

Federico Porcù, Dip. di Fisica ed Astronomia,
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna
federico.porcu@unibo.it



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

25.05 Energia I

problema energetico, struttura atomica,
fissione nucleare

28.05 Energia II

fusione nucleare, centrali nucleari, energie
rinnovabili

04.06 Clima **15:15**

sistema climatico, osservazione, modellazione
e tendenze

Introduzione al sistema climatico terrestre



Studio e previsioni dello stato del sistema

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

definizione del problema;
evidenze della tendenza climatica;
aspetti critici;

sistemi dinamici;
il sistema climatico terrestre;
un approccio osservativo.

CLIMA E TEMPO METEOROLOGICO

diversa scala temporale

diversità di metodo, dati e formulazioni teoriche

tempo meteorologico *stato di un sottosistema (in particolare dell'atmosfera) ad un istante.*

clima *stato medio del sistema e sue variazioni nel tempo.*

INDICATORI

temperatura dell'aria

altezza del mare

**precipitazione, vegetazione, insolazione,
estensione dei ghiacci,**

temperatura dell'aria ($h=2\text{ m}$)

termometri (tempi recenti < 200 anni):

- termometri a mercurio

- termometri a stato solido (termistori)

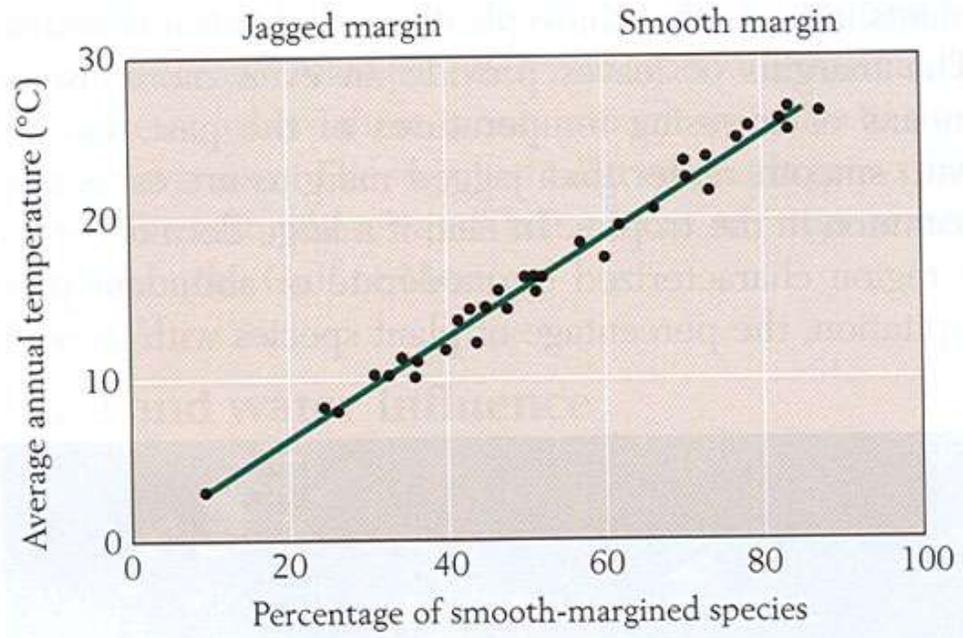
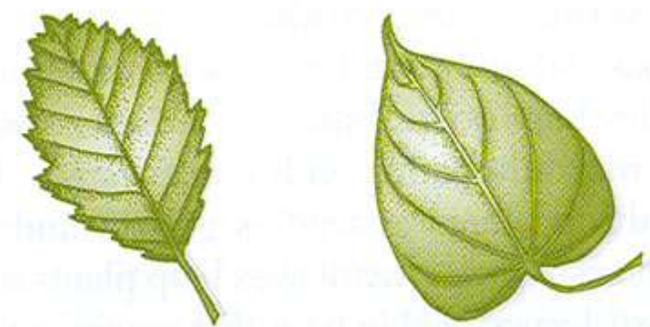
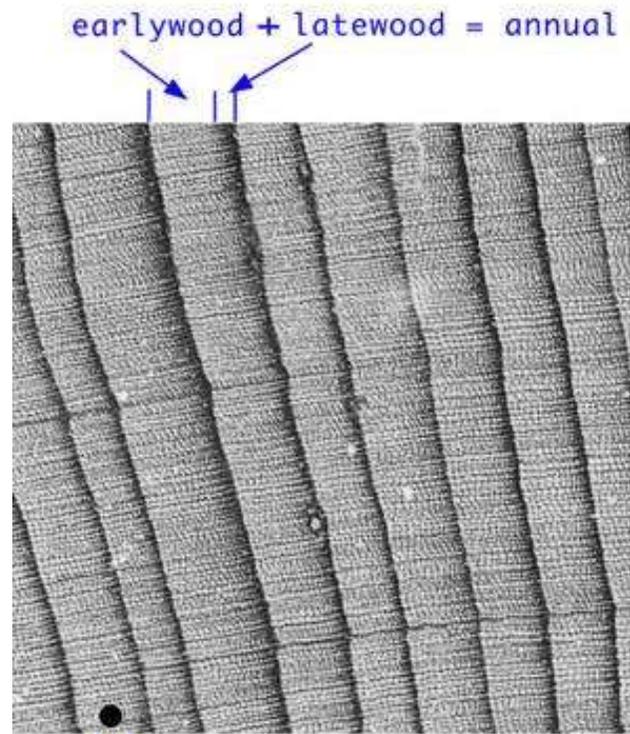
proxy data (paleoclima):

