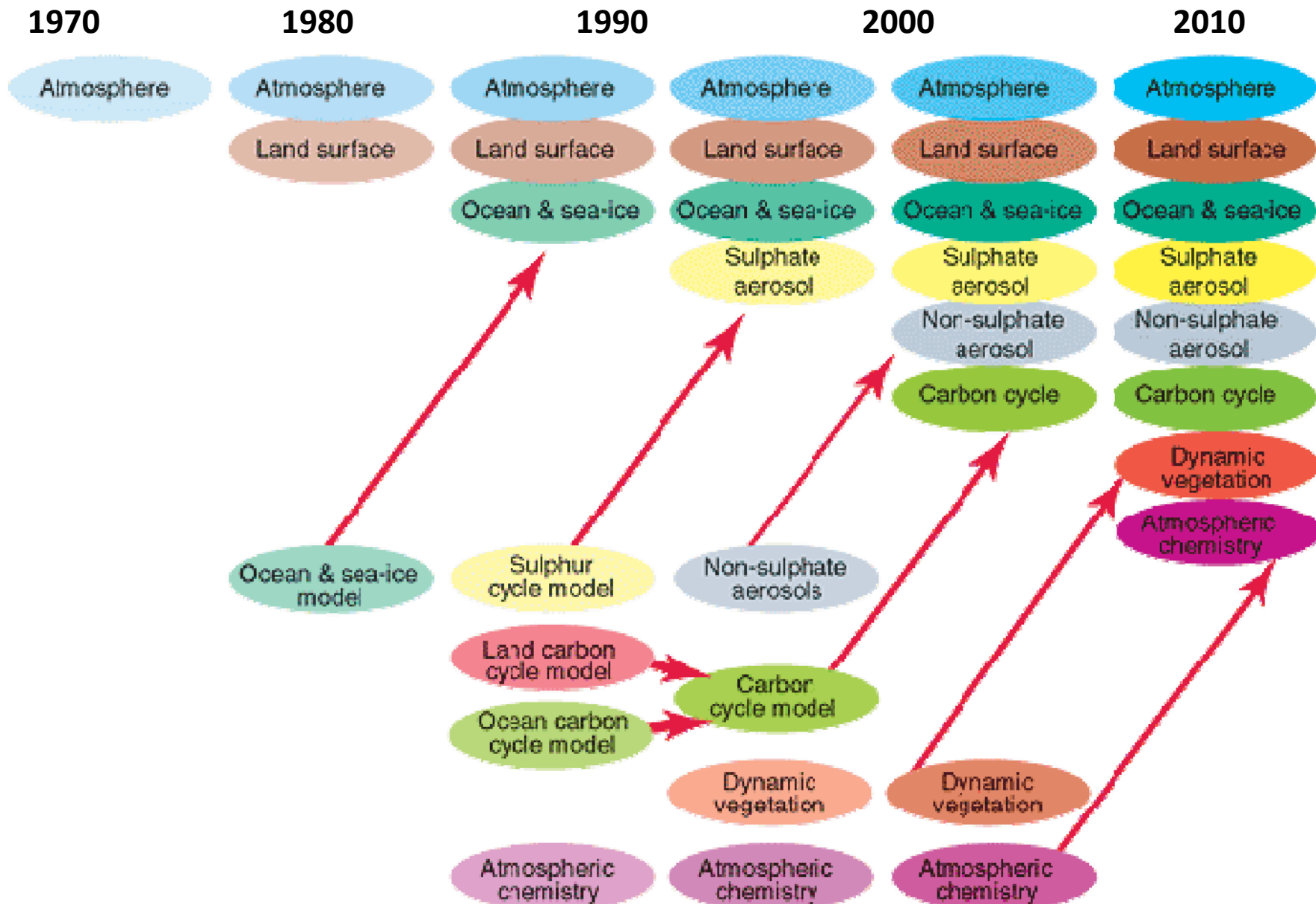
Vertical Grid (height or pressure)



