



ÁREA  
GEOCIENCIAS

# El Sistema Climático

Maestría en Geociencias

2023



Departamento de Ciencias de la Atmósfera  
y Física de los Océanos



Departamento de Ciencias de la Atmósfera  
y Física de los Océanos

## Docentes:

- Teórico: Camila de Mello
  - [camidemello@gmail.com](mailto:camidemello@gmail.com)
- Práctico: Nicolás Díaz
  - [nicolasdiaznegrin@gmail.com](mailto:nicolasdiaznegrin@gmail.com)

## Horarios y modalidad:

Lunes: 8:15 a 10:15 hs (**virtual**)

(Link Zoom: <https://salavirtual-udelar.zoom.us/j/84103584948?pwd=dWZtRDITbWIGRGUrMVBHTXBqYnQwdz09>)

Miércoles: 9:00 a 13:00 hs **presencial**

**Salón: Seminarios Instituto de Física**

# Evaluación

- Entrega de ejercicios prácticos
- Realización de un parcial
- Nota: 50% ej. prácticos / 50% parcial
  - 0-24 pierde el curso
  - 25-60 derecho a examen (escrito+oral)
  - 61-100 exonera parte escrita, debe dar solo examen oral

# Temario

- 1) INTRODUCCIÓN AL SISTEMA CLIMÁTICO
- 2) BALANCE ENERGÉTICO GLOBAL
- 3) CONVECCIÓN ATMOSFÉRICA Y NUBES
- 4) CICLO HIDROLÓGICO
- 5) DINÁMICA DE LA ATMÓSFERA
- 6) CIRCULACIÓN GENERAL
- 7) CRIÓSFERA
- ~~8) CICLO DE CARBONO~~
- 9) VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO
- 10) MODELIZACIÓN CLIMÁTICA

## **BIBLIOGRAFIA:**

The Earth System. Kump et al.

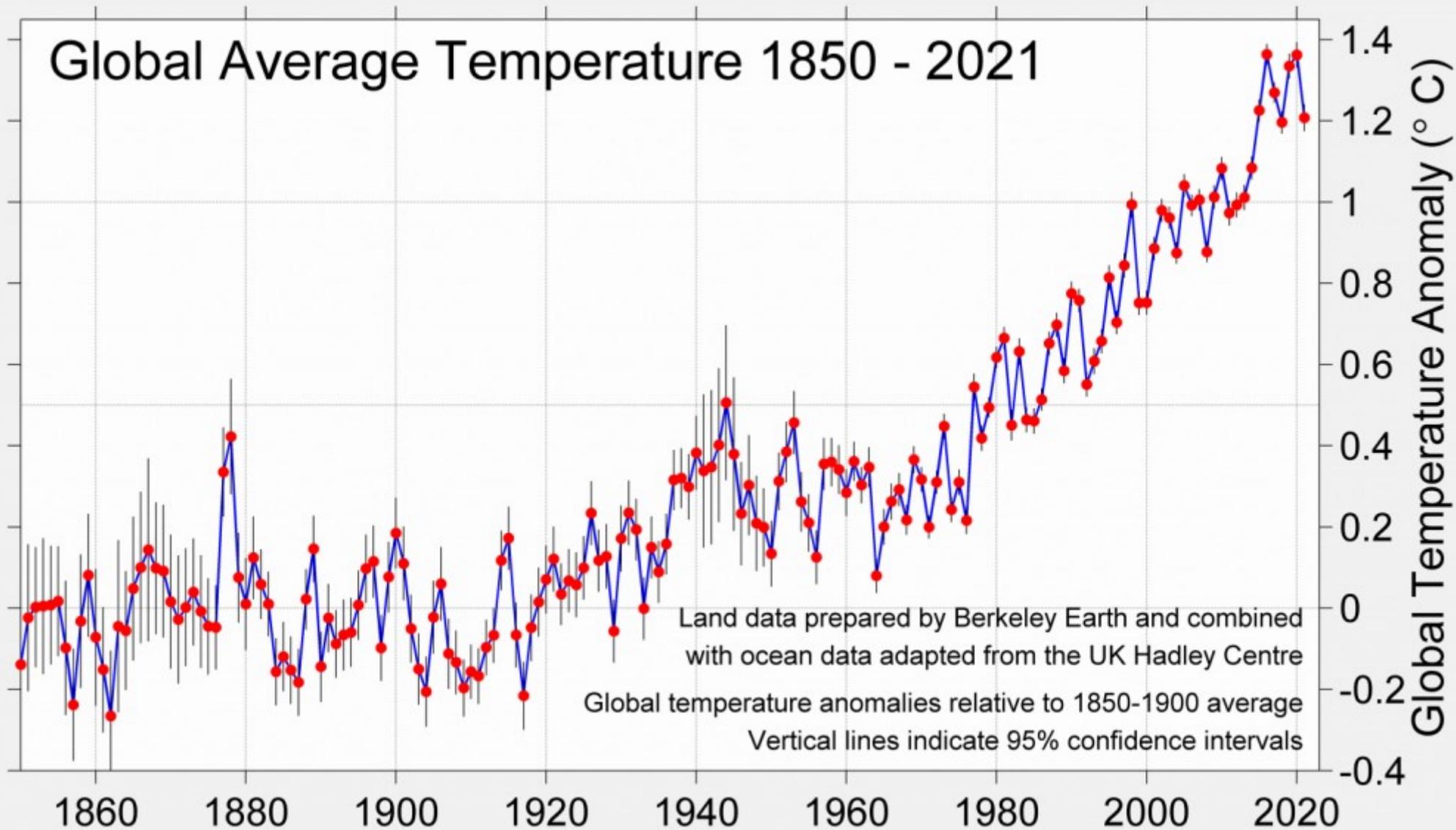
Global Physical Climatology.  
Hartmann.

Atmospheric Science. Wallace and  
Hobbs

IPCC Assessment Report 6

# Introducción al Sistema Climático

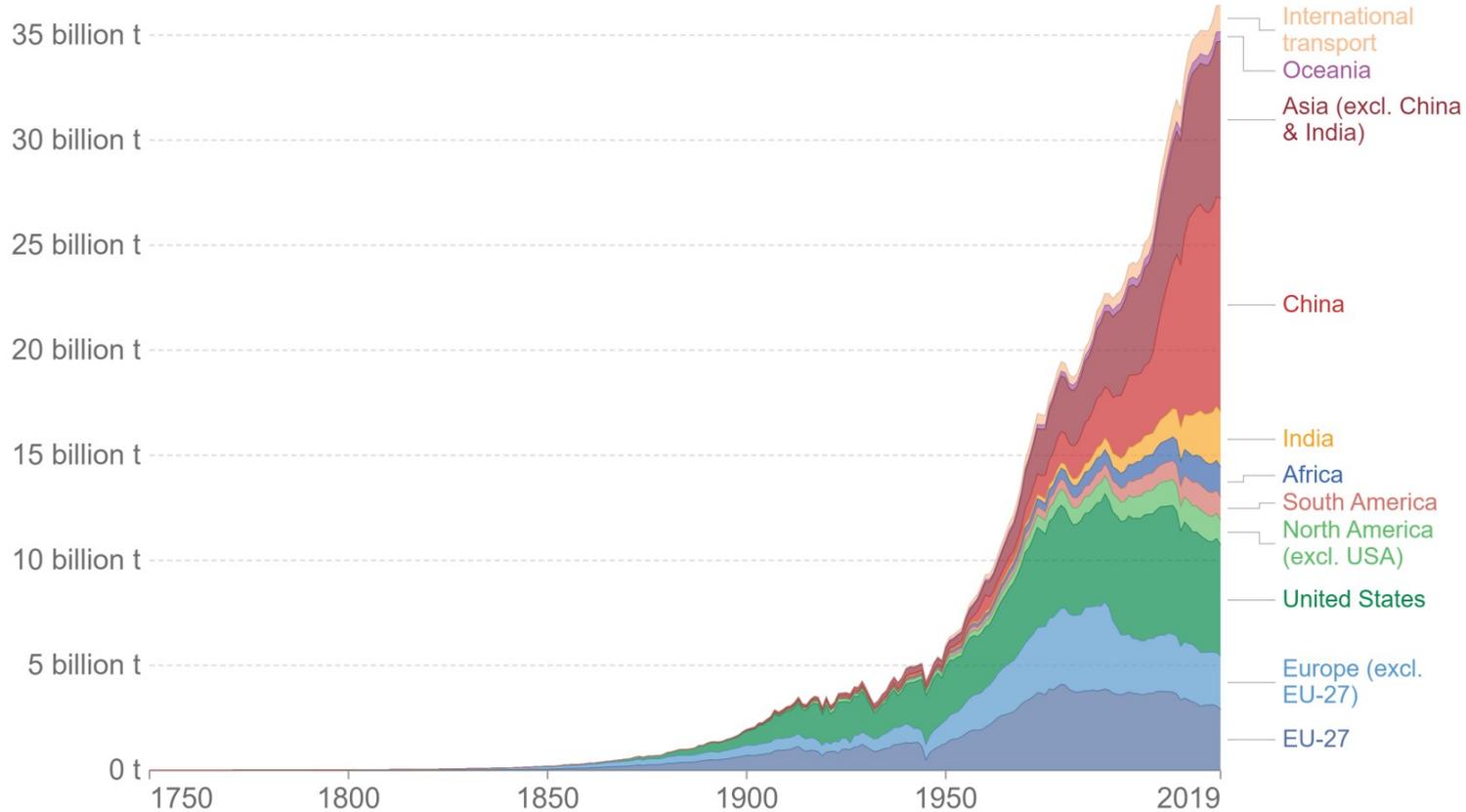
# Global Average Temperature 1850 - 2021



# Las actividades humanas han aumentado el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera (CO2, CH4, NO2)

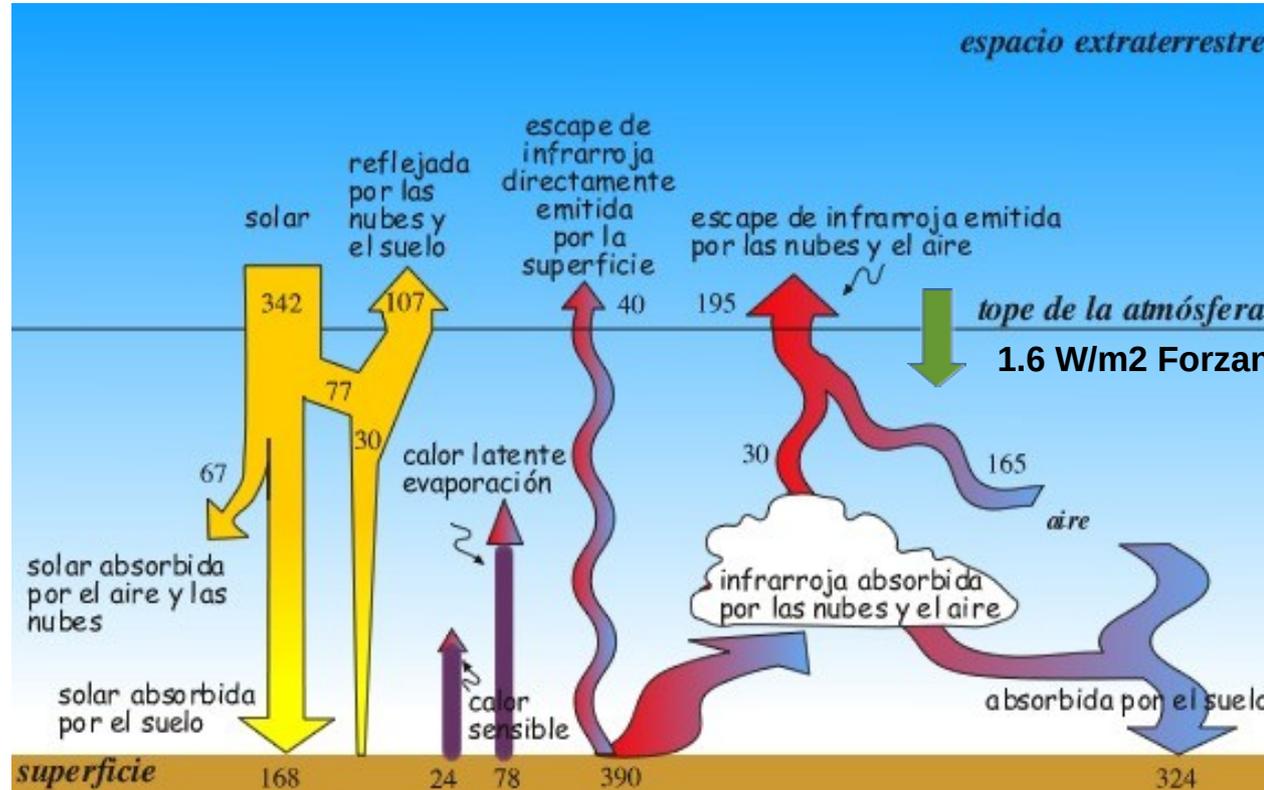
## Annual total CO2 emissions, by world region

Our World in Data



Source: Our World in Data based on the Global Carbon Project  
OurWorldInData.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions • CC BY  
Note: This measures CO2 emissions from fossil fuels and cement production only – land use change is not included. 'Statistical differences' (included in the GCP dataset) are not included here.

