



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
- Práctico: Nicolás Díaz
 - 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.

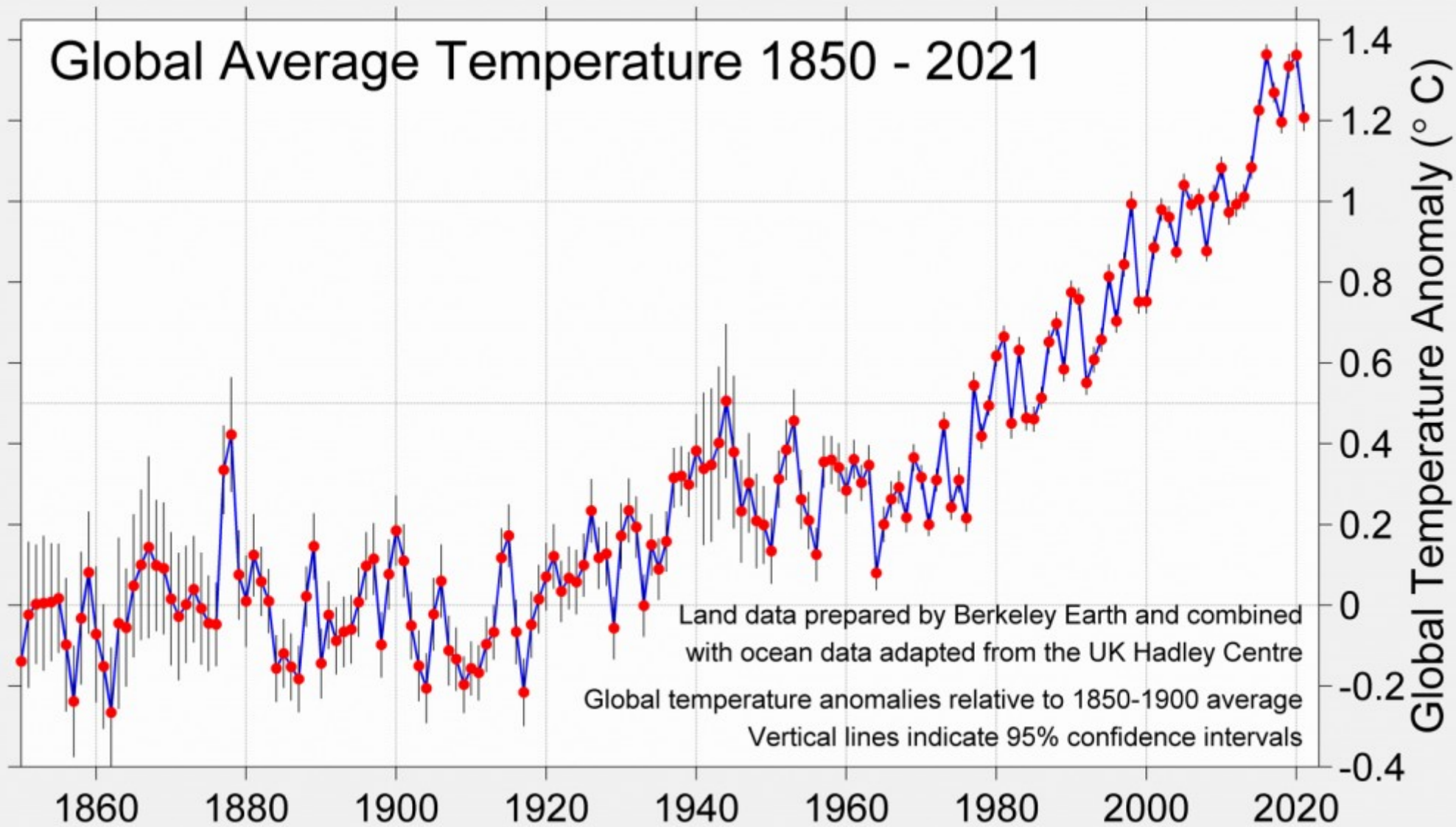
Global Physical Climatology.
Hartmann.