Physical Processes in a Model

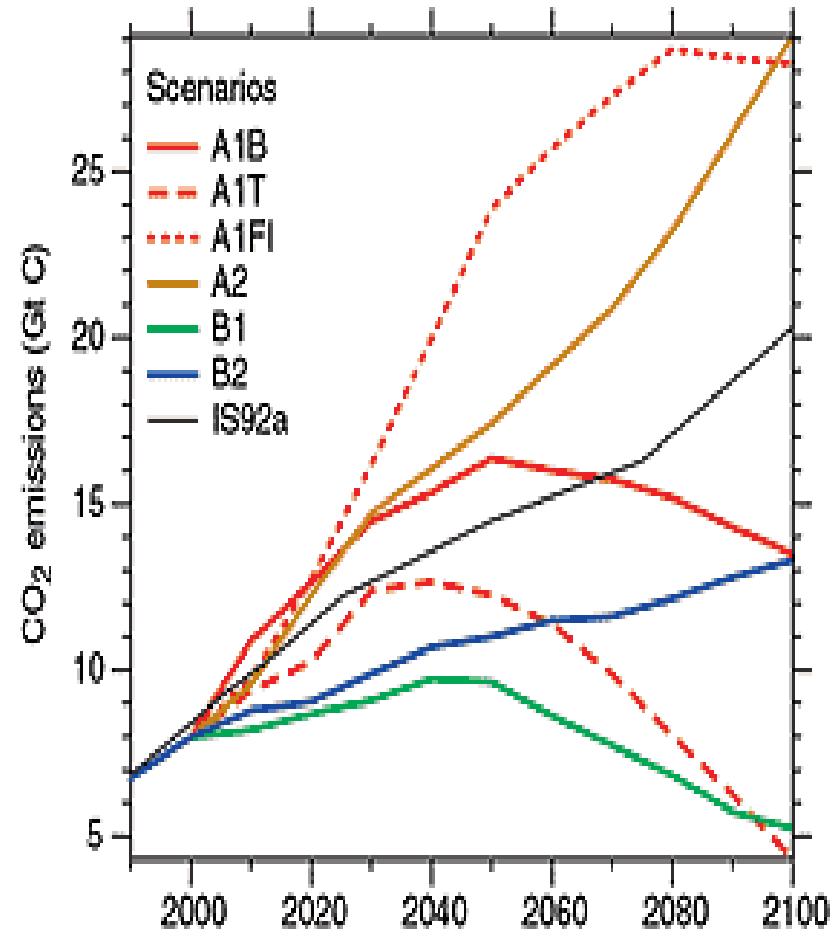


evoluzione dei modelli climatici