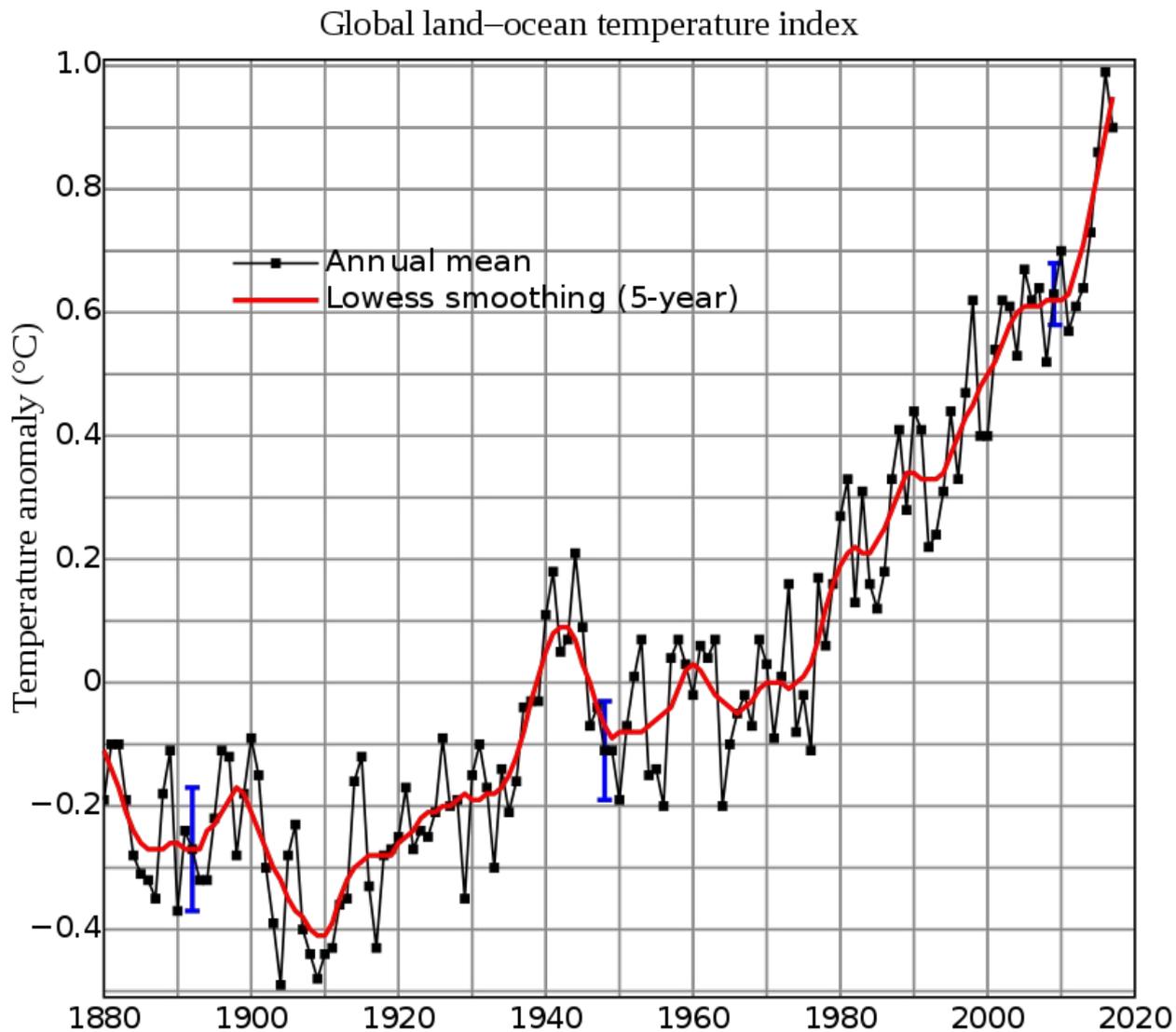
Las actividades humanas han aumentado el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ), .... lo cual generó un aumento en la energía emitida hacia la superficie.



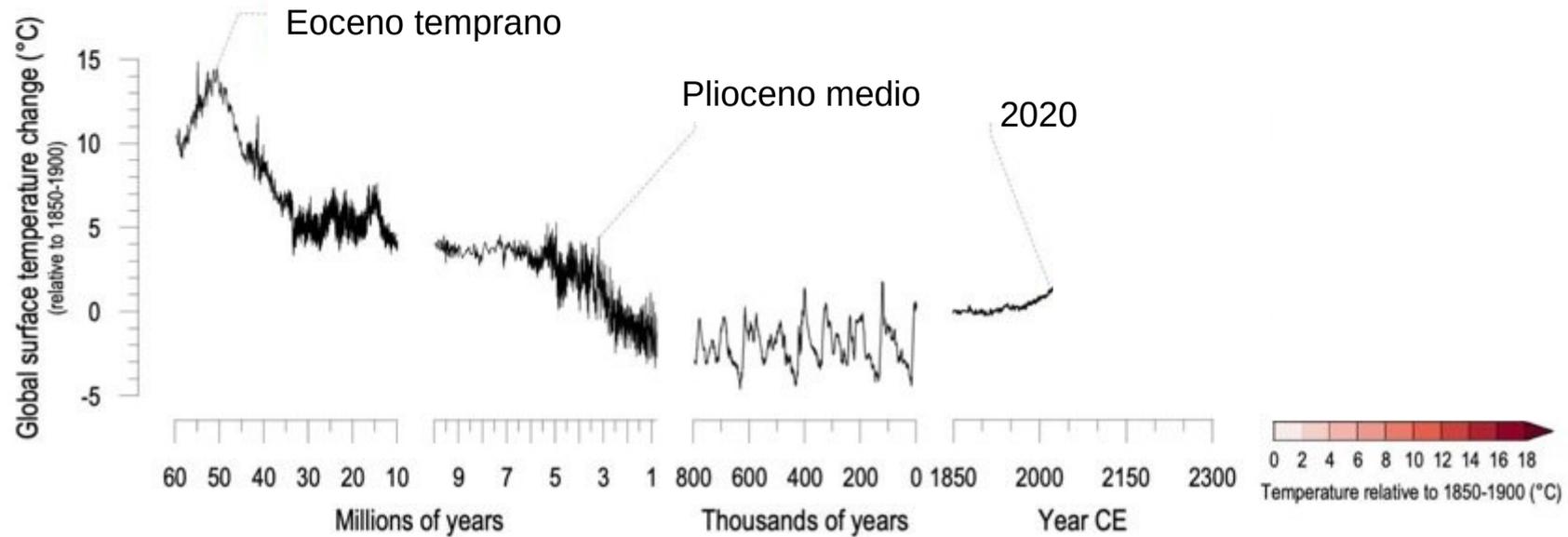
**1.6 W/m<sup>2</sup> Forzante Antropogénico**

Este incremento se usa en el sistema climático para aumentar el contenido de calor de todos sus componentes y ha resultado en un aumento de la temperatura de superficie cercano a  $1^{\circ}\text{C}$  desde comienzos del siglo XX.

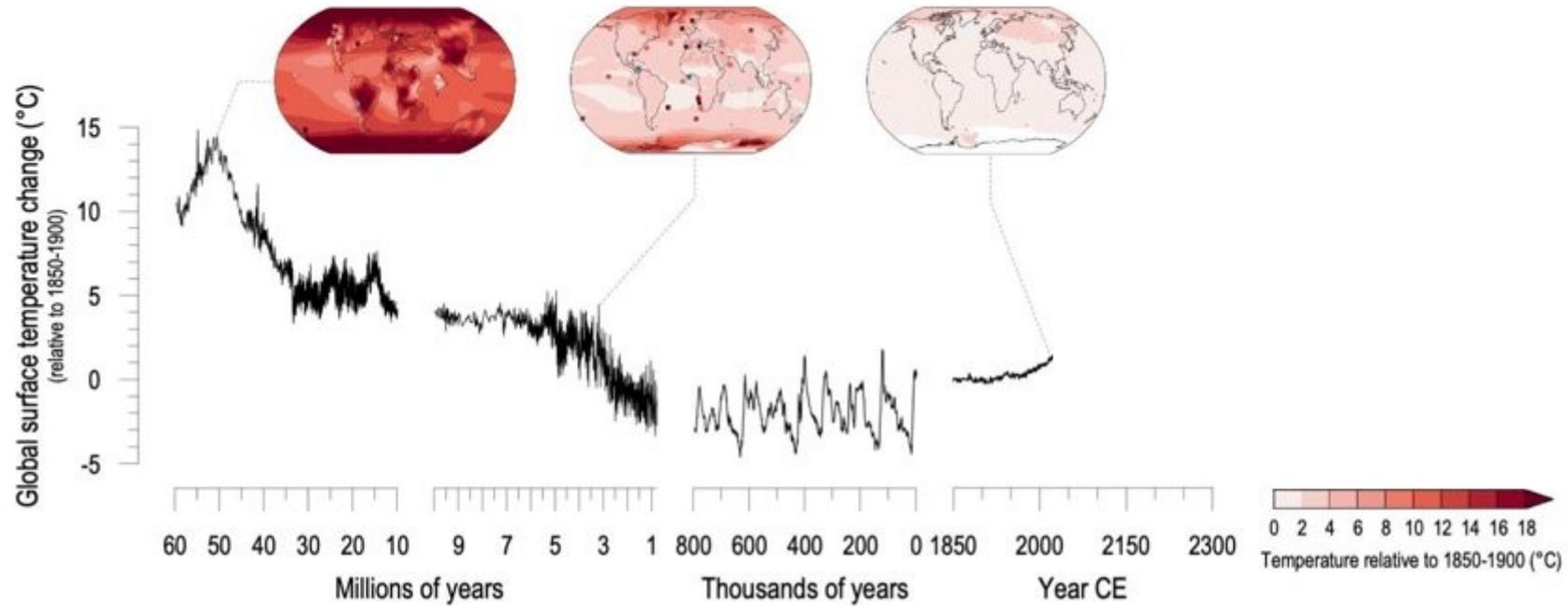
Este aumento en la temperatura de la atmósfera es el efecto más visible del cambio climático.