Atmospheric Science. Wallace and
Hobbs

IPCC Assessment Report 6

Introducción al Sistema Climático

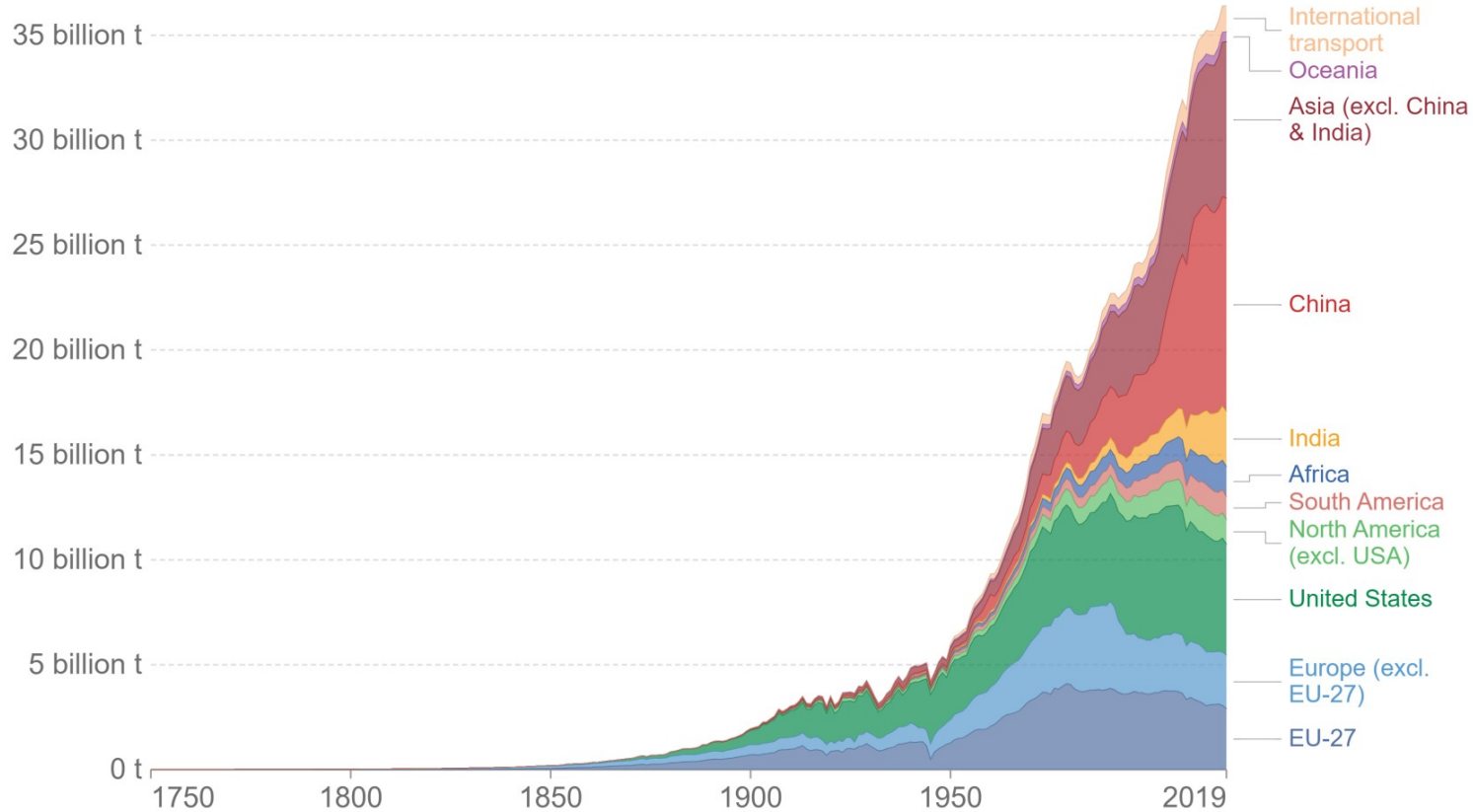
Global Average Temperature 1850 - 2021



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

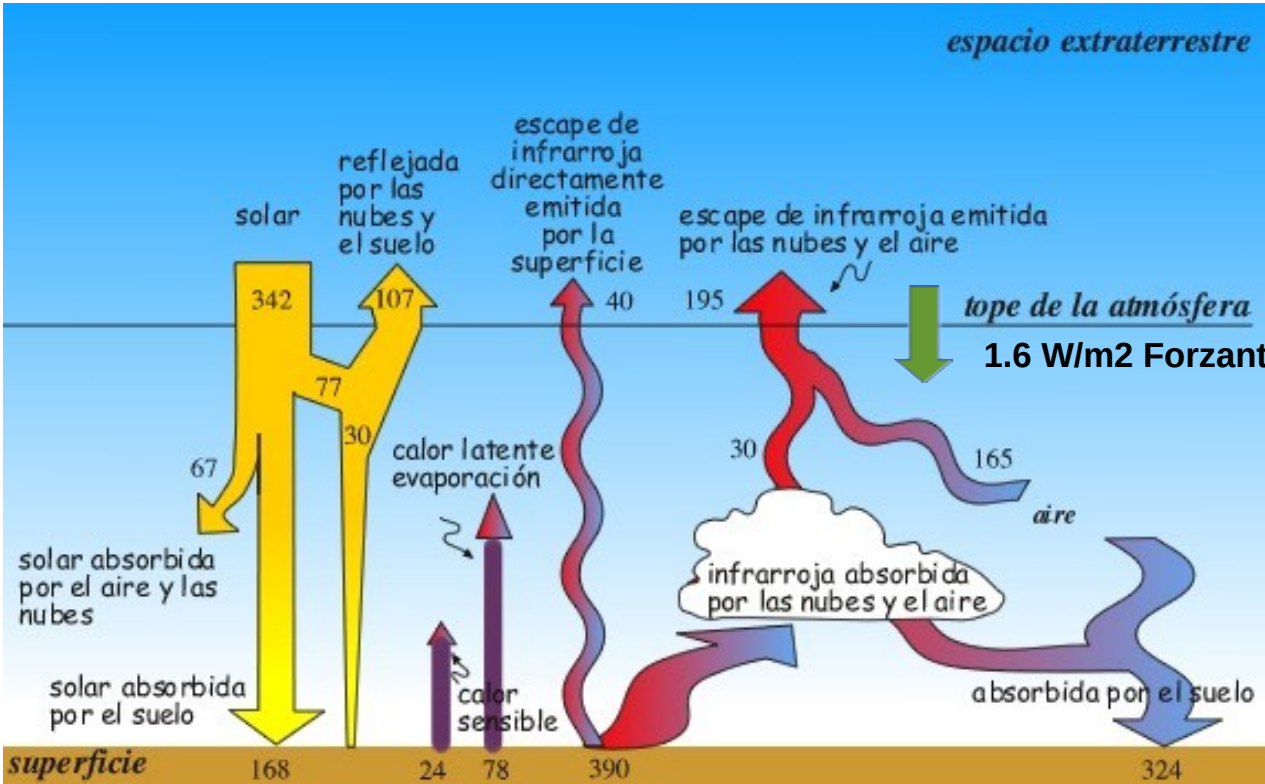
Annual total CO2 emissions, by world region

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.

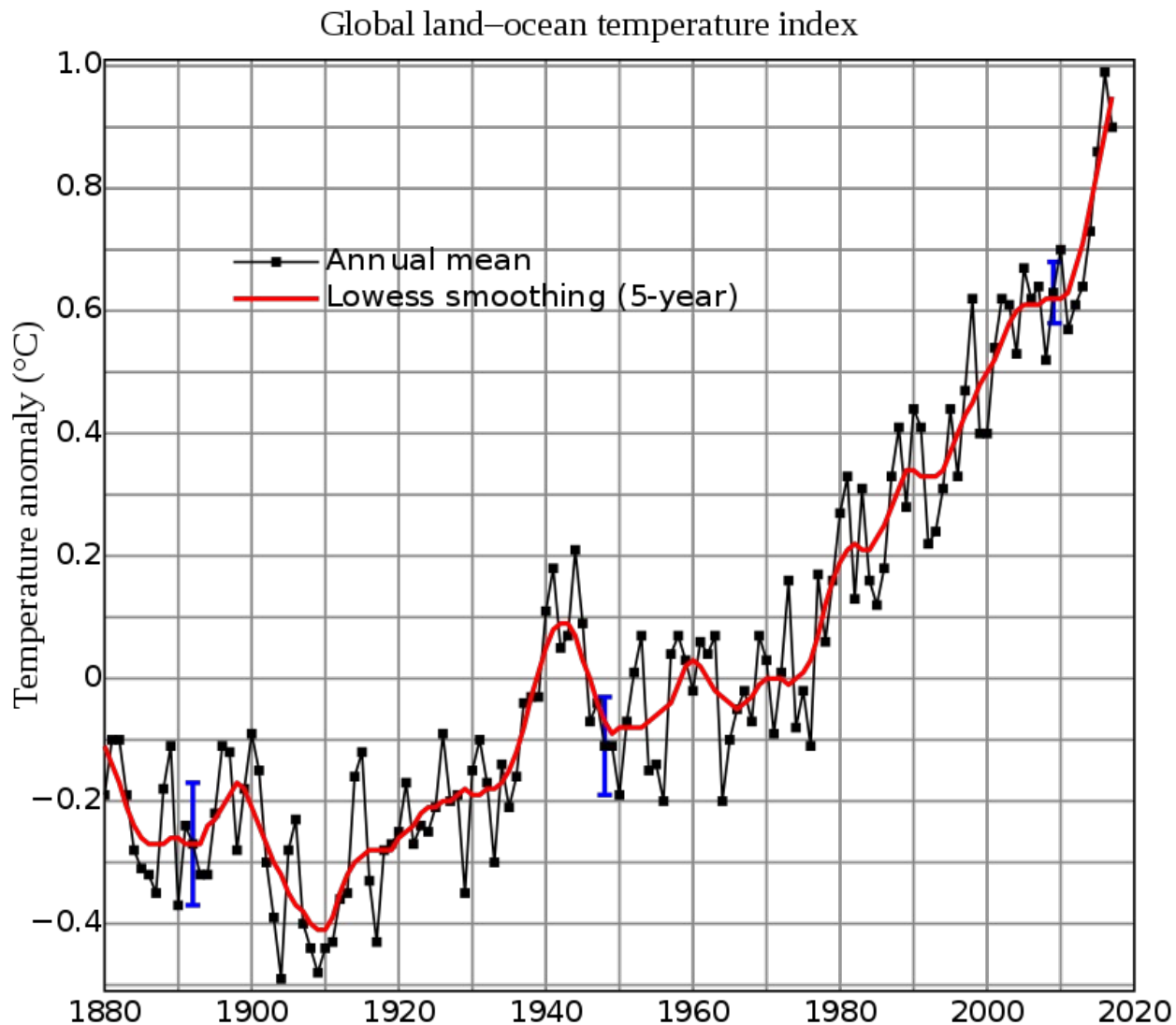
Las actividades humanas han aumentado el contenido de gases de efecto invernadero en la atmósfera (CO₂, CH₄, NO₂), lo cual generó un aumento en la energía emitida hacia la superficie.



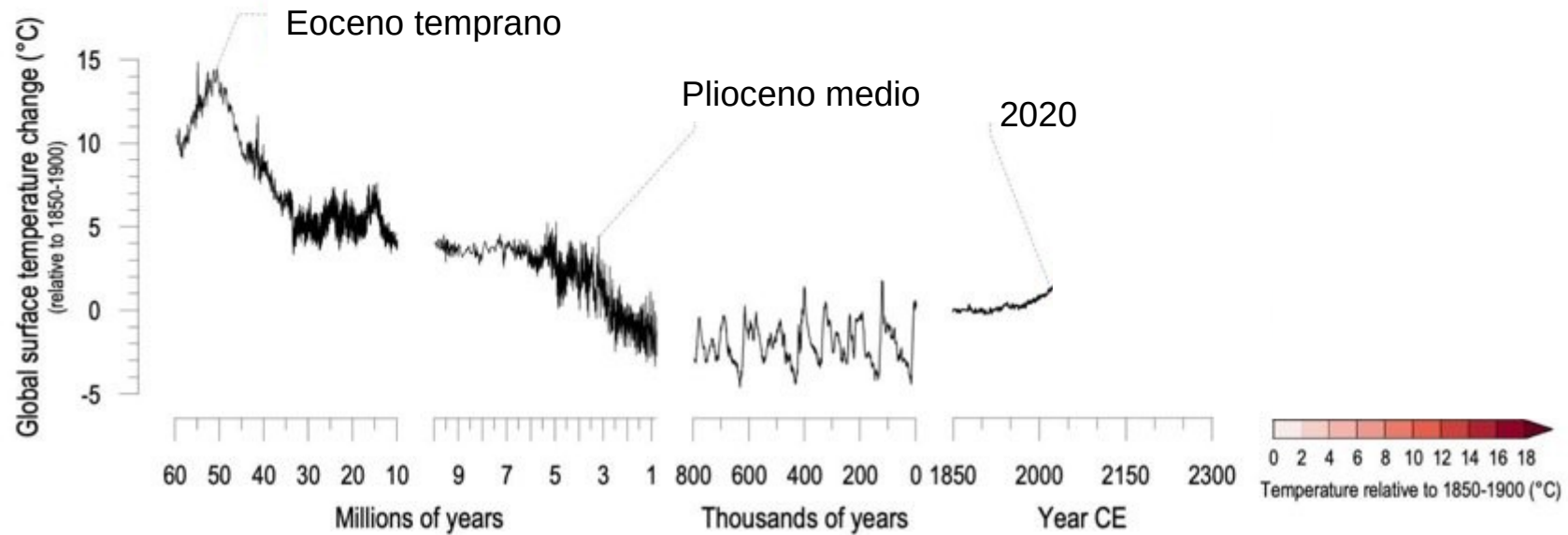
1.6 W/m² Forzante Antropogénico

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°C desde comienzos del siglo XX.