- anelli di accrescimento degli alberi

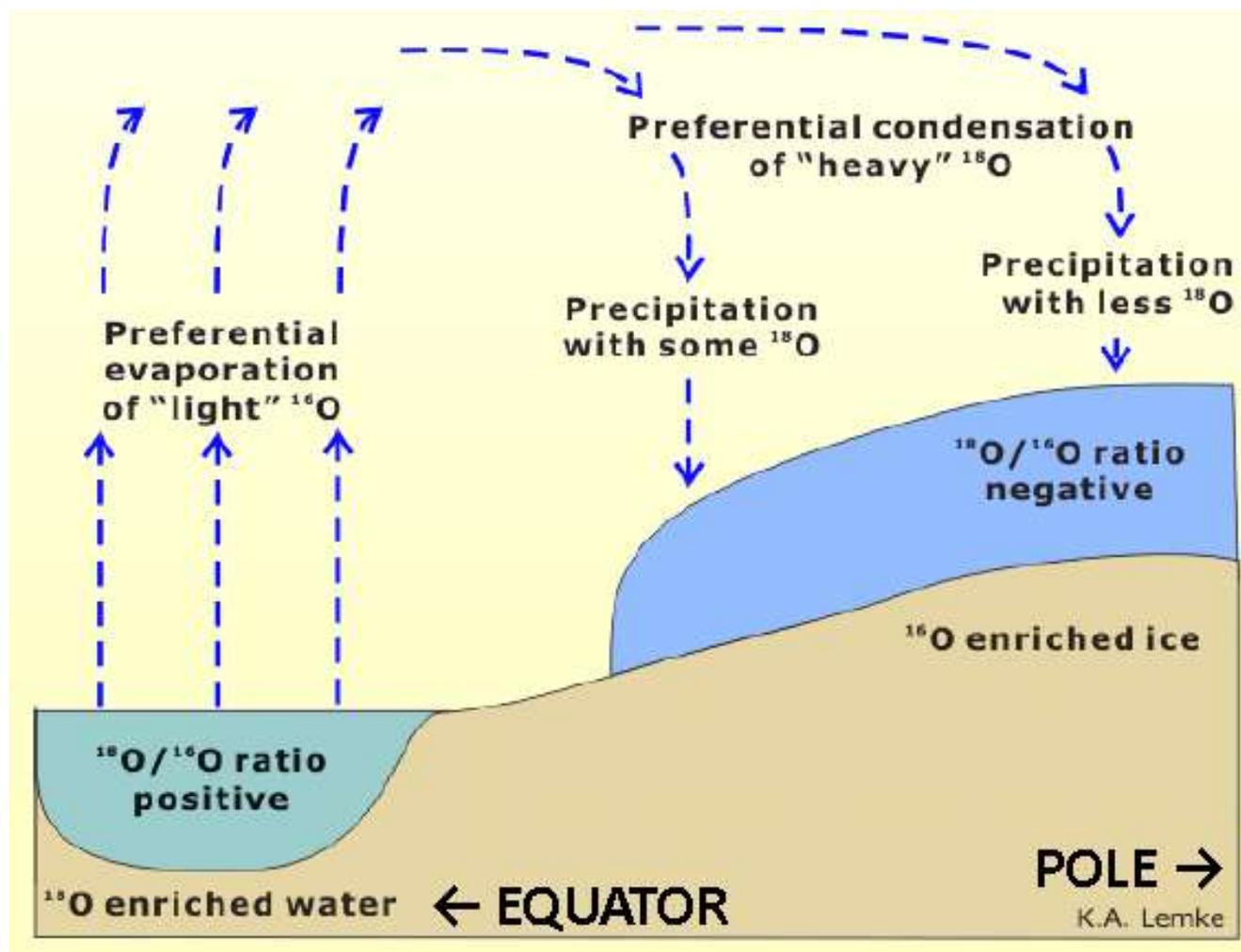
- forma delle foglie

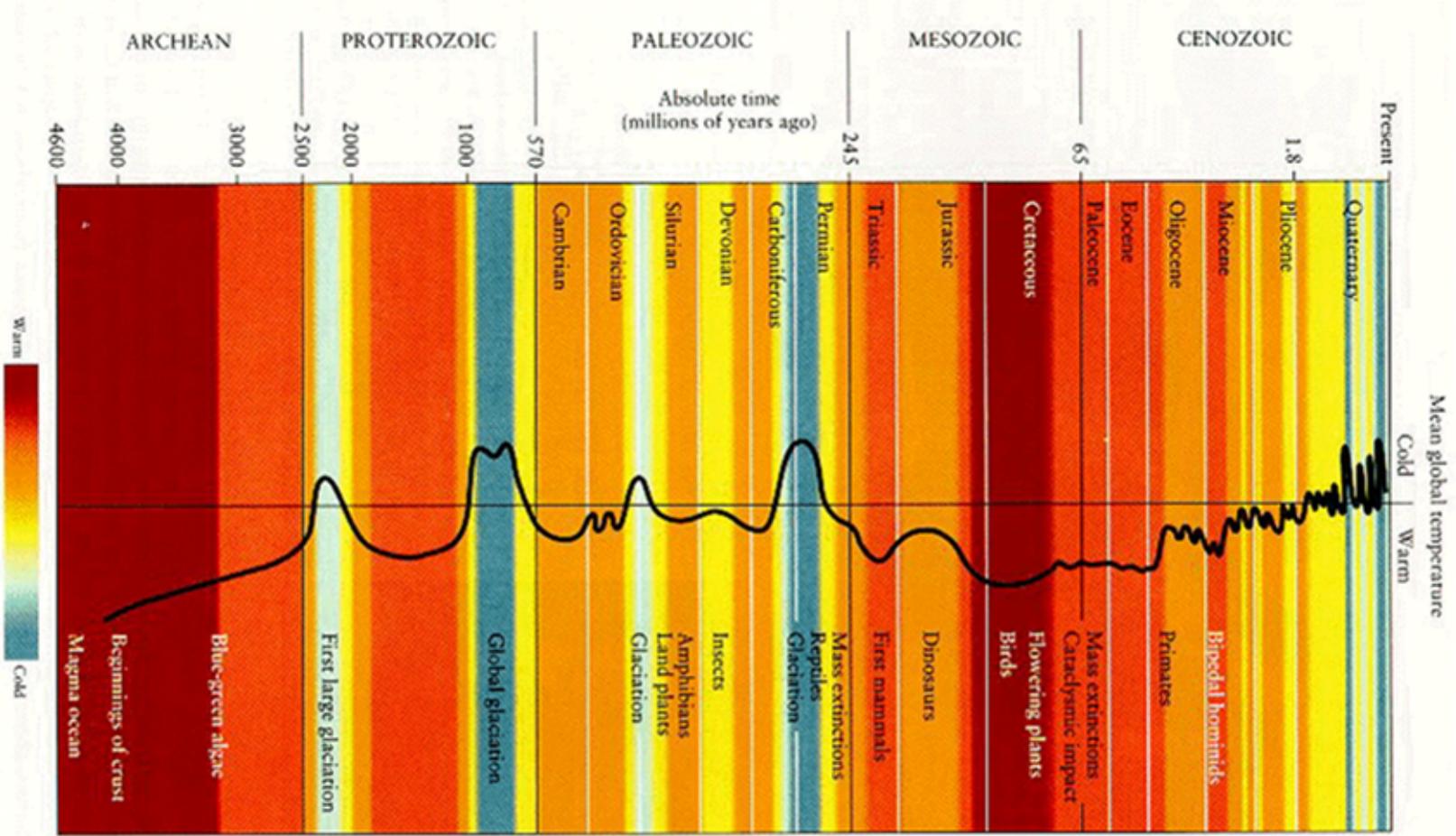
- O^{16}/O^{18}

- cronache storiche



1770 1780 1783 1790 1800

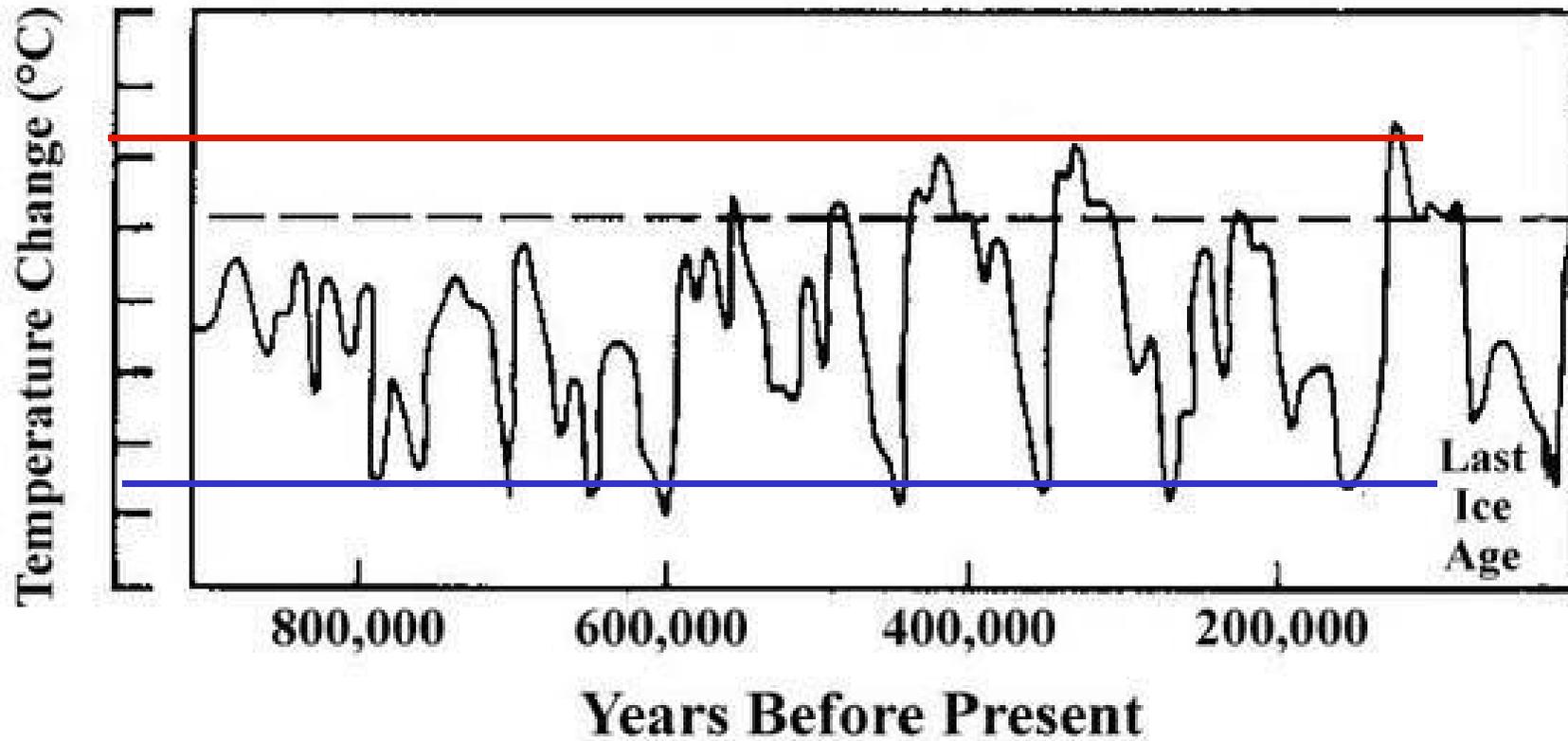




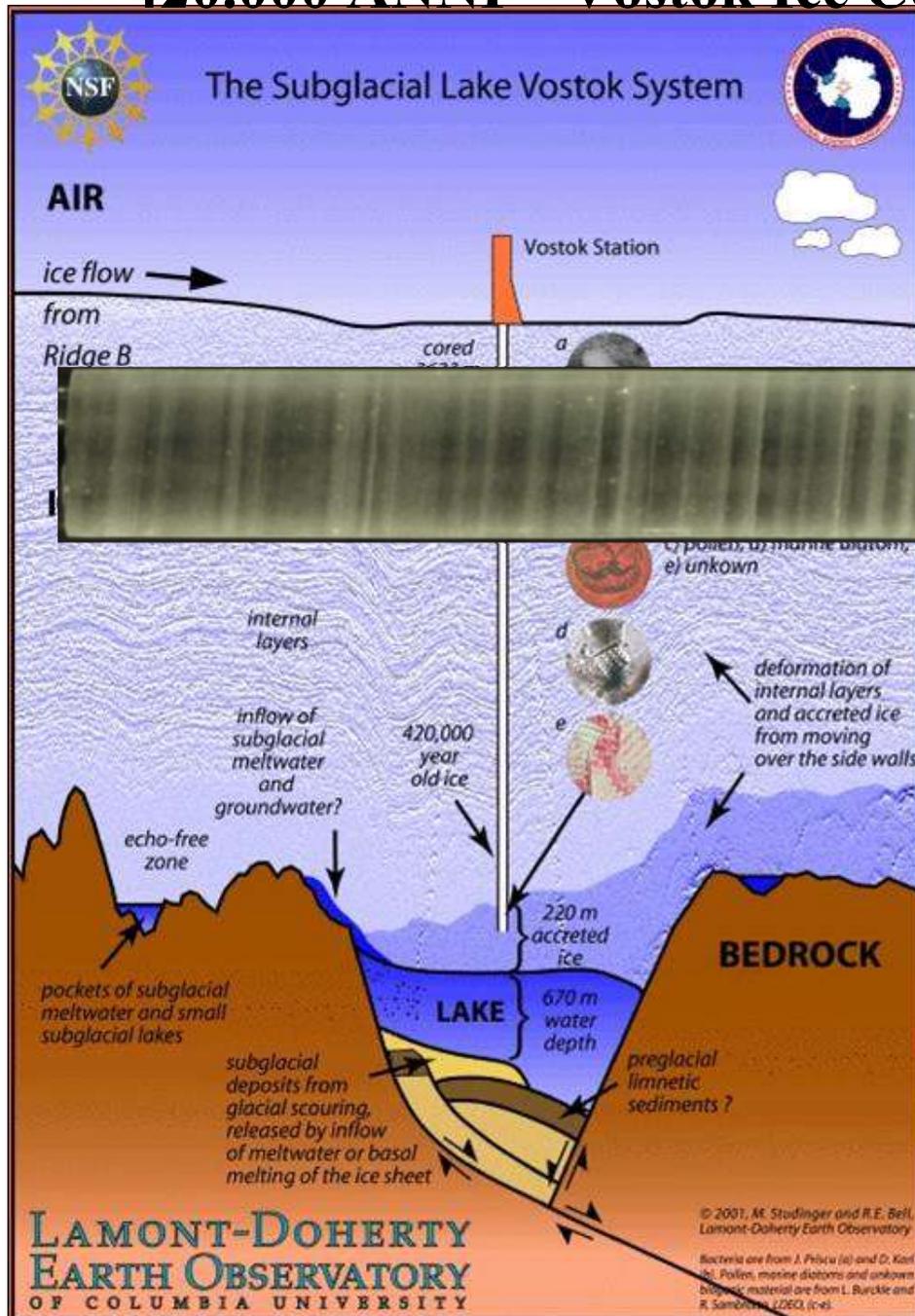
4.5 MILIARDI



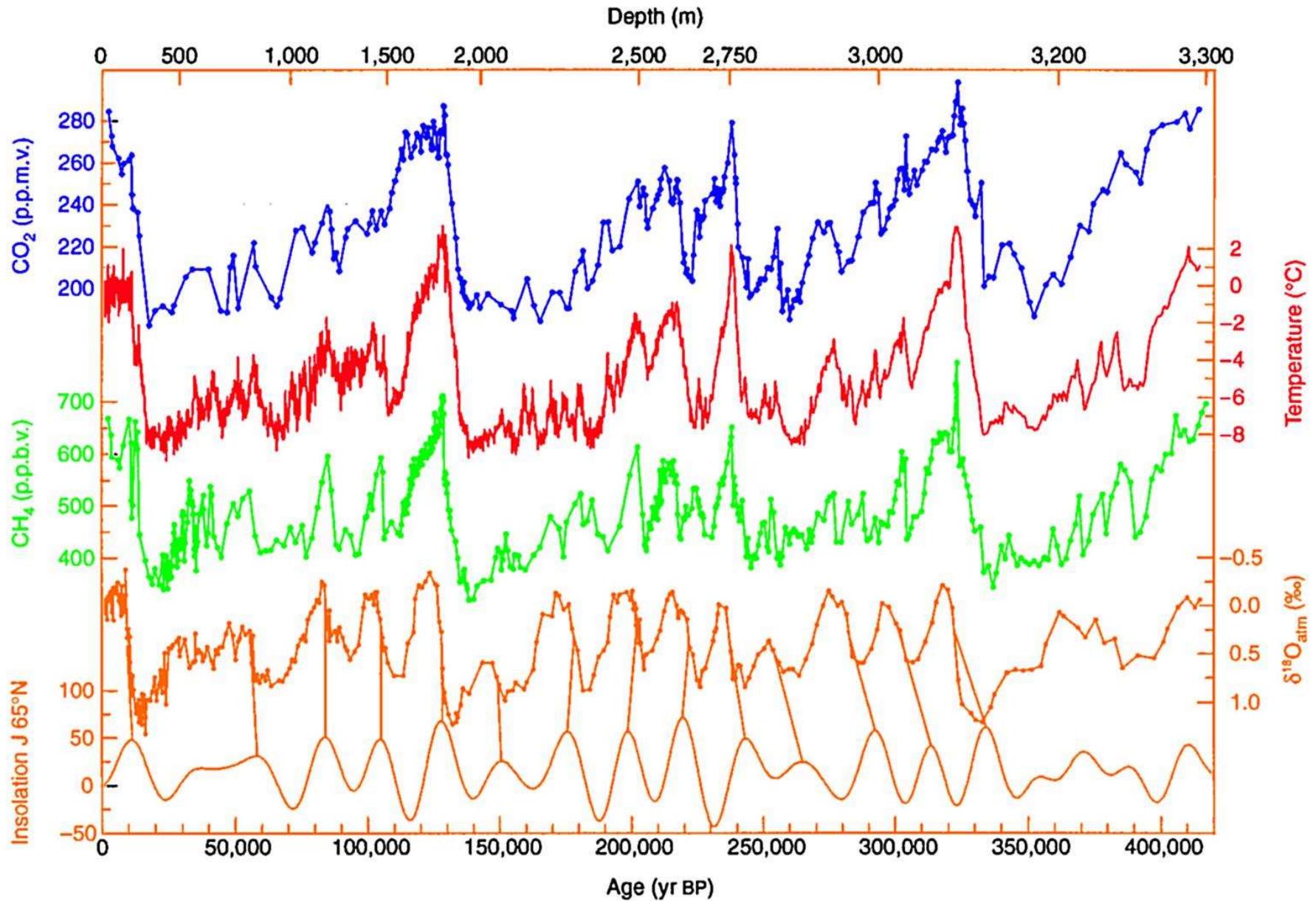
1 MILIONE DI ANNI



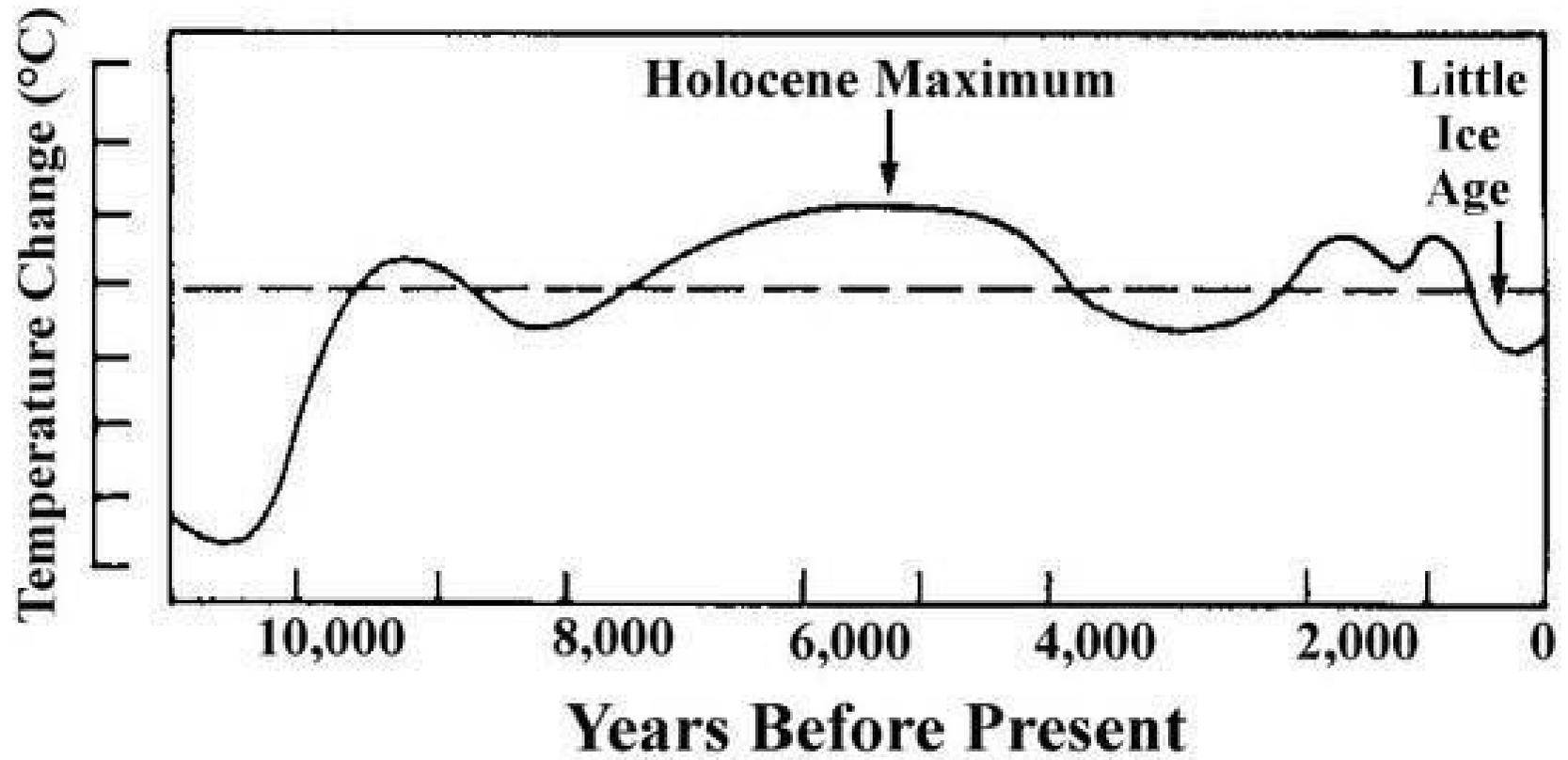
420,000 ANNI – Vostok Ice Core



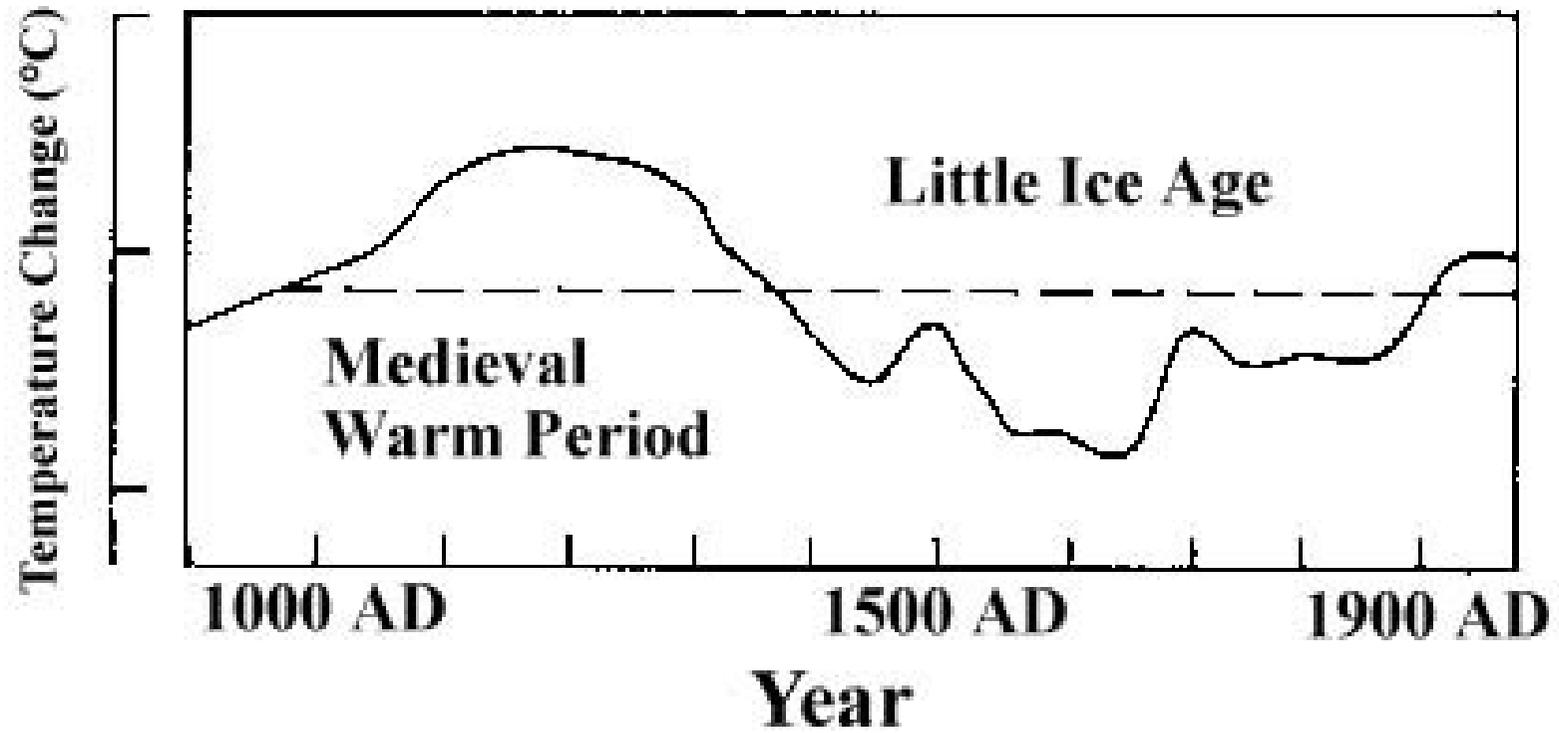
420.000 ANNI – Vostok Ice Core



10.000 ANNI

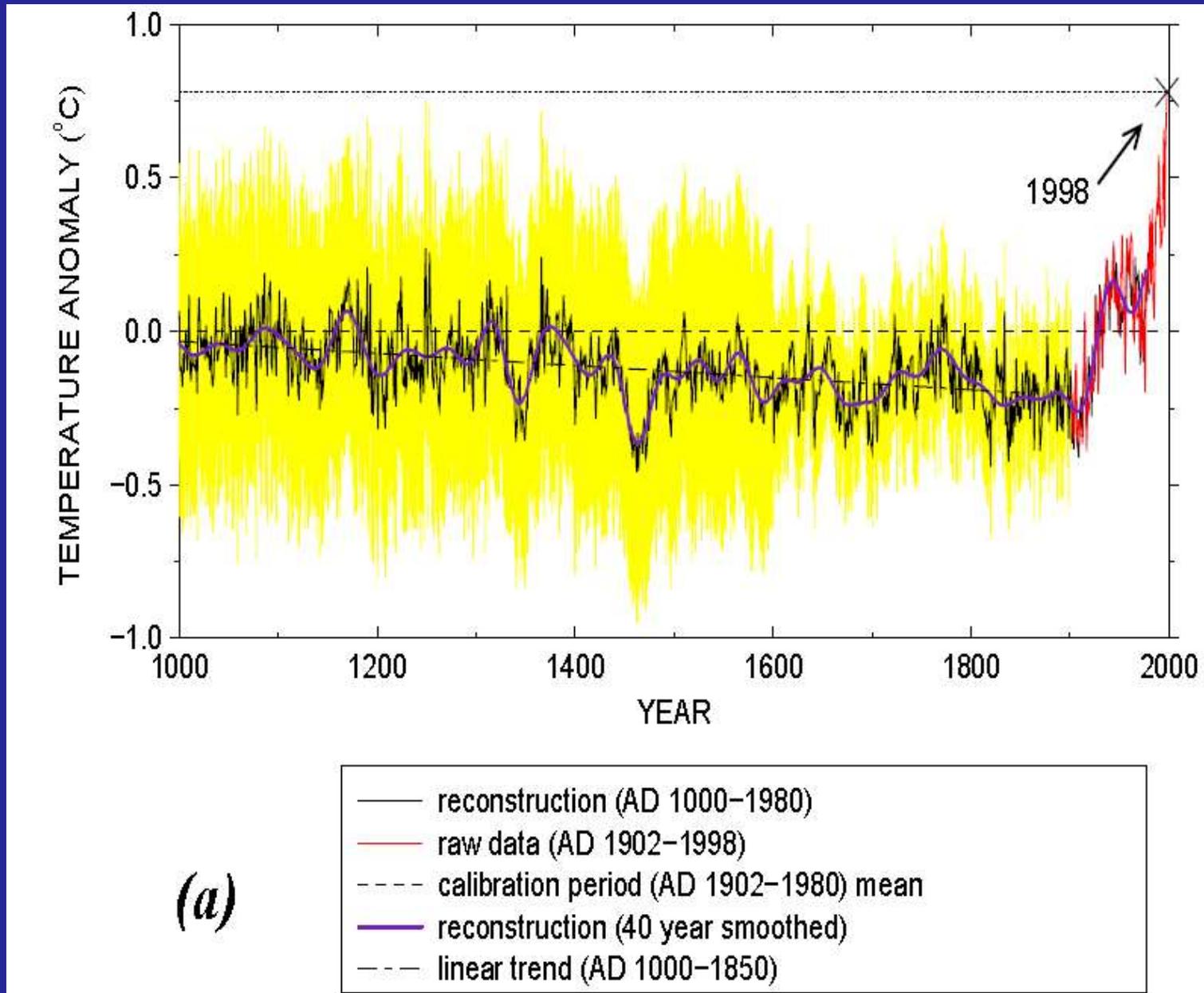


1.000 ANNI



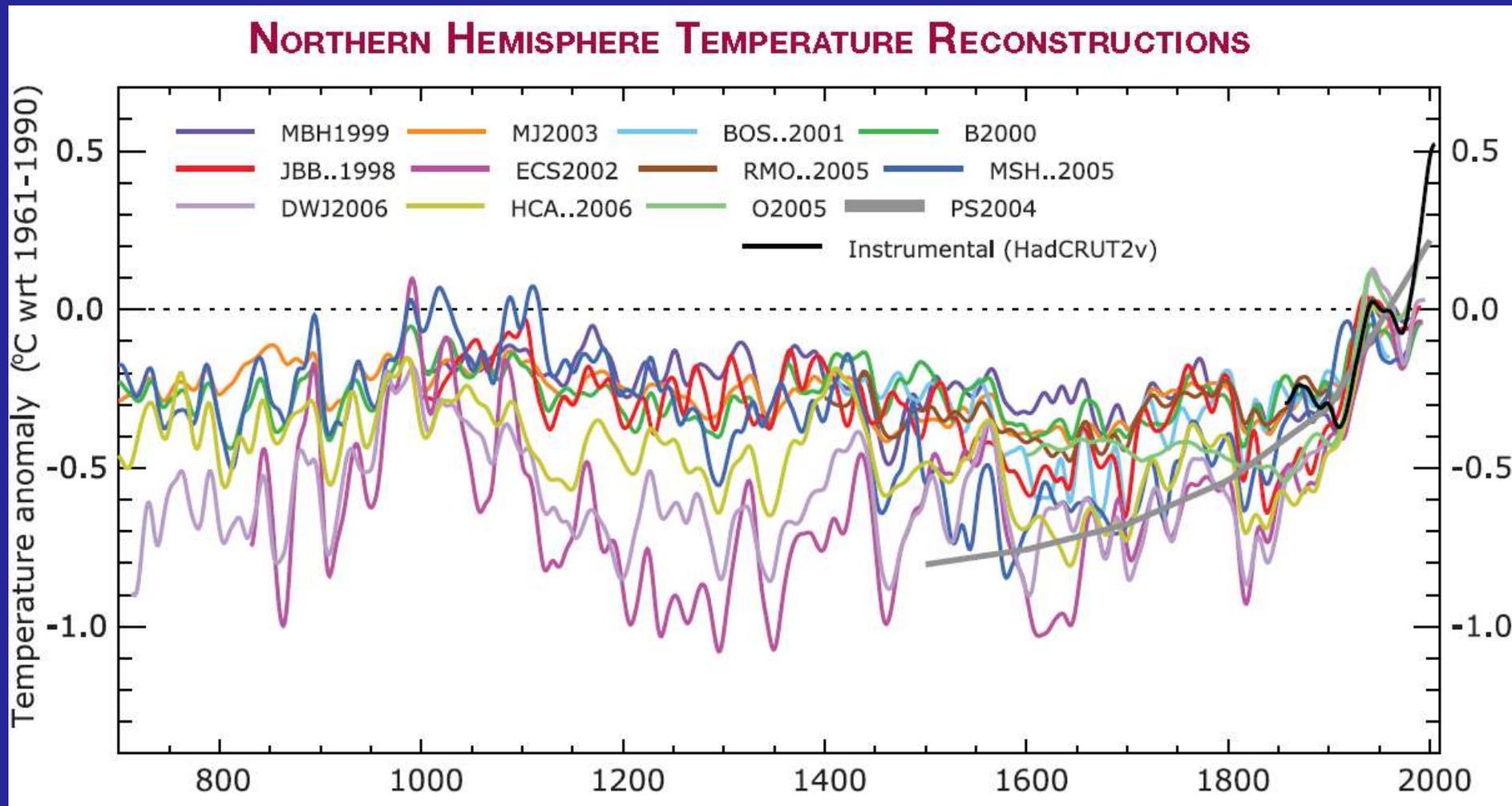
osservazione delle tendenze I

hockey stick (Mann, Bradley, Hughes, JGR, 1999)



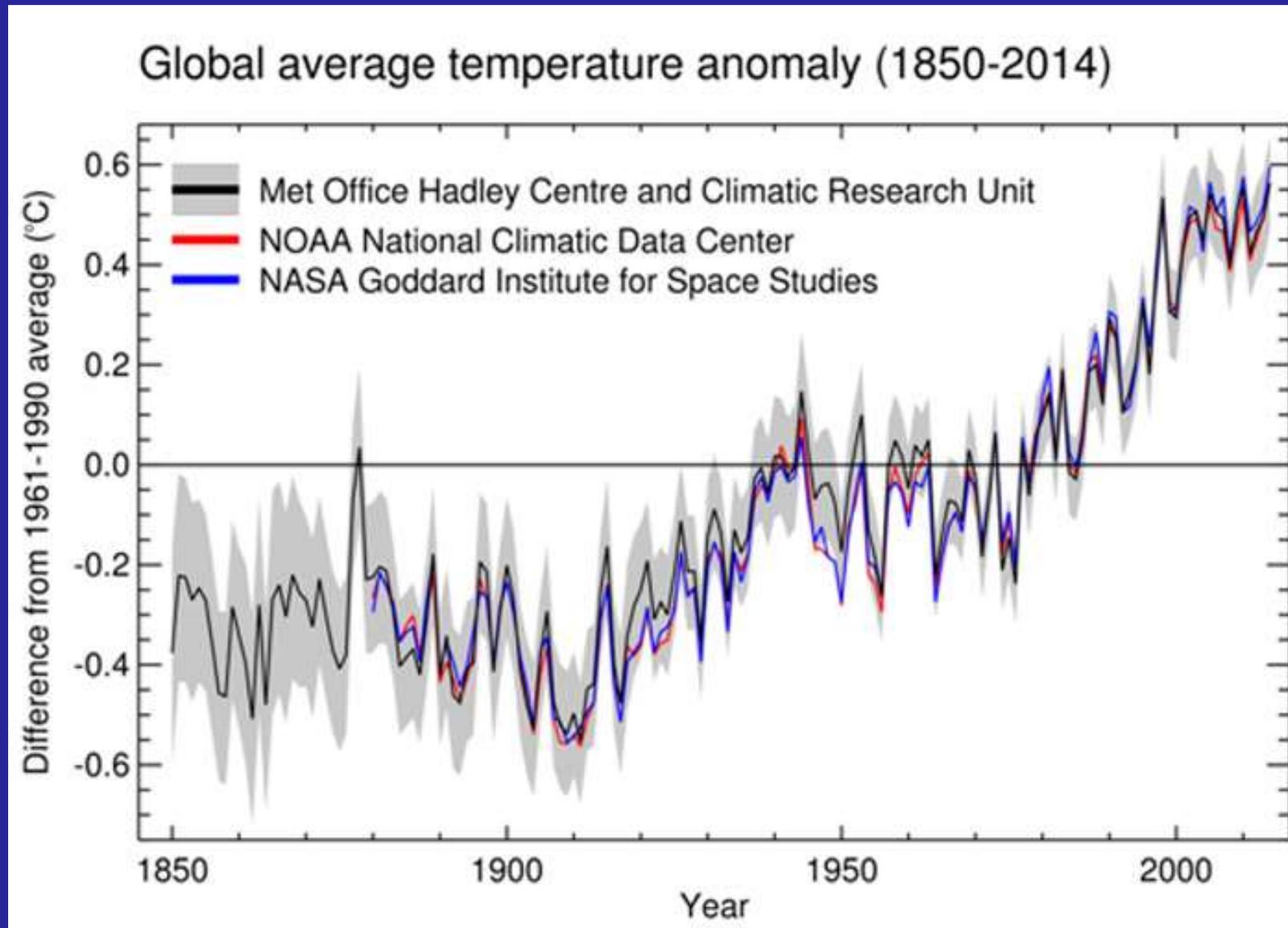
osservazione delle tendenze II

stime della temperatura media dell'emisfero nord



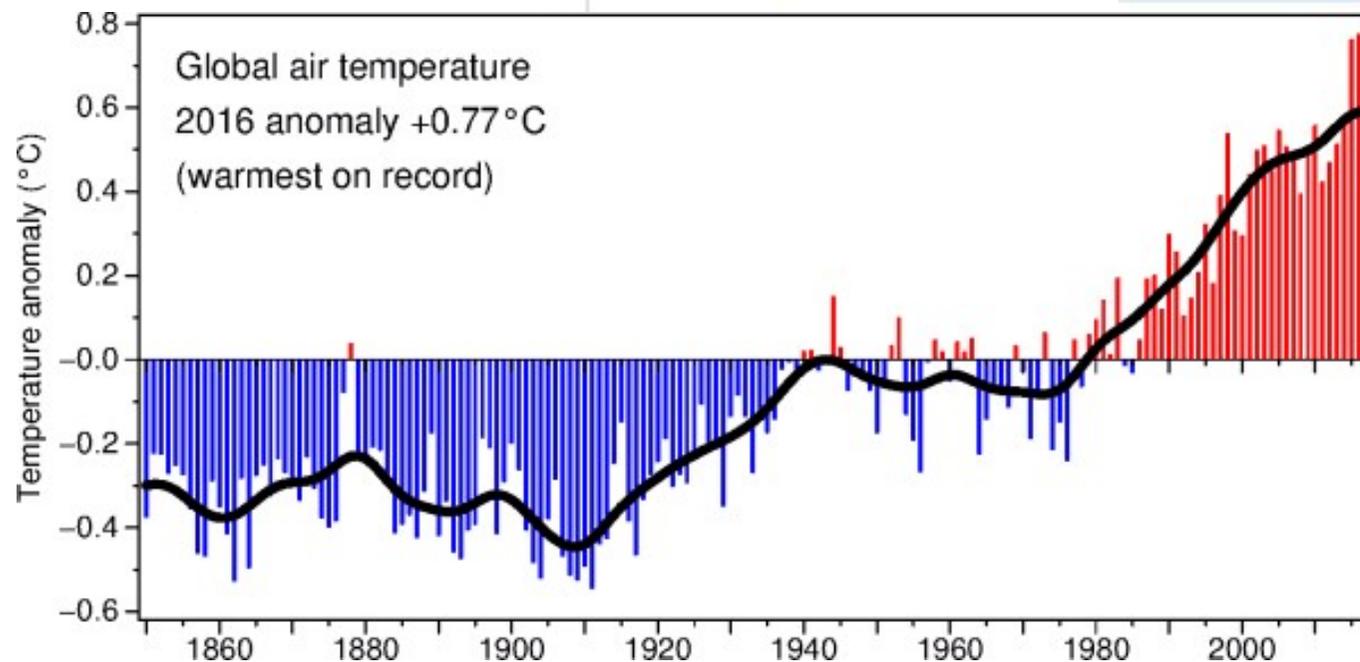
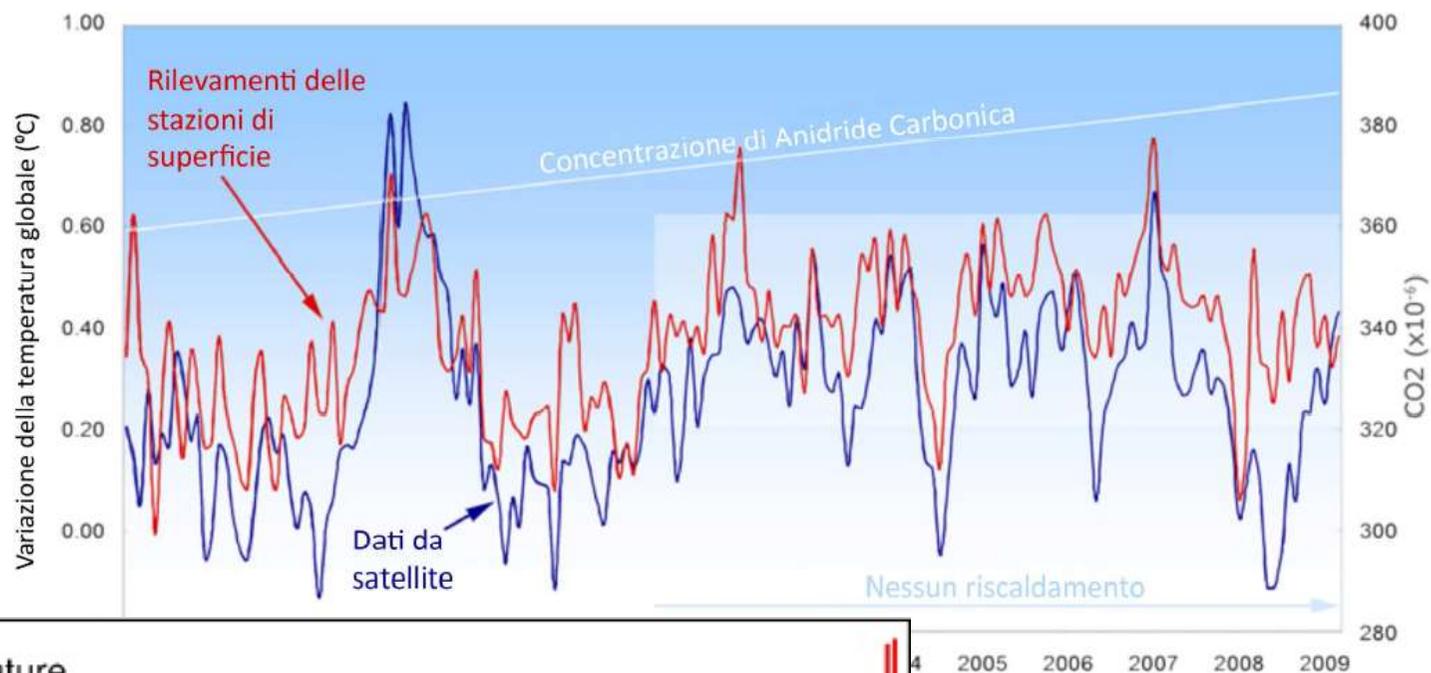
osservazione delle tendenze III