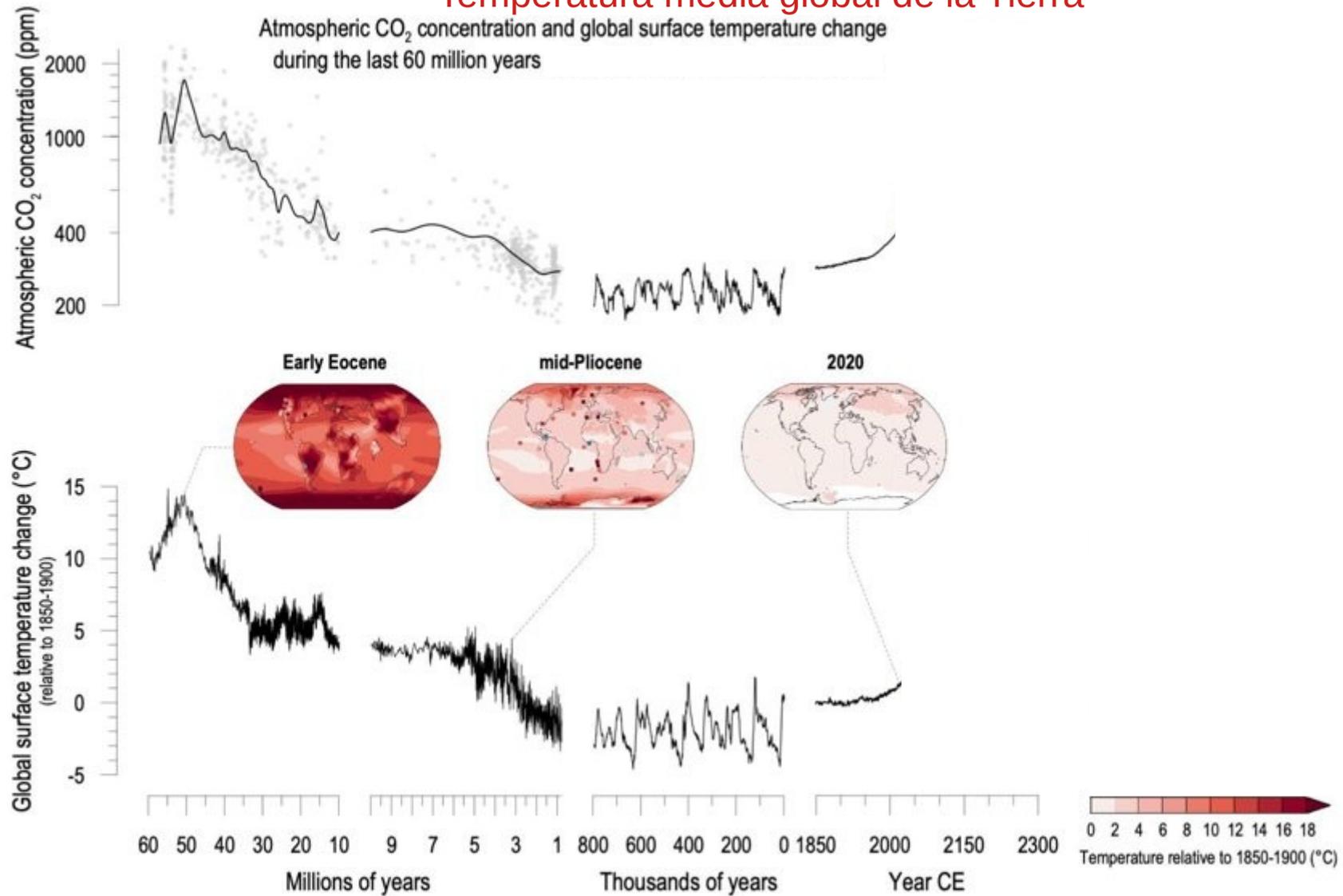
# Temperatura media global de la Tierra



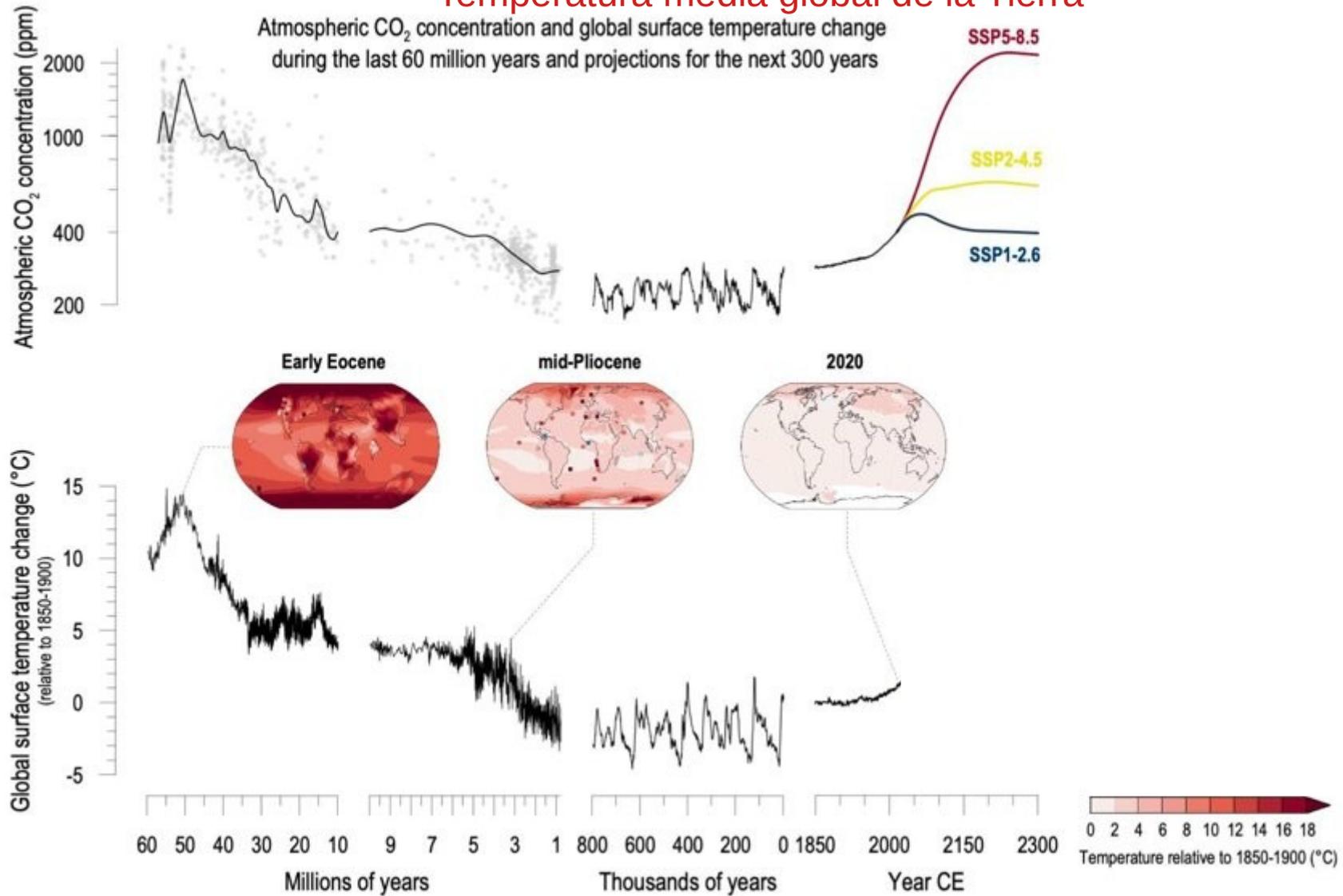
# Temperatura media global de la Tierra



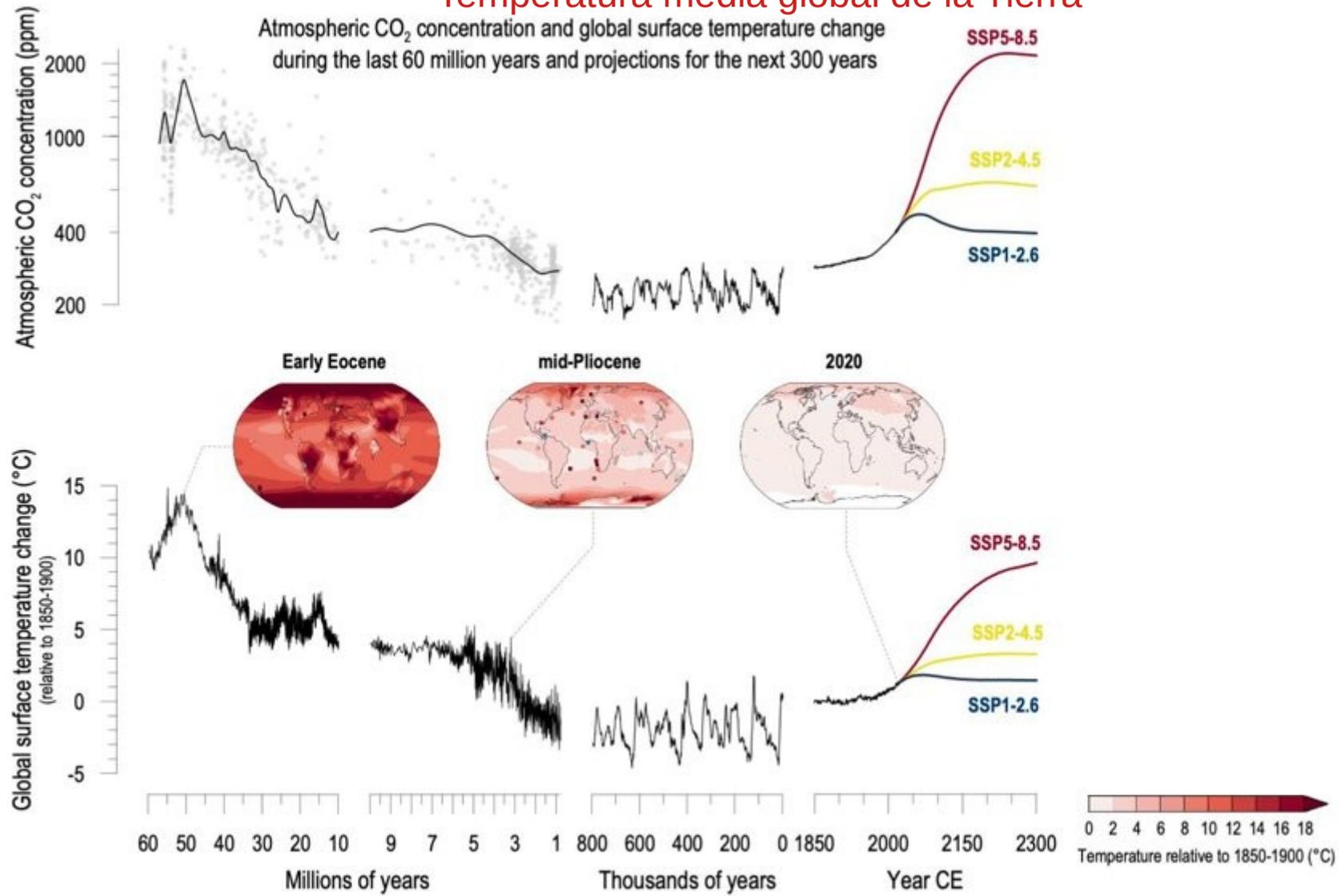
# Temperatura media global de la Tierra



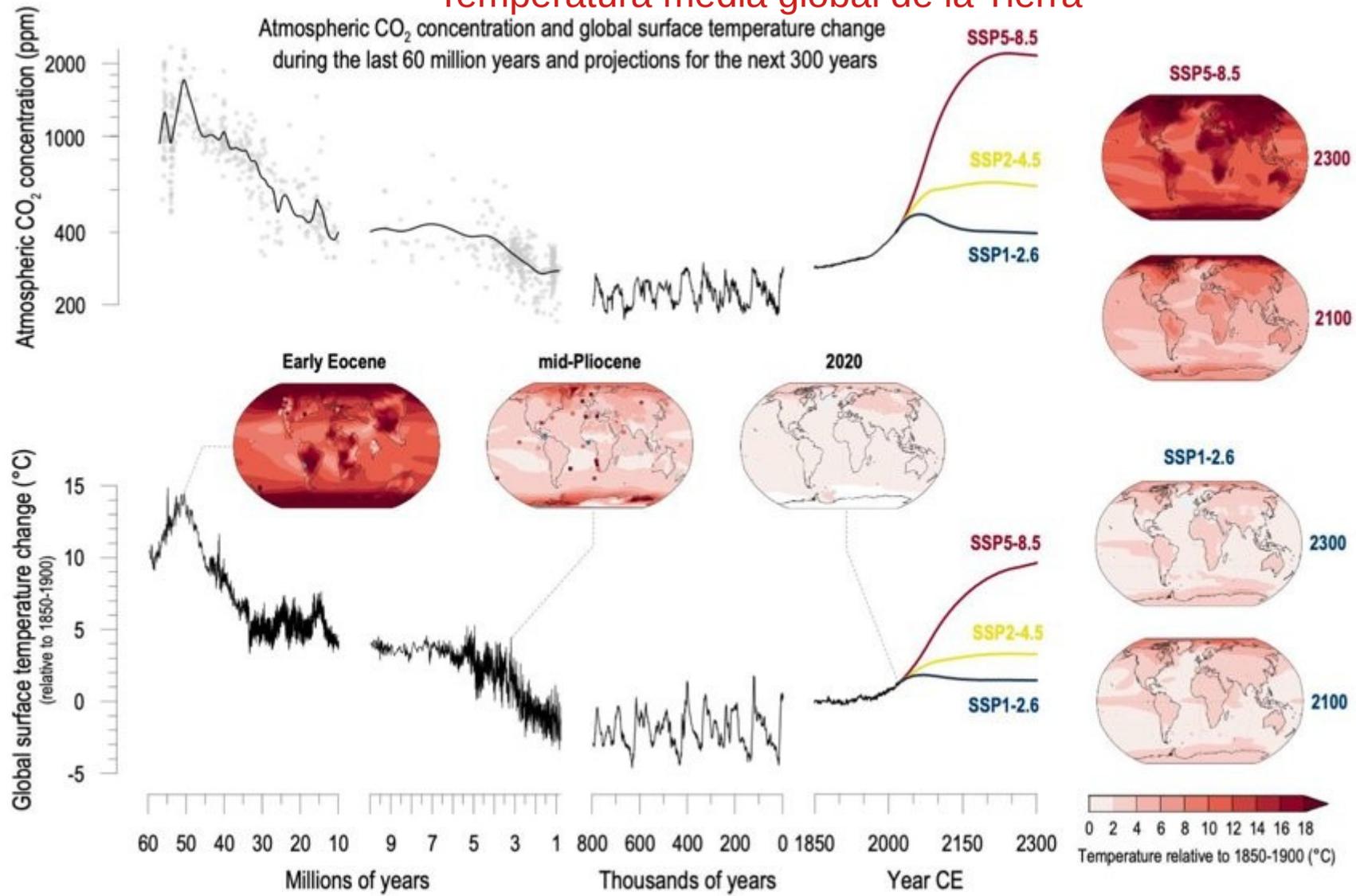
# Temperatura media global de la Tierra



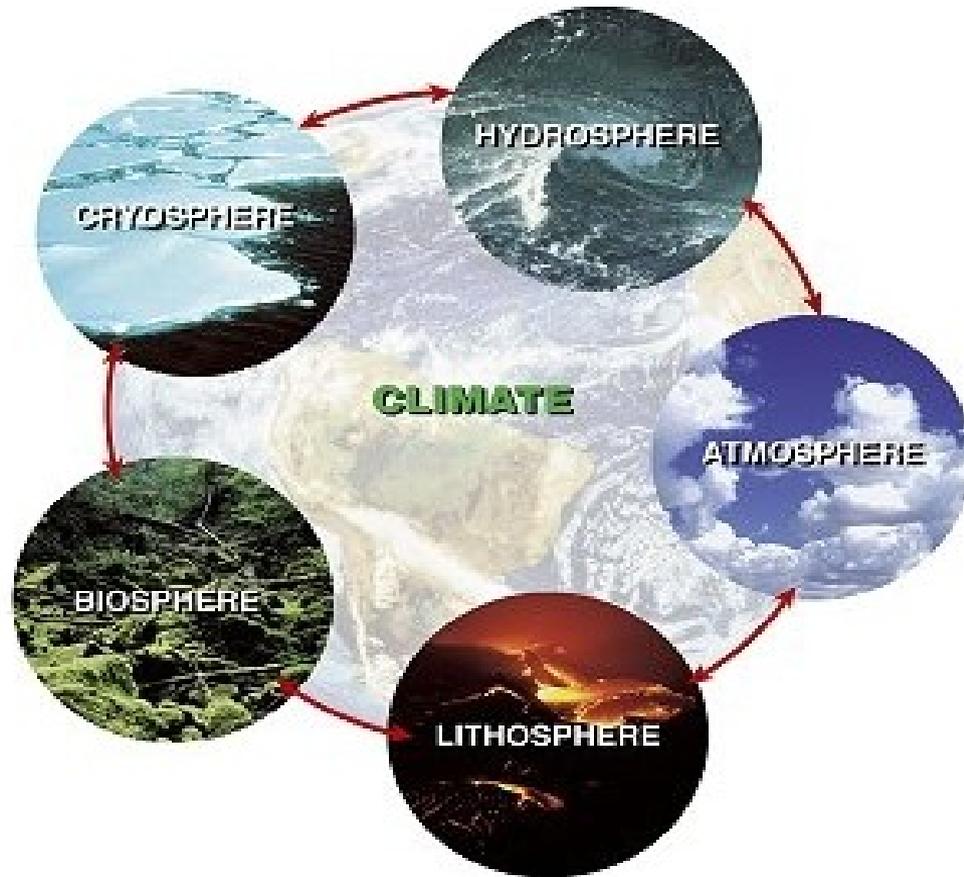
# Temperatura media global de la Tierra



# Temperatura media global de la Tierra



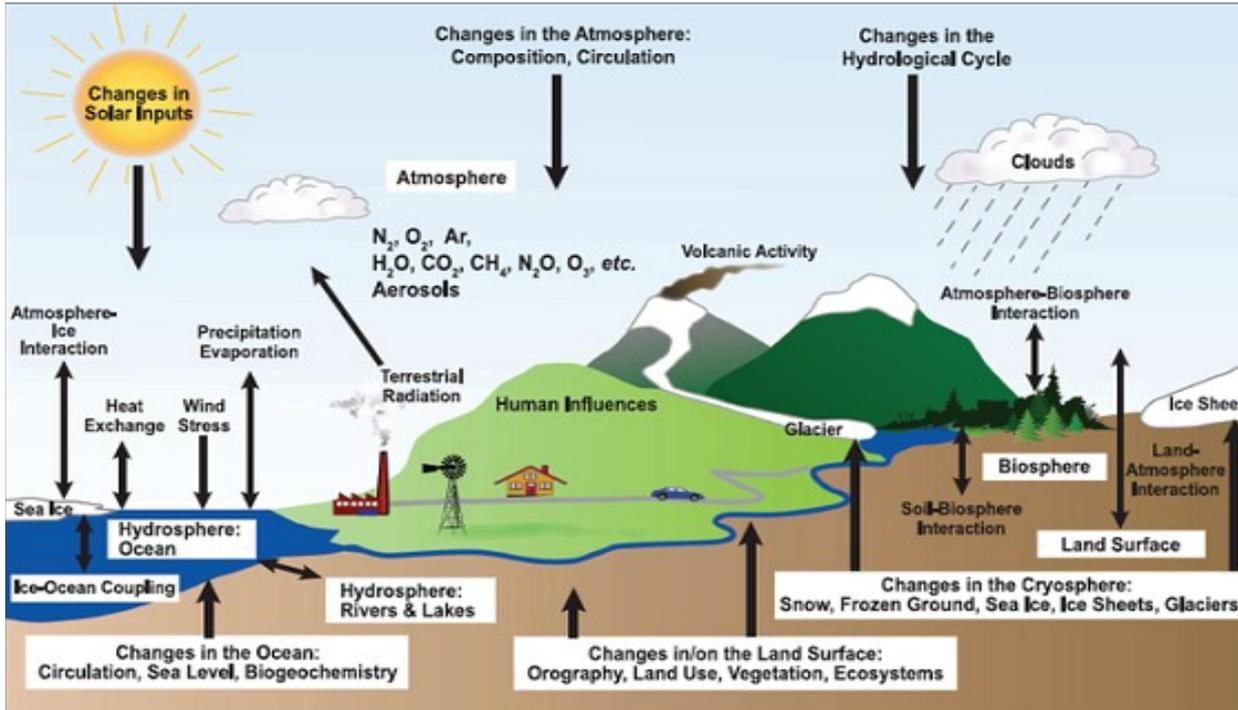
# Clima: resultado de la interacción de todo el Sistema Climático/Tierra



Existe un flujo continuo de momento, energía y masa entre los componentes del Sistema Climático.