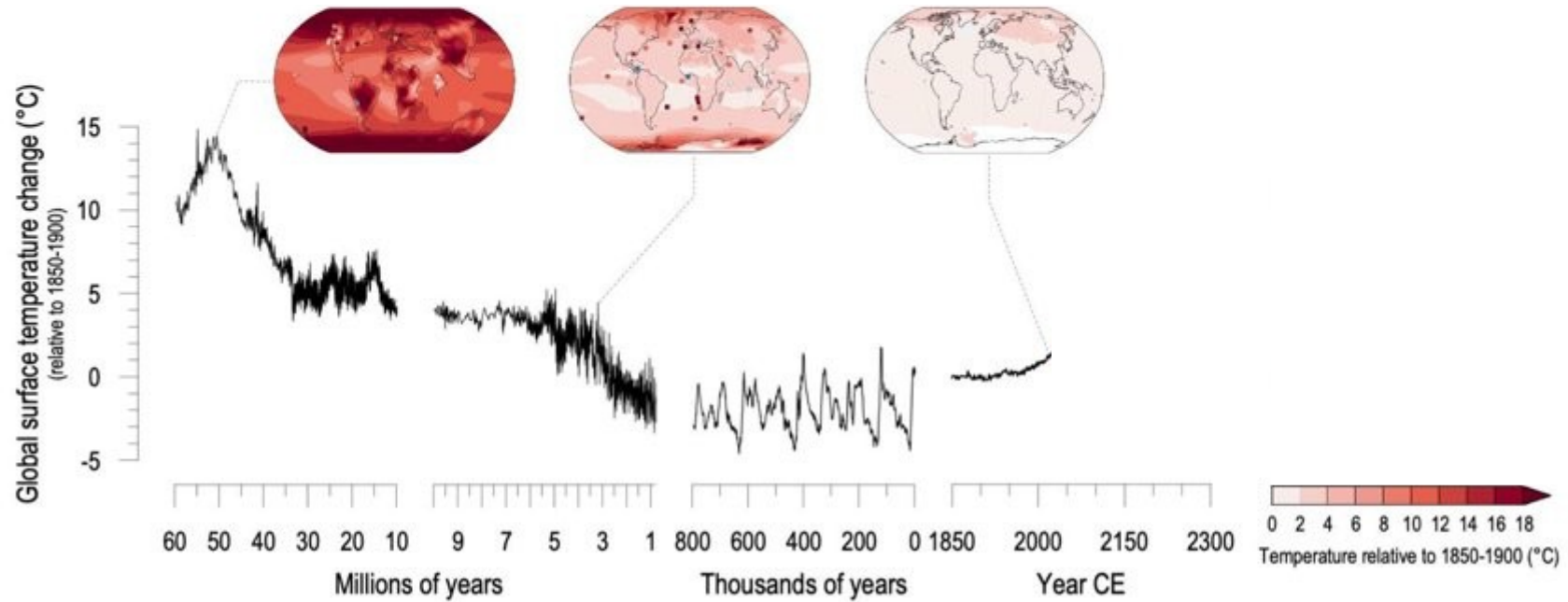
Este aumento en la temperatura de la atmósfera es el efecto más visible del cambio climático.