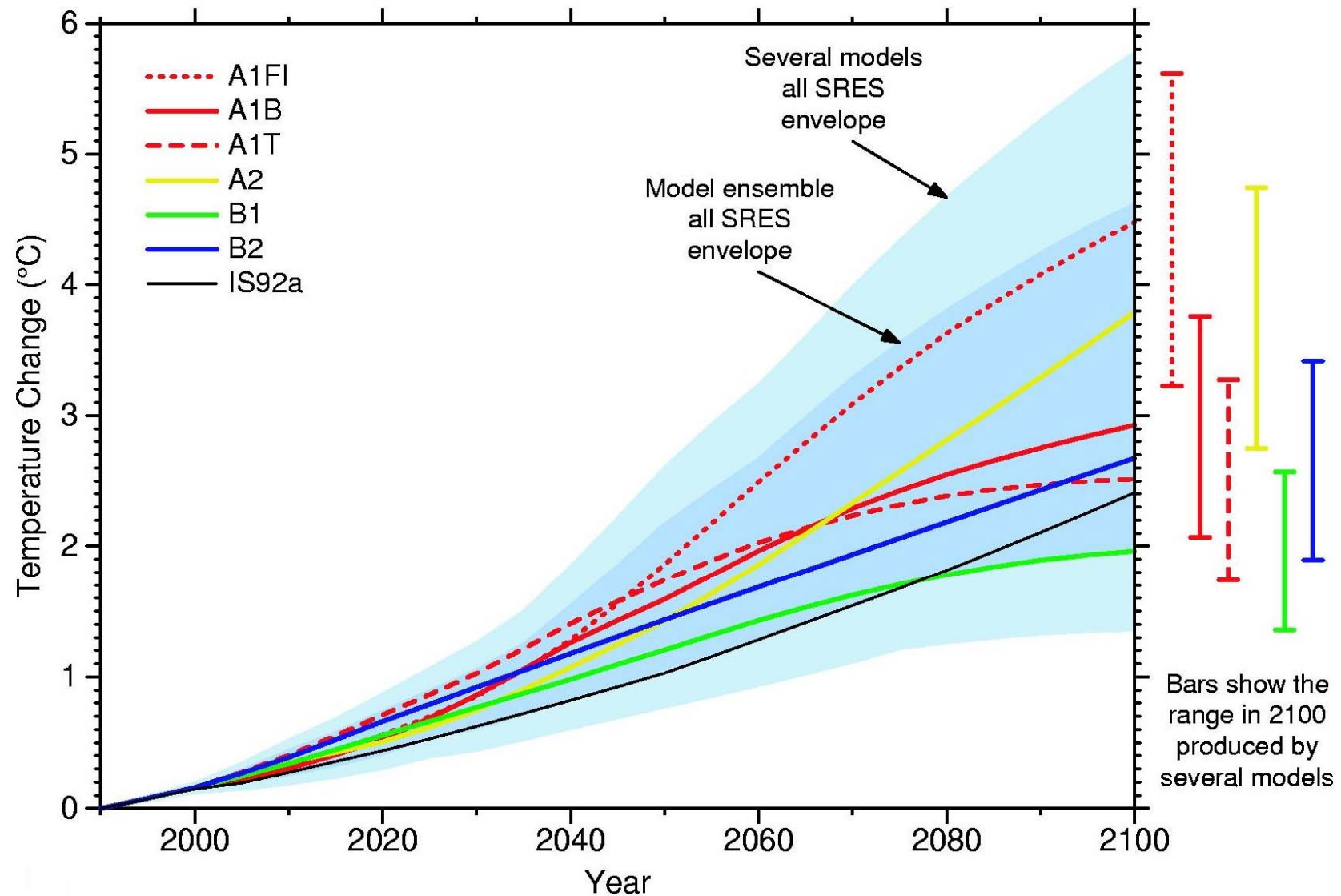


Future Climate Change

- 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



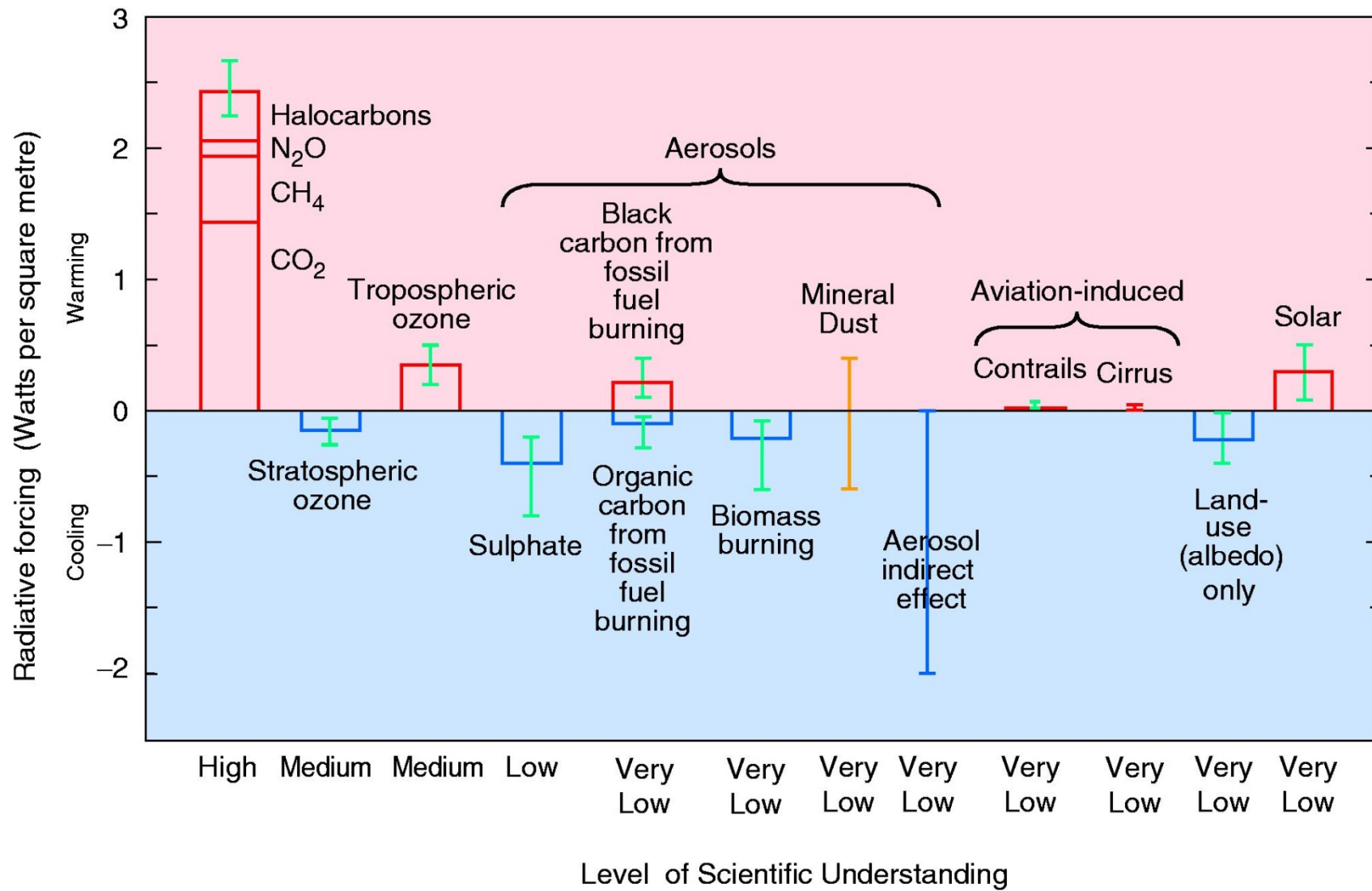
per la **temperatura globale** si prevede una **crescita** da **1.4 a 5.8°C** nel periodo **1990-2100**