El sistema es una máquina que convierte y distribuye la energía que proviene del Sol ( $240 \text{ W/m}^2$ )

# Clima: resultado de la interacción de todo el Sistema Climático/Tierra



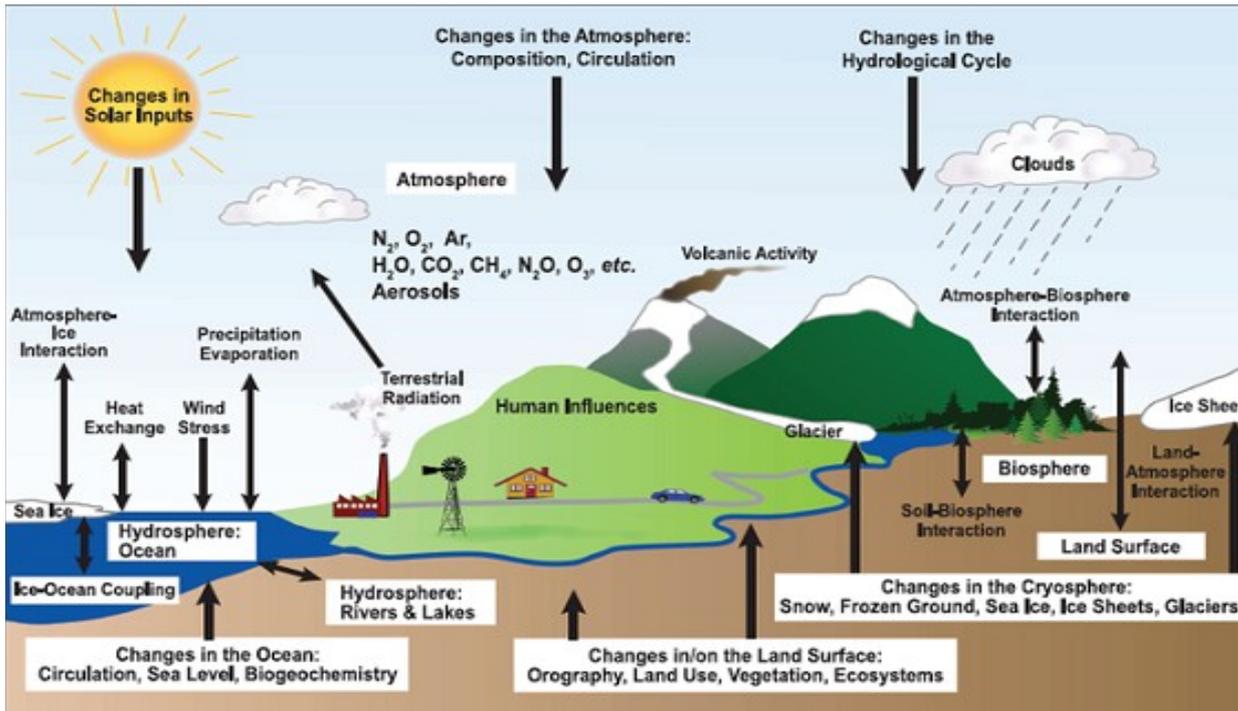
## Componentes:

- 1) Atmósfera
- 2) Hidrósfera
- 3) Criósfera
- 4) Litósfera
- 5) Biósfera



**La naturaleza de los componentes es muy diferente, pero interactúan a través de flujos de materia, momento y energía.**

# Clima: resultado de la interacción de todo el Sistema Climático/Tierra



## Componentes:

- 1) Atmósfera
- 2) Hidrósfera
- 3) Criósfera
- 4) Litósfera
- 5) Biósfera

La naturaleza de los componentes es muy diferente, pero interactúan a través de flujos de materia, momento y energía.

Se asume como un sistema cerrado, pues en general presenta un flujo de energía con el espacio pero no de materia.

# Componentes del Sistema Climático

## ATMÓSFERA

- Fina envoltura gaseosa que rodea la Tierra. Espesor  $\ll$  Radio de la Tierra
- Efecto invernadero mantiene la superficie de la Tierra en condiciones habitables
- Transporte de energía
- Absorbe RUV
- Componente del sistema climático con menor tiempo de respuesta

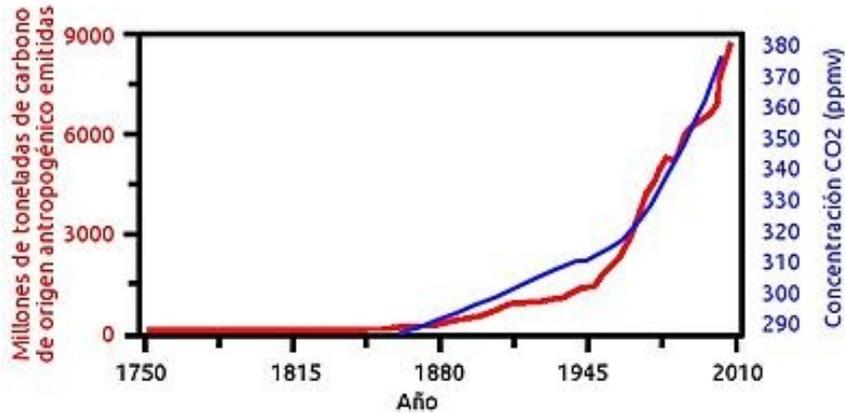
PERMANENT GASES			VARIABLE GASES			
Gas	Symbol	Percent (by Volume) Dry Air	Gas (and Particles)	Symbol	Percent (by Volume)	Parts per Million (ppm)*
Nitrogen	N <sub>2</sub>	78.08	Water vapor	H <sub>2</sub> O	0 to 4	
Oxygen	O <sub>2</sub>	20.95	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	0.038	385*
Argon	Ar	0.93	Methane	CH <sub>4</sub>	0.00017	1.7
Neon	Ne	0.0018	Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	0.00003	0.3
Helium	He	0.0005	Ozone	O <sub>3</sub>	0.000004	0.04†
Hydrogen	H <sub>2</sub>	0.00006	Particles (dust, soot, etc.)		0.000001	0.01–0.15
Xenon	Xe	0.000009	Chlorofluorocarbons (CFCs)		0.00000002	0.0002

\*For CO<sub>2</sub>, 385 parts per million means that out of every million air molecules, 385 are CO<sub>2</sub> molecules.  
†Stratospheric values at altitudes between 11 km and 50 km are about 5 to 12 ppm.

# Componentes del Sistema Climático

## ATMÓSFERA

- Fina envoltura gaseosa que rodea la Tierra. Espesor  $\ll$  Radio de la Tierra
- Efecto invernadero mantiene la superficie de la Tierra en condiciones habitables
- Transporte de energía
- Absorbe RUV
- Componente del sistema climático con menor tiempo de respuesta



VARIABLE GASES			
Gas (and Particles)	Symbol	Percent (by Volume)	Parts per Million (ppm)*
Water vapor	H <sub>2</sub> O	0 to 4	
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	0.038	385*
Methane	CH <sub>4</sub>	0.00017	1.7
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	0.00003	0.3
Ozone	O <sub>3</sub>	0.000004	0.04†
Particles (dust, soot, etc.)		0.000001	0.01–0.15
Chlorofluorocarbons (CFCs)		0.00000002	0.0002

on air molecules, 385 are CO<sub>2</sub> molecules.  
re about 5 to 12 ppm.

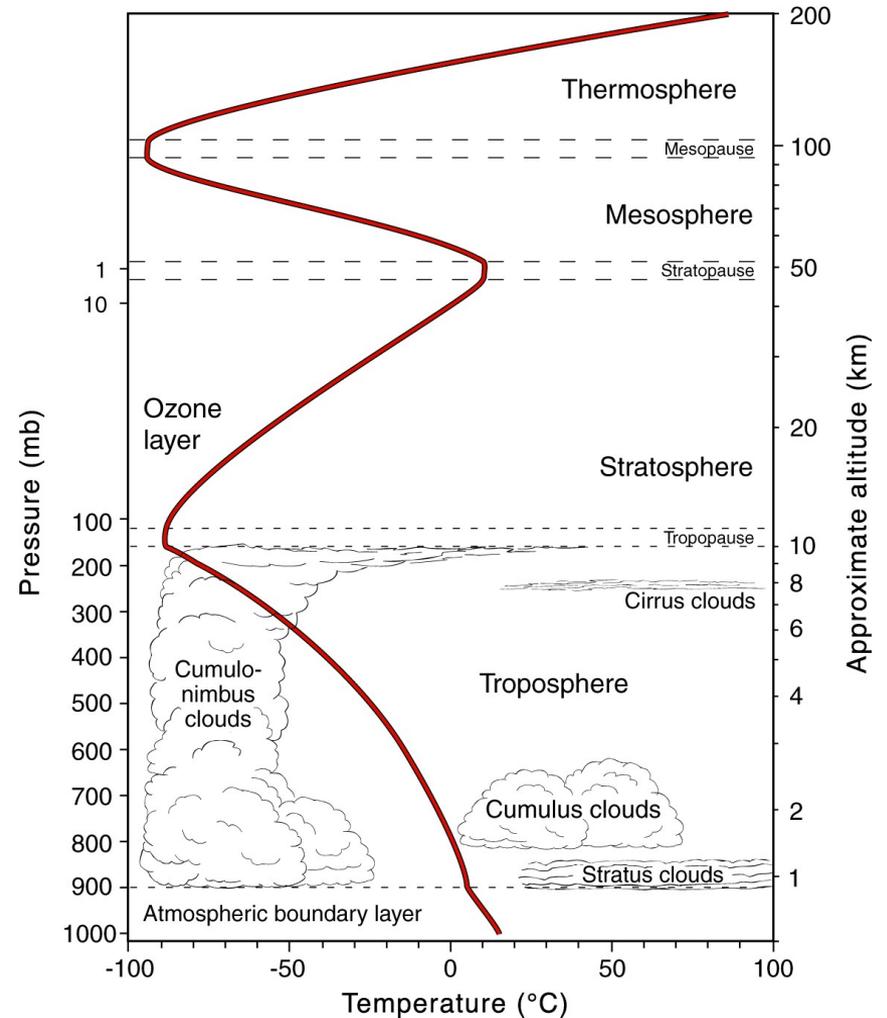
# Componentes del Sistema Climático

## ATMÓSFERA

### Estructura vertical

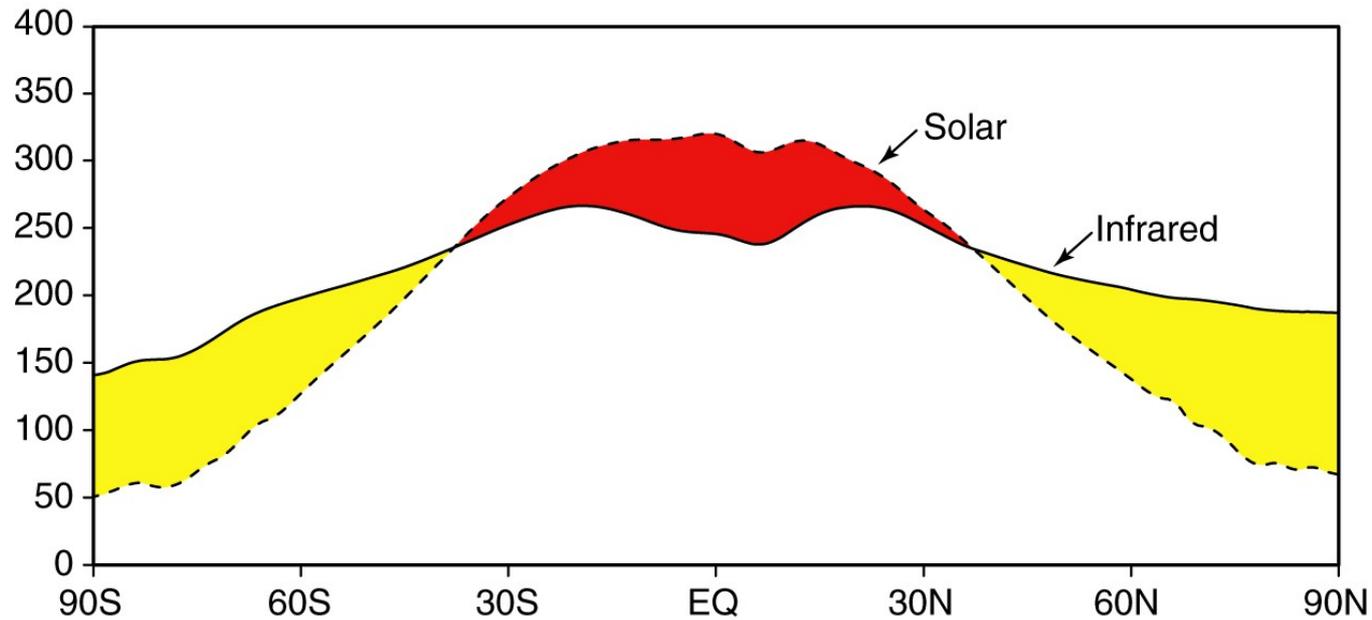
- Tropósfera: fenómenos meteorológicos
- Estratósfera: absorbe UV por  $O_3$  (aumento de T Con altura)