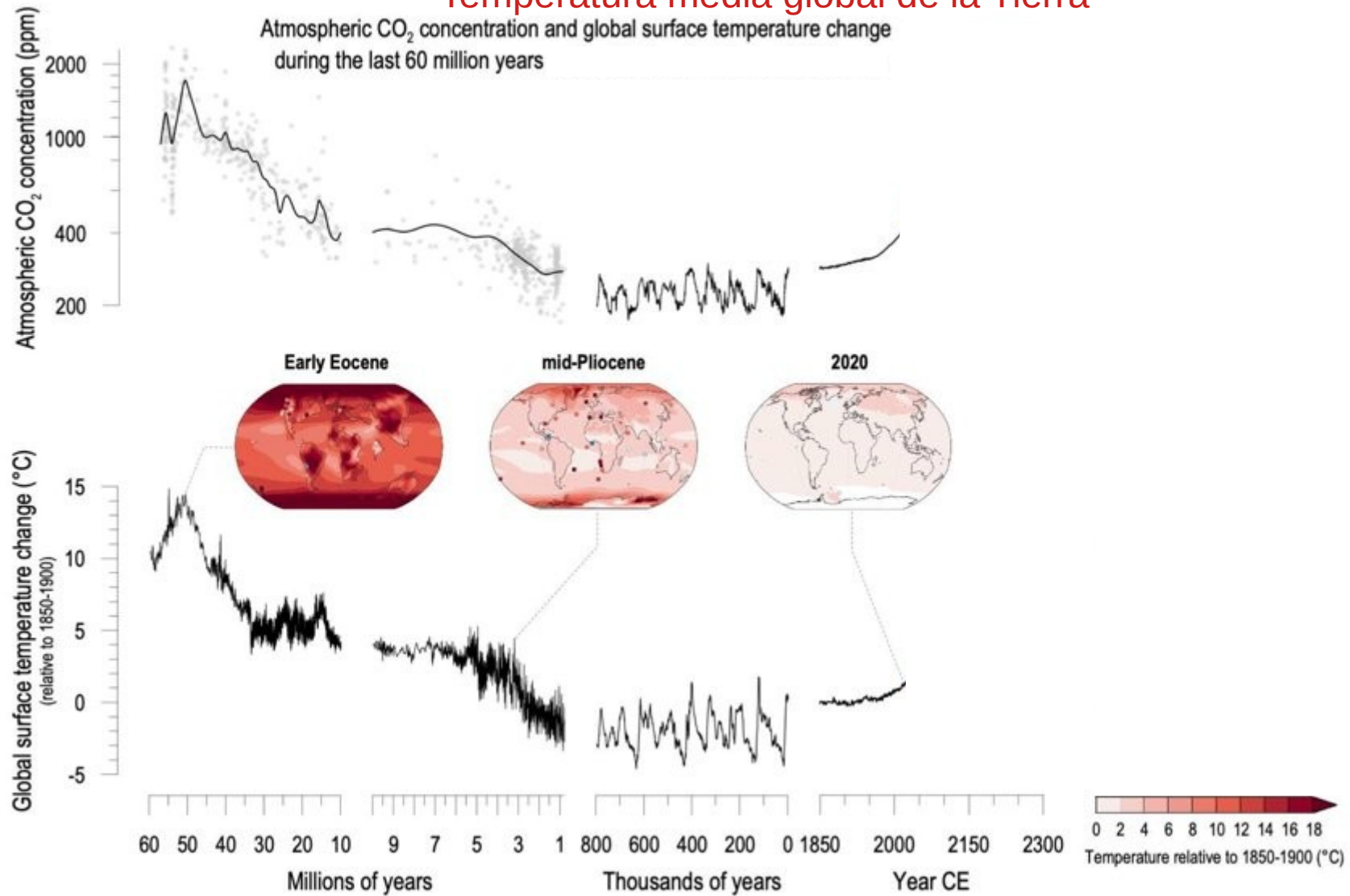
Temperatura media global de la Tierra



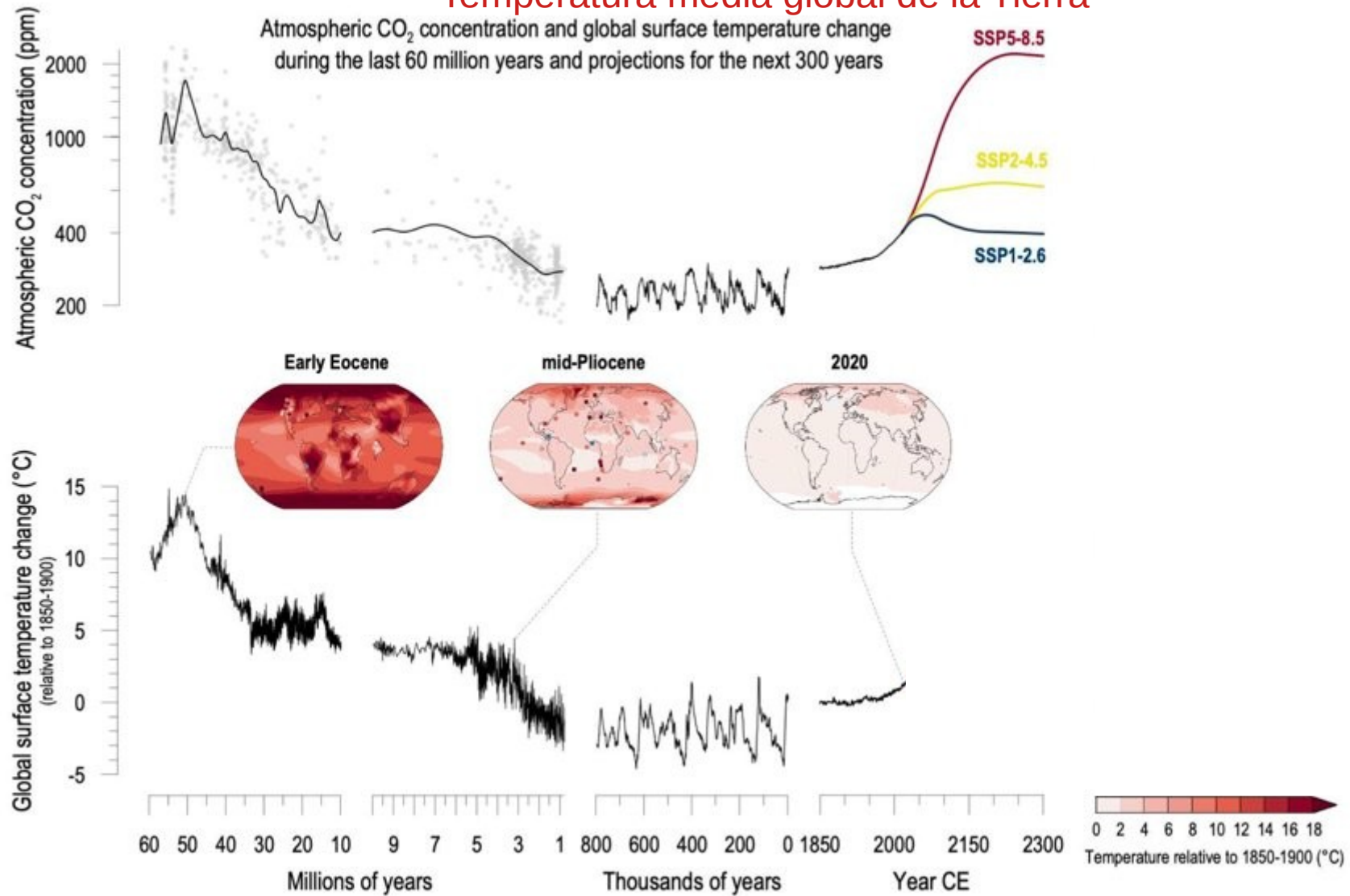
Temperatura media global de la Tierra



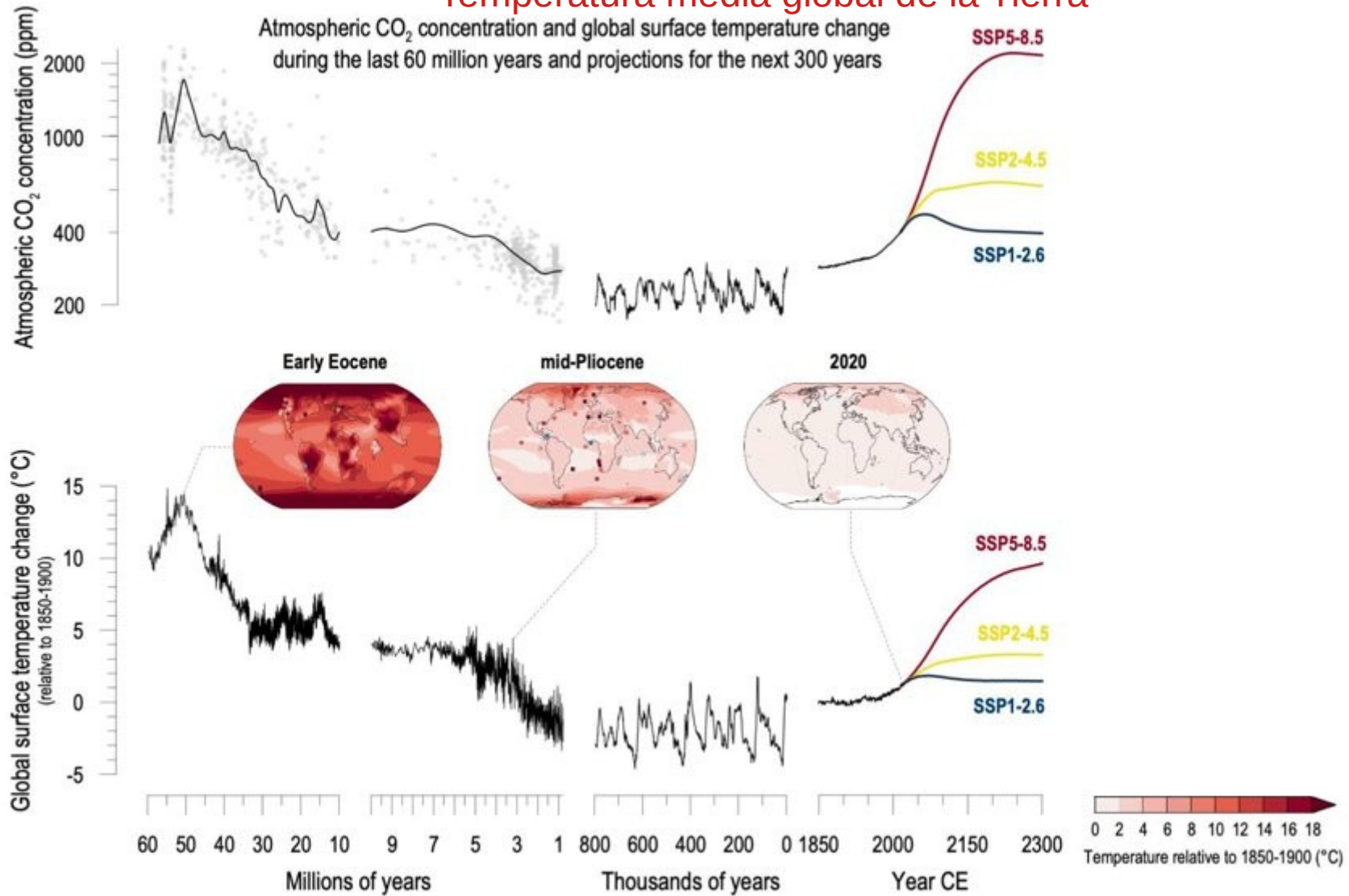
Temperatura media global de la Tierra



Temperatura media global de la Tierra

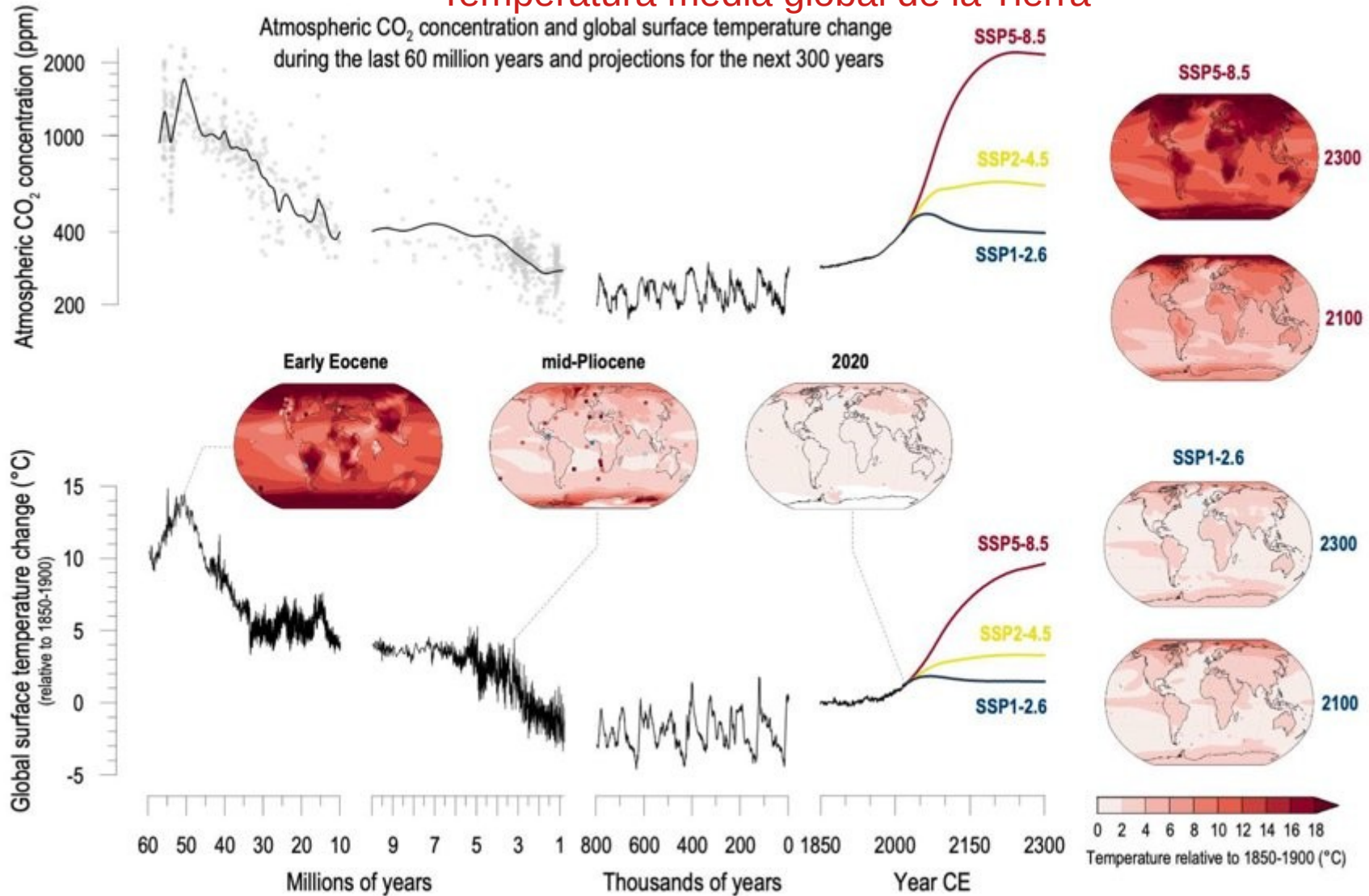


Temperatura media global de la Tierra



Temperatura media global de la Tierra

Atmospheric CO₂ concentration and global surface temperature change during the last 60 million years and projections for the next 300 years