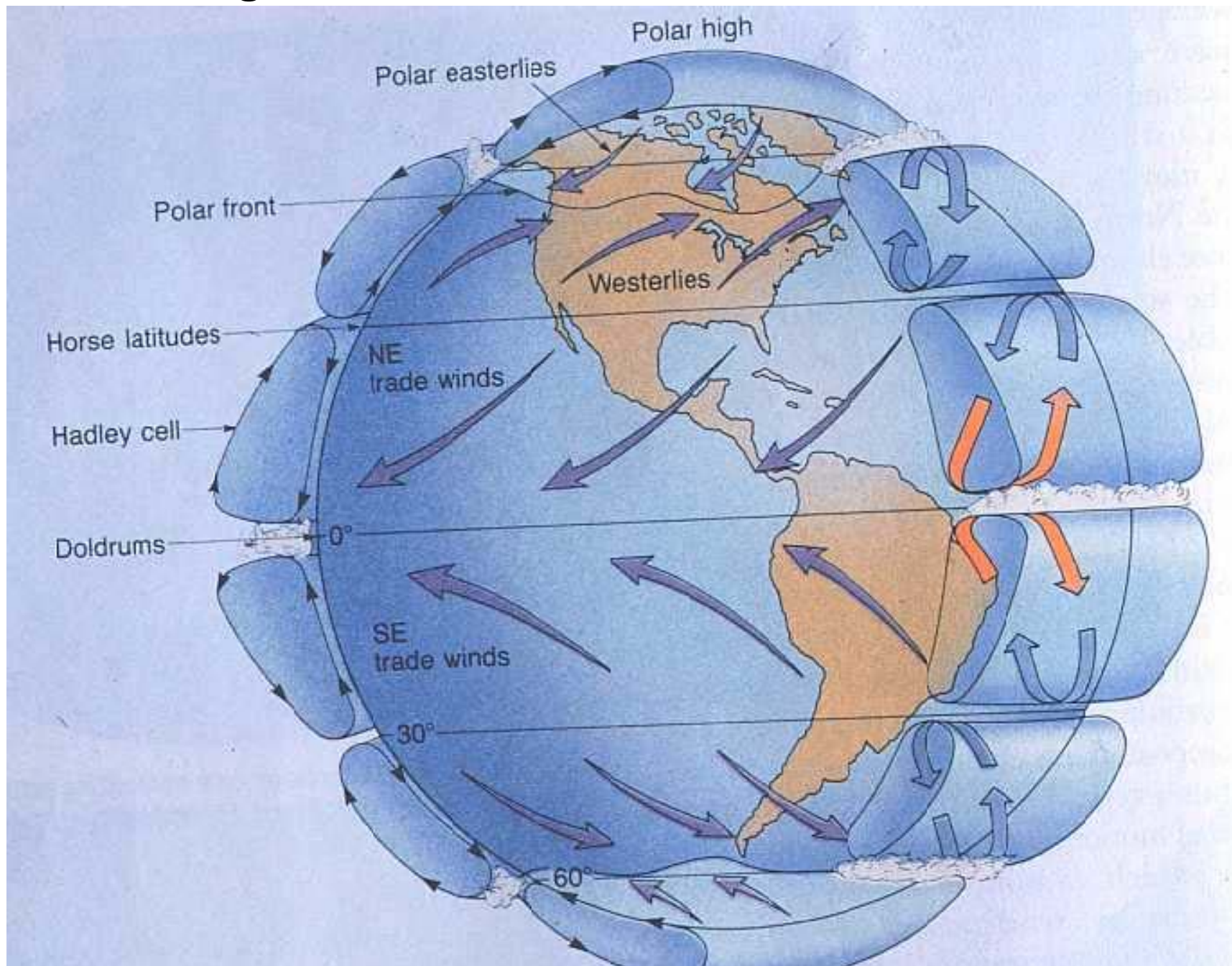
**Prediction is very
difficult, especially if
it's about the future.**