El 99% de su masa se encuentra en los primeros 30 km de altura



# Componentes del Sistema Climático

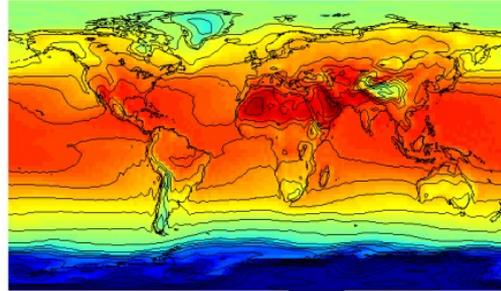
## ATMÓSFERA



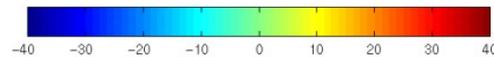
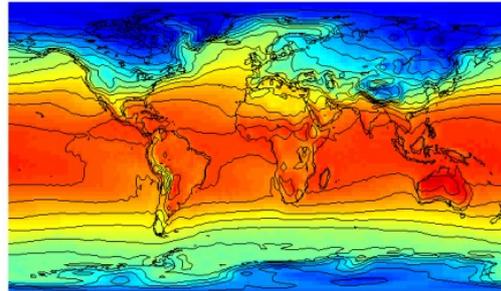
# Componentes del Sistema Climático

## ATMÓSFERA Temperatura

July mean surface temperature (°C)

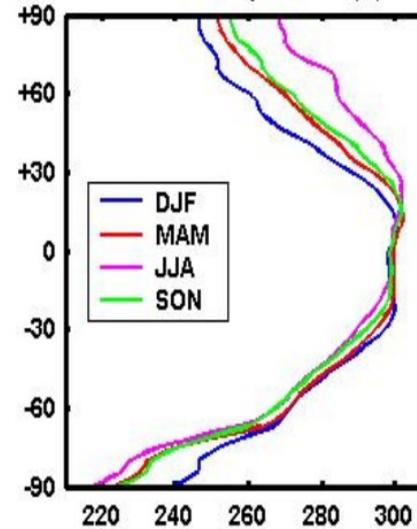


January mean surface temperature (°C)



## Temperatura

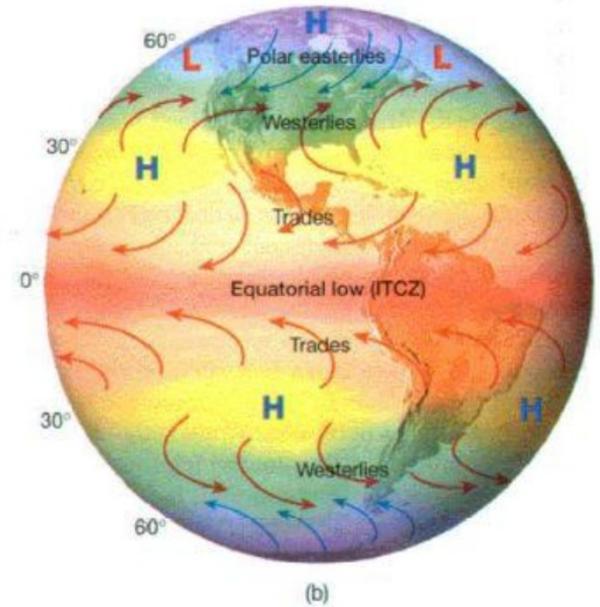
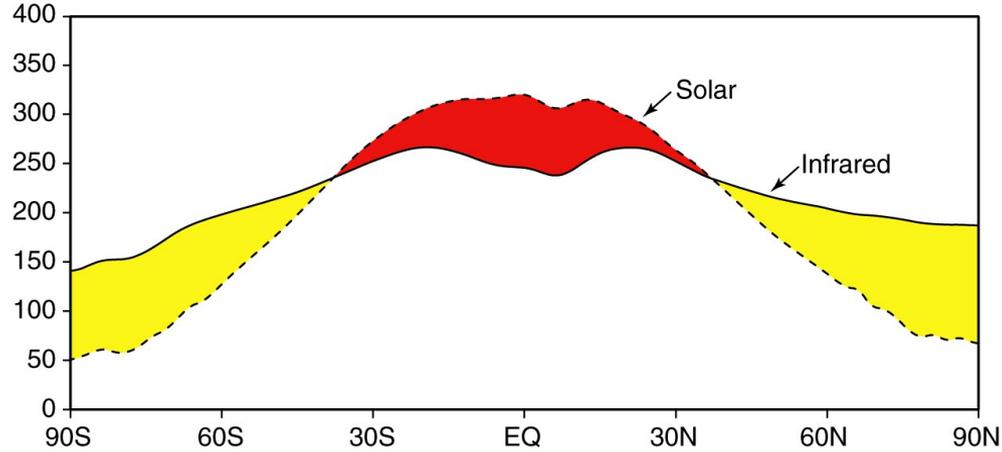
Seasonal Zonal Means:  
Surface Temperature (K)



# Componentes del Sistema Climático

## ATMÓSFERA

- Transporte de energía

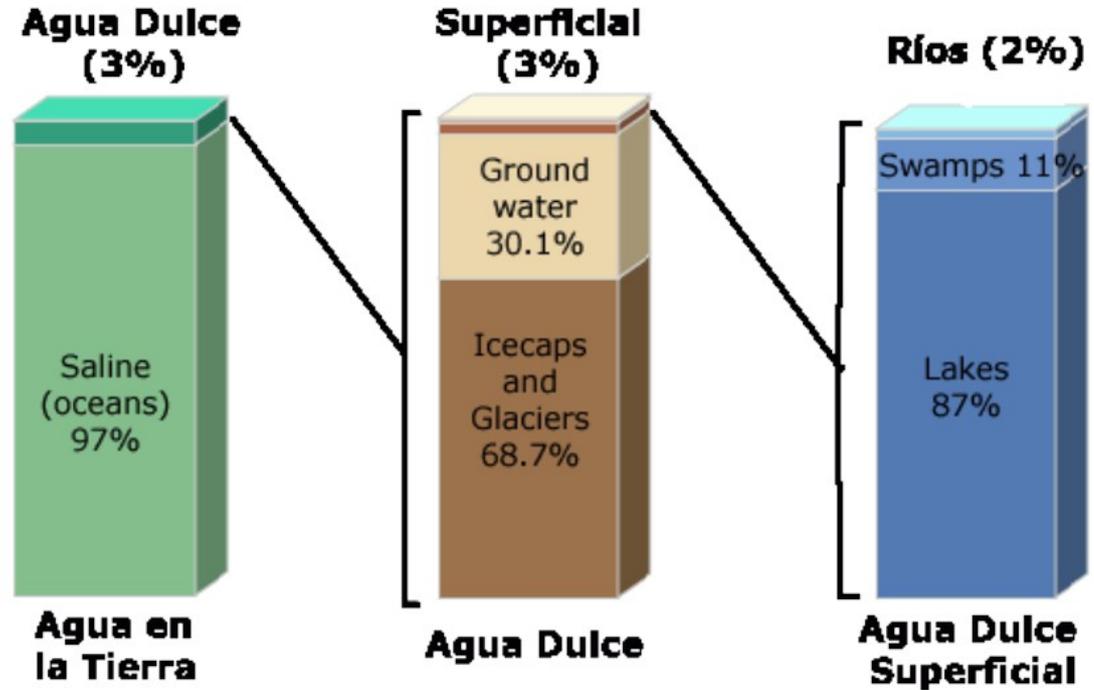


# Componentes del Sistema Climático

## HIDRÓSFERA

Agua líquida que se encuentra en la Tierra.

Océanos, lagos, ríos, mares y aguas subterráneas.



# Componentes del Sistema Climático

## HIDRÓSFERA

Water source	Percent of fresh water	Percent of total water
Oceans, Seas, & Bays	--	96.5
Ice caps, Glaciers, & Permanent Snow	68.7	1.74
Groundwater	--	1.7
Fresh	30.1	0.76
Saline	--	0.94
Soil Moisture	0.05	0.001
Ground Ice & Permafrost	0.86	0.022
Lakes	--	0.013
Fresh	0.26	0.007
Saline	--	0.006
Atmosphere	0.04	0.001
Swamp Water	0.03	0.0008
Rivers	0.006	0.0002
Biological Water	0.003	0.0001
Total	-	100

# Componentes del Sistema Climático

## HIDRÓSFERA

### ▪ Océanos

- 2/3 del planeta cubierto por océanos
- Alto calor específico (cantidad de calor que absorbe 1 kg de agua para incrementar 1°C su T).
- Son un sumidero de CO<sub>2</sub>

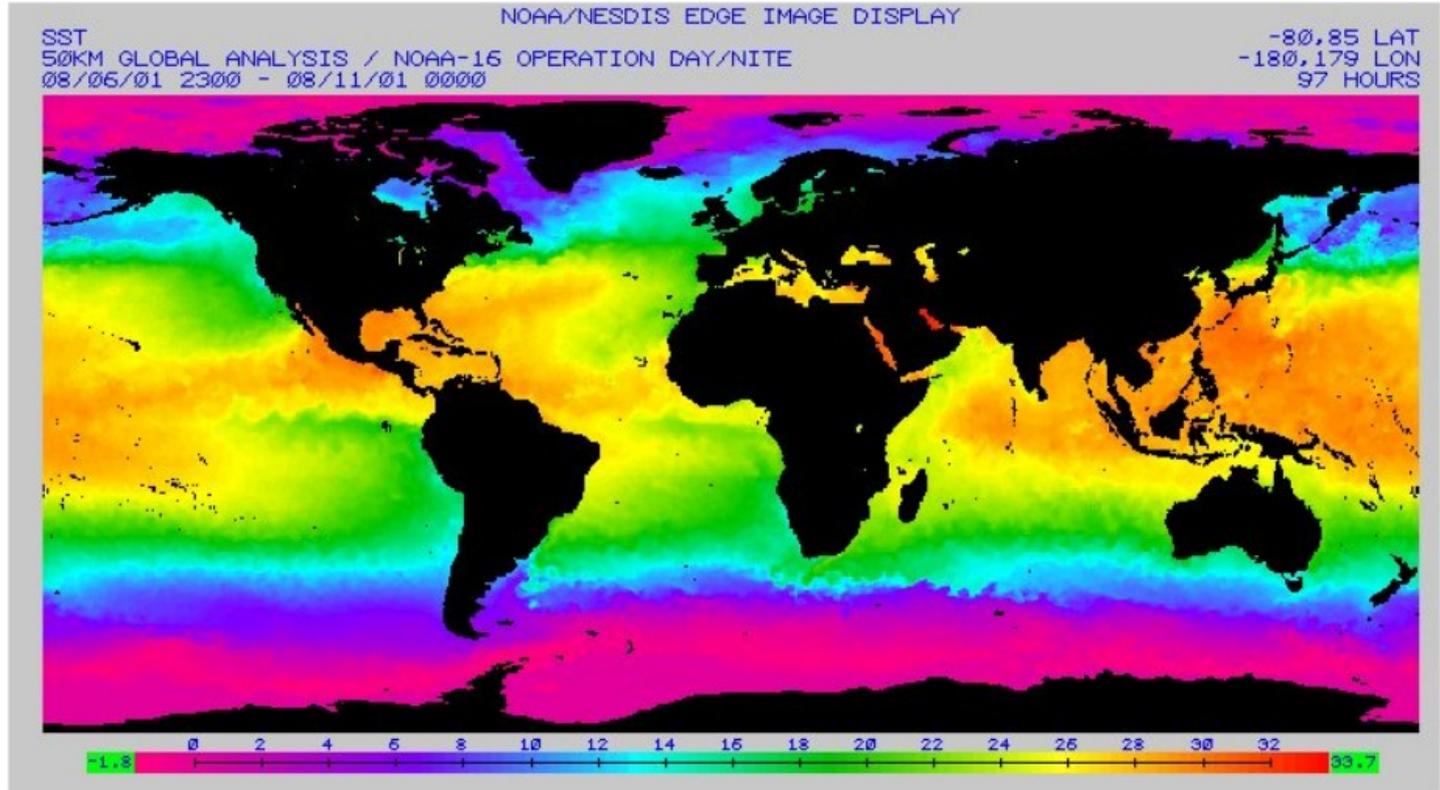


*reservorio de energía, actúan como reguladores de la T del planeta*

# Componentes del Sistema Climático

## HIDRÓSFERA

- Océanos
  - Temperatura



# Componentes del Sistema Climático

## HIDRÓSFERA

## Océanos

## Circulación

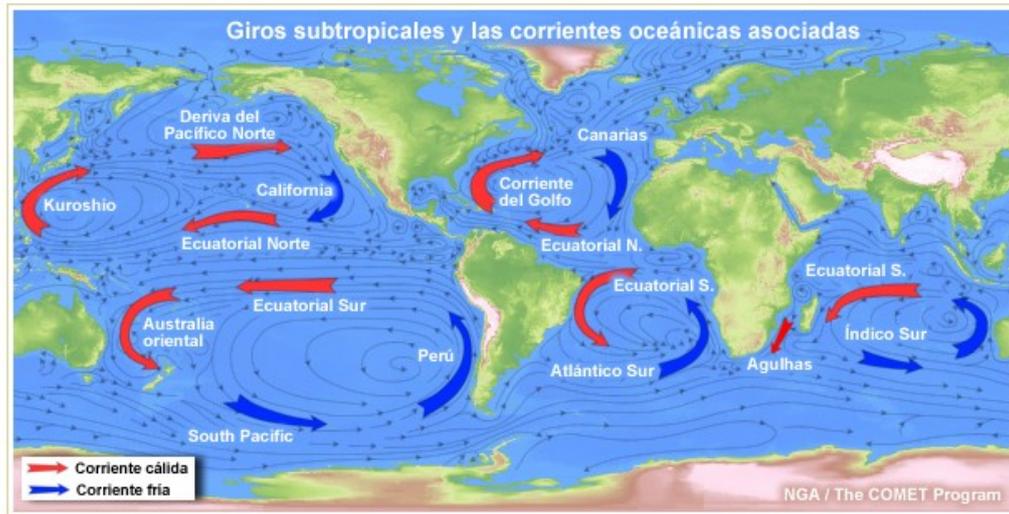
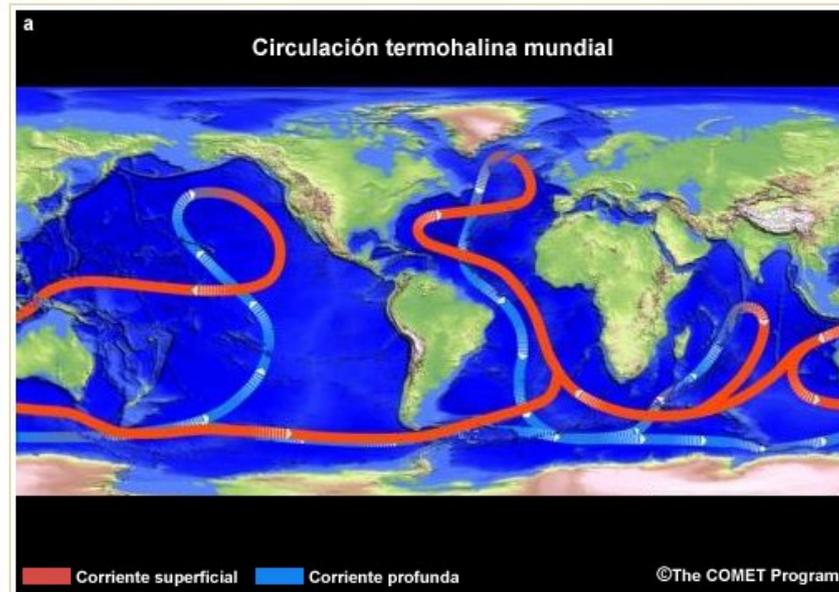


Fig. 3.20. Circulaciones oceánicas globales superficiales y giros subtropicales; las corrientes oceánicas cálidas se indican en rojo y las frías, en azul.