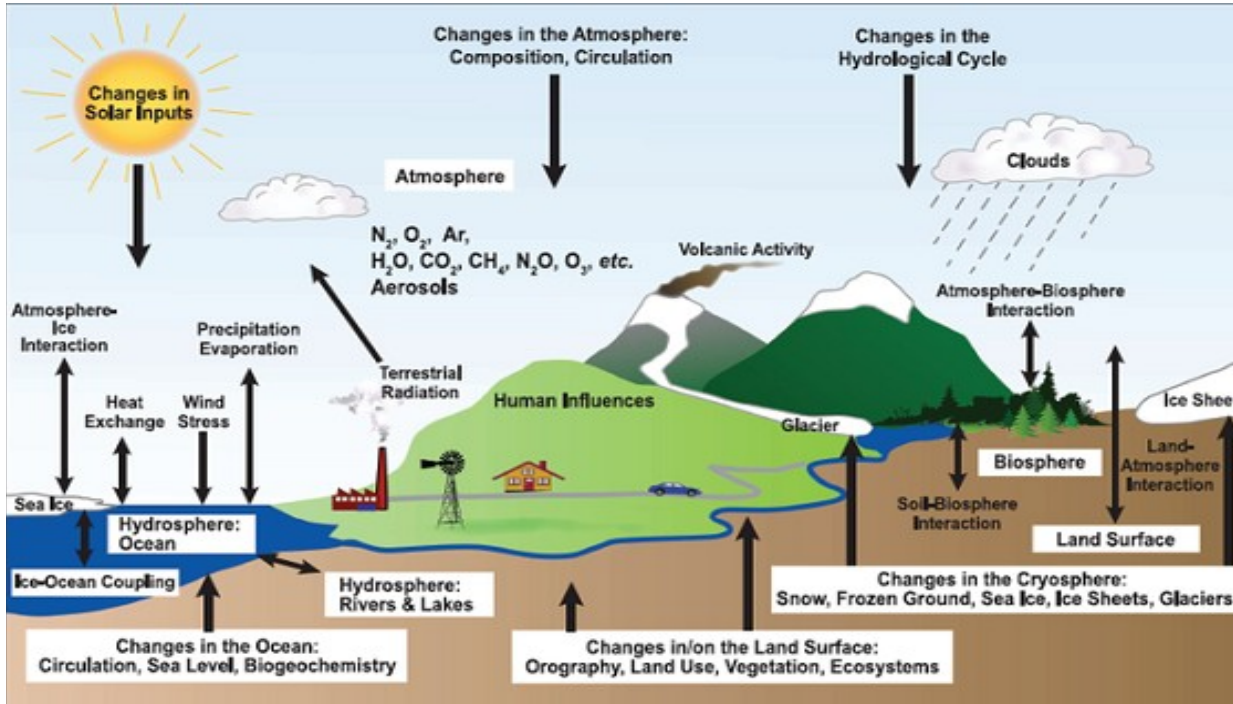
Clima: resultado de la interacción de todo el Sistema Climático/Tierra



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 W/m^2)

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



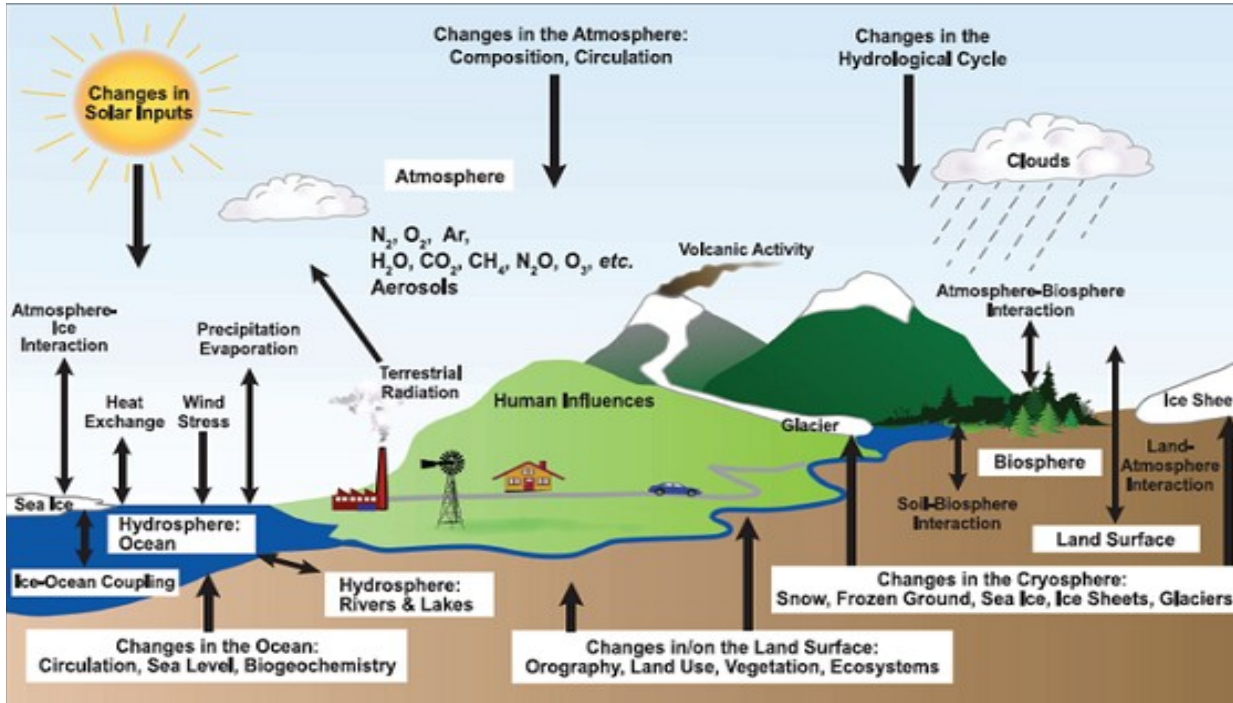
Componentes:

- 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

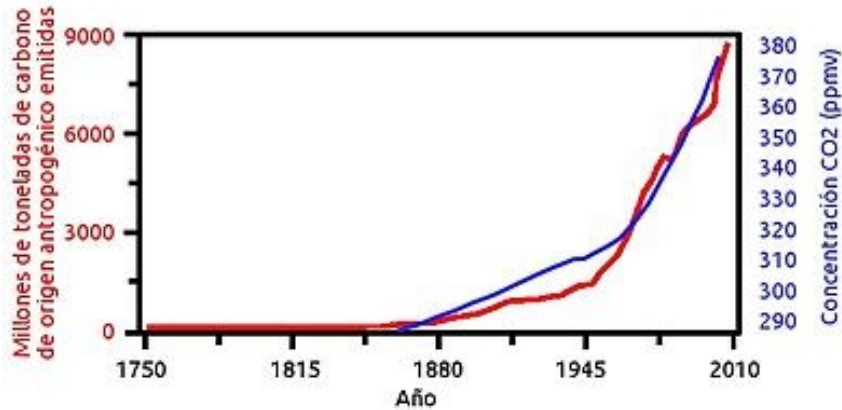
| PERMANENT GASES | | | VARIABLE GASES | | | |
|-----------------|----------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|---------------------|--------------------------|
| Gas | Symbol | Percent (by Volume) Dry Air | Gas (and Particles) | Symbol | Percent (by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

*For CO₂, 385 parts per million means that out of every million air molecules, 385 are CO₂ 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 ₂ O | 0 to 4 | |
| Carbon dioxide | CO ₂ | 0.038 | 385* |
| Methane | CH ₄ | 0.00017 | 1.7 |
| Nitrous oxide | N ₂ O | 0.00003 | 0.3 |
| Ozone | O ₃ | 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 CO₂ molecules.
re about 5 to 12 ppm.