ultimi anni



osservazione delle tendenze III

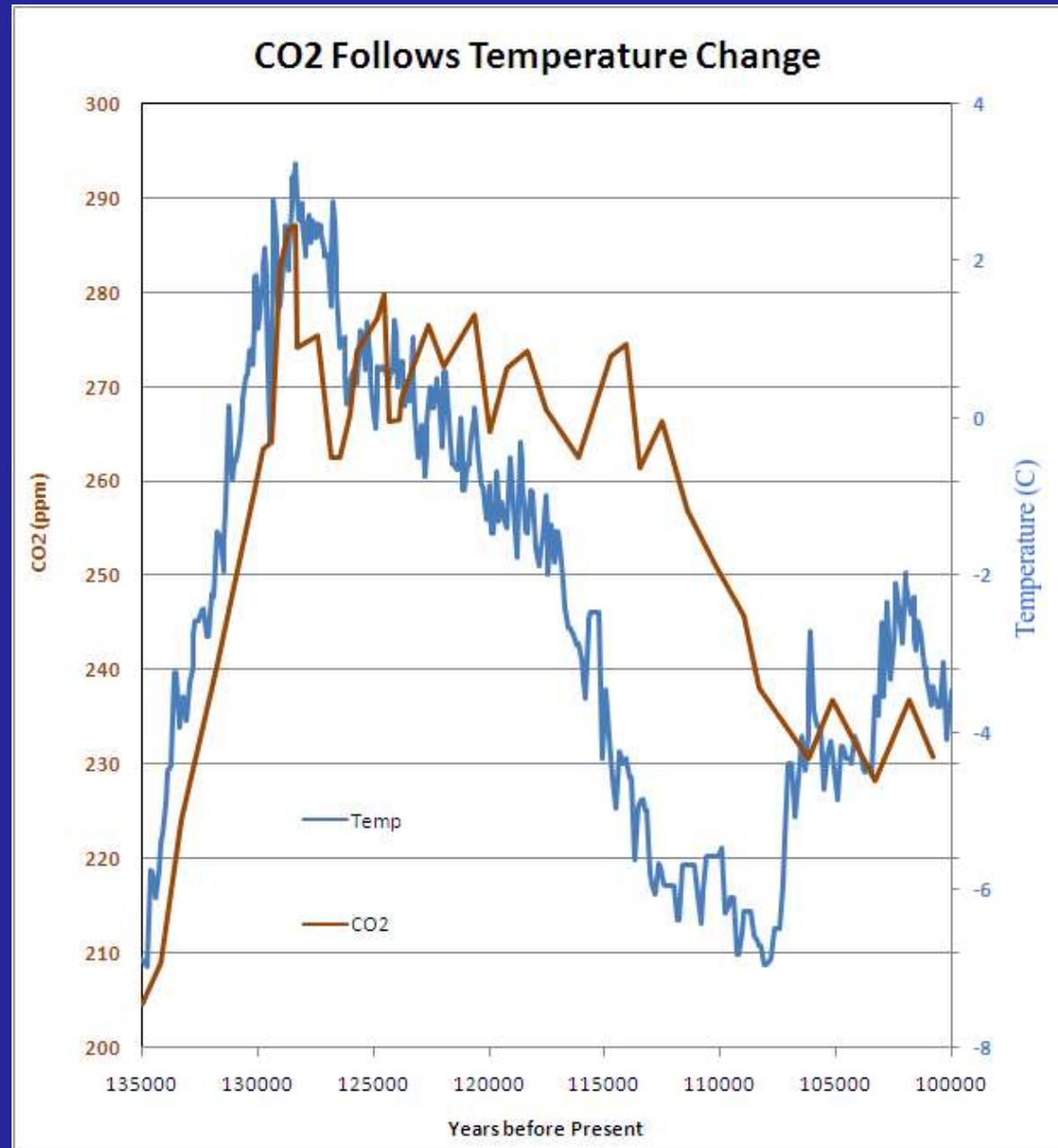
GW hiatus



osservazione delle tendenze IV

relazione GHG/ ΔT

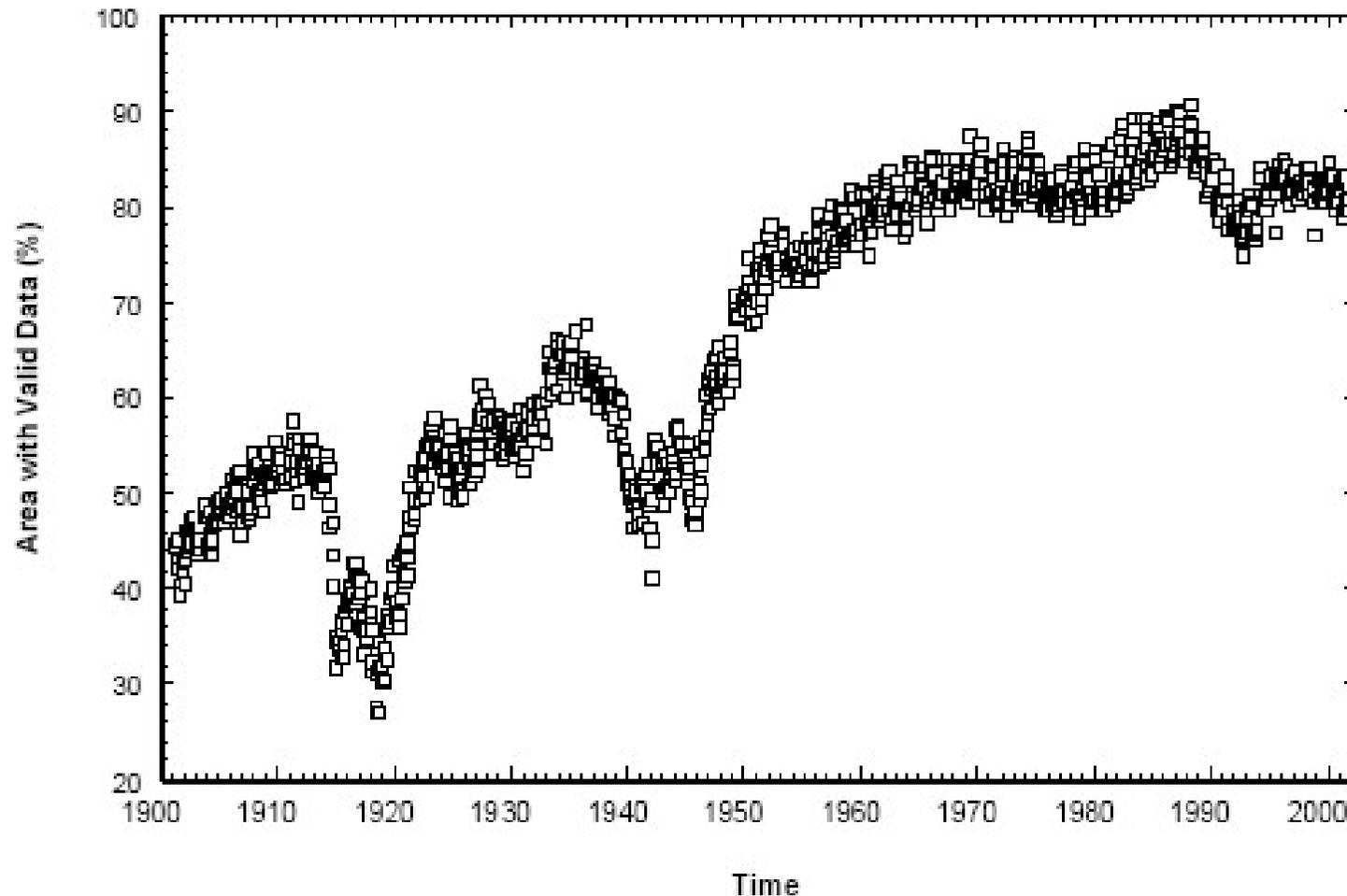
le variazioni di contenuto di CO_2 seguono di circa 800 anni le variazioni della temperatura



Mudelsee, 2001

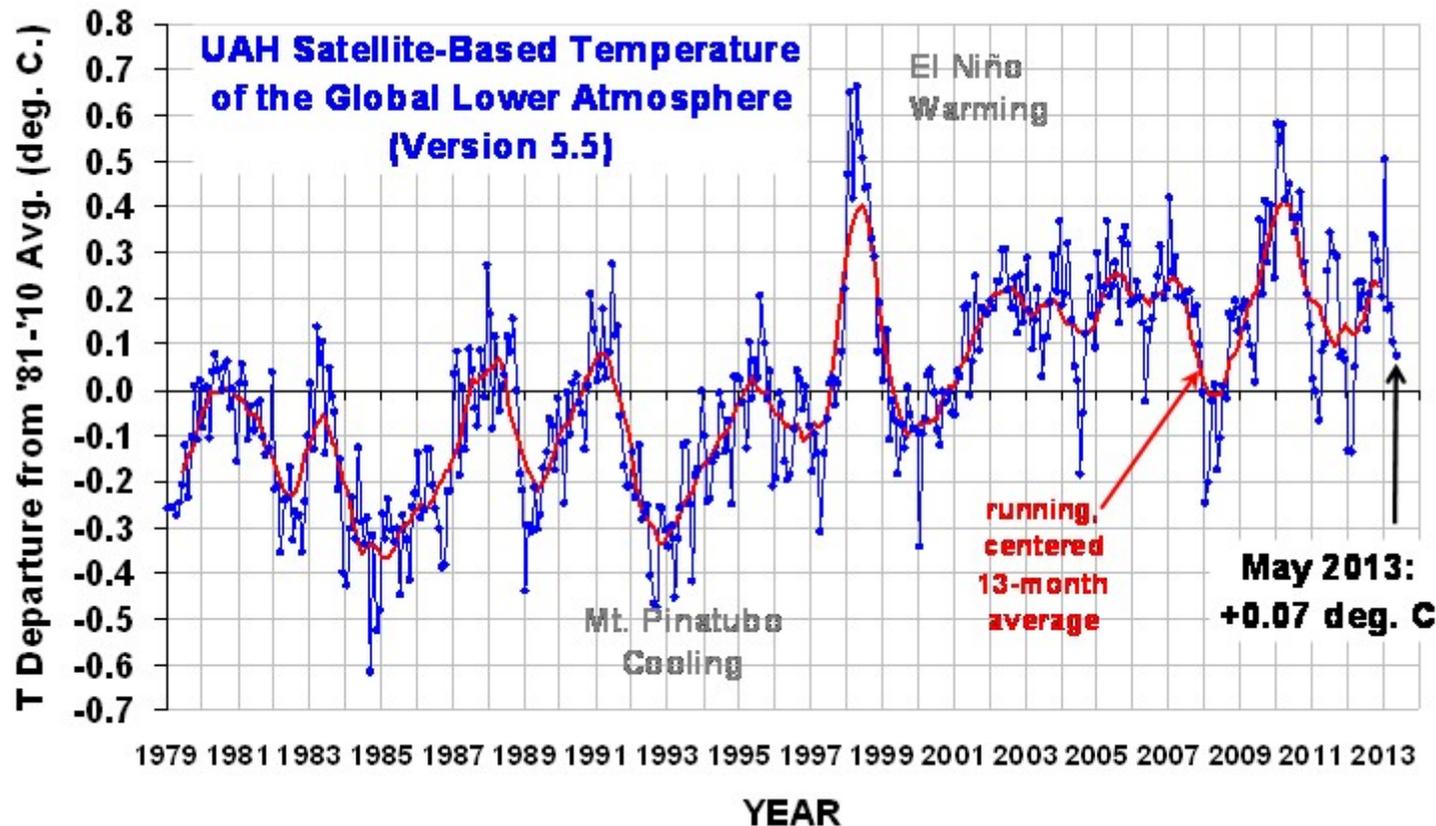
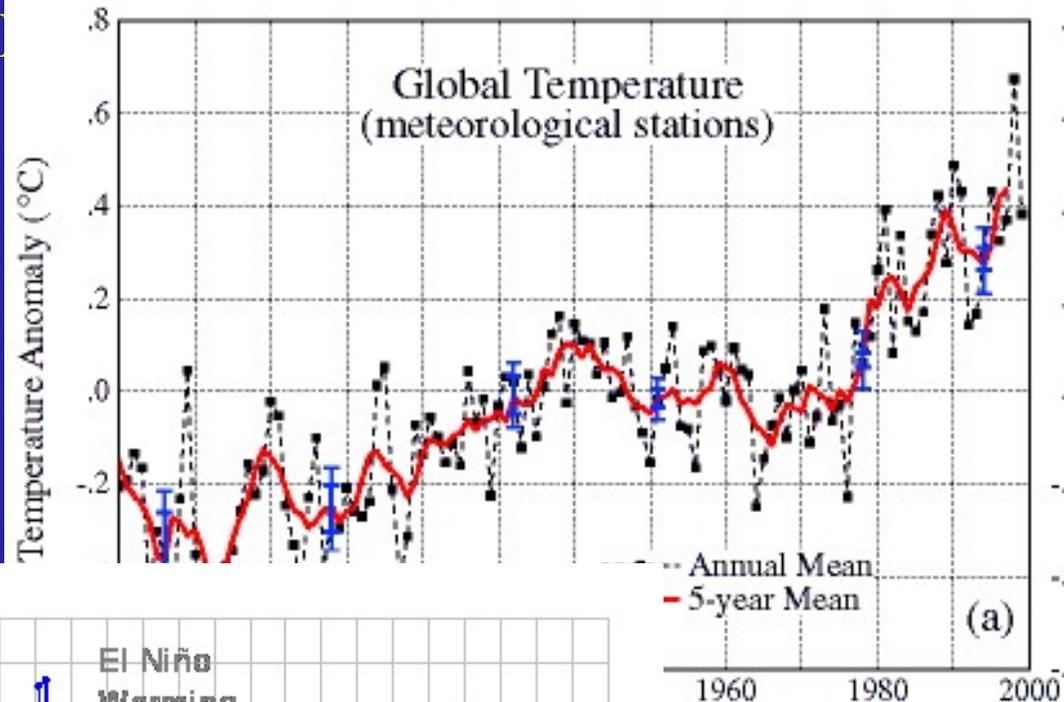
osservazione delle tendenze V
copertura globale dei sensori

la frazione di superficie globale monitorata varia
 $5^\circ \times 5^\circ \sim 550 \times 400 \text{ km}^2$



osservazione delle tendenze VI
osservazioni dallo spazio

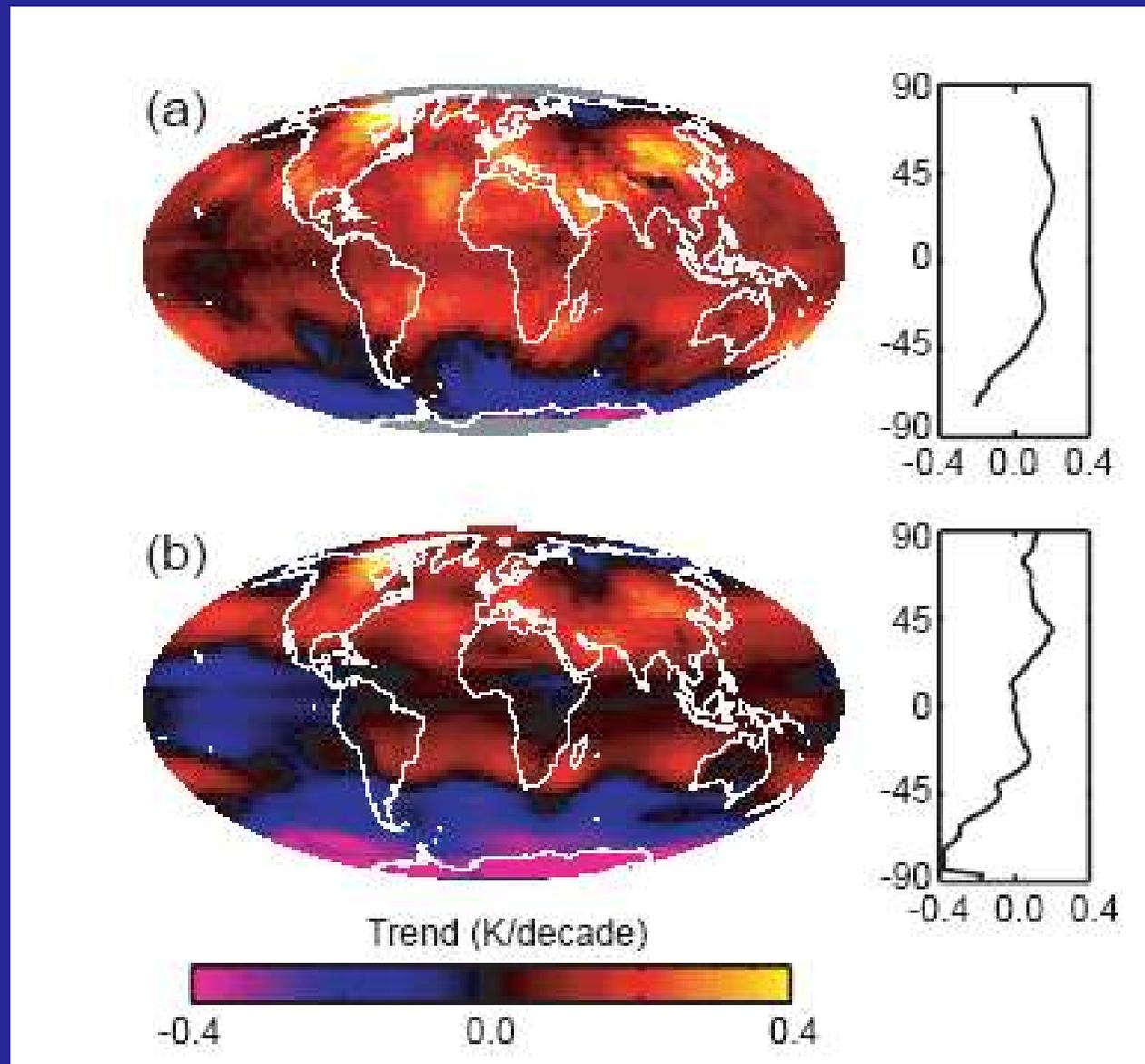
0,2 K/decade ←



0,09 K/decade ←

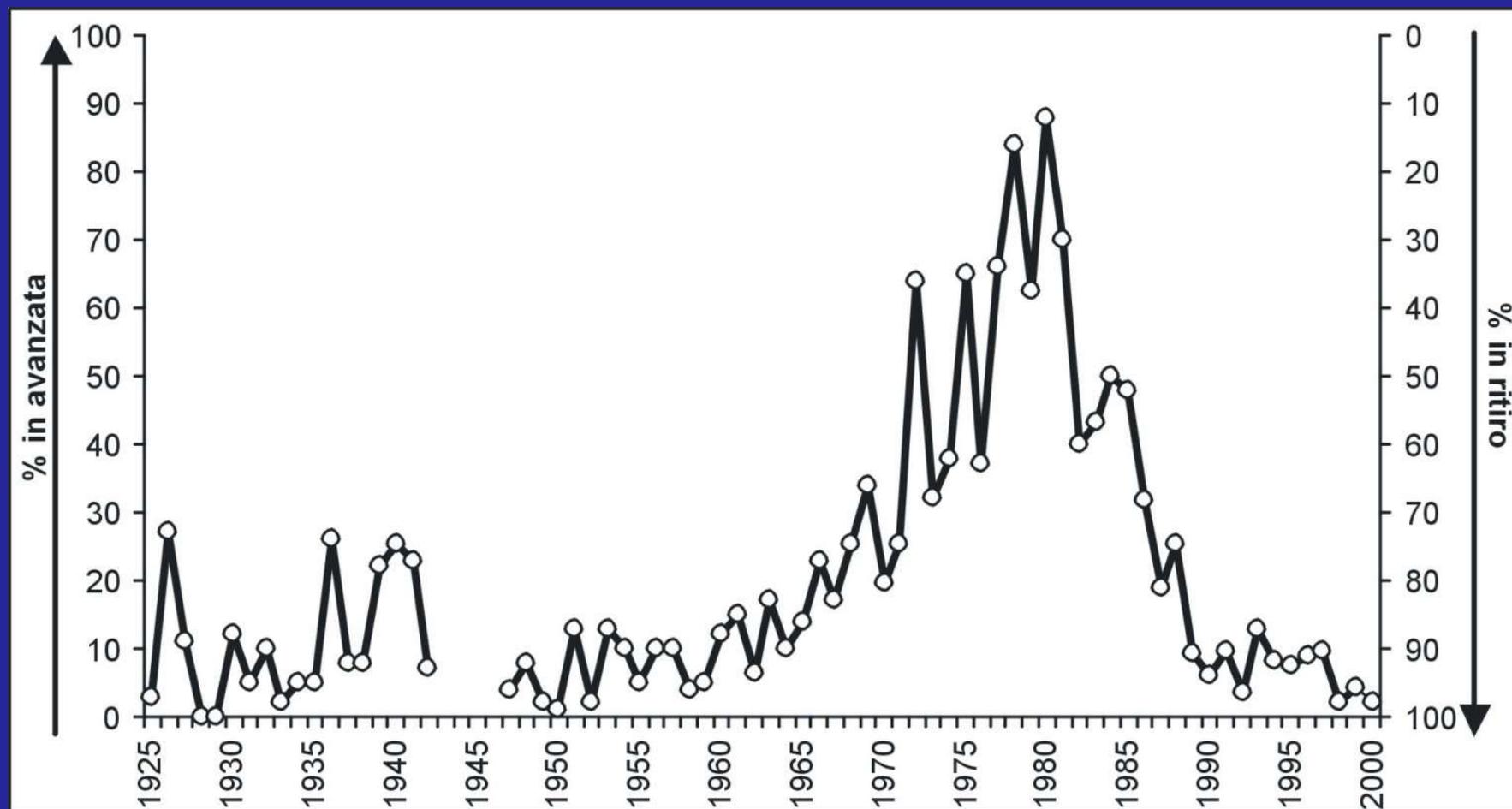
osservazione delle tendenze VIII

Microwave Sounding Unit (MSU)