-Nils Bohr-

The global mean radiative forcing of the climate system for the year 2000, relative to 1750

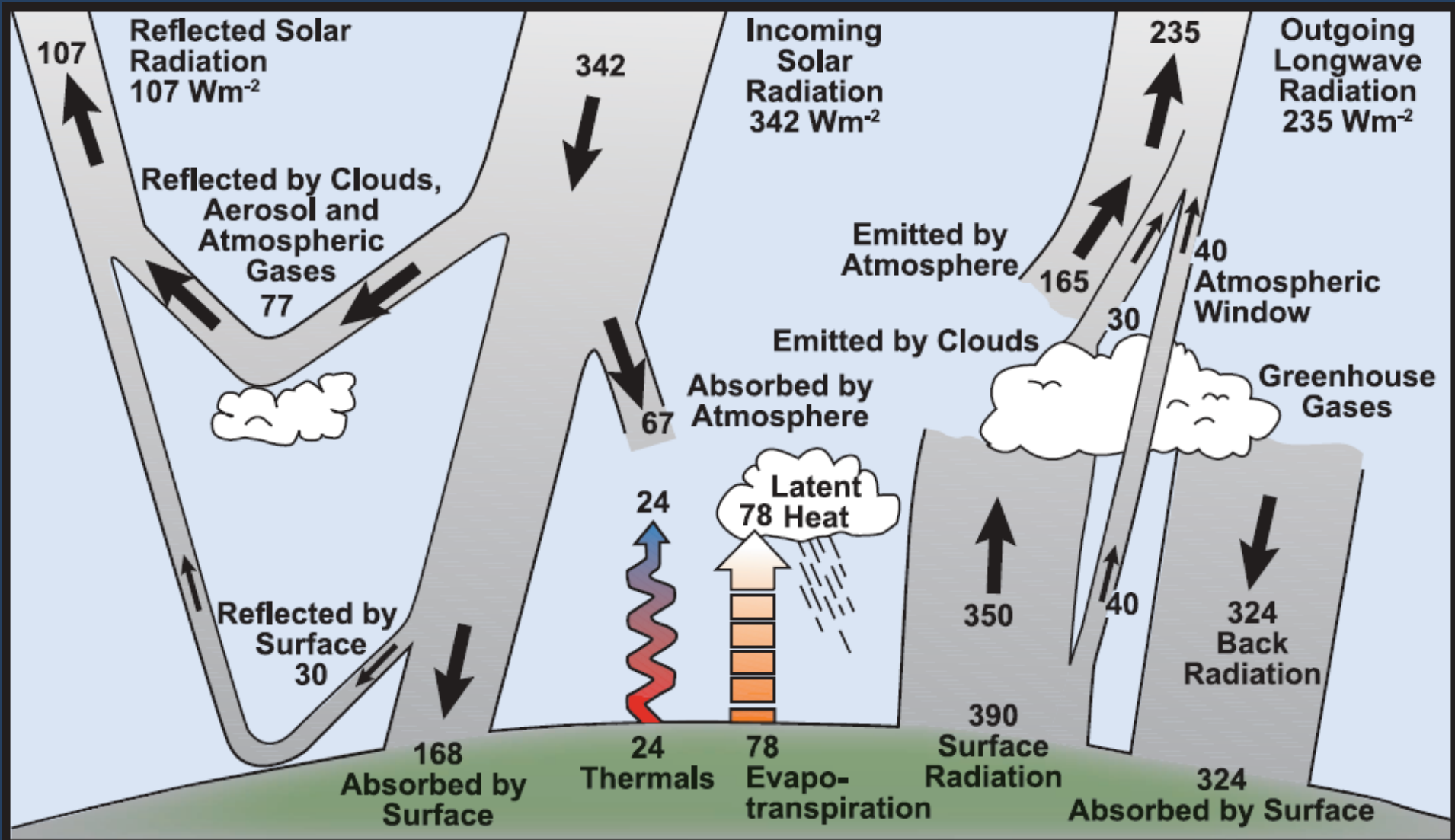


circolazione globale



forzanti - GHG III

bilancio energetico terrestre: flussi globali medi annui (Wm^{-2})



Kiehl and Trenberth (1997)

forzanti - GHG IV

il forcing sul sistema

radiative forcing: misura l'influenza di un dato meccanismo nell'alterare il bilancio di flussi energetici entranti ed uscenti dal sistema alla tropopausa (TOA) in Wm^{-2} :

$$F_{in} - F_{out} = \Delta F = \frac{\Delta T}{\lambda}$$

λ è la sensibilità climatica [$m^2 K W^{-1}$] esprime la variazione della temperatura in seguito ad un forcing di $1 Wm^{-2}$ al TOA.

forzanti - GHG VI

Global Warming Potential

$$GWP(X) = \frac{\int_0^{TH} a_x \cdot X(t) dt}{\int_0^{TH} a_{CO_2} \cdot CO_2(t) dt}$$

ove:

a_x è l'efficienza radiativa della specie x [$W m^{-2} kg^{-1}$]