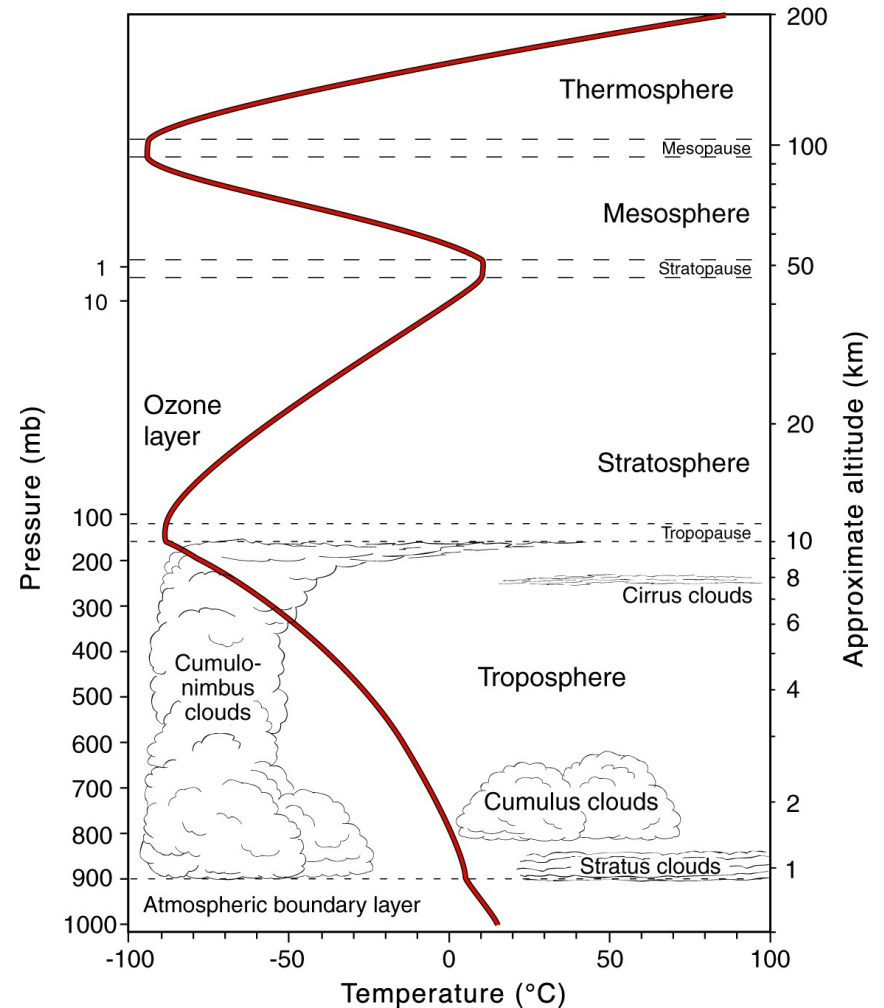
Componentes del Sistema Climático

ATMÓSFERA

Estructura vertical

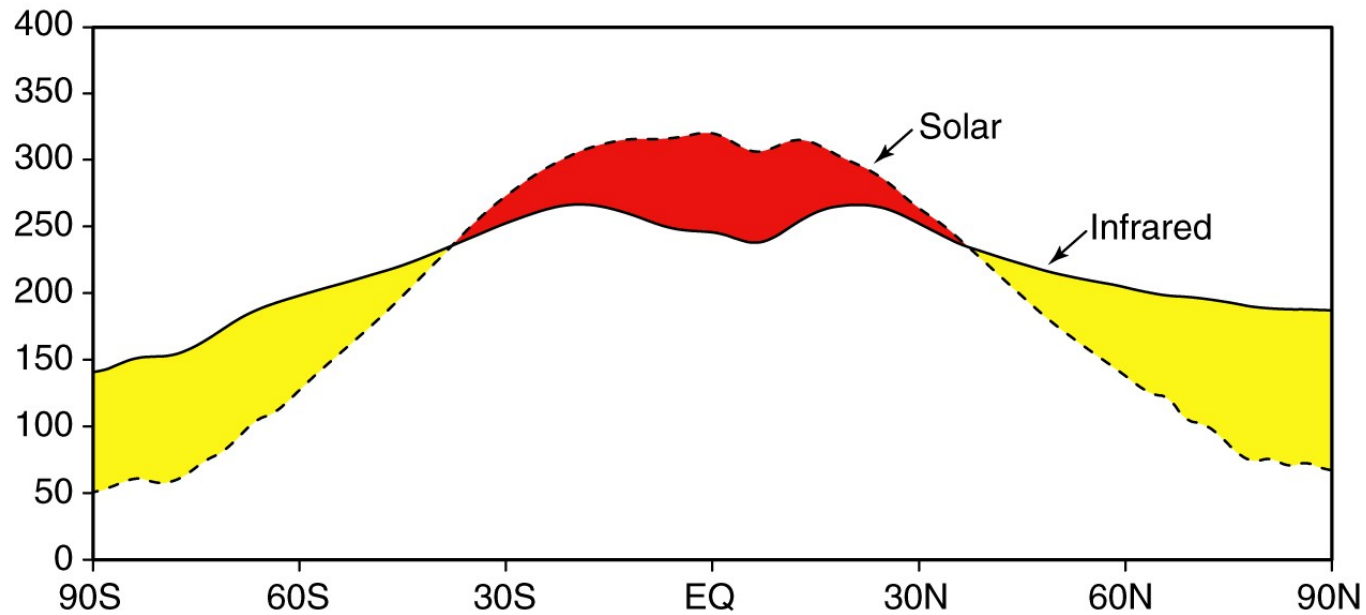
- Tropósfera: fenómenos meteorológicos
- Estratósfera: absorbe UV por O₃ (aumento de T Con altura)

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



Componentes del Sistema Climático

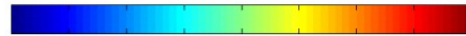
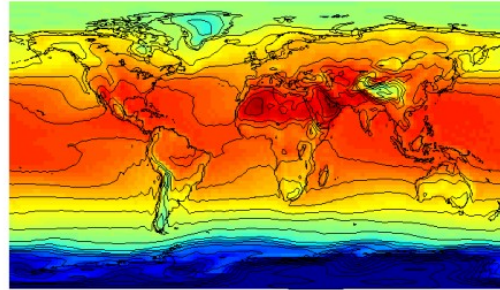
ATMÓSFERA



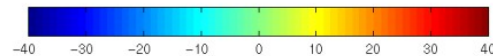
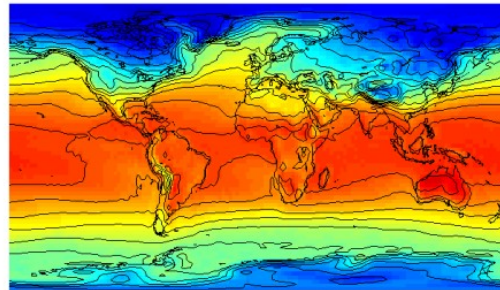
Componentes del Sistema Climático

ATMÓSFERA Temperatura

July mean surface temperature (°C)

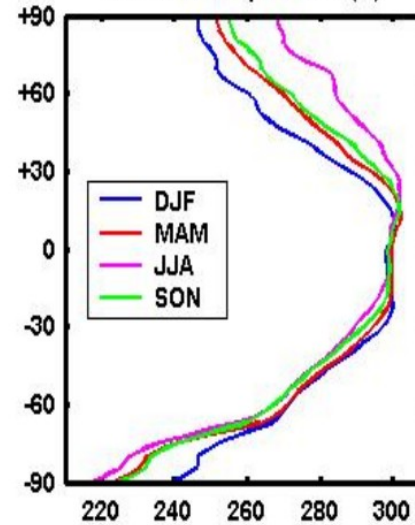


January mean surface temperature (°C)



Temperatura

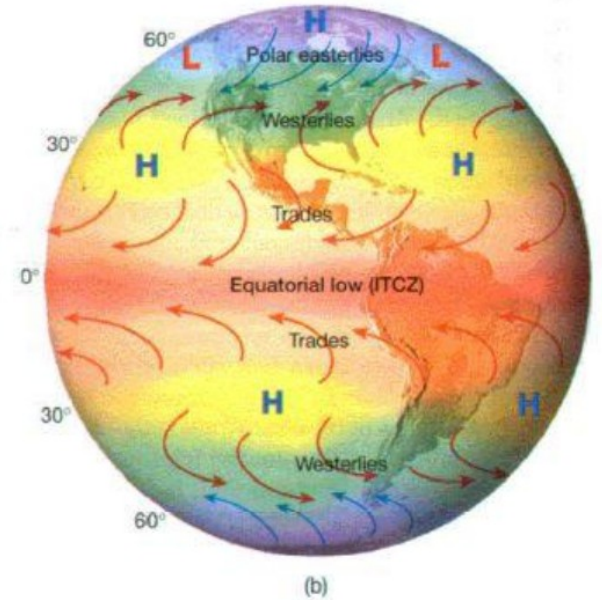
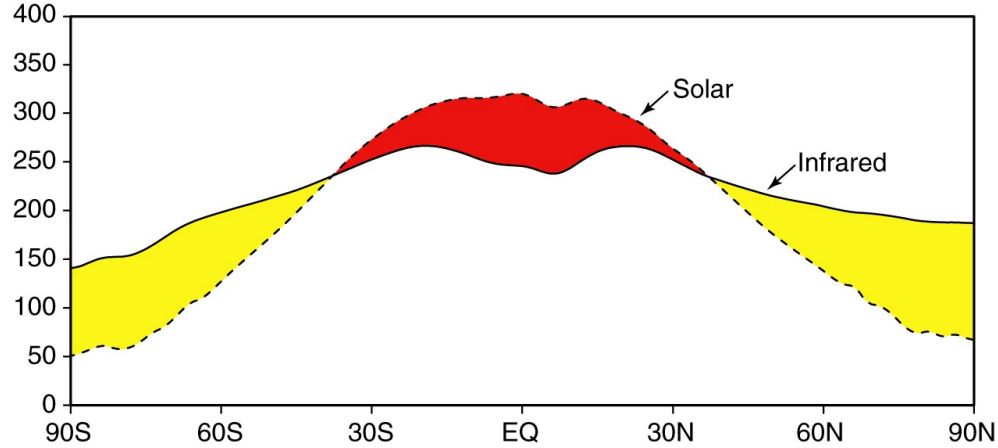
Seasonal Zonal Means:
Surface Temperature (K)