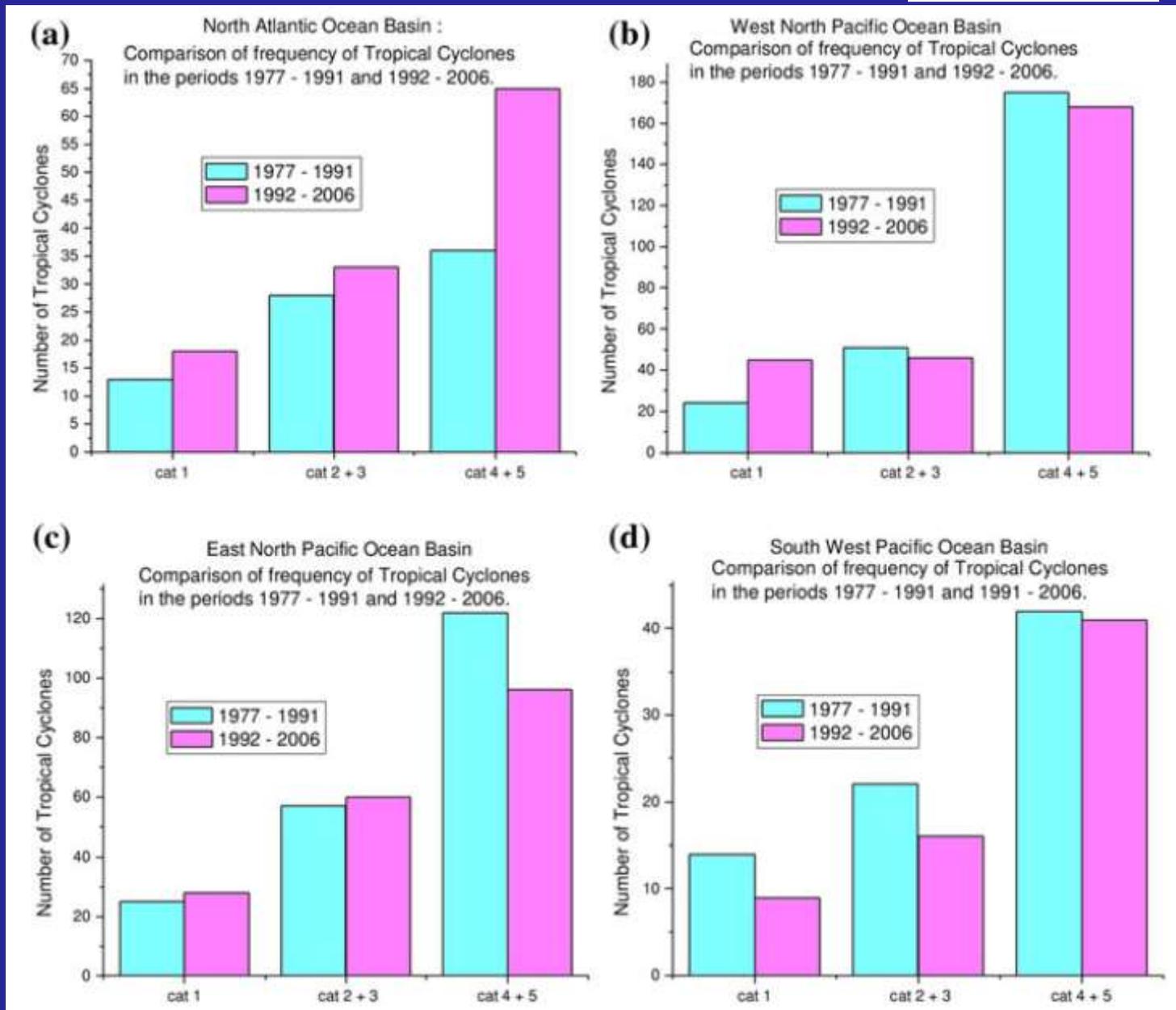
osservazione delle tendenze IX

ritiro dei ghiacciai

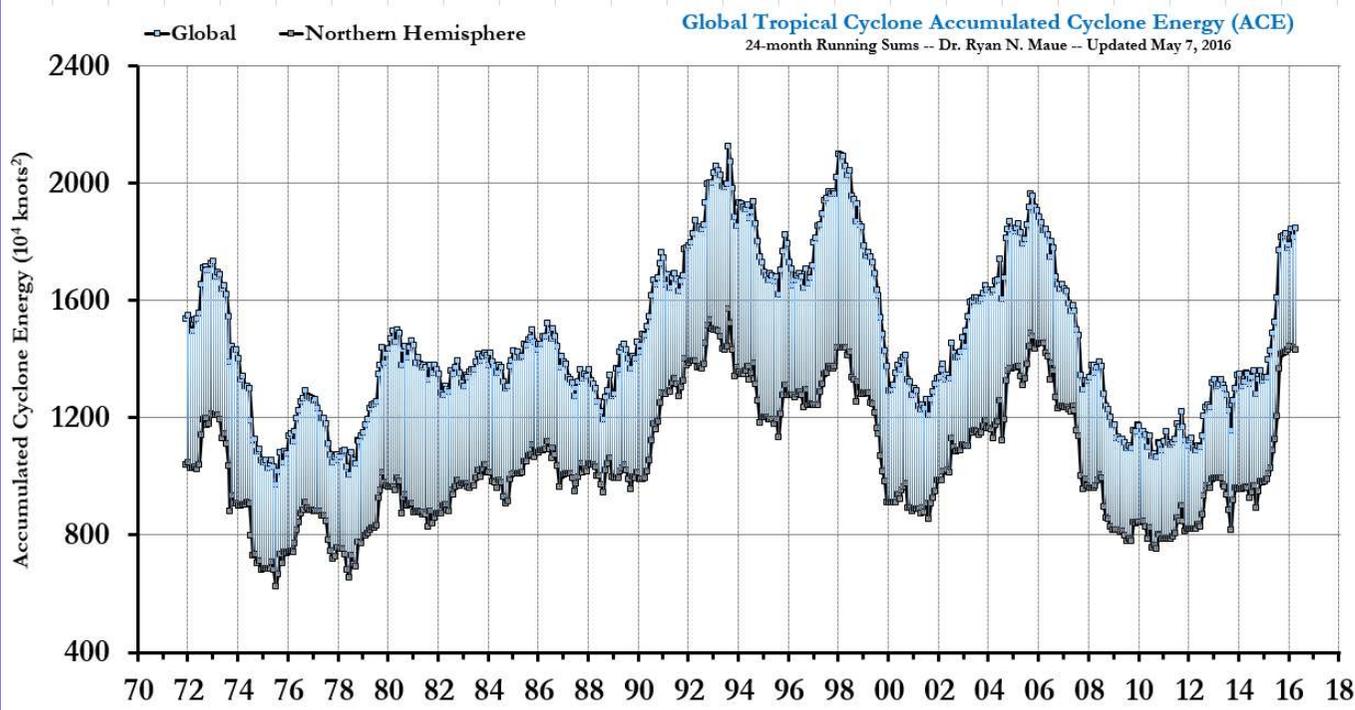
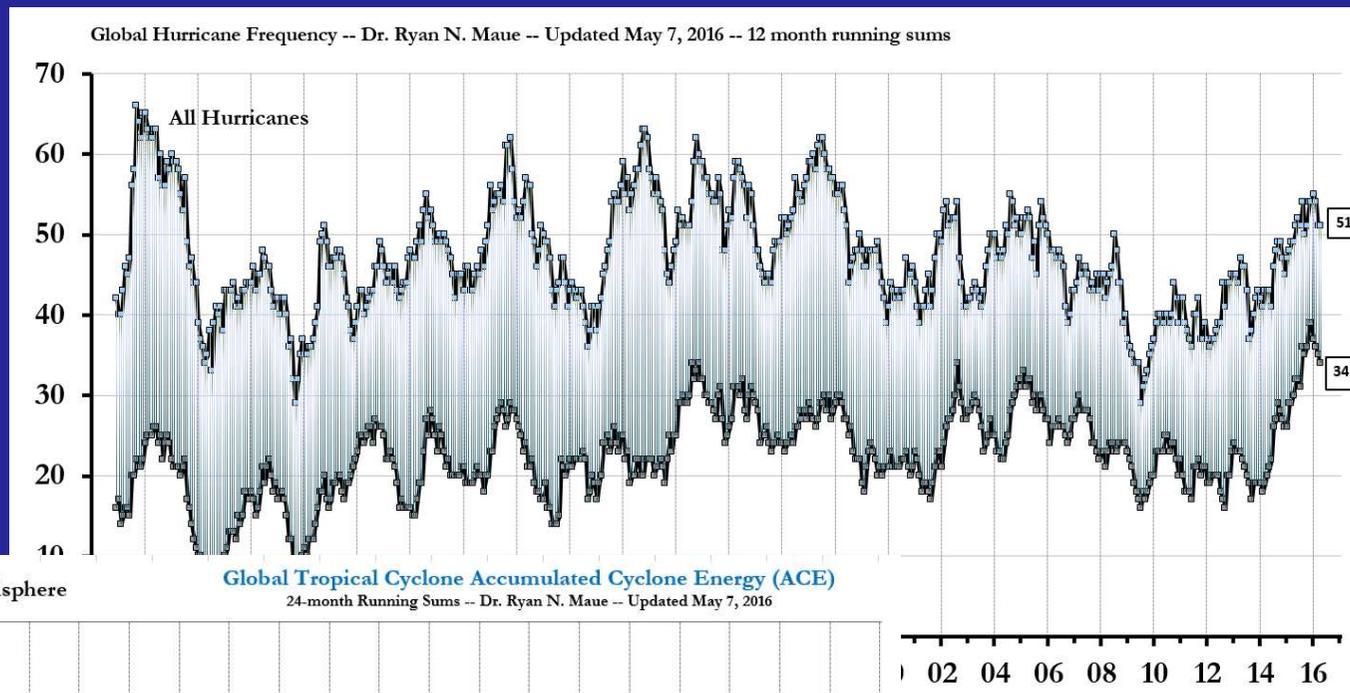


osservazione delle tendenze X eventi estremi: cicloni tropicali

Deo et al., 2011

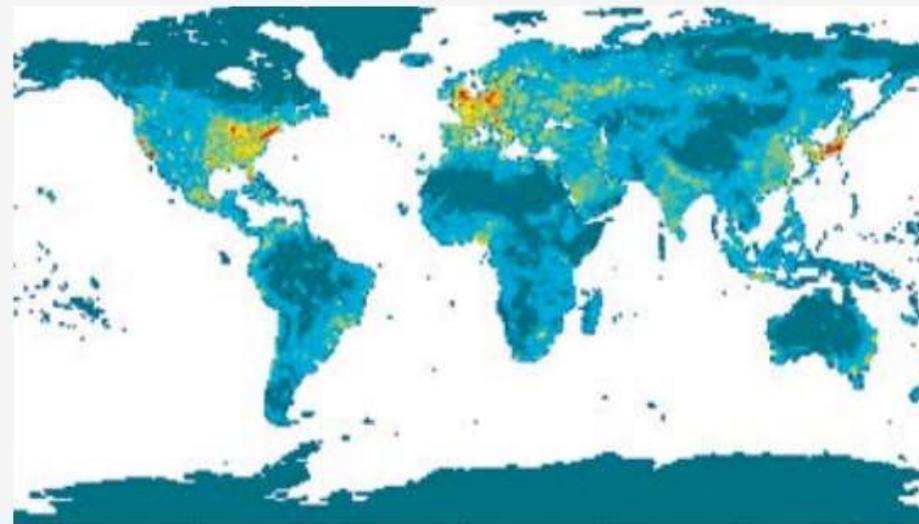


osservazione delle tendenze X eventi estremi: cicloni tropicali

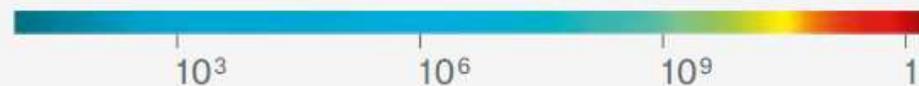
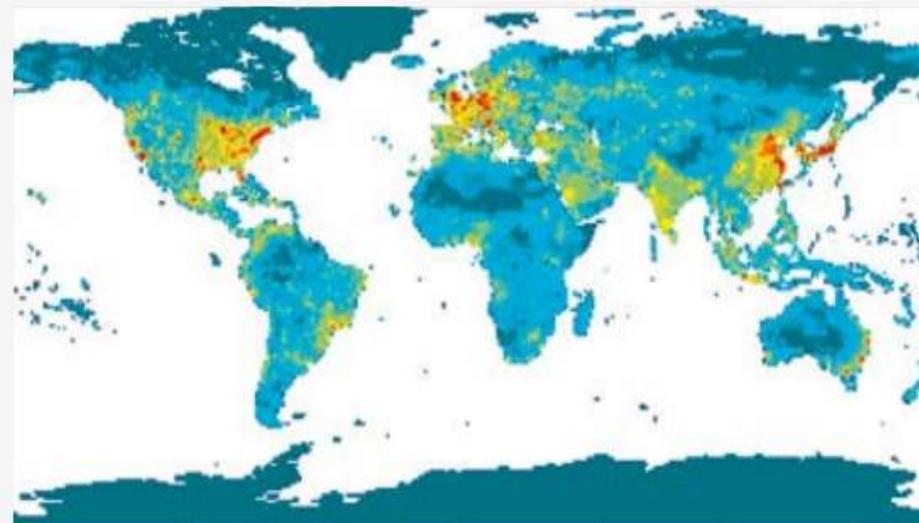


osservazione delle tendenze
eventi estremi: PIL

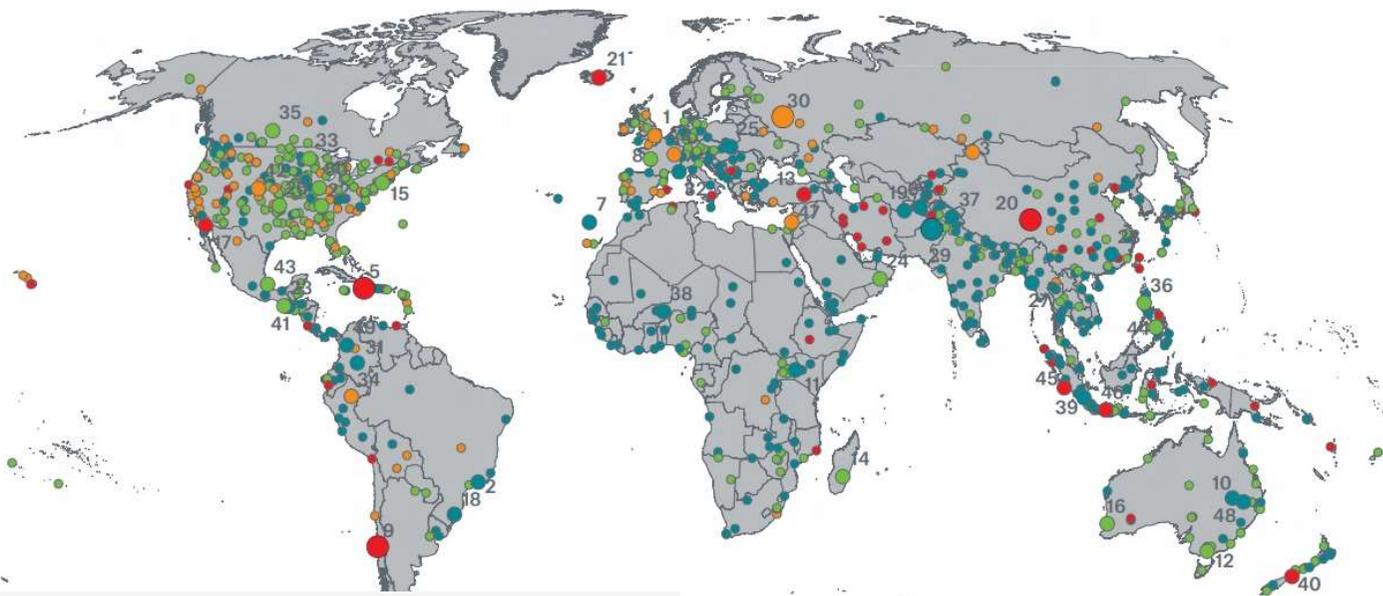
1980



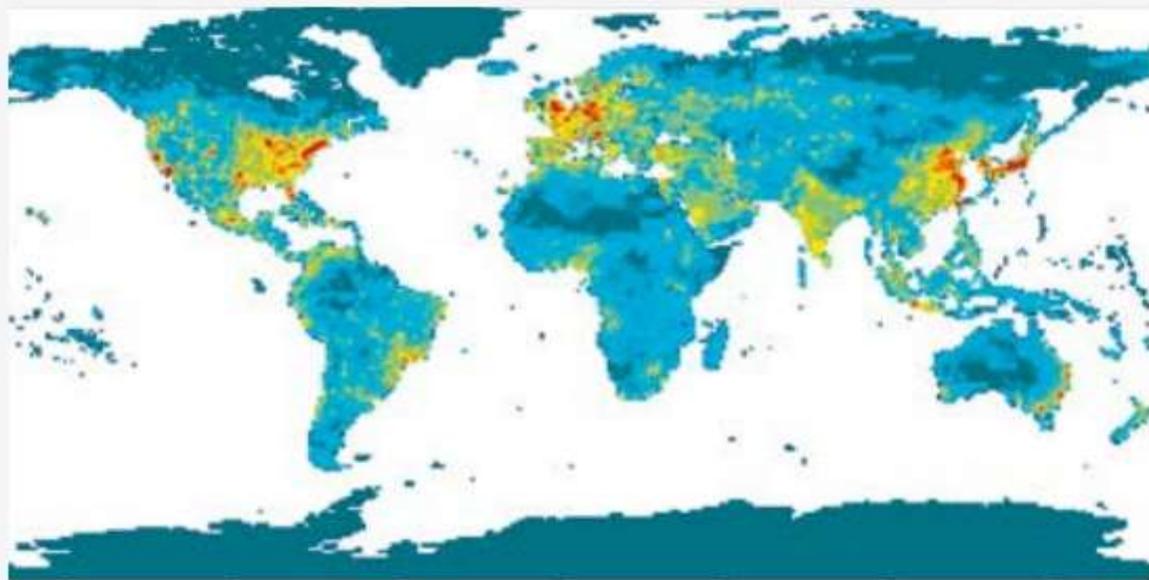
2015



osservazione delle
eventi estremi: dan

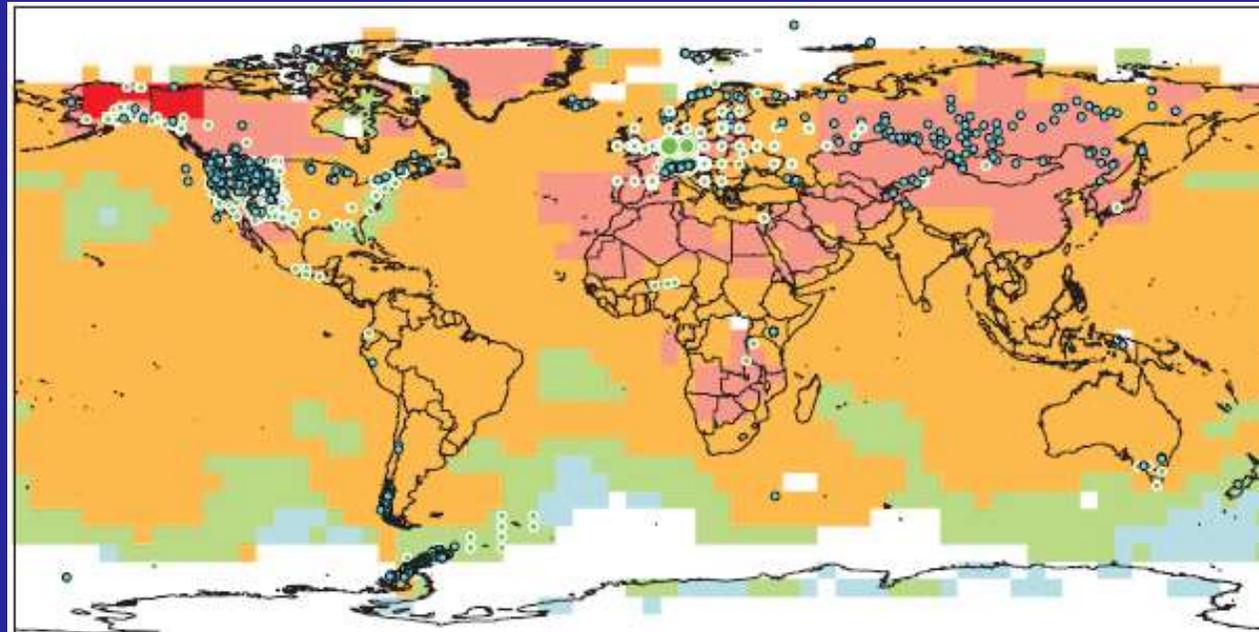


2015



osservazione delle tendenze XI

impatto sui sistemi fisici e biologici

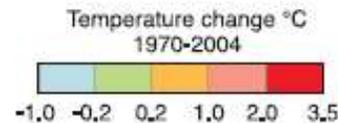


NAM		LA		EUR		AFR		AS		ANZ		PR*		TER		MFW**		GLO	
355	455	53	5	119	28,115	5	2	106	8	6	0	120	24	764	28,586	1	85	765	28,671
94%	92%	98%	100%	94%	89%	100%	100%	95%	100%	100%	—	91%	100%	94%	90%	100%	99%	94%	90%

Observed data series

- Physical systems (snow, ice and frozen ground; hydrology; coastal processes)
- Biological systems (terrestrial, marine, and freshwater)

Europe ***	
•	1-30
○	31-100
○	101-800
○	801-1,200
○	1,201-7,500



Physical

Physical	Biological
Number of significant observed changes	Number of significant observed changes
Percentage of significant changes consistent with warming	Percentage of significant changes consistent with warming

* Polar regions include also observed changes in marine and freshwater biological systems.

** Marine and freshwater includes observed changes at sites and large areas in oceans, small islands and continents. Locations of large-area marine changes are not shown on the map.

*** Circles in Europe represent 1 to 7,500 data series.

La scienza è fatta di dati come una casa di pietre.

Ma un ammasso di dati non è scienza più di quanto un mucchio di pietre sia una casa.

-Henri Poincaré-

sistemi dinamici, non linearità, caos;

**componenti e caratteristiche del sistema
climatico terrestre;**

un approccio osservativo.

Il sistema climatico è un sistema complesso;

non esiste una definizione univoca e generale di sistema complesso;

definiamo allora un sistema non complesso:
sistema semplice o lineare o riducibile.

sistema: insieme di elementi che interagiscono tra loro con un obiettivo seguendo proprie regole

linearità: l'effetto è proporzionale alla causa

riduzionismo: il sistema può essere compreso studiando separatamente le parti di cui è composto

caratteristiche di un sistema lineare:

- i componenti interagiscono tra loro in modo lineare;
- è riducibile;
- è predicibile;
- è descritto da un numero finito di parametri.

caratteristiche di un sistema non lineare:

- non è possibile riconoscere il ruolo di ogni singolo elemento in un processo (meccanismi di retroazione);

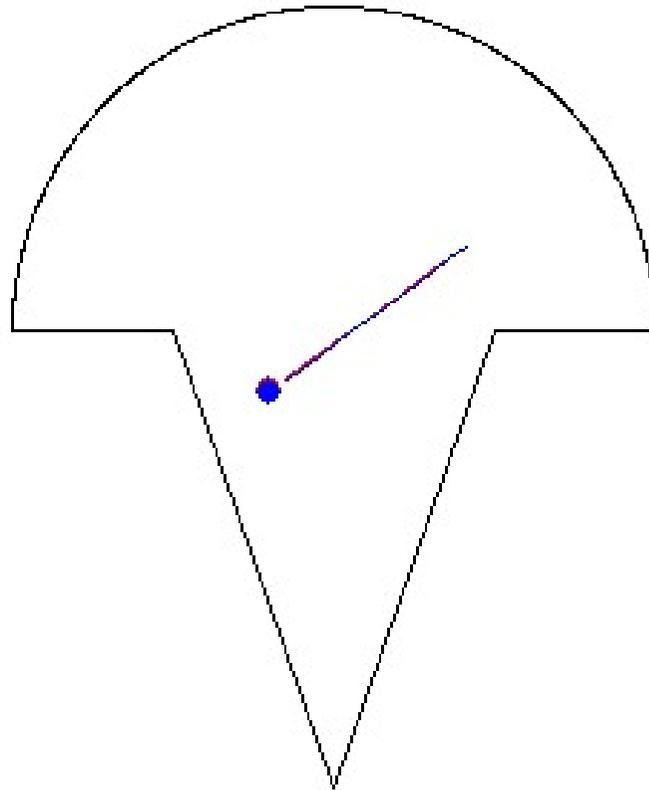
- è non predicibile (caos, sensibilità alle condizioni iniziali);

- piccole perturbazioni possono dare grandi risposte e viceversa;

- fenomeni di auto-organizzazione (vortici, convezione).

Biliardo

sensibilità alle condizioni iniziali ($\Delta\phi = 0.5\%$)