# Componentes del Sistema Climático

## **ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA**

La atmósfera y los océanos están **acoplados**. Interactúan en distintas escalas a través de intercambios en la interfaz atmósfera-océano de

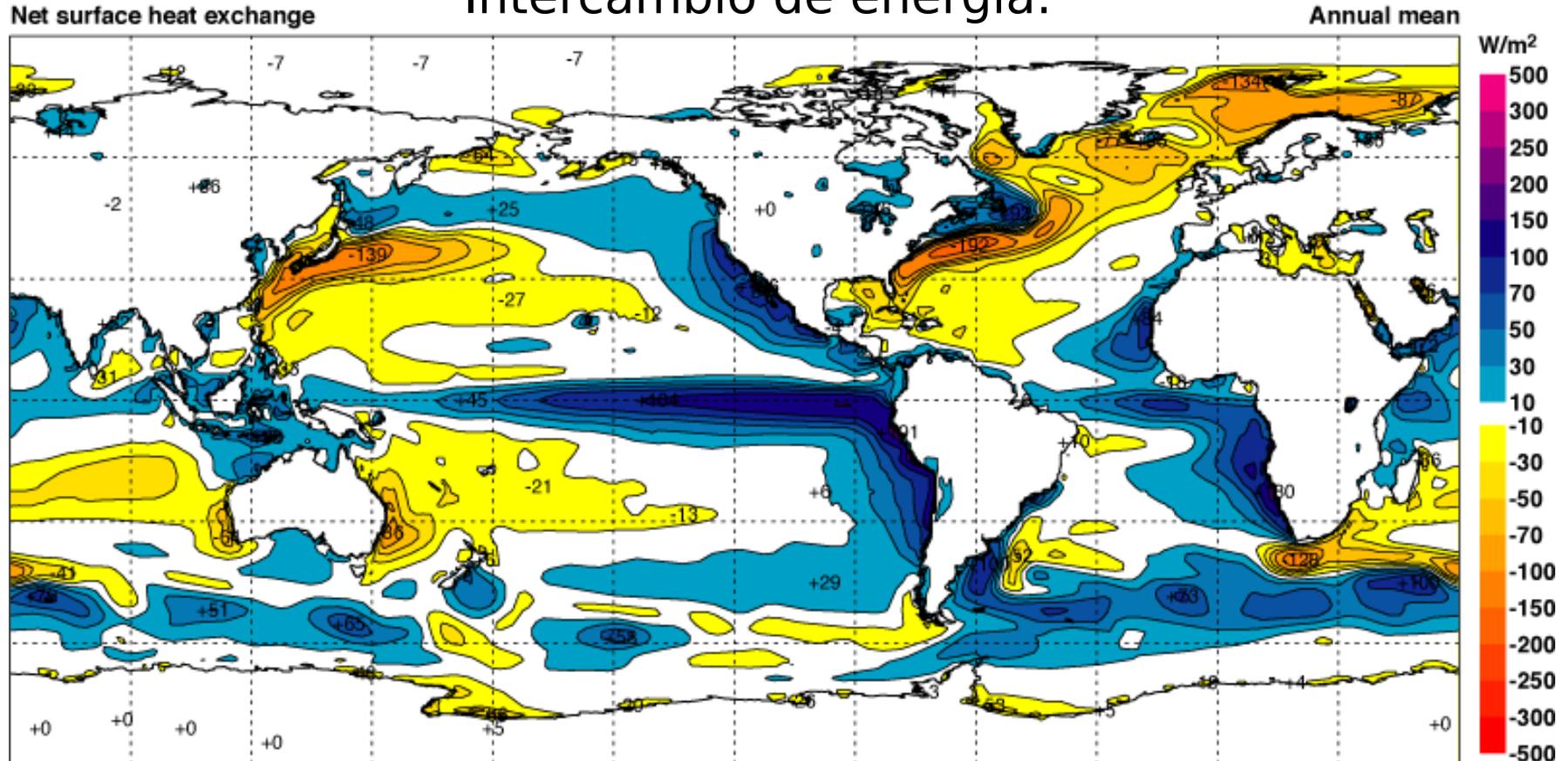
Energía

Materia

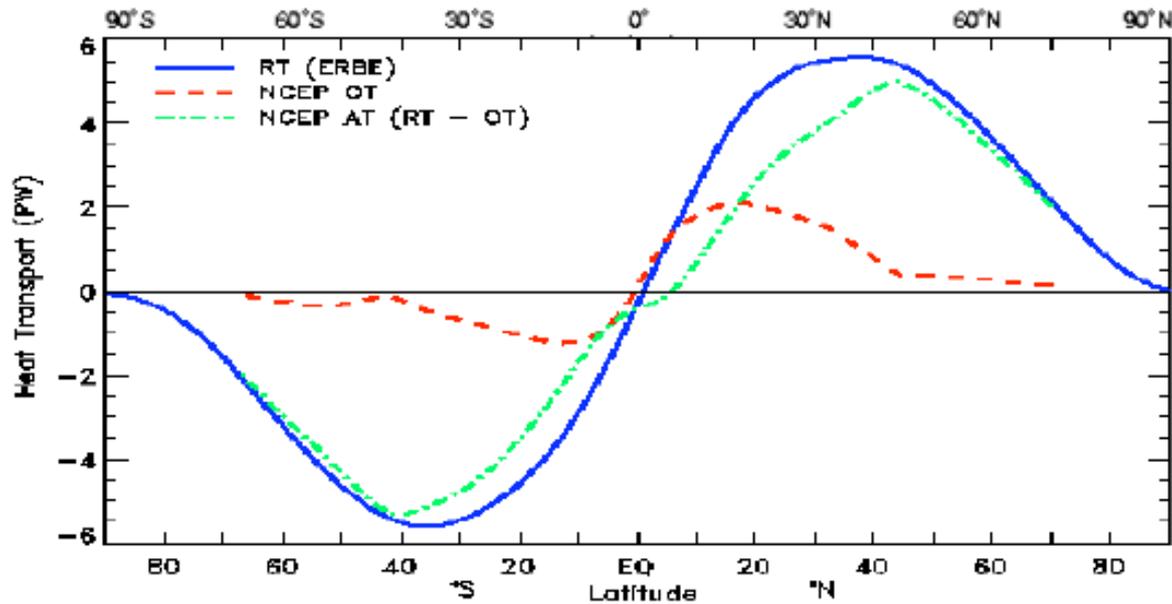
Momento

# ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

Intercambio de energía:



Algunas regiones del océano absorben energía neta (trópicos) y otras la pierden



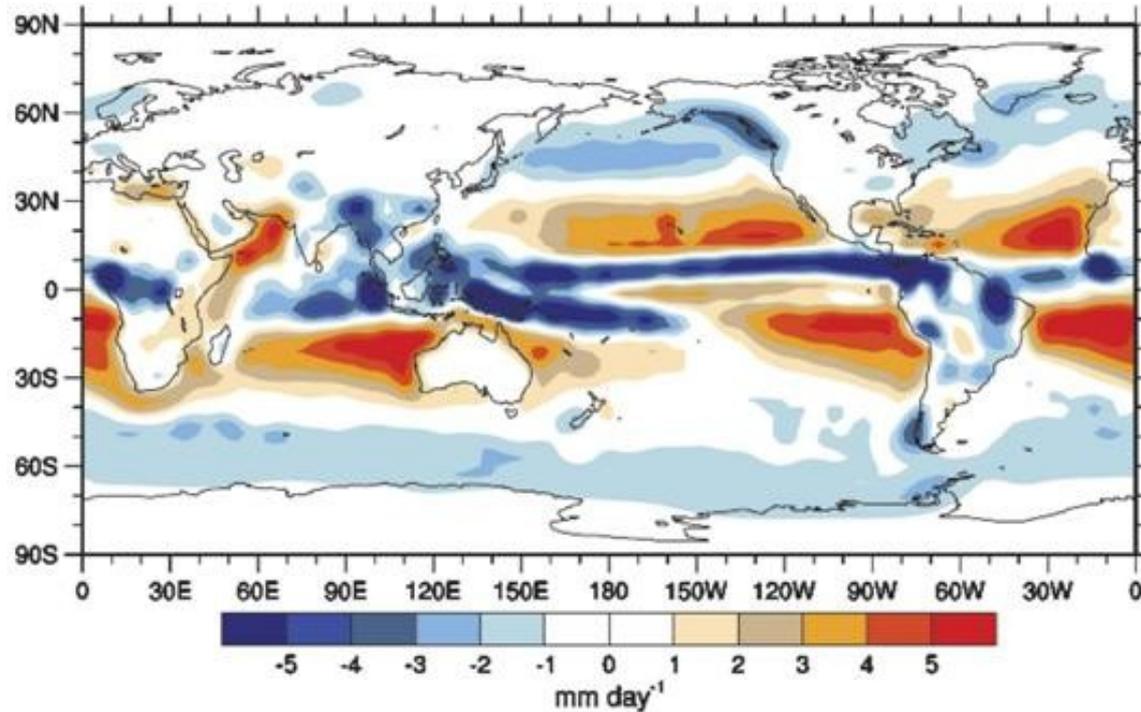
Transporte de energía hacia los polos realizado por el océano consistente con la absorción y liberación de calor en superficie.

# Componentes del Sistema Climático

## ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

Intercambio de materia:

Evaporación - Precipitación

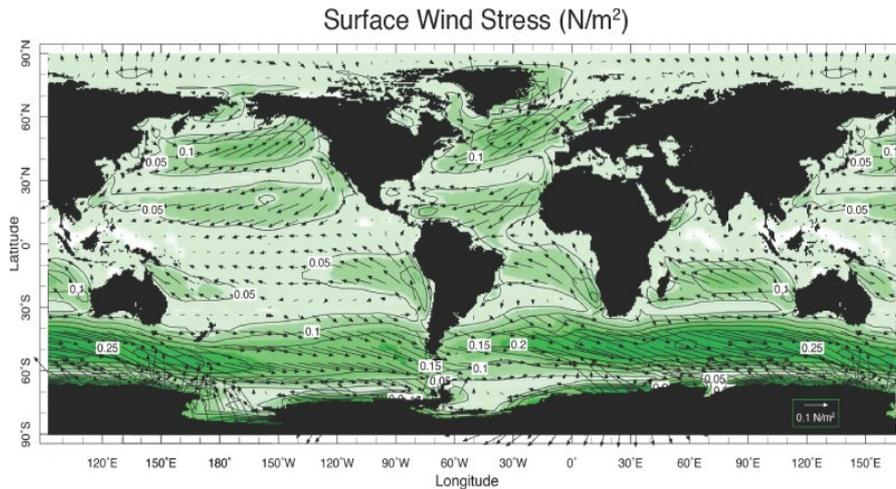


# Componentes del Sistema Climático

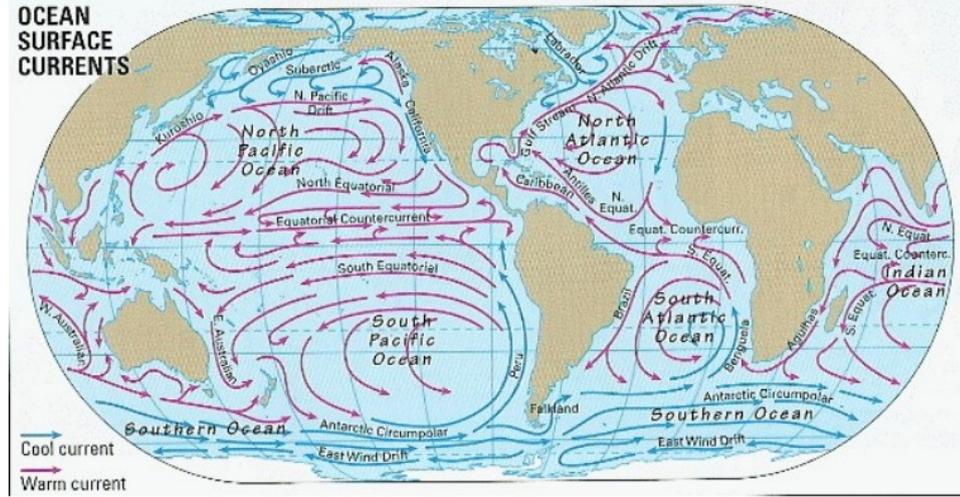
## ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

Intercambio de momento:

Los vientos ejercen un esfuerzo (tensión) sobre la superficie del océano. Este es uno de los factores que genera la aparición de corrientes en el océano.