Componentes del Sistema Climático

ATMÓSFERA

- Transporte de energía

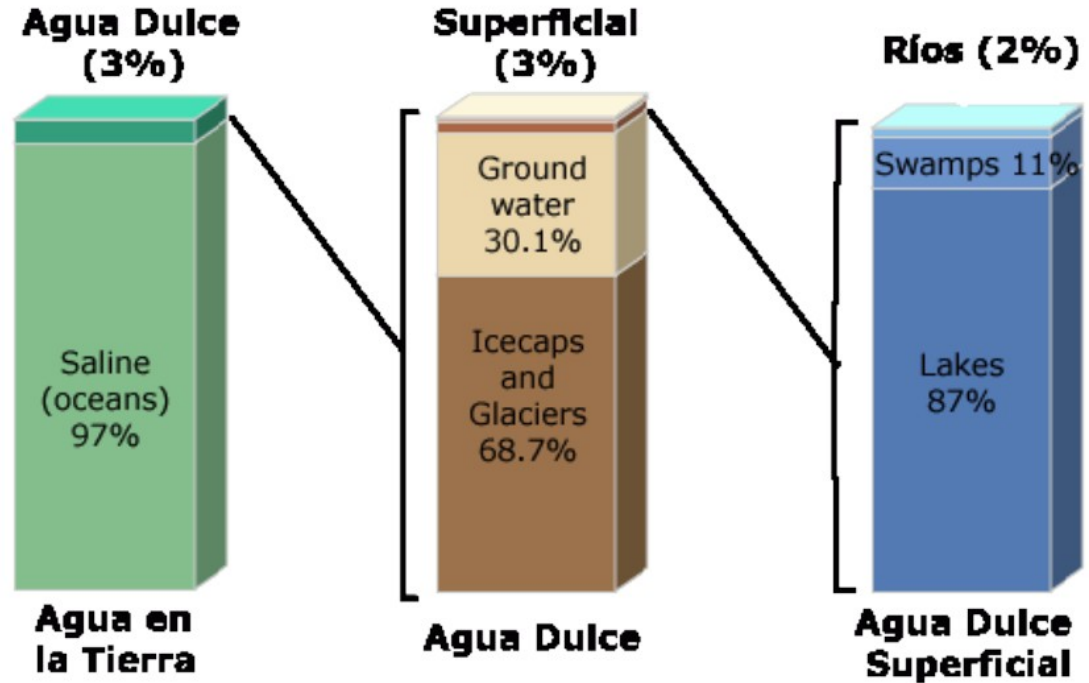


Componentes del Sistema Climático

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 CO₂

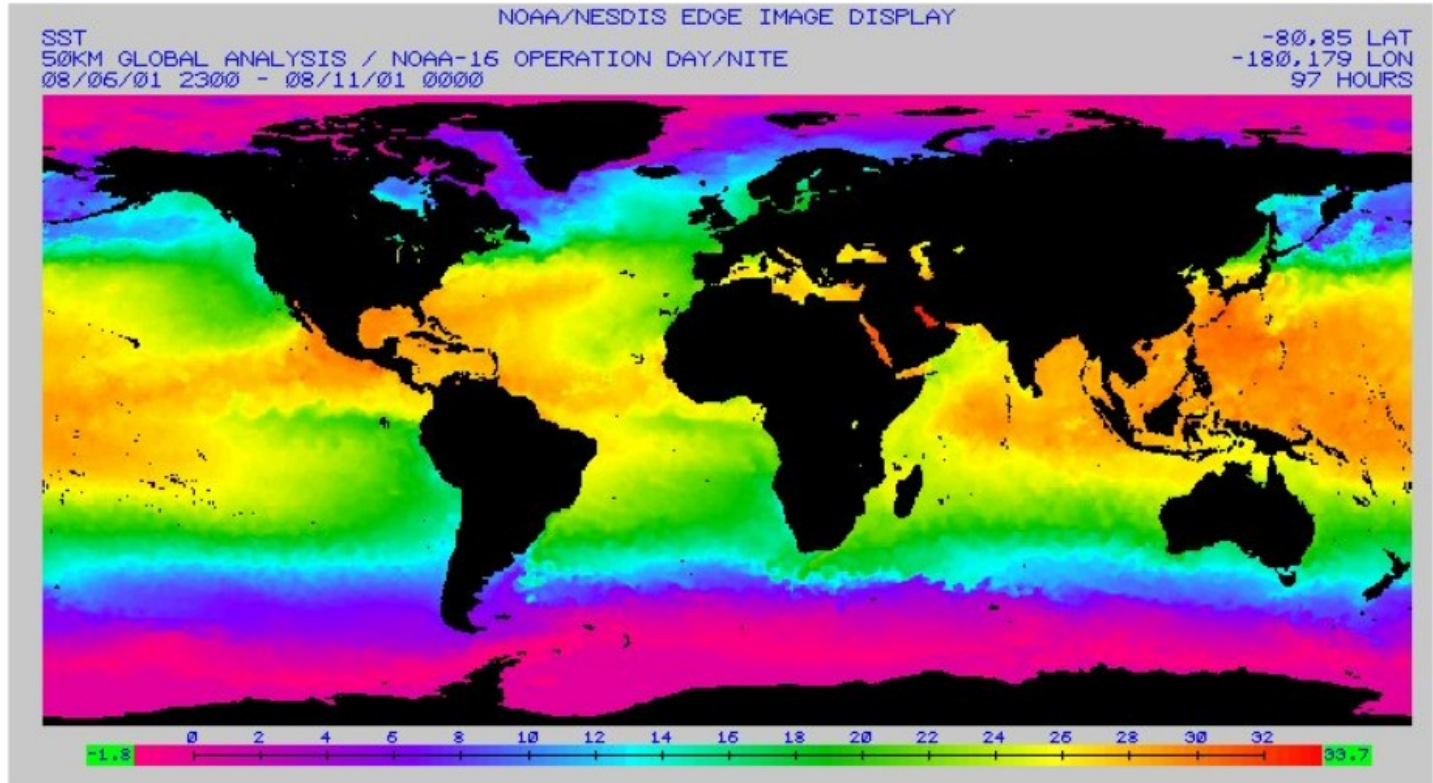


reservorio de energía, actúan como reguladores de la T del planeta

Componentes del Sistema Climático

HIDRÓSFERA

- Océanos
 - Temperatura



Componentes del Sistema Climático

HIDRÓSFERA

Océanos

Circulación

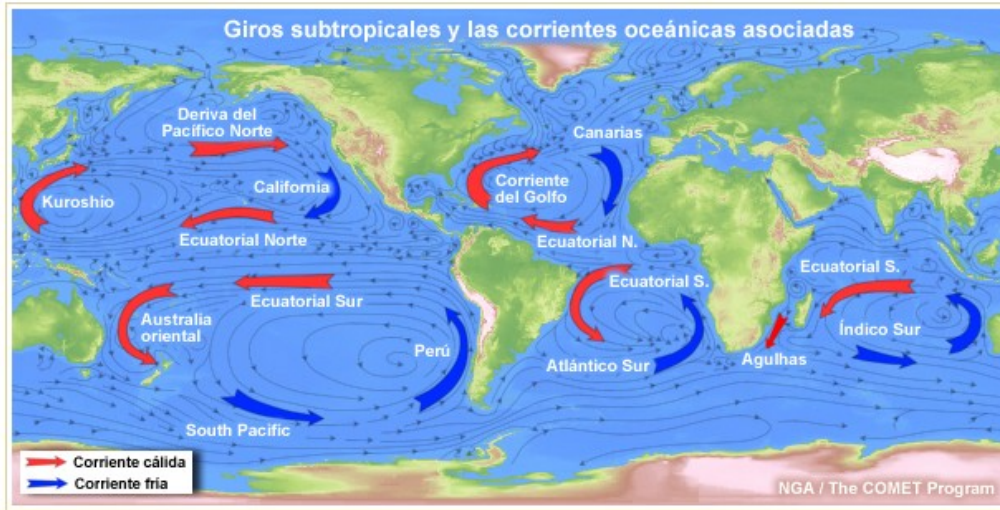
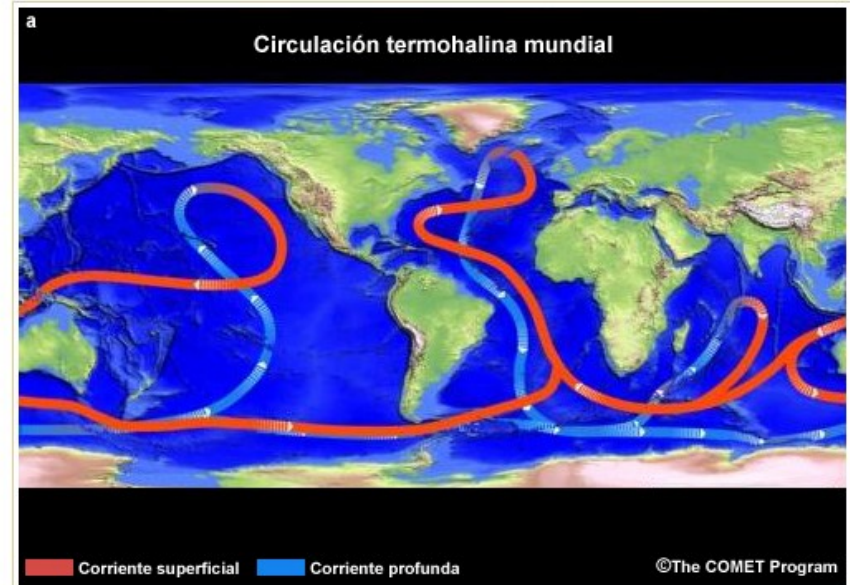


Fig. 3.20. Circulaciones oceánicas globales superficiales y giros subtropicales; las corrientes oceánicas cálidas se indican en rojo y las frías, en azul.