Sistema di Lorenz

$$\dot{x} = \sigma(y - x)$$

$$\dot{y} = rx - y - xz$$

$$\dot{z} = xy - bz$$

$$x_{(t=0)} = 8$$

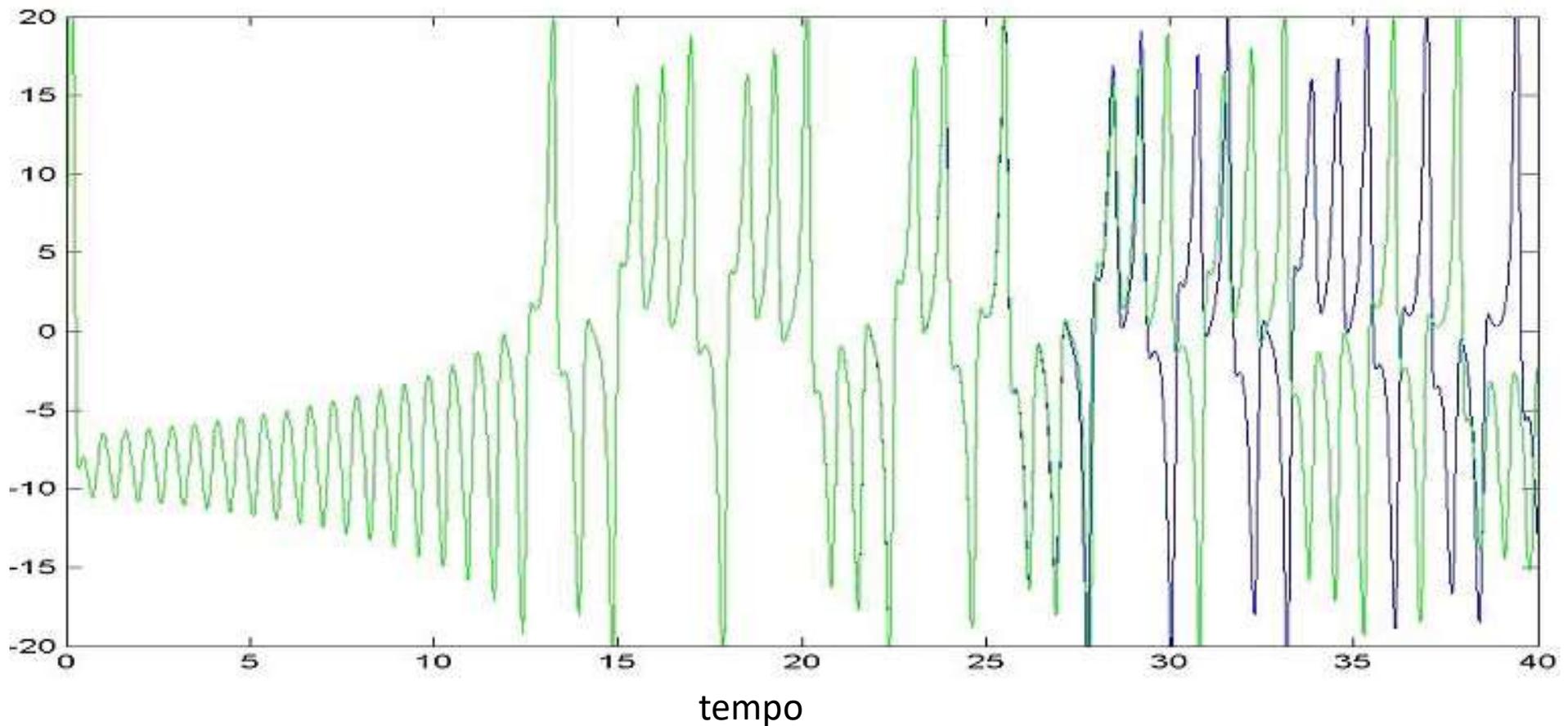
$$y_{(t=0)} = 1$$

$$z_{(t=0)} = 1$$

$$x_{(t=0)} = 8$$

$$y_{(t=0)} = 1.0000001$$

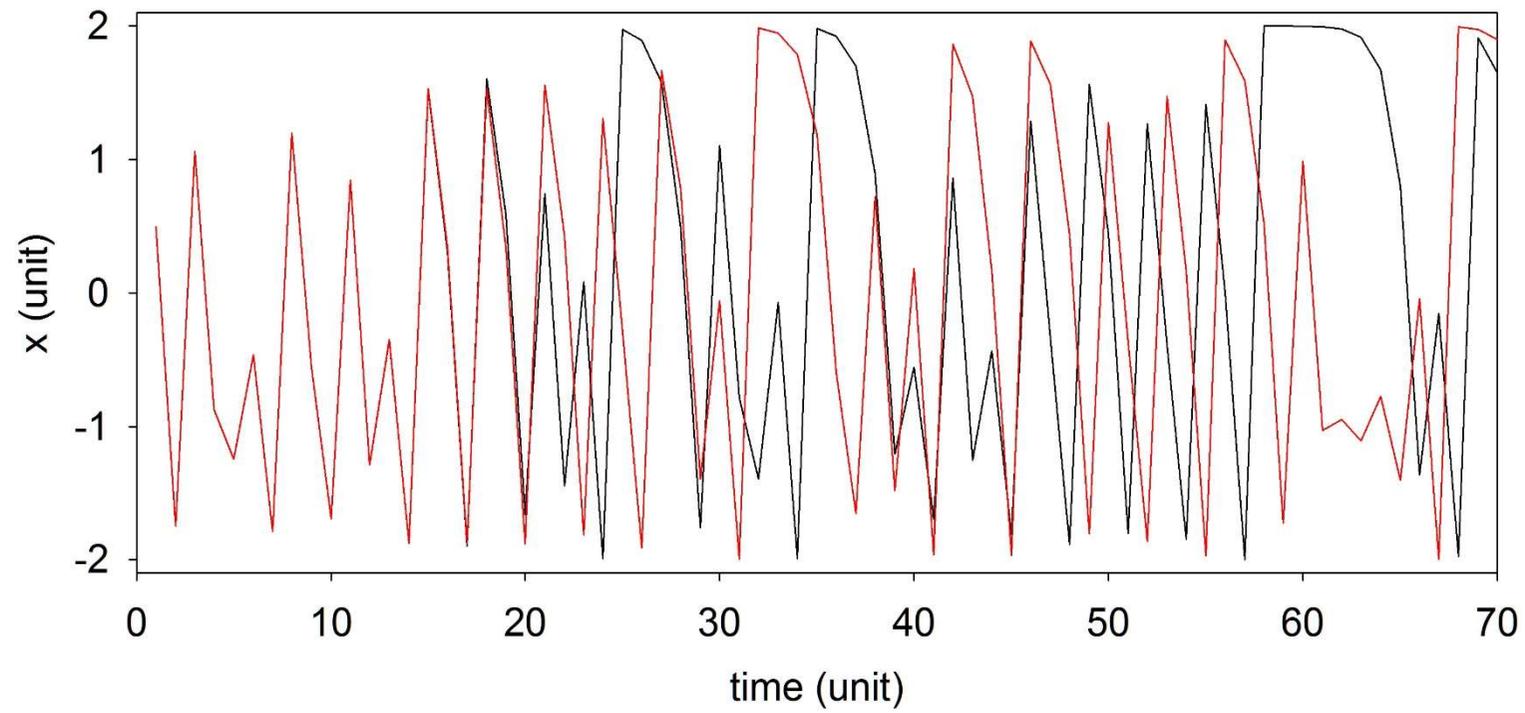
$$z_{(t=0)} = 1$$



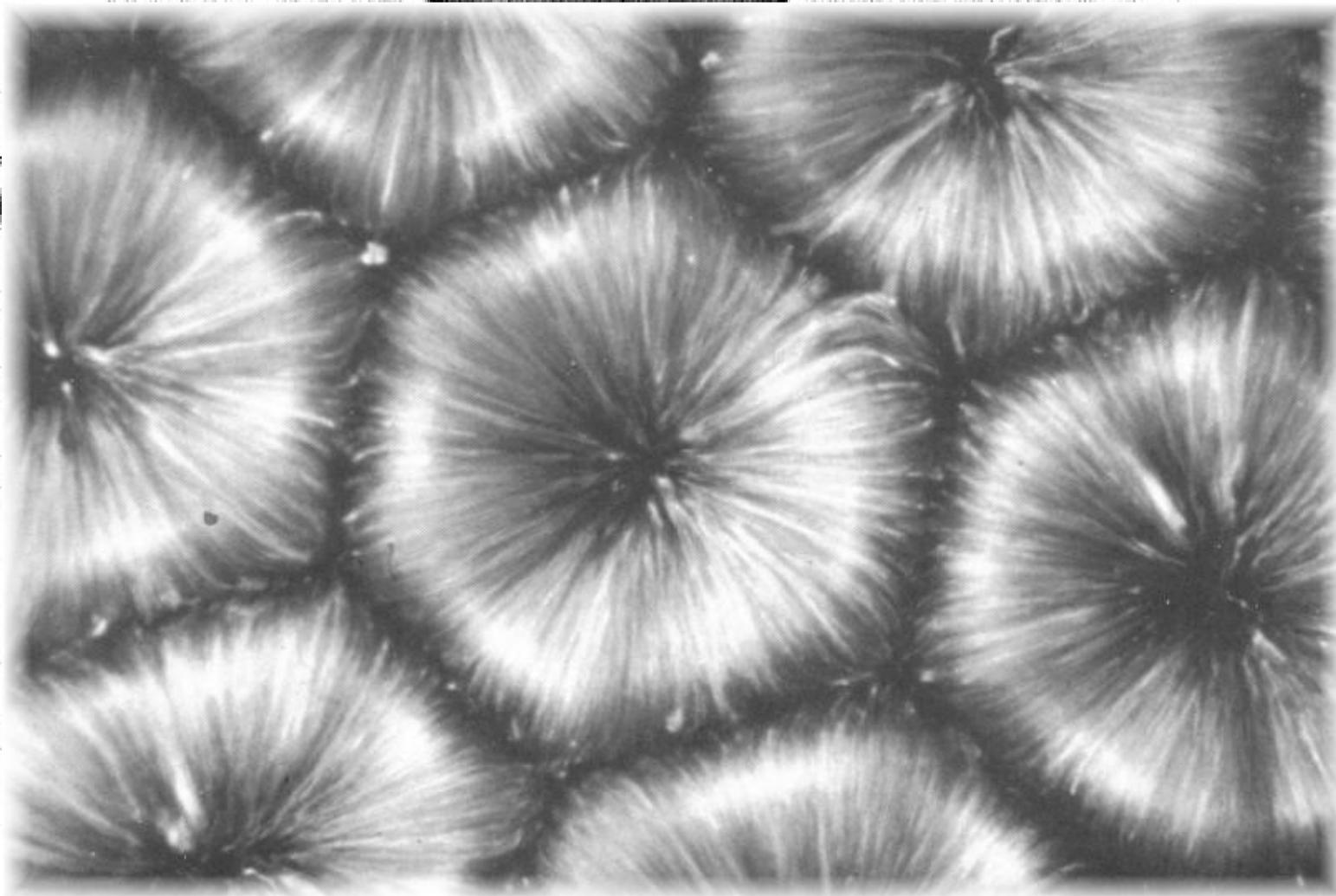
$$\mathbf{x}_t = \mathbf{x}_{t-1}^2 - 2$$

$$\mathbf{x}_o = 0.500000$$

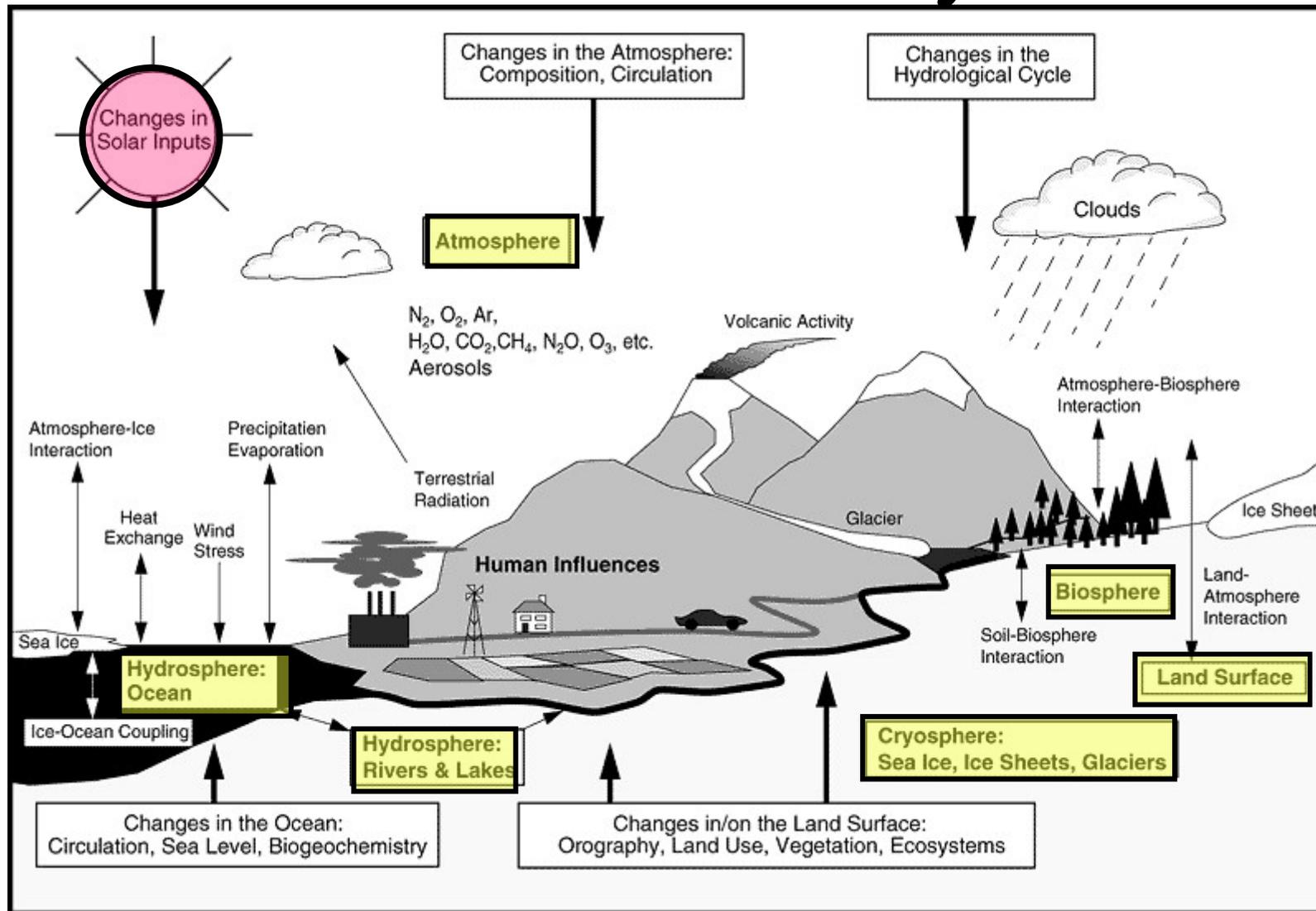
$$\mathbf{x}'_o = 0.500001$$



Convezione (Benard)



The Global Climate System



Publicità



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

LAUREA MAGISTRALE IN
FISICA DEL SISTEMA TERRA



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

PHD PROGRAMME

FUTURE EARTH, CLIMATE CHANGE AND SOCIETAL CHALLENGES

IT EN

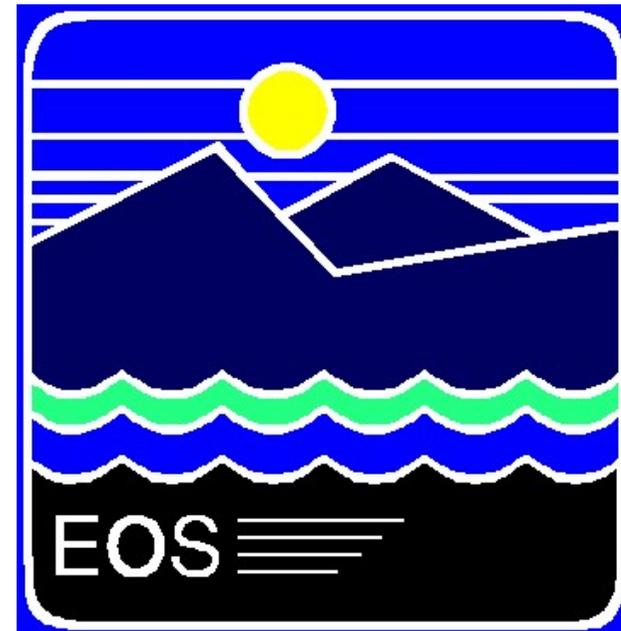
caratteristiche del sistema climatico:

- 1) diversi sottosistemi con:
diversi scale spazio-temporali,
diverse metodologie di studio,
diversi livelli di conoscenza;
- 2) interazioni tra sottosistemi:
difficilmente osservabili,
poco studiate,
- 3) necessità di tempi “sperimentali” lunghi;
- 4) sistema caotico.

*The key to gaining a better understanding of the **global environment** is exploring how the Earth's systems of air, land, water, and life interact with each other, **blending together** fields like meteorology, oceanography, biology, and atmospheric sciences*

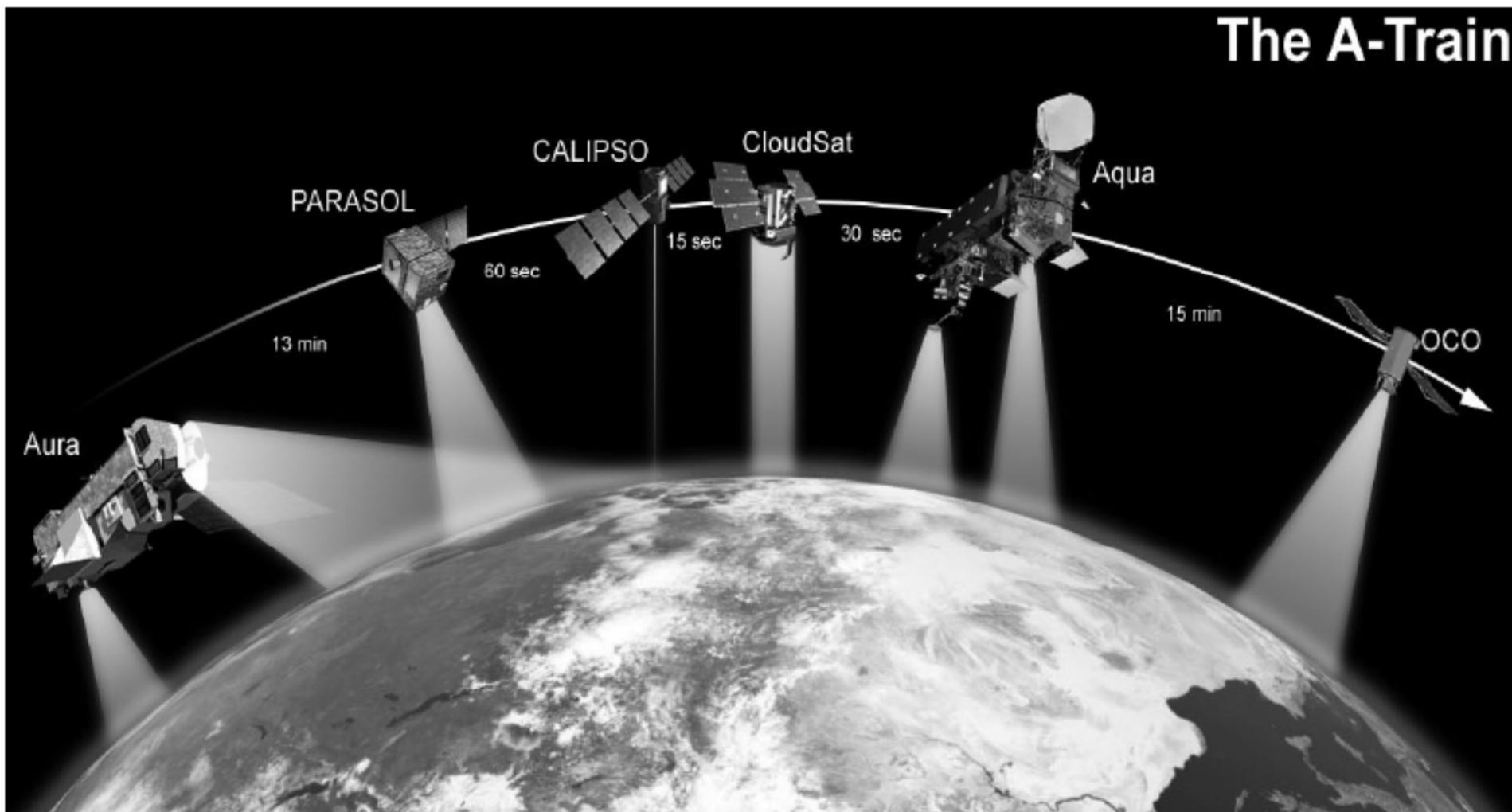
1991: Earth Science Enterprise

1999: Earth Observing System



*EOS will observe the key physical variables needed to advance understanding of the entire Earth system and develop a **deeper comprehension** of the **components** of that system and the **interactions** among the components*

The A-Train



24 EOS Measurements



ATMOSPHERE	Cloud Properties <i>(amount, optical properties, height)</i>	MODIS, GLAS, AMSR-E, MISR, AIRS, ASTER, SAGE III
	Radiative Energy Fluxes <i>(top of atmosphere, surface)</i>	CERES, ACRIM III, MODIS, AMSR-E, GLAS, MISR, AIRS, ASTER, SAGE III
	Precipitation	AMSR-E
	Tropospheric Chemistry <i>(ozone, precursor gases)</i>	TES, MOPITT, SAGE III, MLS, HIRDLS, LIS
	Stratospheric Chemistry <i>(ozone, ClO, BrO, OH, trace gases)</i>	MLS, HIRDLS, SAGE III, OMI, TES
	Aerosol Properties <i>(stratospheric, tropospheric)</i>	SAGE III, HIRDLS MODIS, MISR, OMI, GLAS
	Atmospheric Temperature	AIRS/AMSU-A, MLS, HIRDLS, TES, MODIS
	Atmospheric Humidity	AIRS/AMSU-A/HSB, MLS, SAGE III, HIRDLS, Poseidon 2/JMR/DORIS, MODIS, TES
	Lightning <i>(events, area, flash structure)</i>	LIS
	SOLAR RADIATION	Total Solar Irradiance
Solar Spectral Irradiance		SIM, SOLSTICE

24 EOS Measurements



LAND	Land Cover & Land Use Change	ETM+, MODIS, ASTER, MISR
	Vegetation Dynamics	MODIS, MISR, ETM+, ASTER
	Surface Temperature	ASTER, MODIS, AIRS, AMSR-E, ETM+
	Fire Occurrence (extent, thermal anomalies)	MODIS, ASTER, ETM+
	Volcanic Effects (frequency of occurrence, thermal anomalies, impact)	MODIS, ASTER, ETM+, MISR
	Surface Wetness	AMSR-E
OCEAN	Surface Temperature	MODIS, AIRS, AMSR-E
	Phytoplankton & Dissolved Organic Matter	MODIS
	Surface Wind Fields	SeaWinds, AMSR-E, Poseidon 2/JMR/DORIS
	Ocean Surface Topography (height, waves, sea level)	Poseidon 2/JMR/DORIS

24 EOS Measurements



CRYOSPHERE

Land Ice

(ice sheet topography, ice sheet volume change, glacier change)

GLAS, ASTER, ETM+

Sea Ice

(extent, concentration, motion, temperature)

AMSR-E, Poseidon 2/JMR/DORIS, MODIS, ETM+, ASTER

Snow Cover

(extent, water equivalent)

MODIS, AMSR-E, ASTER, ETM+

Europe's eyes on Earth

Looking at our planet and its environment
For the ultimate benefit of all European
citizens

Copernicus Services



Atmosphere



Marine



Land



Climate Change



Security



Emergency

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)

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



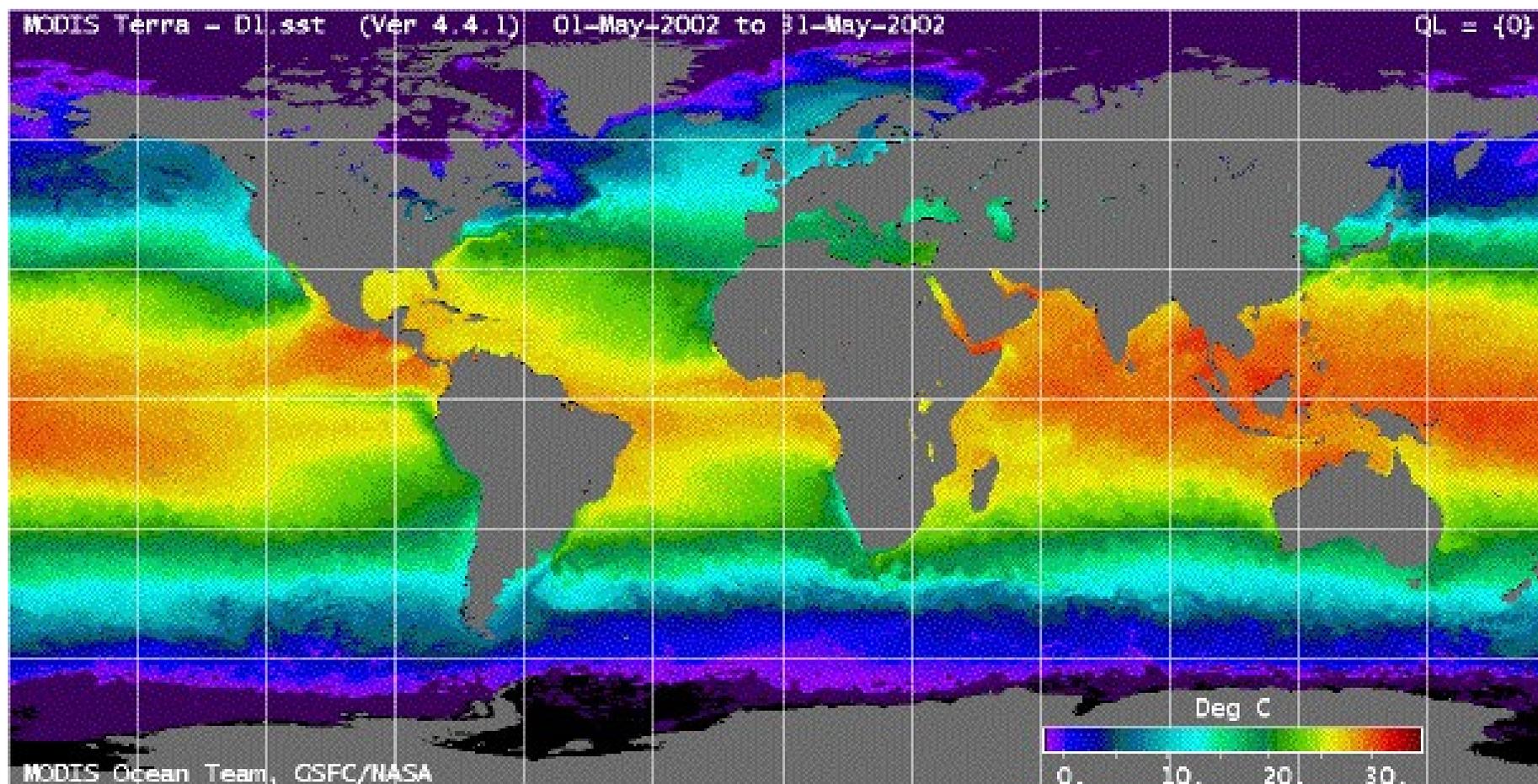
El Niño

Interazione Atmosfera/Oceano

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

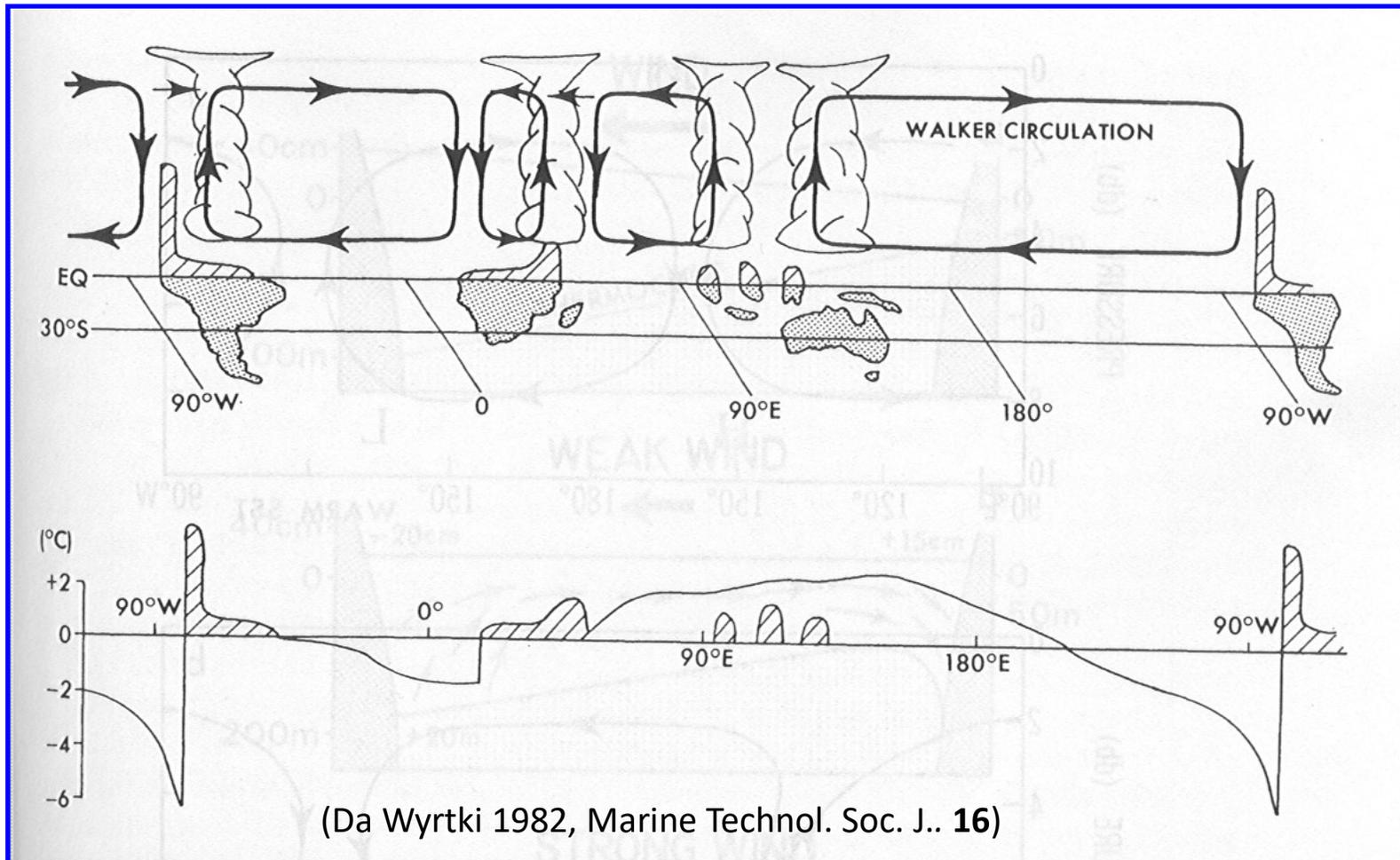
- l'oceano influenza l'atmosfera principalmente a causa di anomalie nella temperatura della sua superficie (*Sea Surface Temperature SST*) e del conseguente flusso verticale di calore sensibile e latente.**