TH è il Time Horizon sul quale è fatta la stima

$X(t)$ è il profilo di decadimento temporale della specie x

forzanti - GHG VII

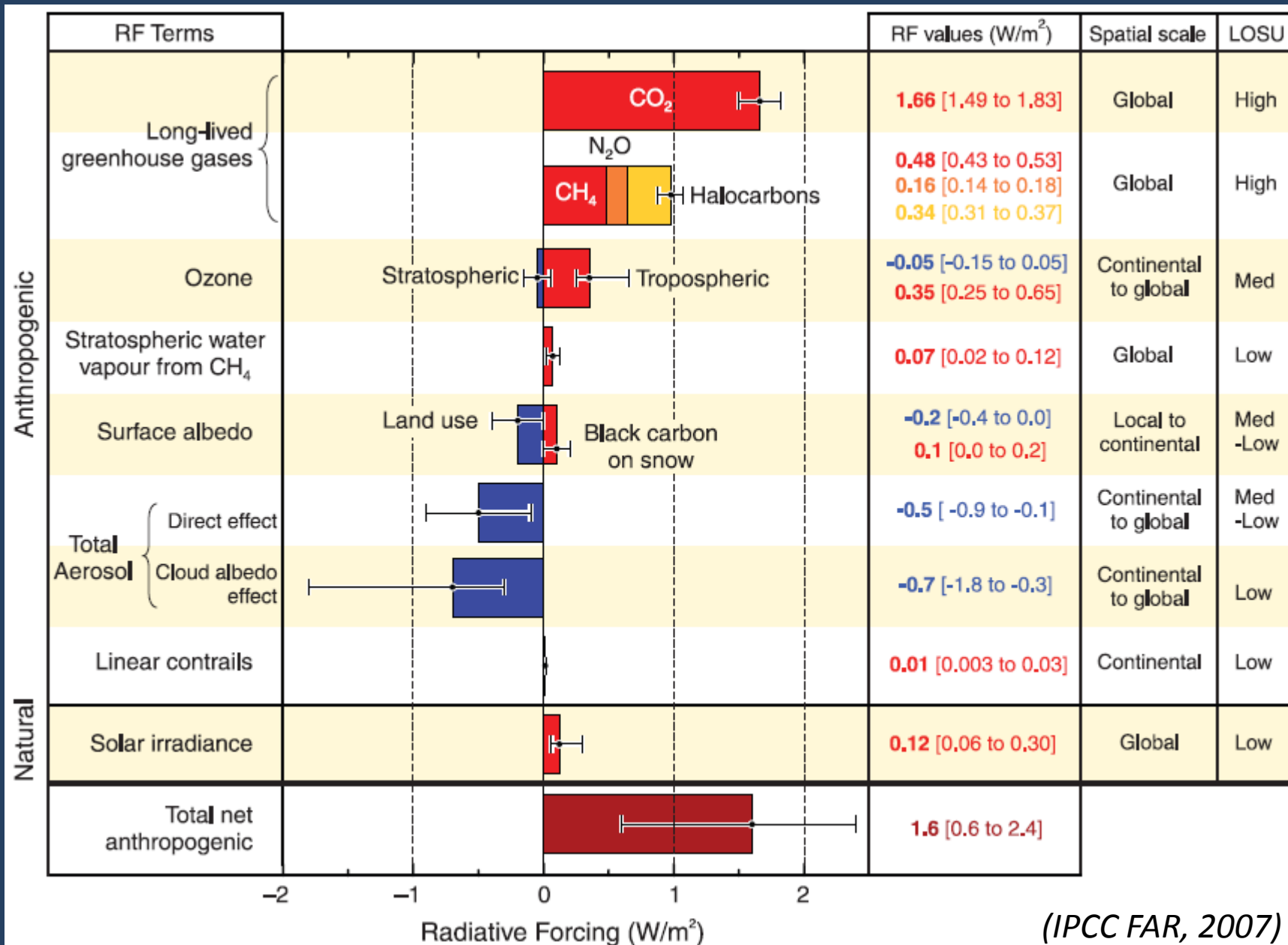
GWP per alcuni gas

(IPCC FAR, 2007)

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency ($W\ m^{-2}\ ppb^{-1}$)	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR [†] (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO ₂	See below ^a	^b 1.4x10 ⁻⁵	1	1	1	1
Methane ^c	CH ₄	12 ^c	3.7x10 ⁻⁴	21	72	25	7.6
Nitrous oxide	N ₂ O	114	3.03x10 ⁻³	310	289	298	153
Sulphur hexafluoride	SF ₆	3,200	0.52	23,900	16,300	22,800	32,600
CFC-11	CCl ₃ F	45	0.25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl ₂ F ₂	100	0.32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	CClF ₃	640	0.25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl ₂ FCClF ₂	85	0.3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	CClF ₂ CClF ₂	300	0.31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	CClF ₂ CF ₃	1,700	0.18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	CBrF ₃	65	0.32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	CBrClF ₂	16	0.3		4,750	1,890	575
Halon-2402	CBrF ₂ CBrF ₂	20	0.33		3,680	1,640	503
Carbon tetrachloride	CCl ₄	26	0.13	1,400	2,700	1,400	435
Methyl bromide	CH ₃ Br	0.7	0.01		17	5	1
Methyl chloroform	CH ₃ CCl ₃	5	0.06		506	146	45
HCFC-22	CHClF ₂	12	0.2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	1.3	0.14	90	273	77	24
HCFC-124	CHClFCF ₃	5.8	0.22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH ₃ CCl ₂ F	9.3	0.14		2,250	725	220

forzanti - GHG V

radiative forcing & LOSU



forzanti - GHG X

The Global Atmosphere Watch (GAW) programme of WMO WDCGG (1990)