Copyright © 2008, Elsevier Inc. All rights reserved.

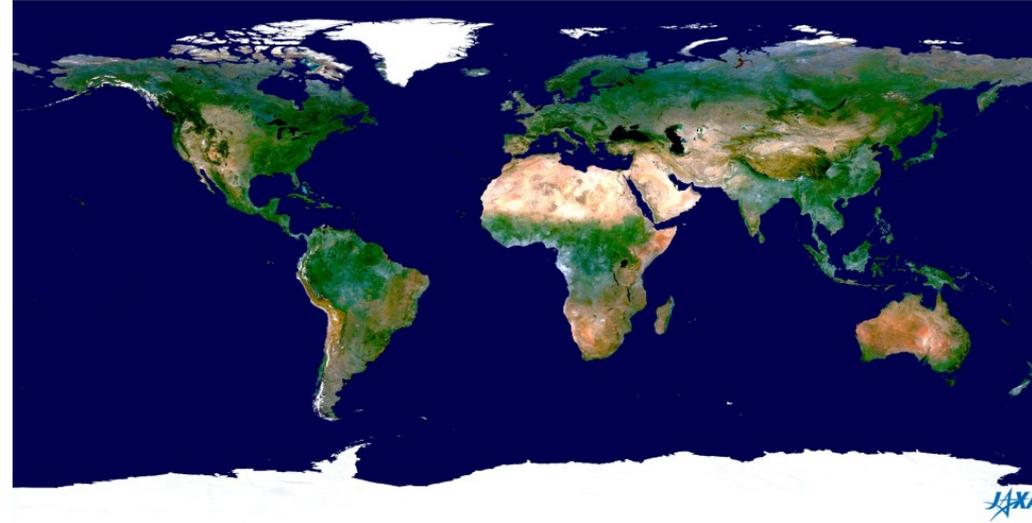


# Componentes del Sistema Climático

## LITÓSFERA

Influye en:

- Albedo
- Evaporación
- Conductividad térmica.



Interactúa con la atmósfera mediante transferencia de masa, momento angular, calor sensible y disipación de energía cinética.

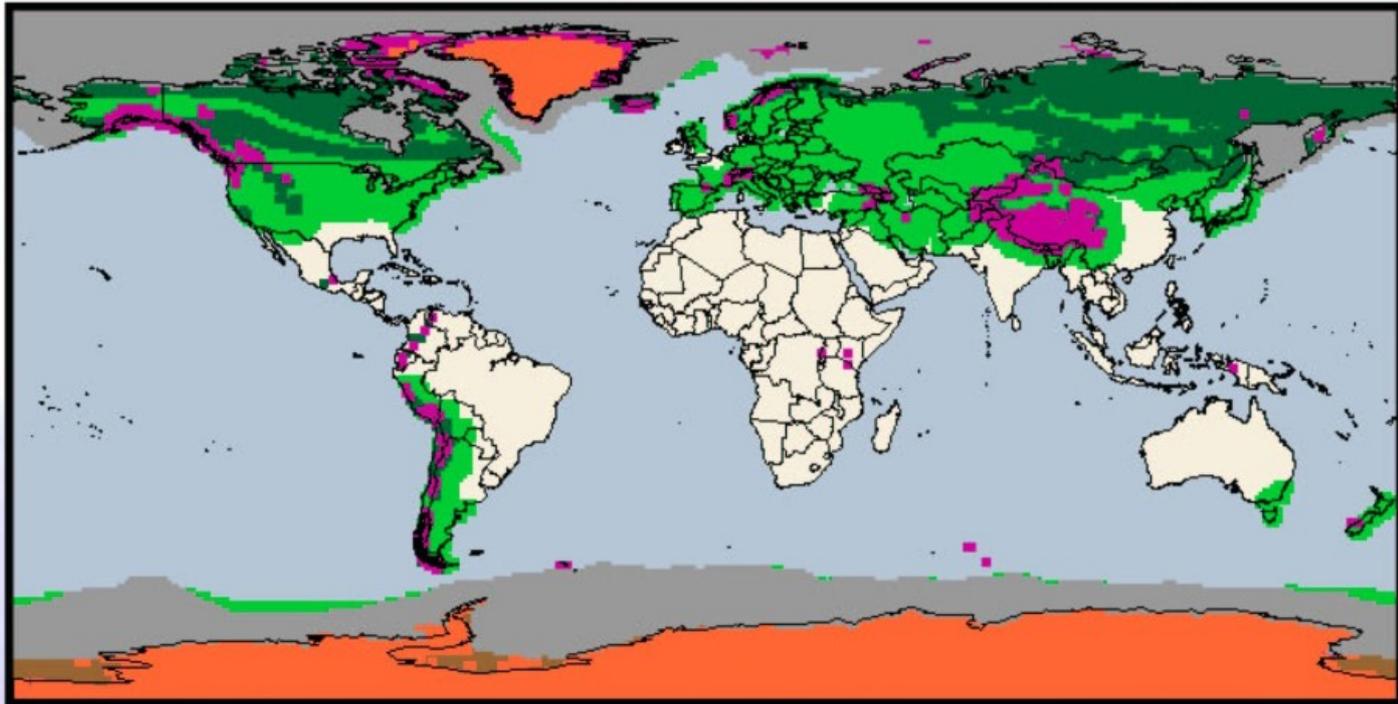
# Componentes del Sistema Climático

## **CRIÓSFERA**

- Masas de hielo y nieve de la Tierra.
- Representa el reservorio de agua dulce más grande del planeta
- Elevado albedo y su baja conductividad.



Rol en los cambios climáticos a escalas de decenas de miles de años (glaciaciones - periodos interglaciales durante el Pleistoceno)



Glacier 

Ice Sheets 

Ice Shelves 

Sea Ice 

Permafrost 

Snow Cover 

# Componentes del Sistema Climático

## CRIÓSFERA

Estimated Global Inventory of Land and Sea Ice<sup>a</sup>

		Area (km <sup>2</sup> )	Volume (km <sup>3</sup> )	Percent of total ice mass	
Land ice	Antarctic ice sheet	$13.9 \times 10^6$	$30.1 \times 10^6$	89.3	
	Greenland ice sheet	$1.7 \times 10^6$	$2.6 \times 10^6$	8.6	
	Mountain glaciers	$0.5 \times 10^6$	$0.3 \times 10^6$	0.76	
	Permafrost	Continuous	$8 \times 10^6$	(Ice content) $0.2-0.5 \times 10^6$	0.95
		Discontinuous	$17 \times 10^6$		
Sea ice	Seasonal snow (average maximum)	Eurasia	$30 \times 10^6$	$2-3 \times 10^3$	
		America	$17 \times 10^6$		
	Southern Ocean	Max	$18 \times 10^6$	$2 \times 10^4$	
		Min	$3 \times 10^6$	$6 \times 10^3$	
		Max	$15 \times 10^6$	$4 \times 10^4$	
		Min	$8 \times 10^6$	$2 \times 10^4$	

<sup>a</sup>Not included in this table is the volume of water in the ground that annually freezes and thaws at the surface of permafrost ("active layer"), and in regions without permafrost but with subfreezing winter temperatures. [After Untersteiner (1984). Printed with permission from Cambridge University Press.]

# Componentes del Sistema Climático

**BIÓSFERA** Impacta en el balance energético global:

## **Vegetación**

altera la rugosidad del suelo,  
albedo superficial

Evaporación

Escorrentía.

Sumidero CO<sub>2</sub> y fuente de O<sub>2</sub>

## **Fauna**

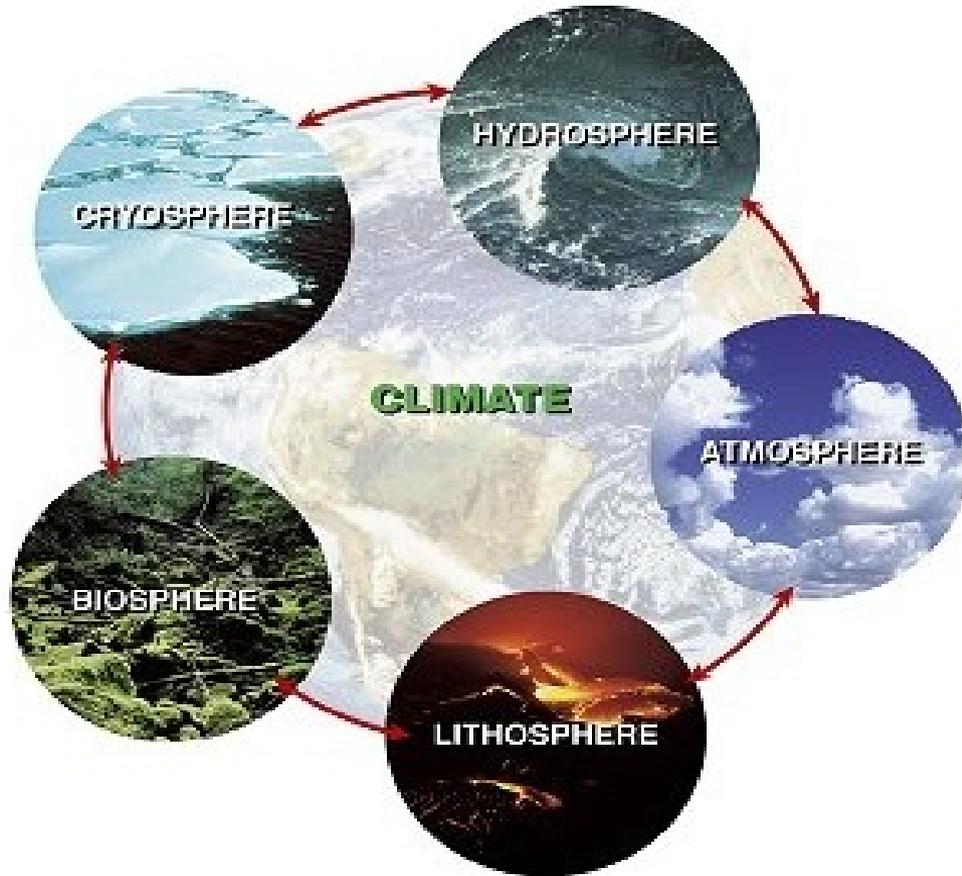
Fuente de gases E<sub>i</sub>

Sumidero de O<sub>2</sub>

Cambios en el uso de suelos → cambios en el albedo



# Interacción del Sistema Climático/Tierra



Existe un flujo continuo de momento, energía y masa entre los componentes

El sistema es una máquina que convierte y distribuye la energía que proviene del sol ( $240 \text{ W/m}^2$ )

La interacción entre los subsistemas da lugar a procesos de retroalimentación internos al sistema.

Pueden intensificar la respuesta a forzantes externos.

# Interacción del Sistema Climático/Tierra

## The Climate System

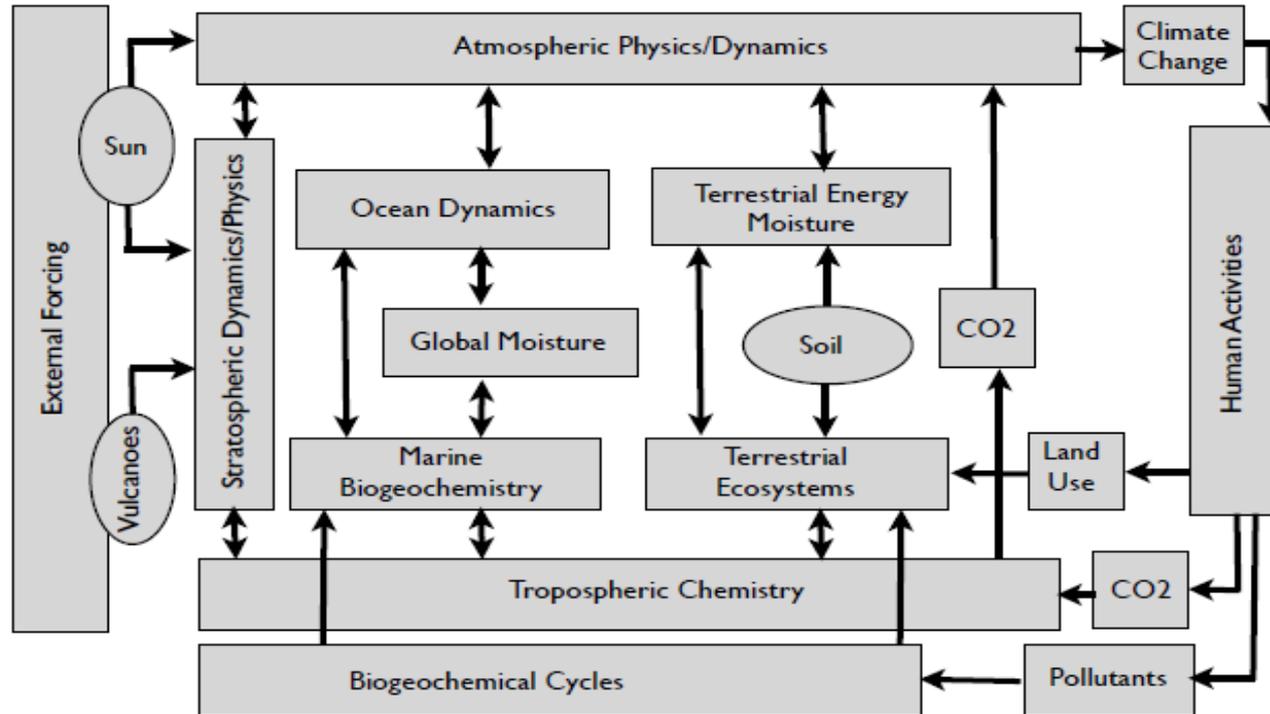
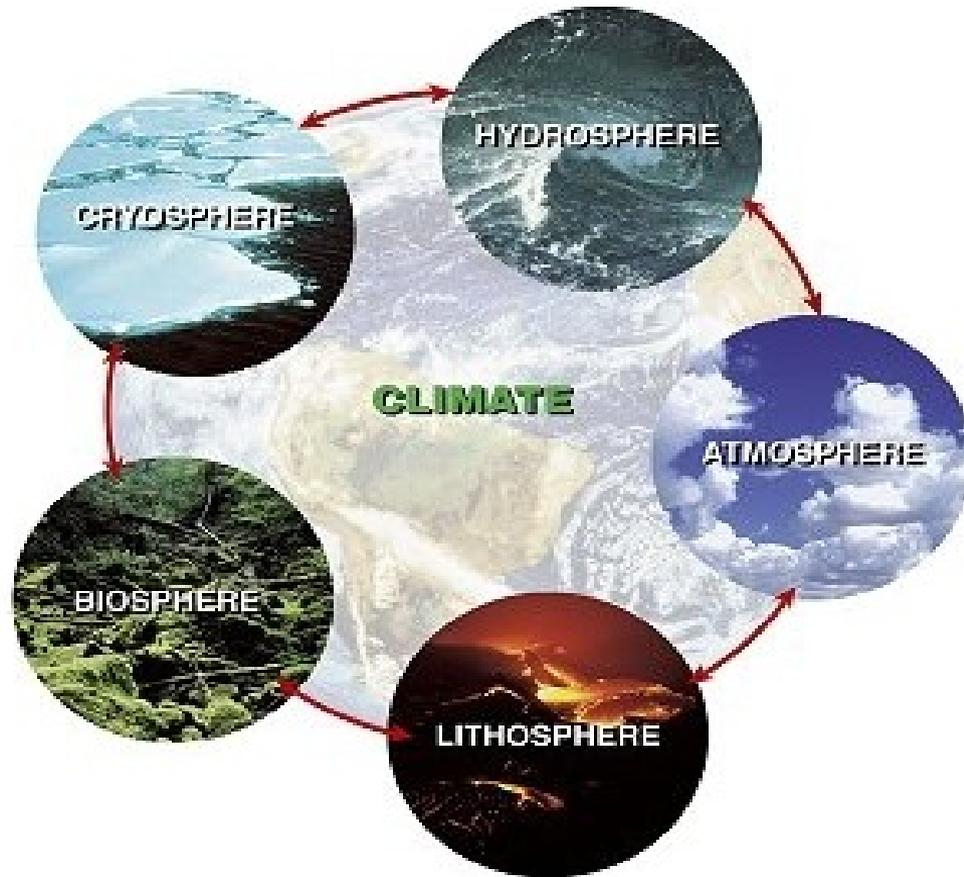