temperatura media oceanica

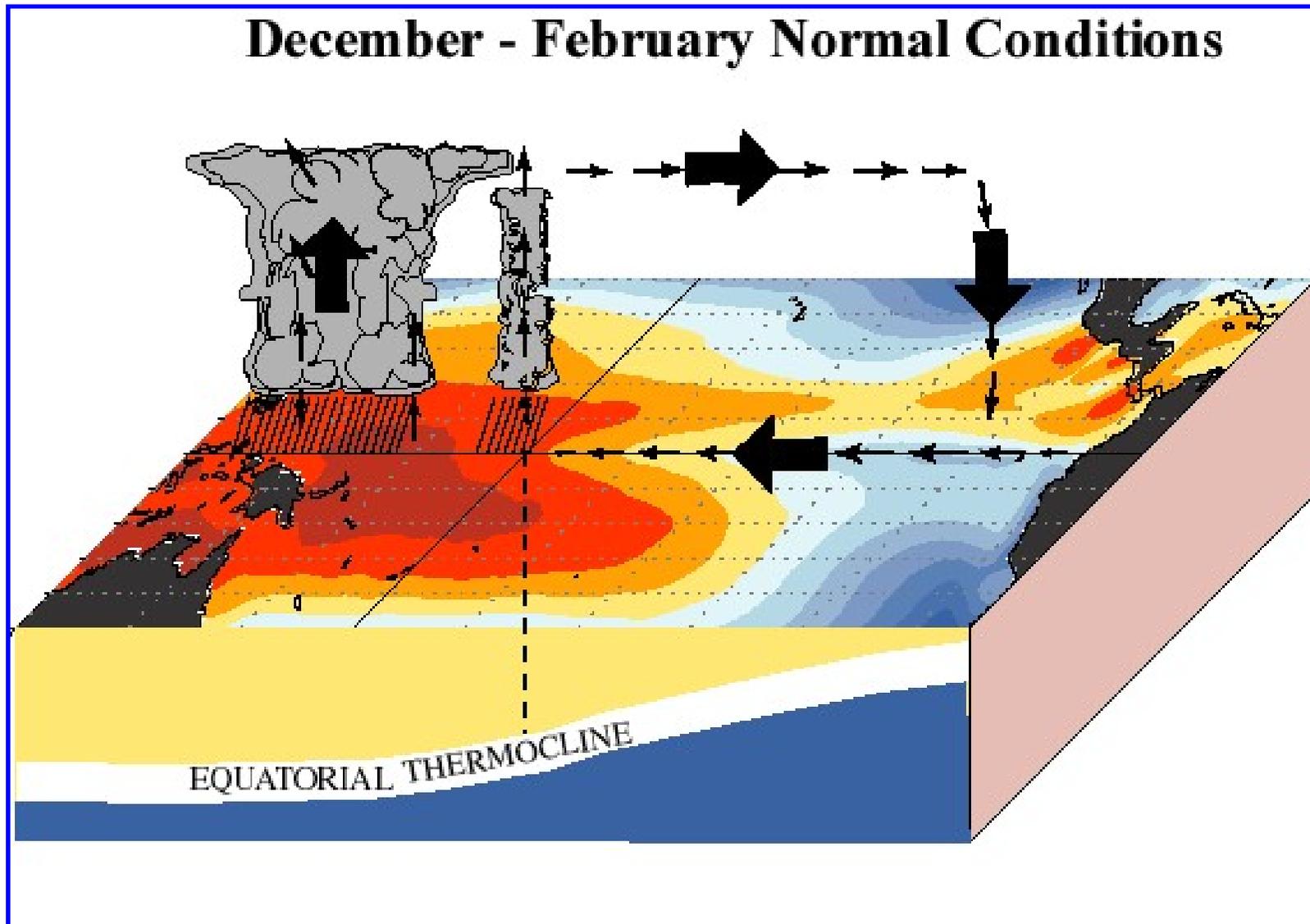


Circolazione Atmosferica Equatoriale

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.

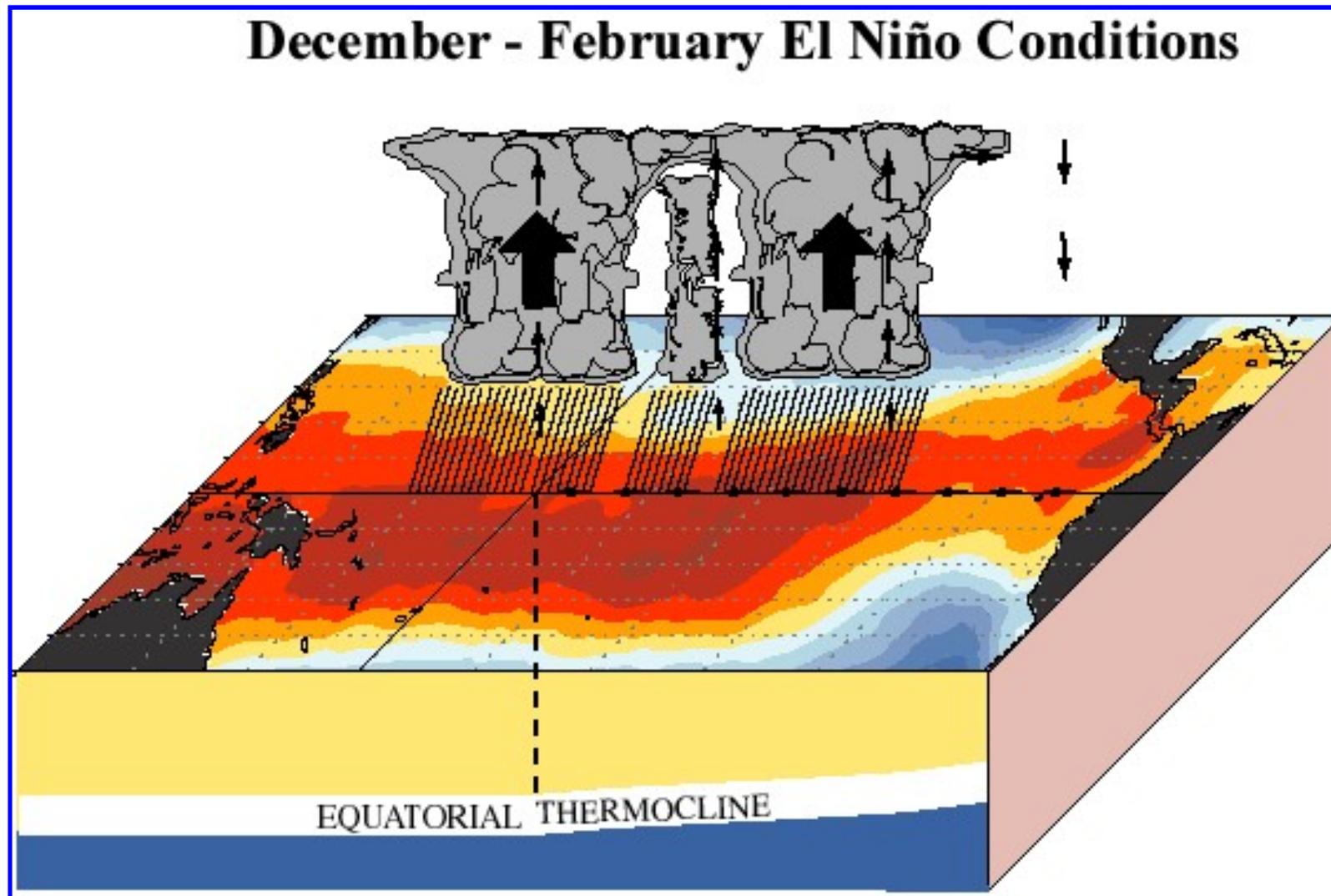


Circolazione Atmosferica Equatoriale



Circolazione Atmosferica Equatoriale

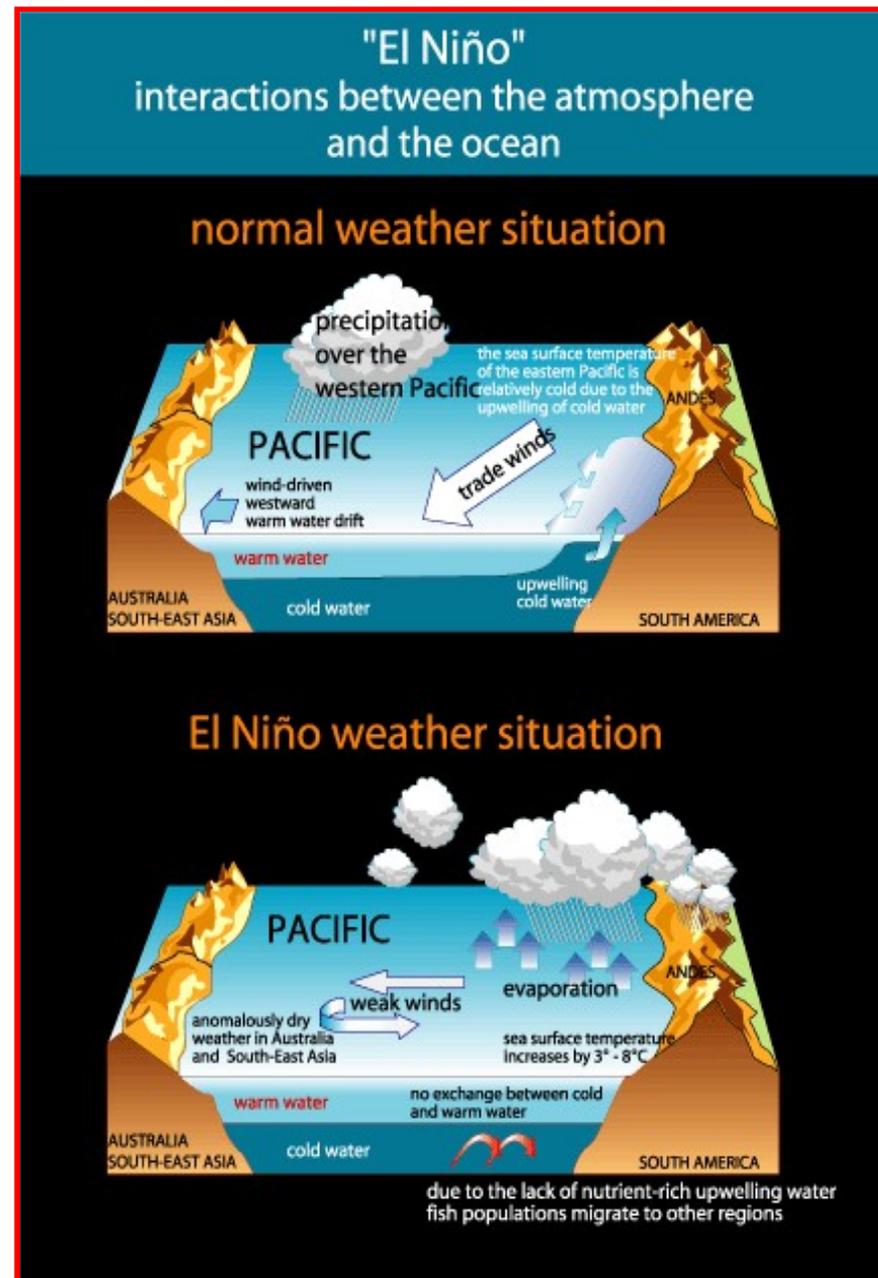
Condizione ENSO – El Niño



Circolazione Atmosferica Equatoriale - Condizione ENSO

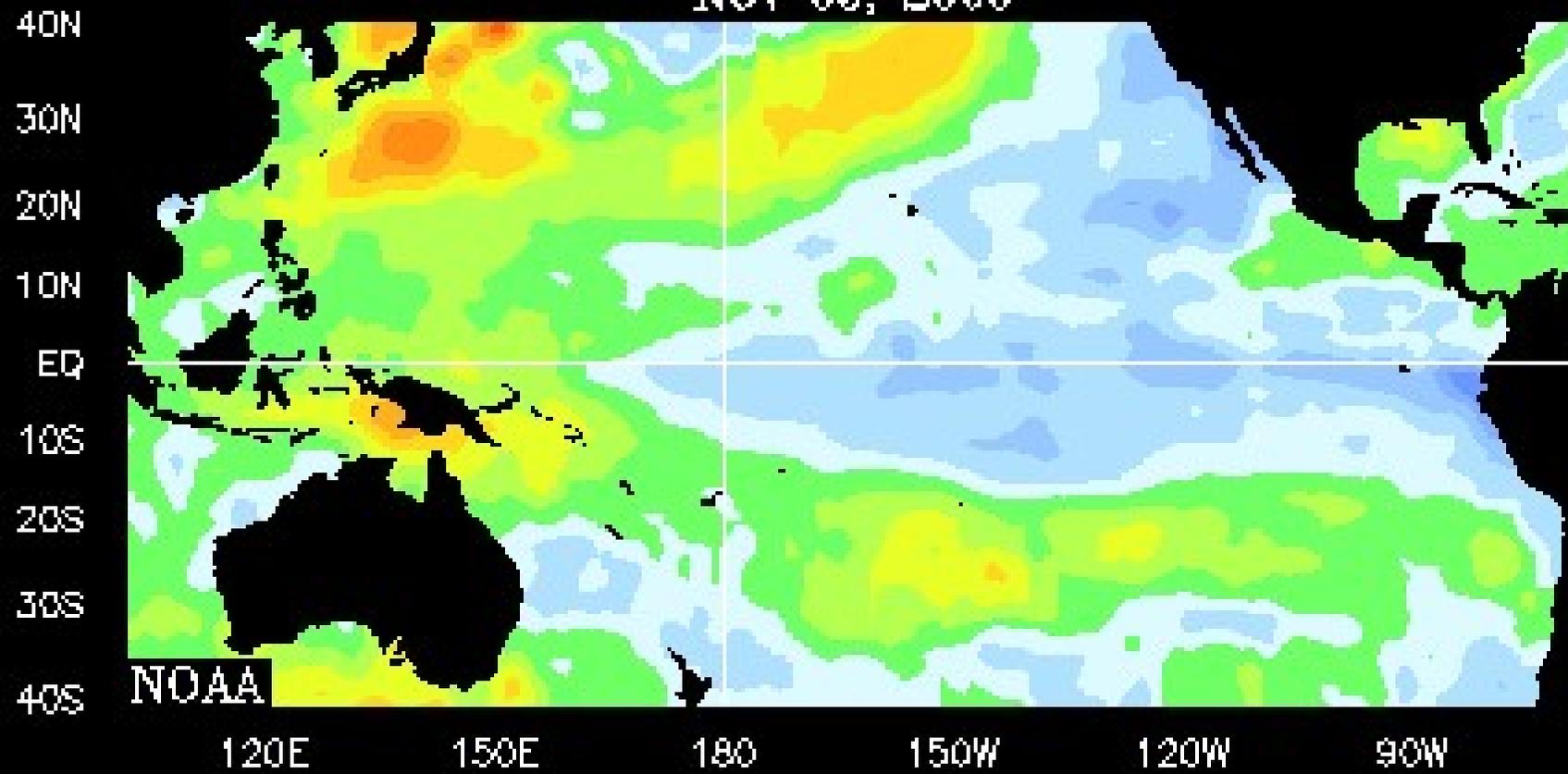
Negli anni “normali” il forte gradiente di temperatura superficiale (freddo a est caldo a ovest) nel Pacifico equatoriale è accompagnato da **forti venti alisei** che spingono le acque superficiali verso ovest permettendo a quelle più fredde e profonde di risalire in superficie. La **risalita delle acque**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

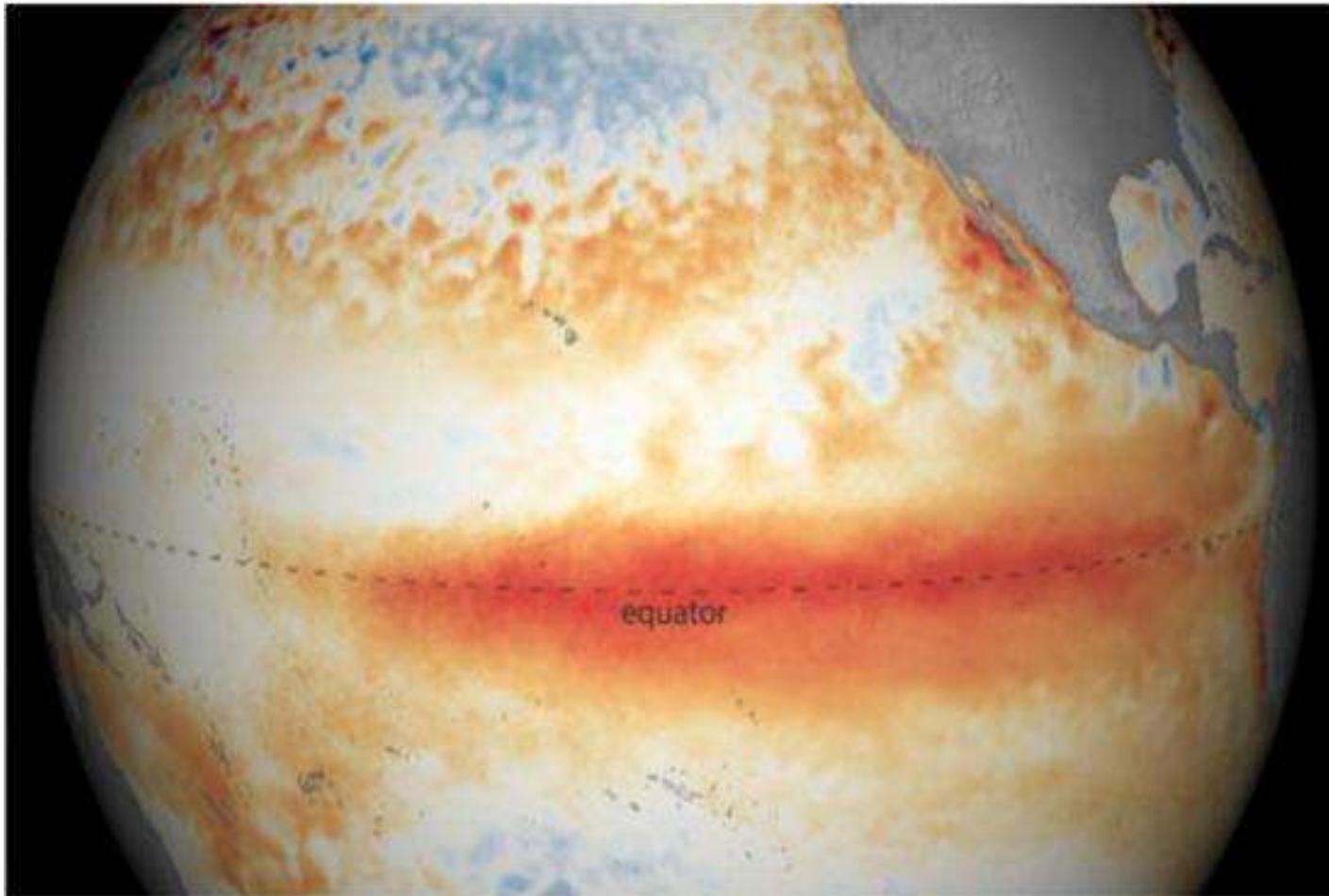
Un **indebolimento degli alisei** nel Pacifico centrale **indebolisce l'upwelling** e fa aumentare la temperatura del Pacifico orientale. Questo fenomeno contribuisce a indebolire ulteriormente gli alisei. Il rafforzarsi vicendevole di questi effetti contribuisce all'instaurarsi di un El Niño.



SST ANOMALIES °C

NOV 05, 2000



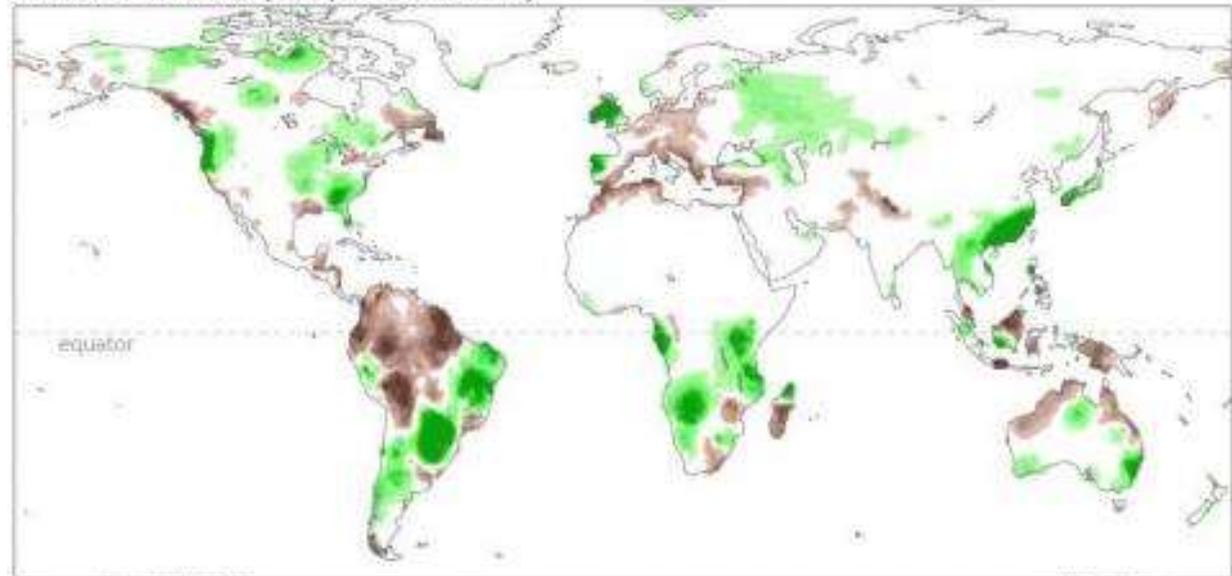


February 2016
compared to 1981-2010



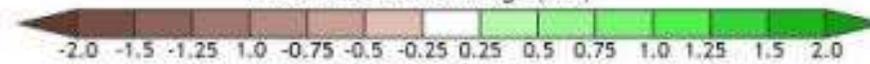
Climate.gov/NNVL
Data: Geo-Polar SST

Dec 2015–Feb 2016 precipitation anomaly



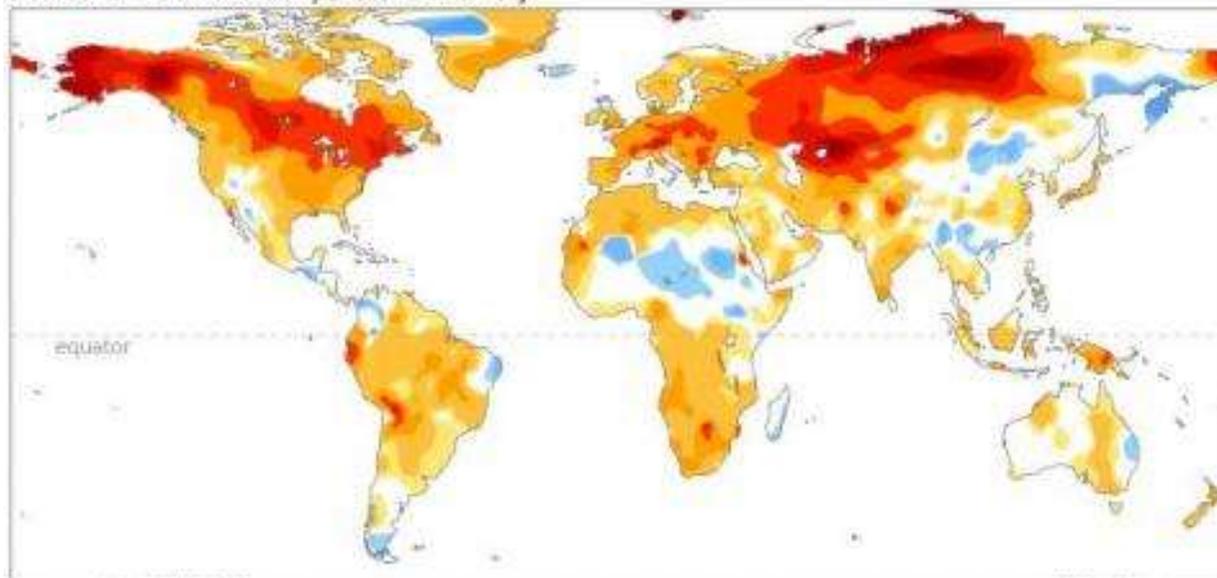
Compared to 1981–2010

Difference from average (mm)



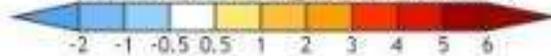
NOAA Climate.gov
Data: CPC

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

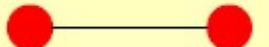
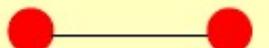
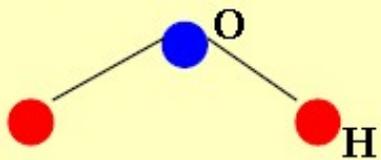
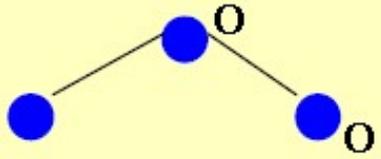
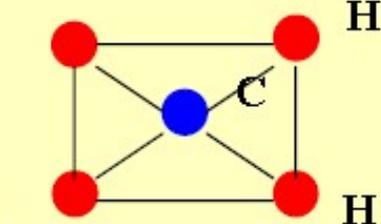
IMMISSIONE DI GAS IN ATMOSFERA

IMMISSIONE DI AEROSOL IN ATMOSFERA

SFRUTTAMENTO DEL TERRENO

forzanti - GHG I

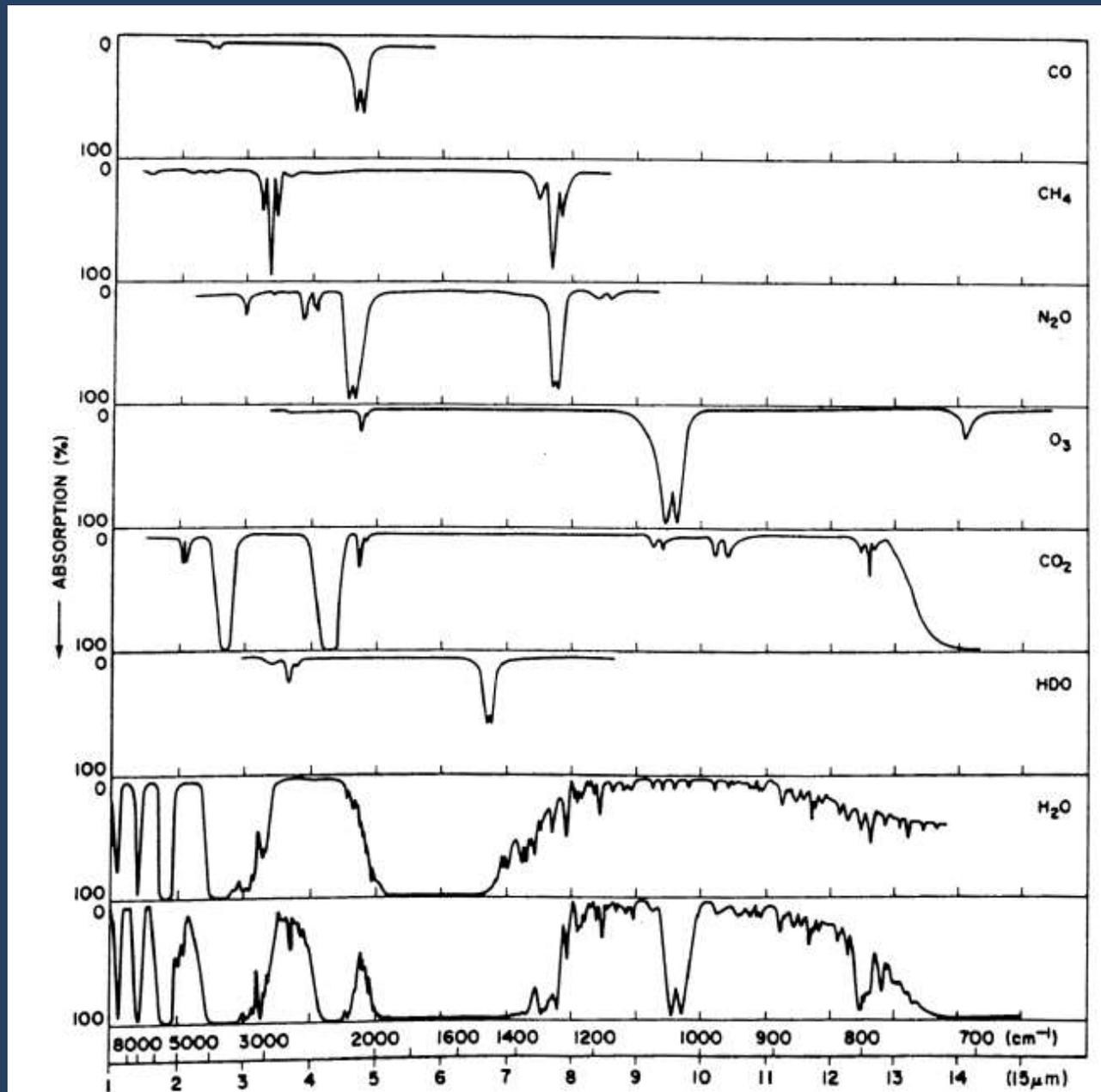
interazione tra radiazione e costituenti atmosferici

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

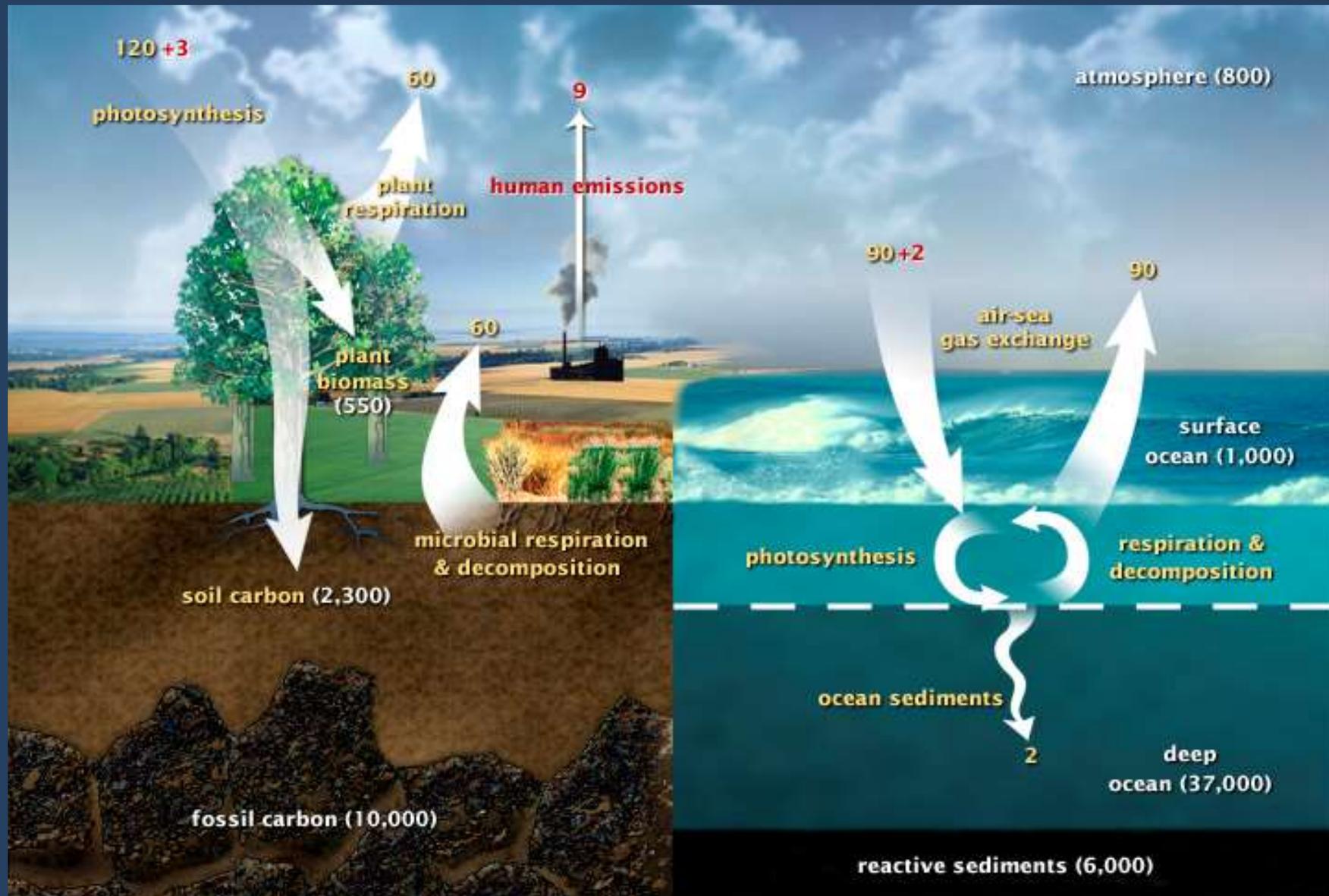


(Valley, 1965)

forzanti - GHG III

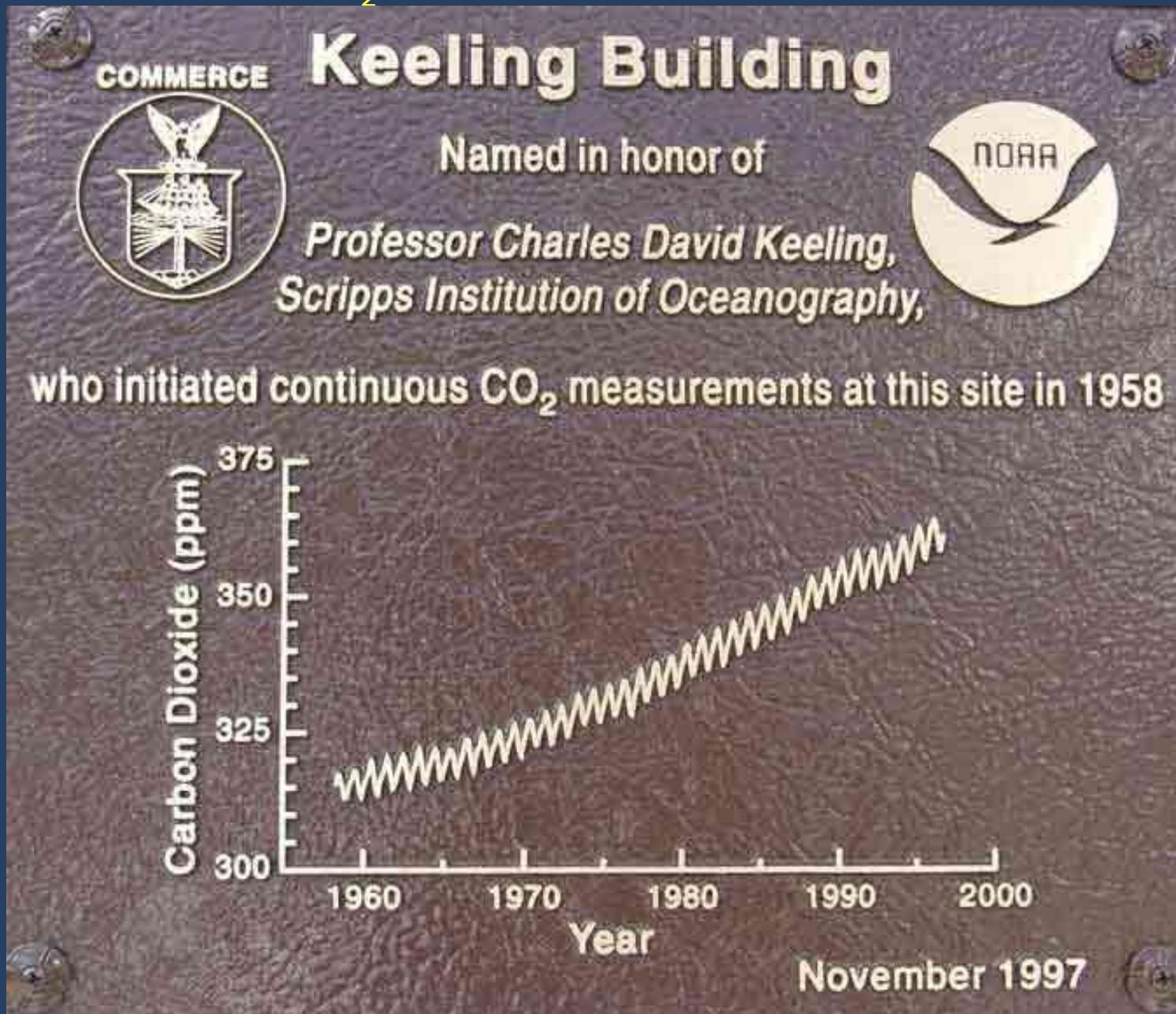
ciclo veloce del carbonio

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



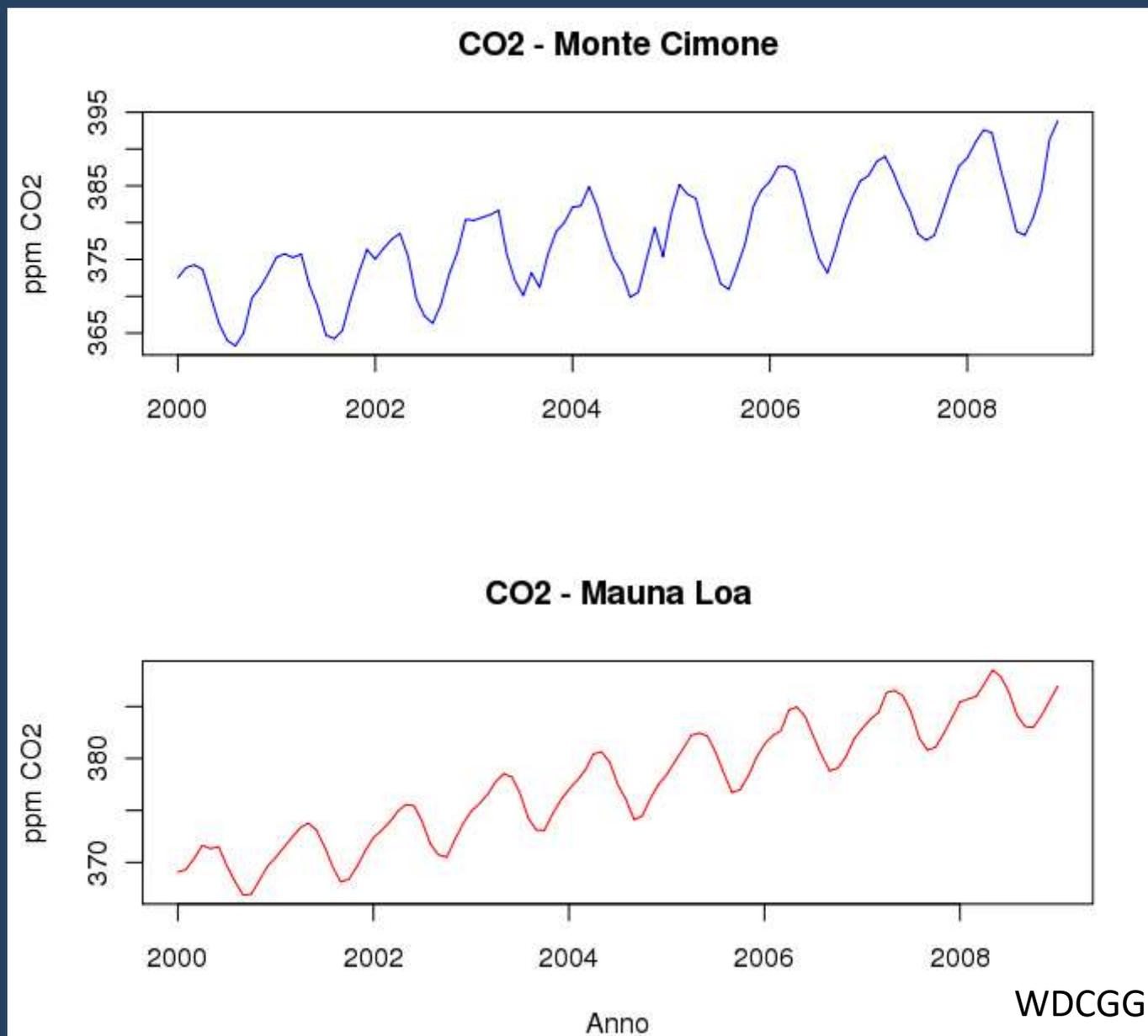
forzanti - GHG IV

misure di contenuto di CO₂



forzanti - GHG V

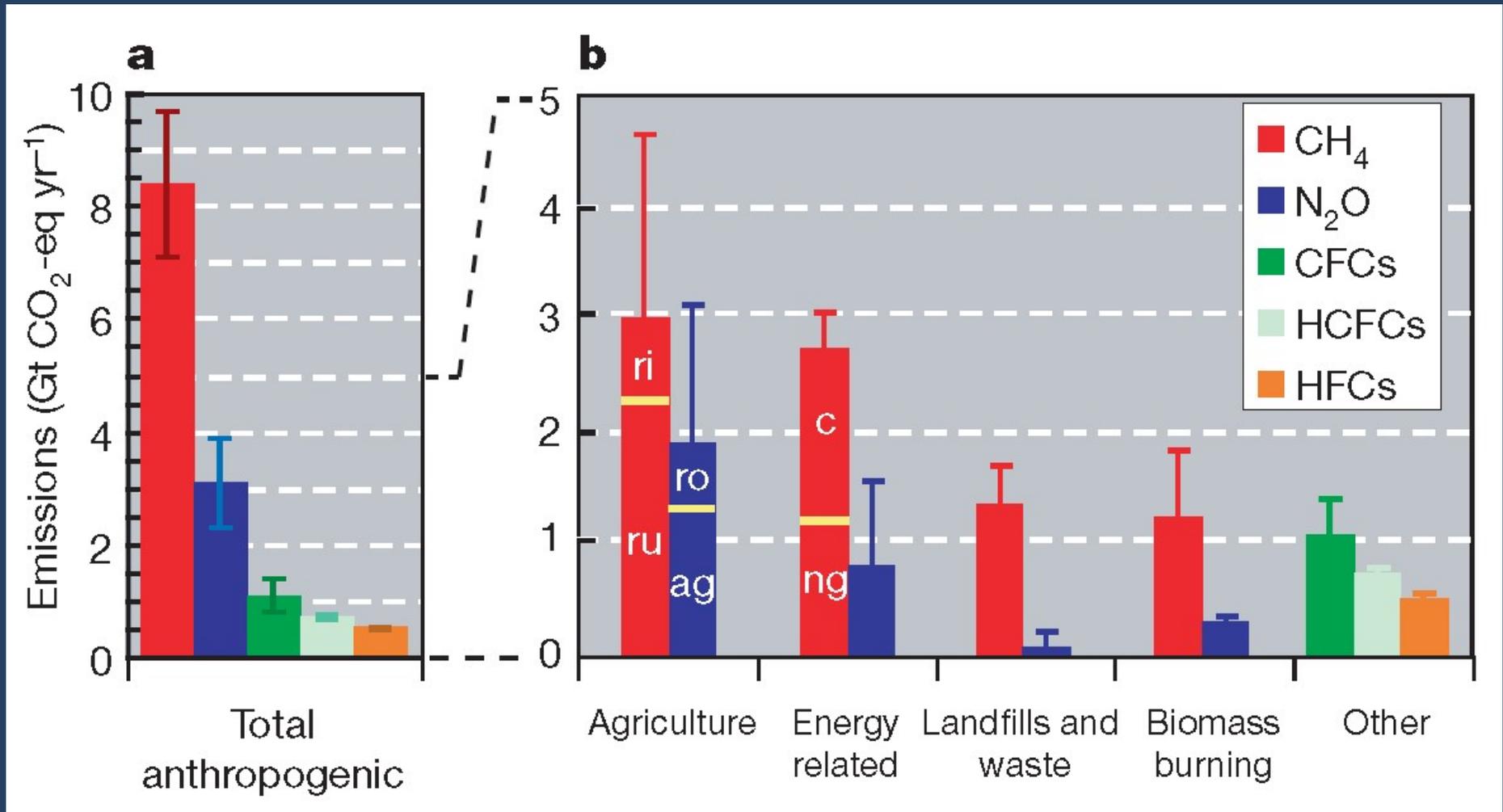
misure di contenuto di CO₂



forzanti - GHG VI

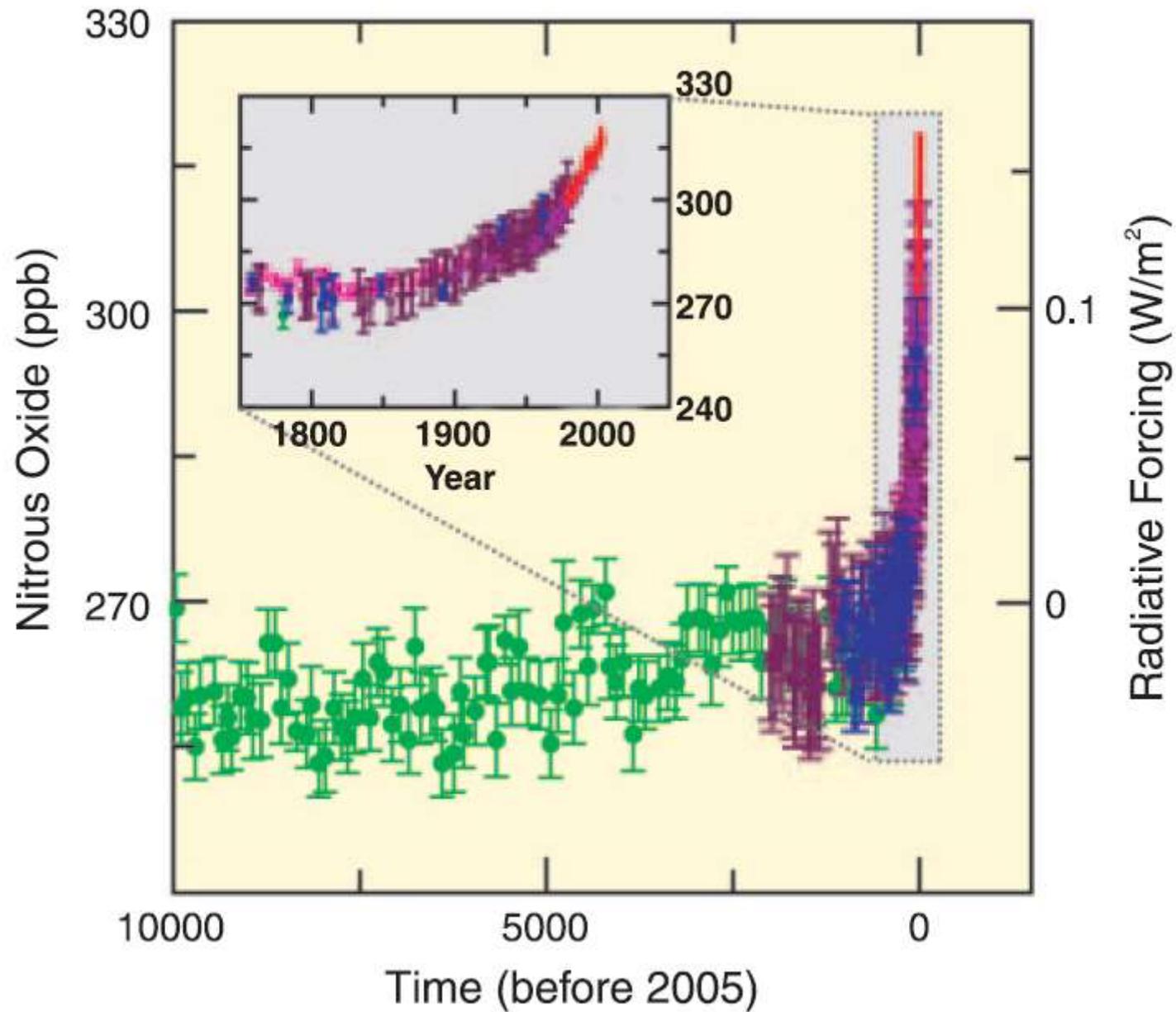
meccanismi di produzione e distruzione di altri GHG