Figure 1.1 A schematic of the organization of the climate system, showing the different component and their connections (simplified from Bretherton (1988)).

# Interacción del Sistema Climático/Tierra



Existe un flujo continuo de momento, energía y masa entre los componentes del Sistema Climático.

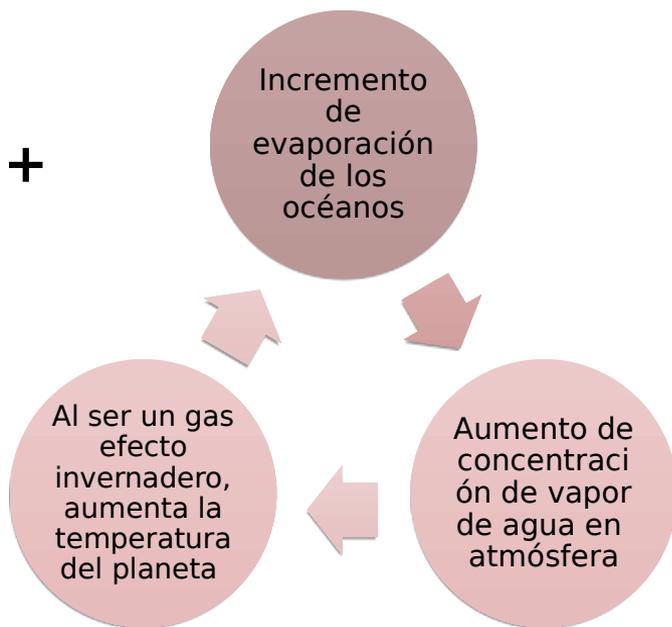
El sistema es una máquina que convierte y distribuye la energía que proviene del sol ( $240 \text{ W/m}^2$ )

La interacción entre los subsistemas da lugar a procesos de retroalimentación internos al sistema. Pueden intensificar la respuesta a forzantes externos.

# Interacción del Sistema Climático/Tierra

La interacción entre los subsistemas da lugar a procesos de Retroalimentación.

## Retroalimentación



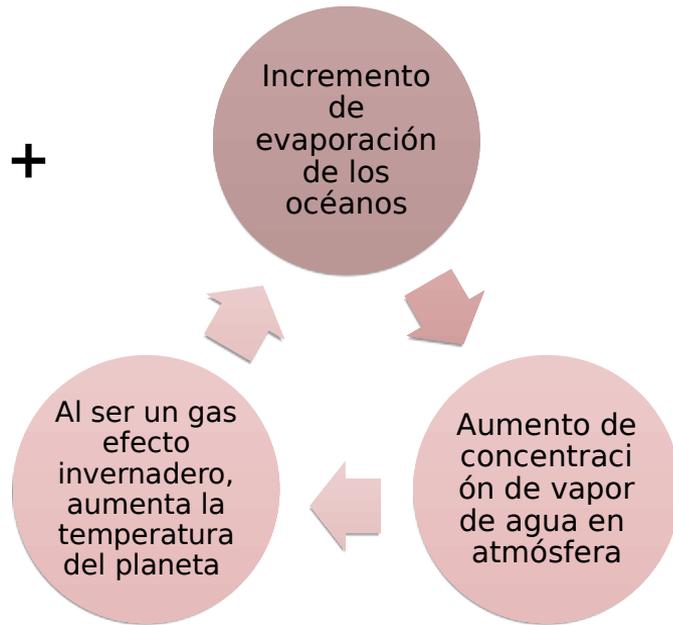
+: El resultado de la interacción es una amplificación de la perturbación.



# Interacción de todo el Sistema Climático/Tierra

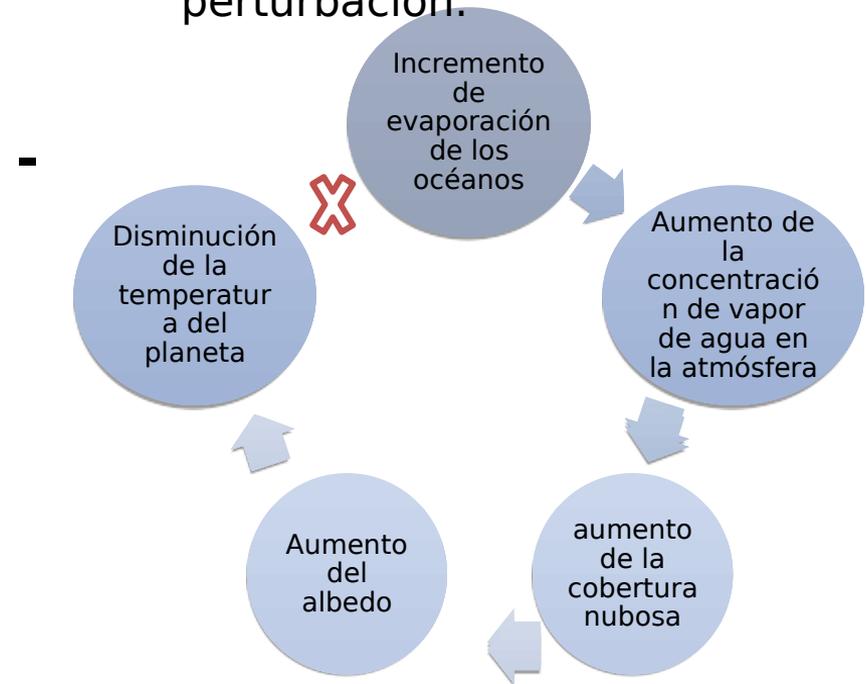
La interacción entre los subsistemas da lugar a procesos de Retroalimentación.

## Retroalimentación



+ : El resultado de la interacción es una amplificación de la perturbación.

- : El resultado de la interacción es una disminución de los efectos de la perturbación.



# Interacción del Sistema Climático/Tierra

## Ejemplo: Nubosidad



La importancia relativa de uno de los efectos sobre el otro va a depender de la altura de la nube y del espesor de la misma.

# Interacción del Sistema Climático/Tierra

## Ejemplo: Nubosidad



La importancia relativa de uno de los efectos sobre el otro va a depender de la altura de la nube y del espesor de la misma.

- Nubes altas: El efecto de la absorción de radiación terrestre es mayor que el del albedo → calentamiento global
- Nubes bajas: Su contribución al albedo es mayor que al efecto invernadero

# Escalas de tiempo

**Los procesos atmosféricos son el de más rápida respuesta y tienen el rol principal en las propiedades fundamentales del clima**

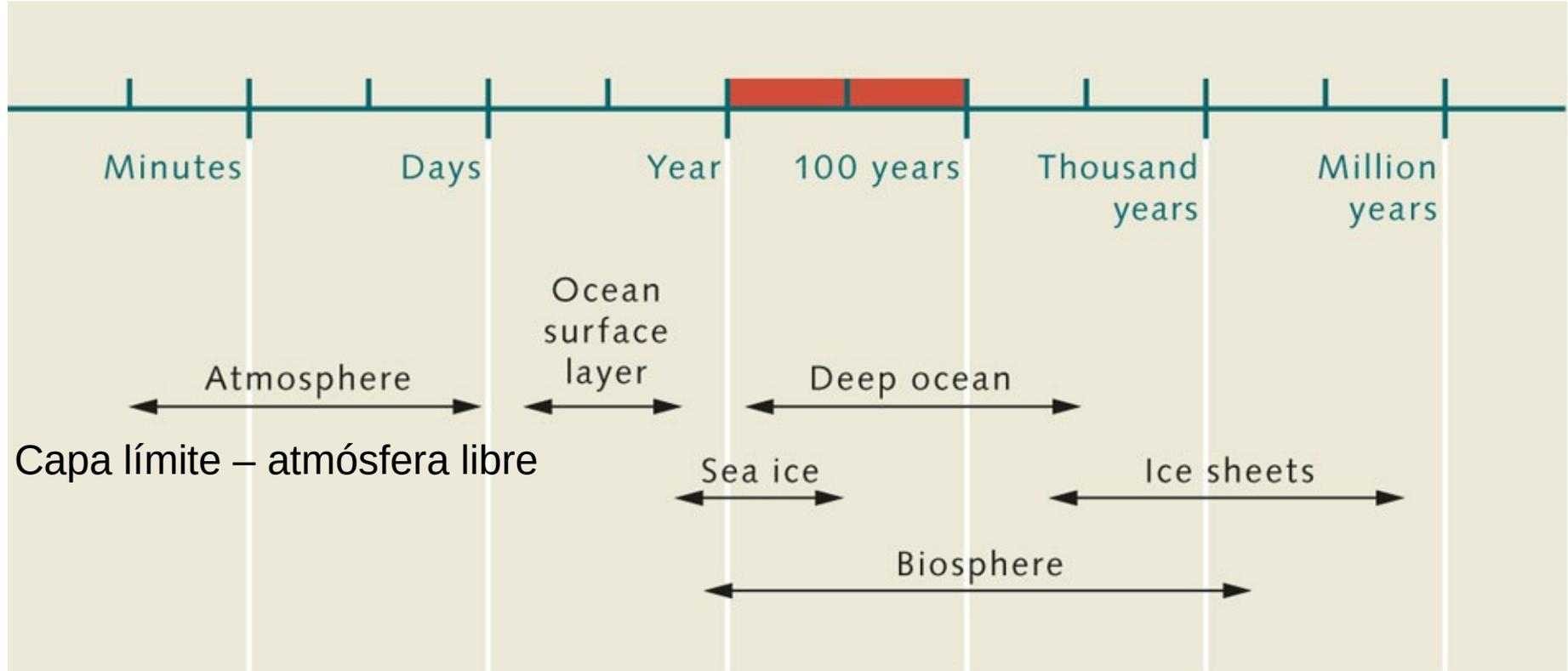
- Redistribución de energía a nivel global
- Distribución de temperaturas en la superficie
- Distribución de agua en superficie

Los otros componentes son importantes, a distintas escalas:

El almacenamiento de calor por parte del océano durante el verano, disminuye la amplitud térmica sobre continentes en latitudes medias y altas.

La vegetación afecta a la temperatura diaria máxima que alcanza la superficie.

# Escalas de tiempo



Debido a los diferentes componentes el sistema climático tiene variabilidad en todas las escalas de tiempo (segundos a millones de años)

# Escalas de tiempo

*“The study of climate can assume many forms. Meteorologists have tended to think of the climate, and the changes that it continually undergoes, as special aspects of the weather. Oceanographers are likely to include ocean currents among the significant climate features, and they may seek the roots of climate changes in oceanic behavior. Geologists may attribute prehistoric climatic variations to changes in land forms and ultimately to the drifting of the continents. Within more recent years the concept of a "climate system" has become firmly established.*

*Edward Lorenz*

# Escalas de tiempo

Según los tiempos característicos se define una jerarquía de sistemas, tomando primero los subsistemas con tiempos mas rápidos de respuesta considerando al resto como parte del sistema externo.

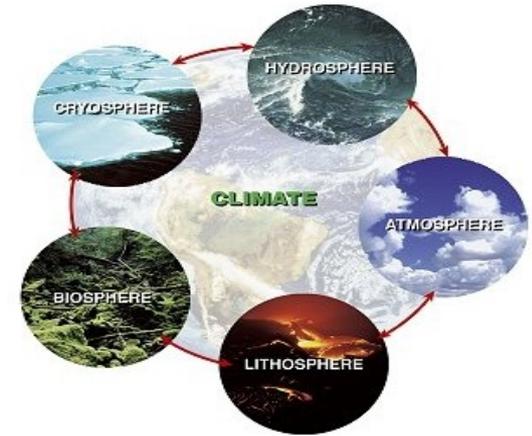
## Escala de horas a días

La atmósfera puede considerarse el único componente interno del sistema climático ( $S=A$ ), con los océanos, hielos, continente y biósfera considerados como forzantes externos o condiciones de borde. → **predicción del tiempo y climatología clásica**

## Escala de semanas a décadas

El sistema climático interno debe considerar el océano, nieve, hielos marinos y parte de la biósfera ( $S=A+O+B+C$ ).

→ **variabilidad y cambio climático**



**Tiempo** – Estado instantáneo de la atmósfera

**Clima** – El clima es el comportamiento promedio de la atmósfera en un lugar dado durante un periodo de tiempo prolongado

(es el promedio del tiempo).

Resulta de la interacción de los diferentes componentes del sistema climático.