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



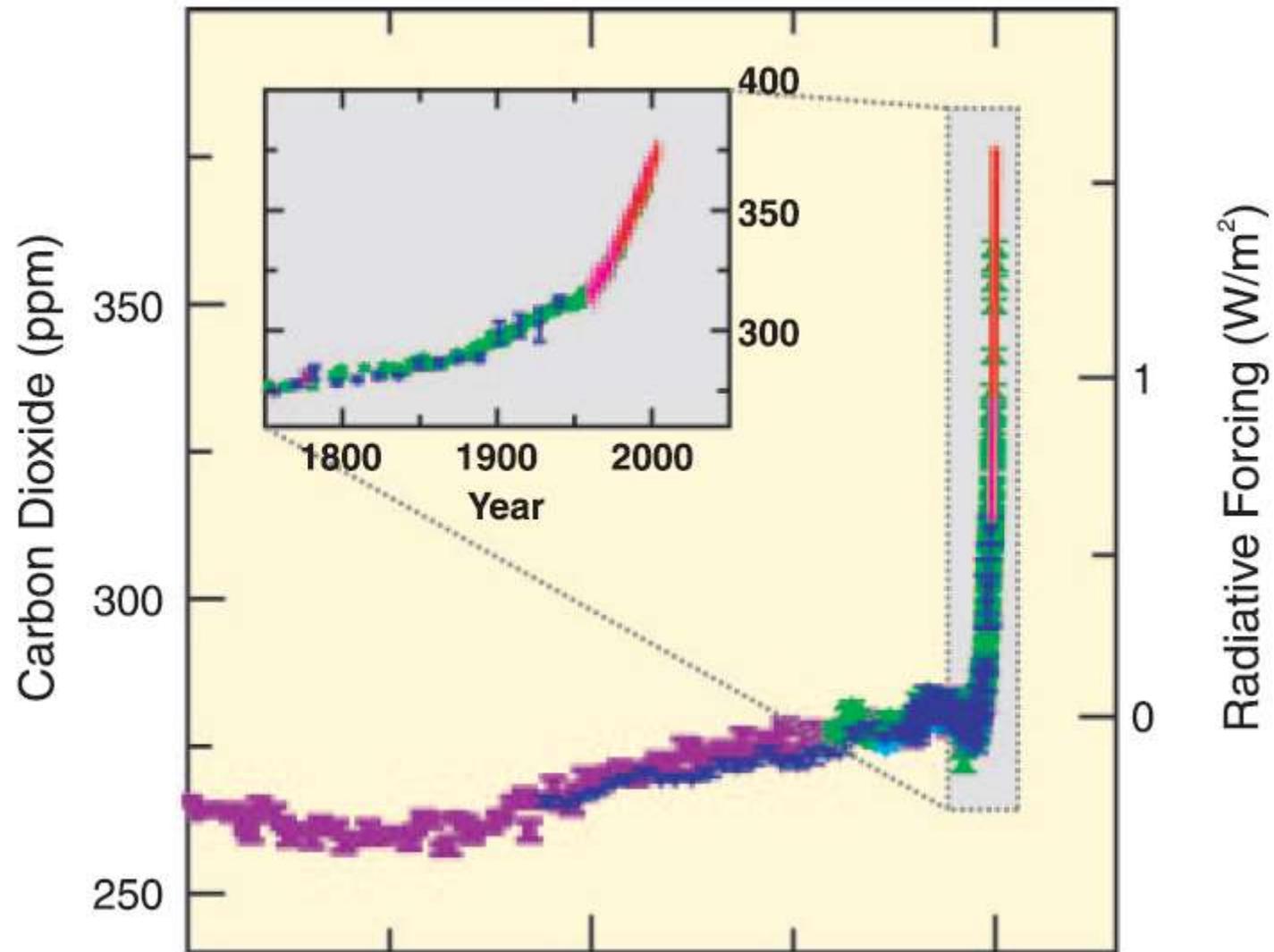
(Montzka et al, 2011)

forzanti - GHG VII
record storici (ice cores)

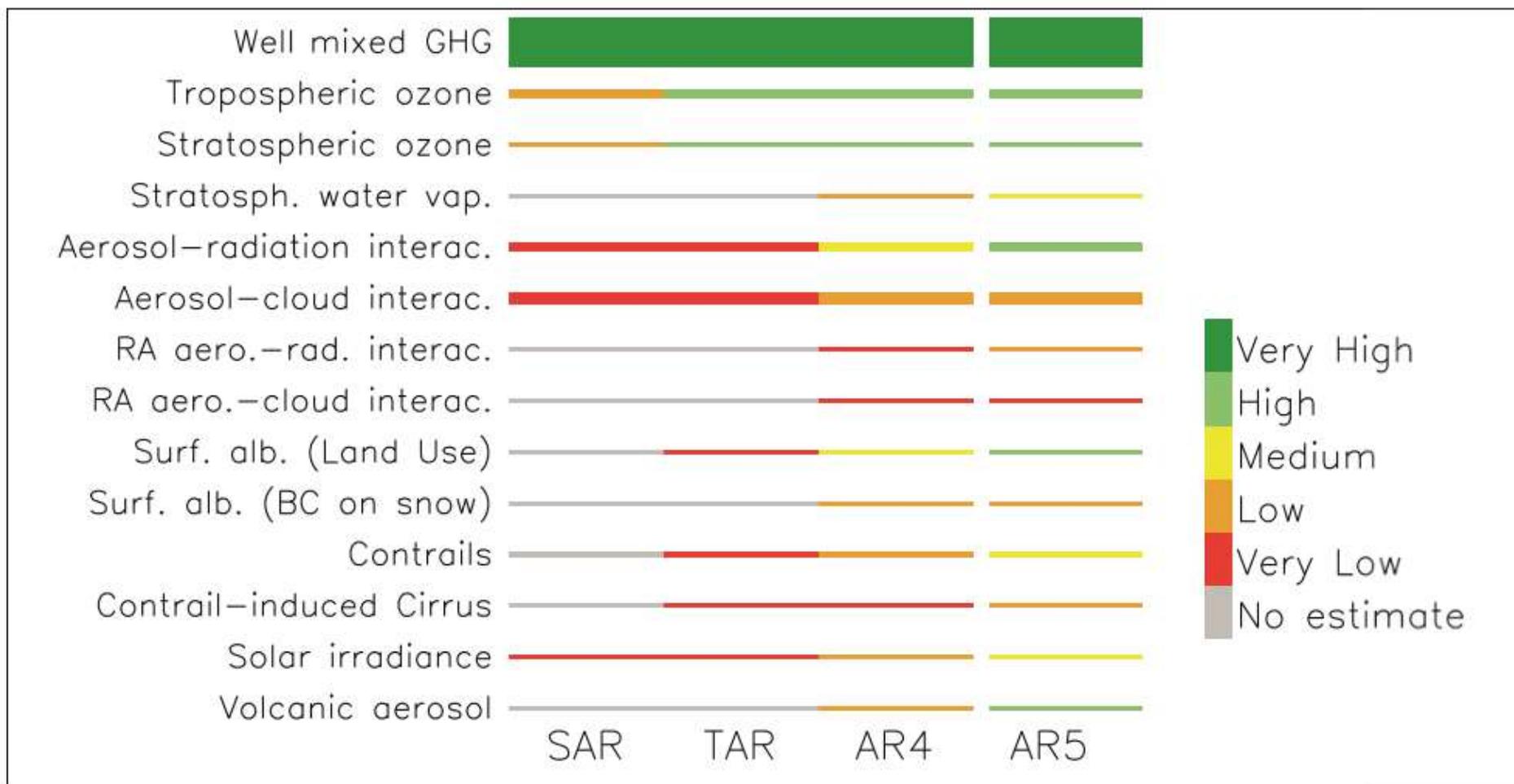


forzanti - GHG VII

record storici (ice cores)



IPCC 5° Assessment Report - 2014 (6° nel 2022)



Confidence Level

GEOENGINEERING TECHNIQUES

Geoengineering is the large-scale intervention in the Earth system to counteract human-induced climate change. There are two basic approaches to intervention:



CARBON DIOXIDE REMOVAL

Removes carbon dioxide (CO₂) from the atmosphere and storing it for a long time. Techniques include:

Ocean fertilisation
Sprinkle iron to stimulate growth of CO₂-eating phytoplankton

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●

Afforestation
Plant trees on a large-scale to remove CO₂

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●

Air capture
Convert CO₂ into a solid using sodium hydroxide

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●

SOLAR RADIATION MANAGEMENT

Counteracts global warming by reflecting some sunlight back to space. Techniques include:

Desert surface albedo
Cover desert surface with reflective sheets to reflect sunlight

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●

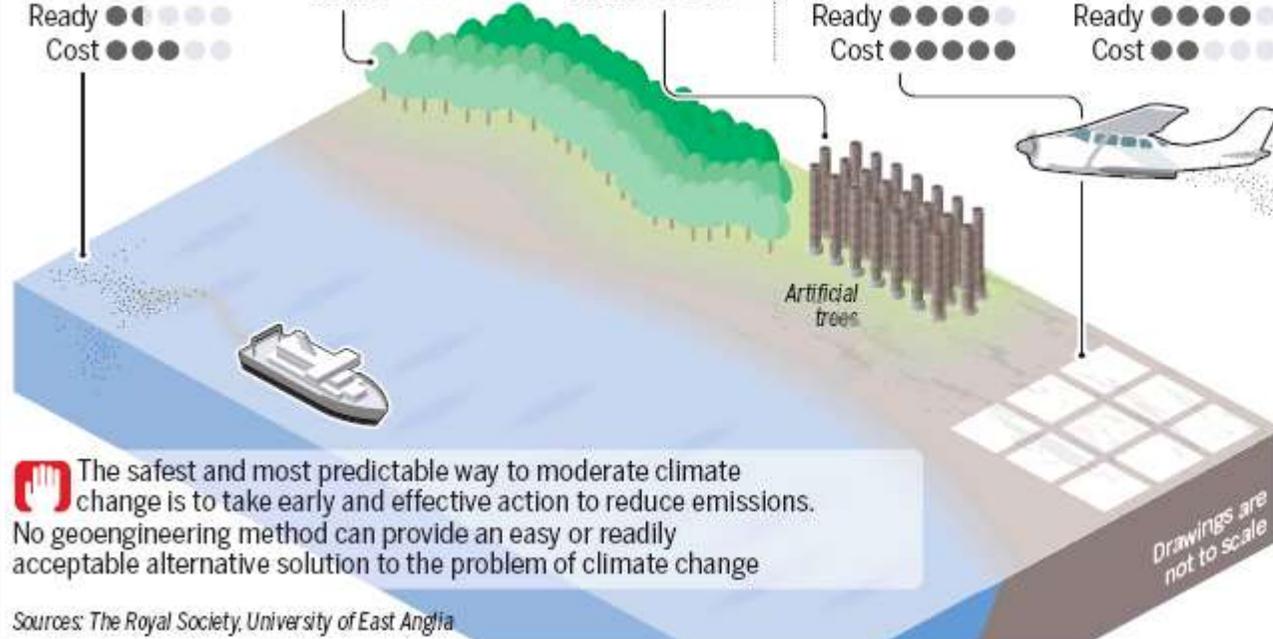
Stratospheric aerosol
Inject sulfur to reflect sunlight, increase cloud condensation

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●



Space reflector
Launch mirrors into space to reflect sunlight

Safety ●●●●●
Ready ●●●●●
Cost ●●●●●



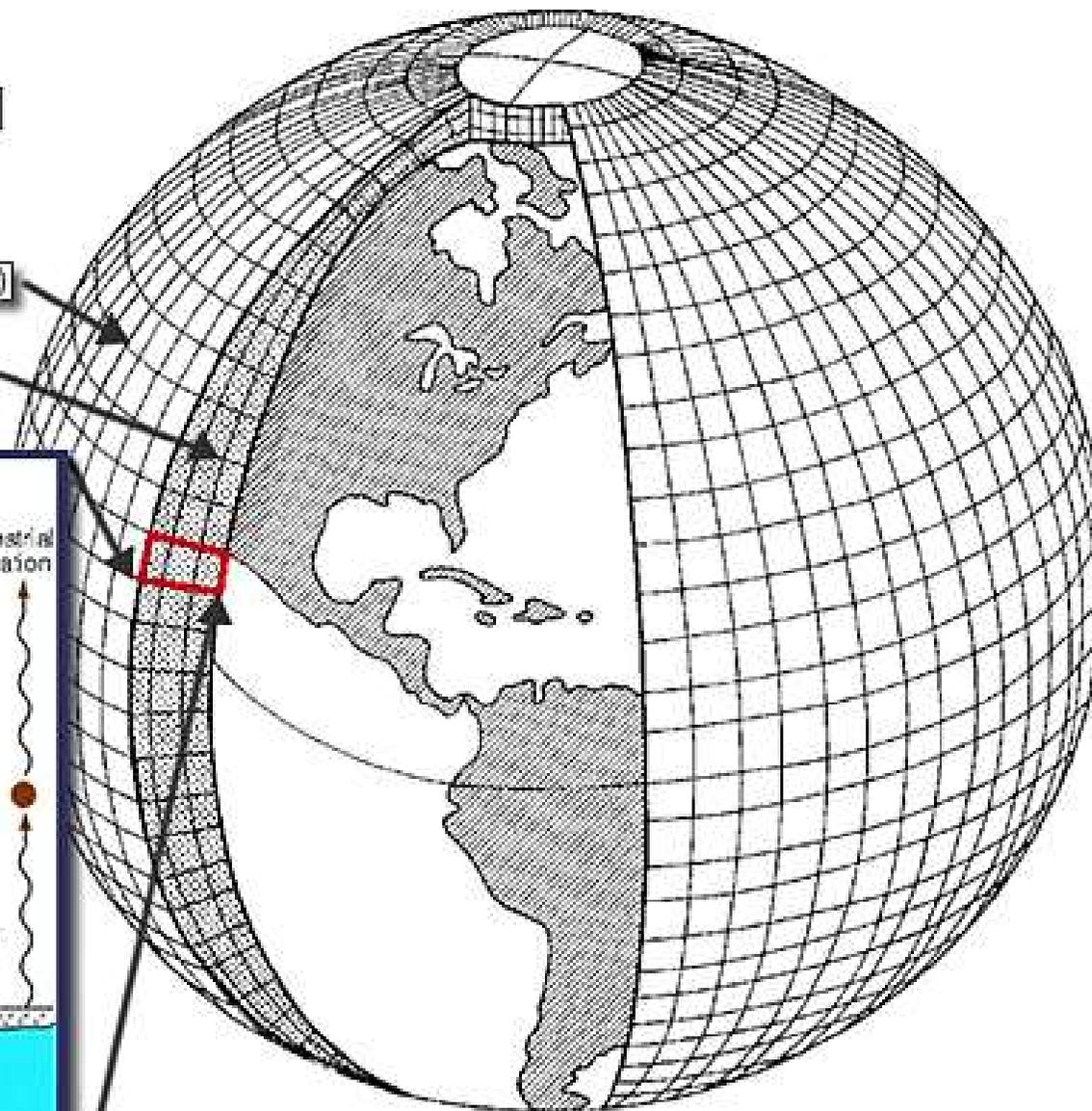
Hand icon The safest and most predictable way to moderate climate change is to take early and effective action to reduce emissions. No geoengineering method can provide an easy or readily acceptable alternative solution to the problem of climate change

Sources: The Royal Society, University of East Anglia

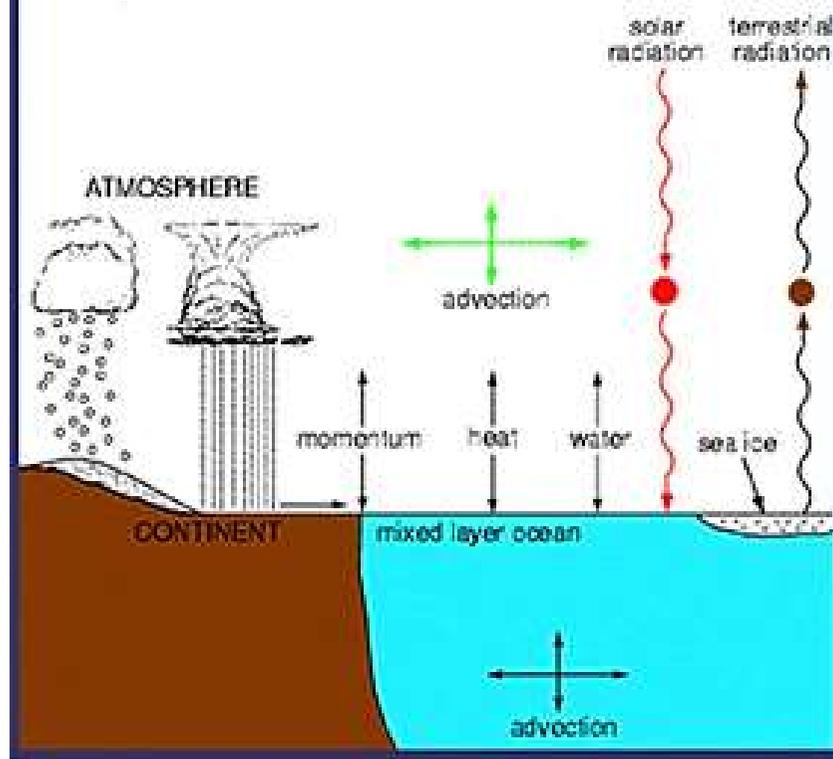
Schematic for Global Atmospheric Model

Horizontal Grid (latitude - longitude)

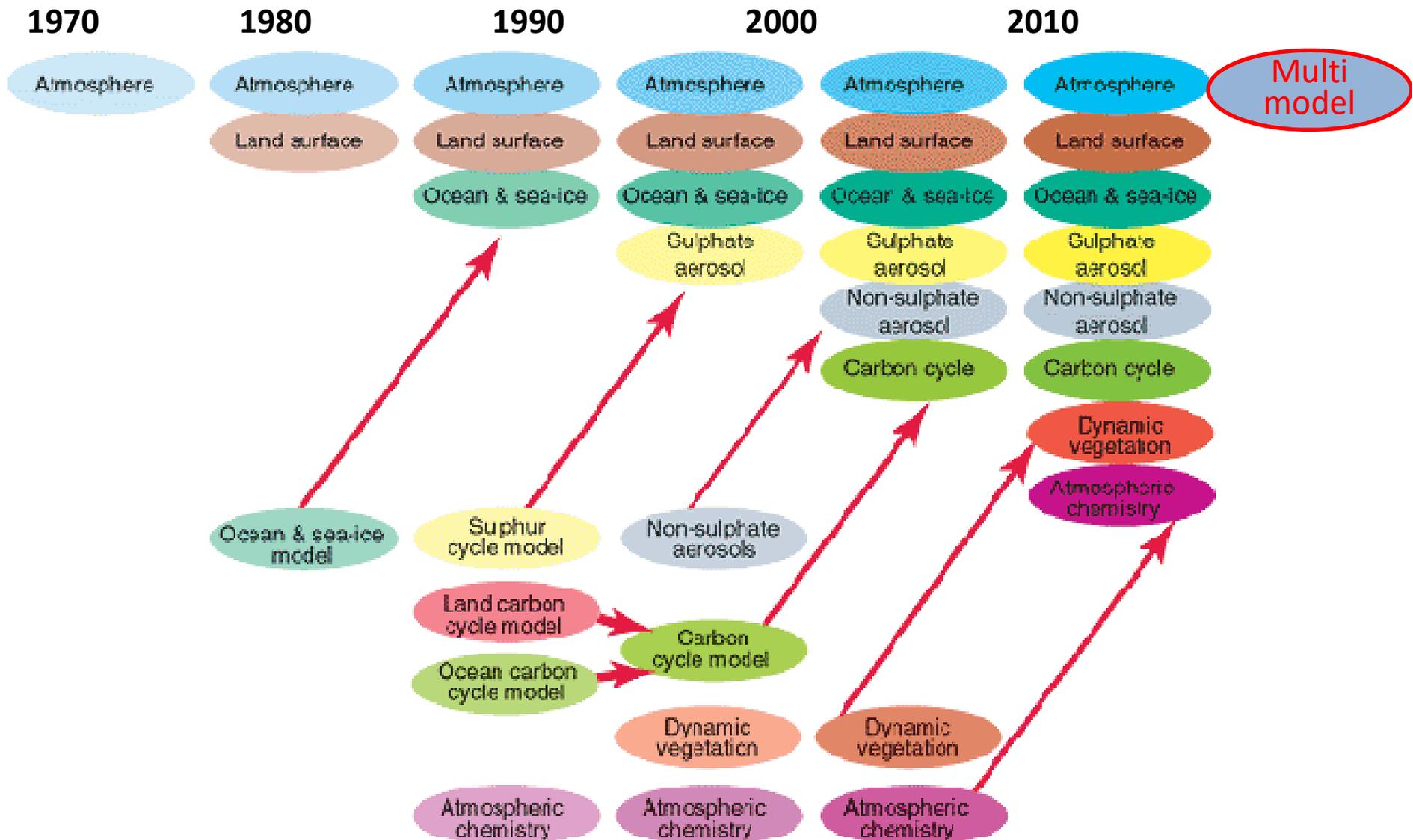
Vertical Grid (height or pressure)



Physical Processes in a Model

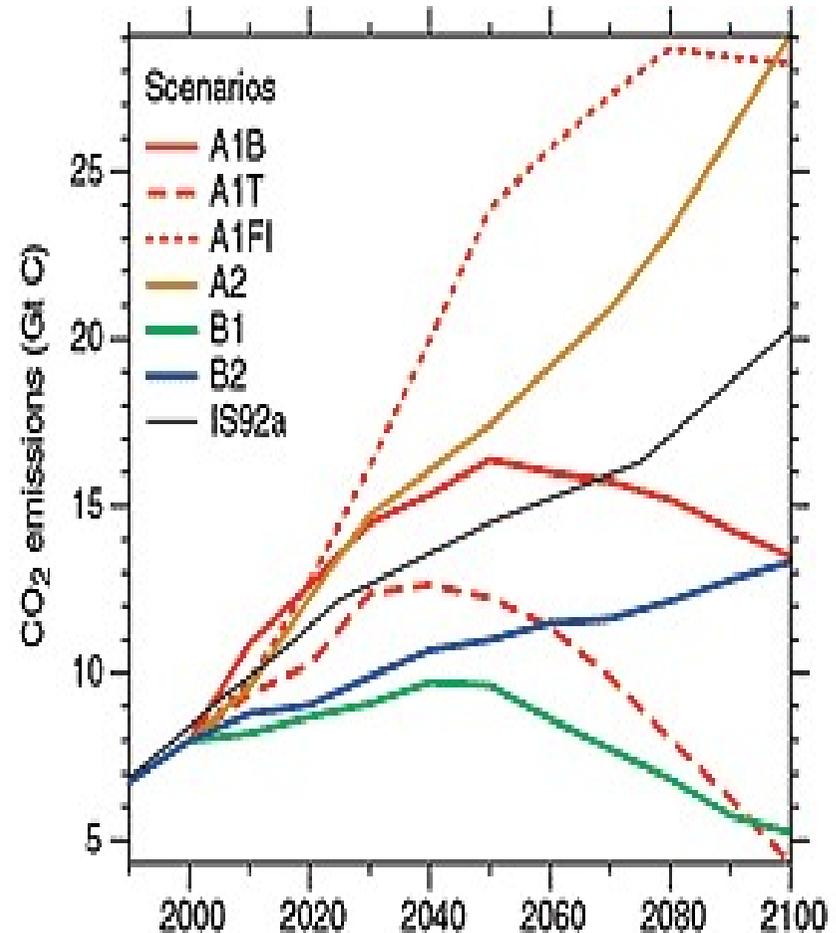


evoluzione dei modelli climatici

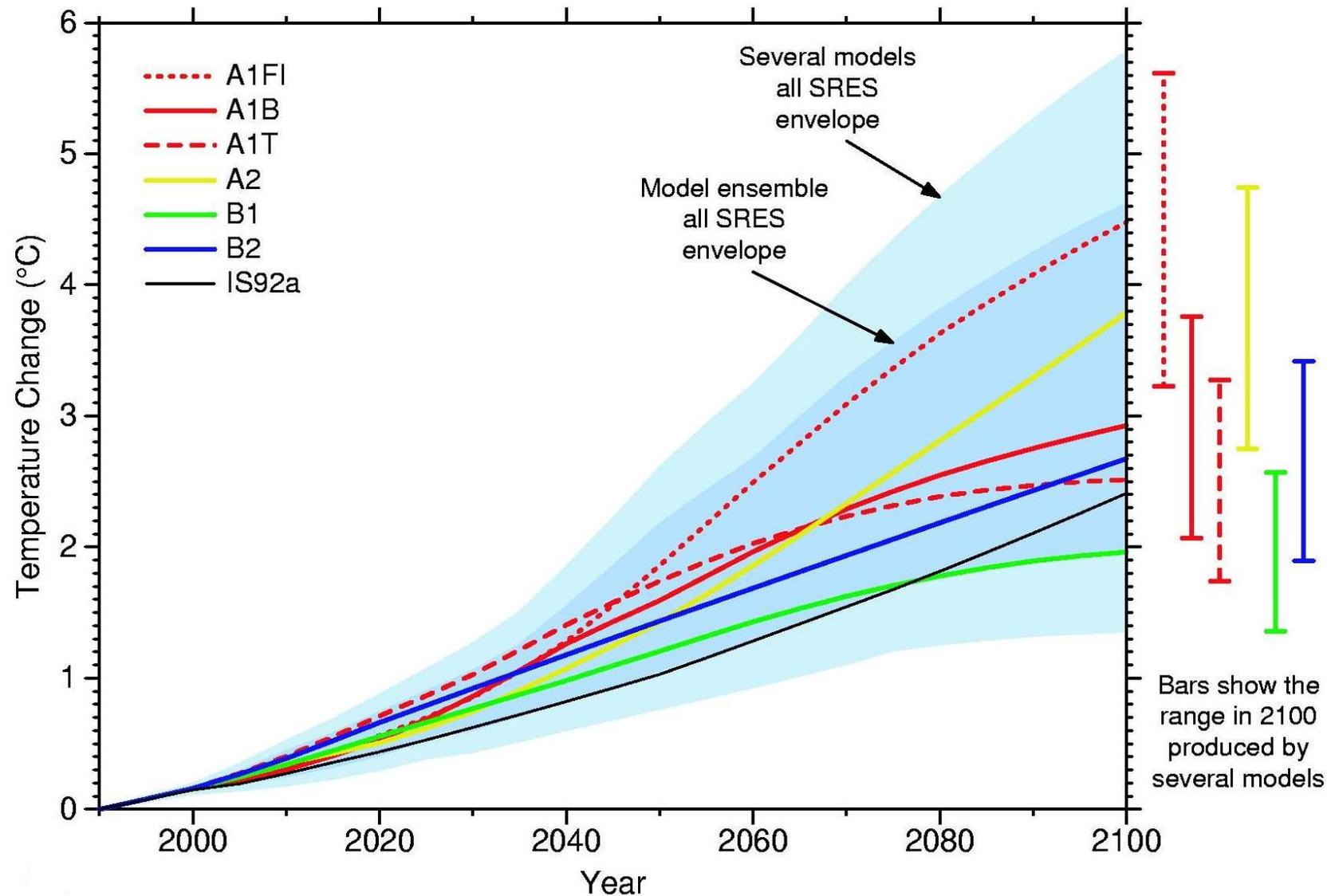


Future Climate Change

- 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-