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

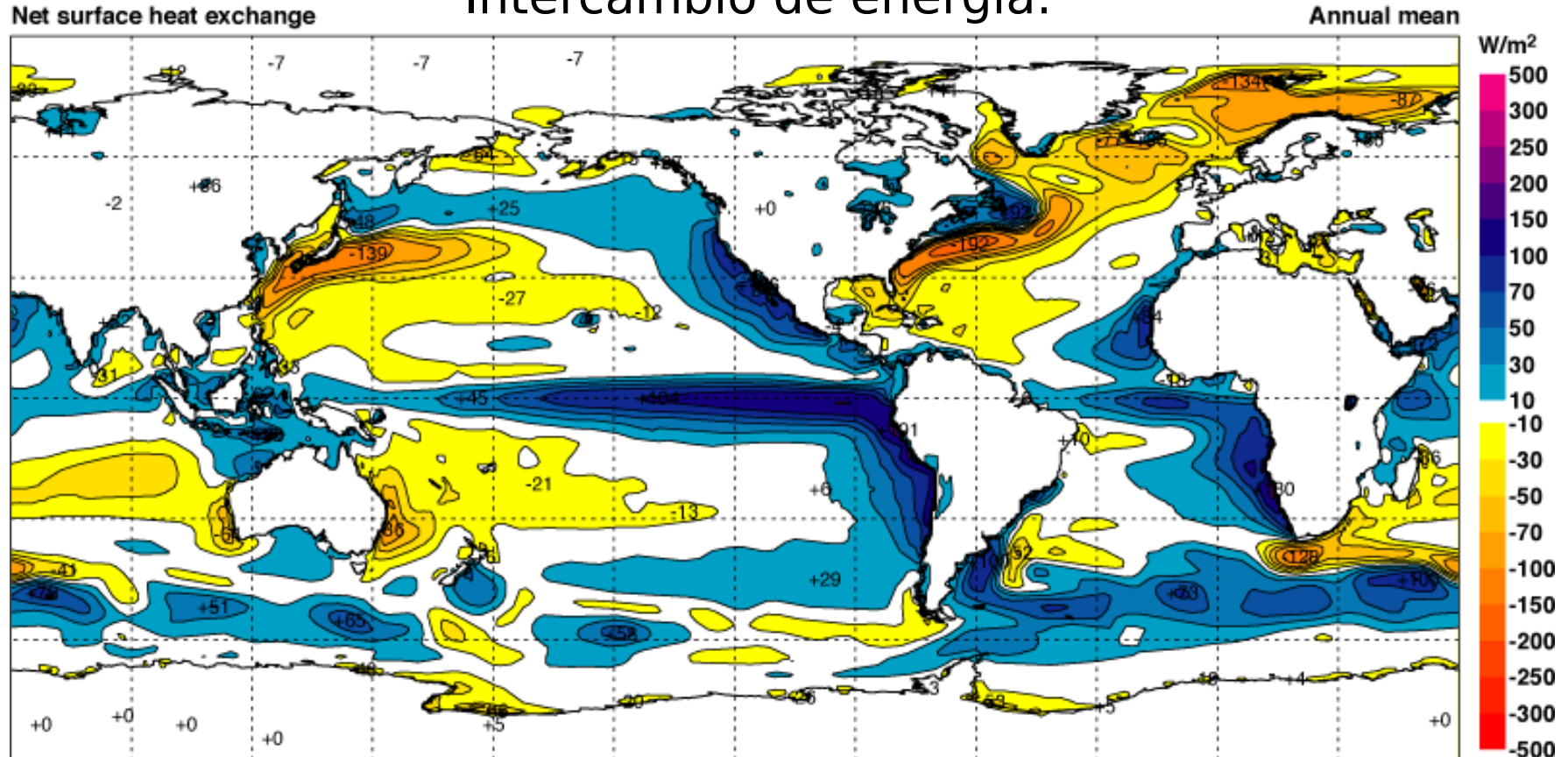
Energía

Materia

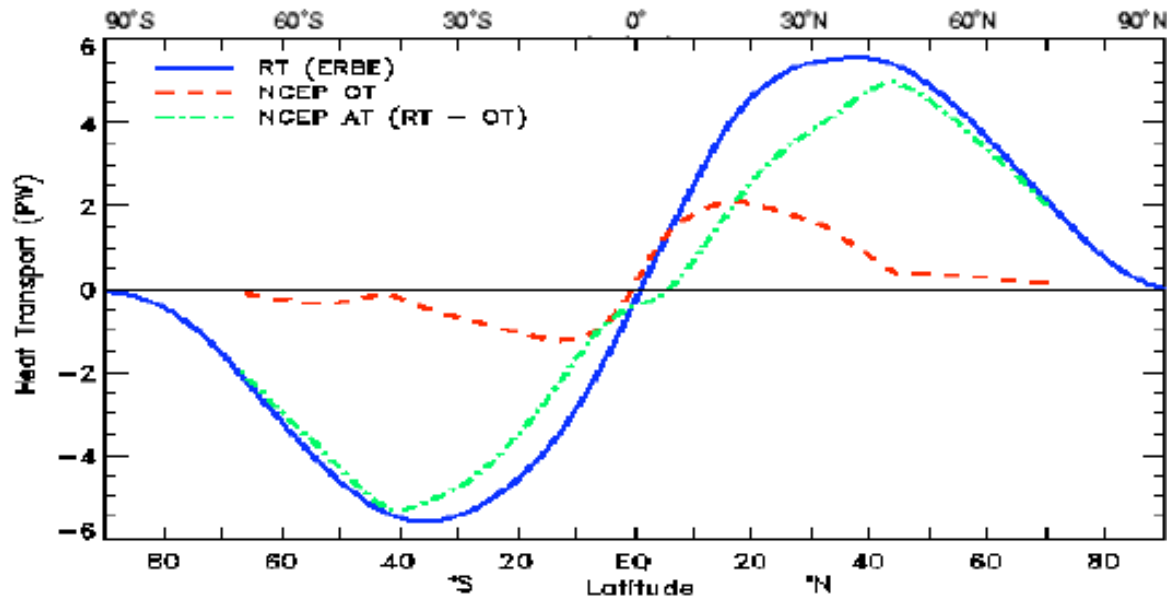
Momento

ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

Intercambio de energía:



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



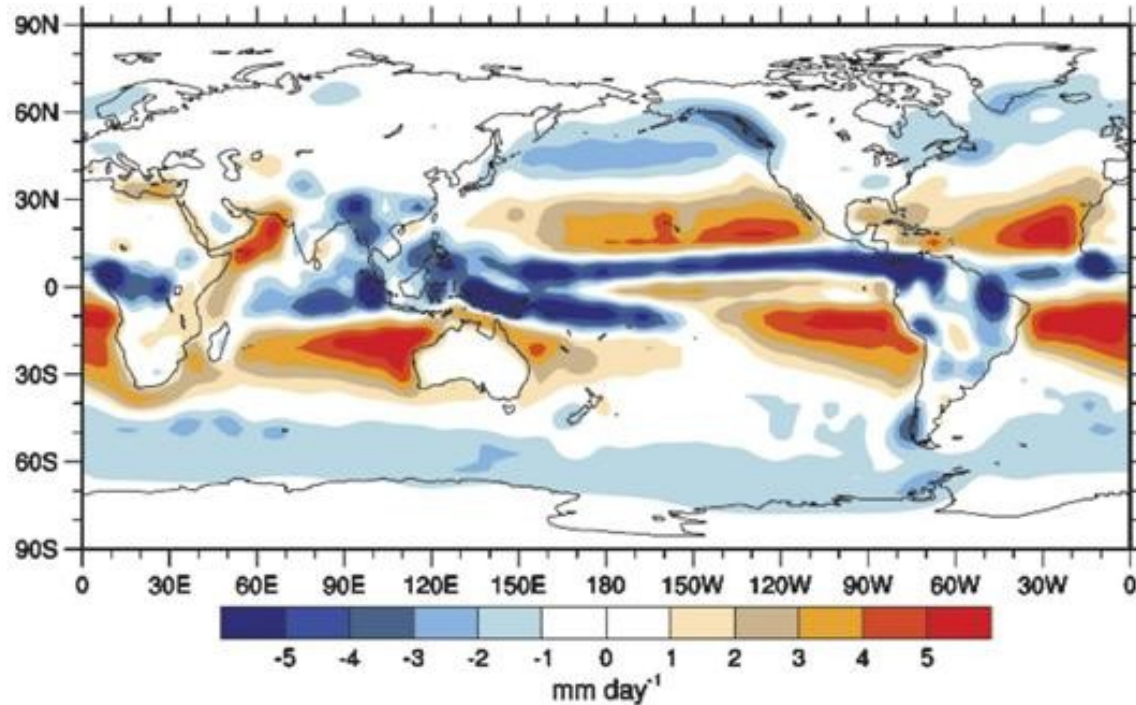
Transporte de energía hacia los polos realizado por el océano consistente con la absorción y liberación de calor en superficie.

Componentes del Sistema Climático

ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

Intercambio de materia:

Evaporación - Precipitación

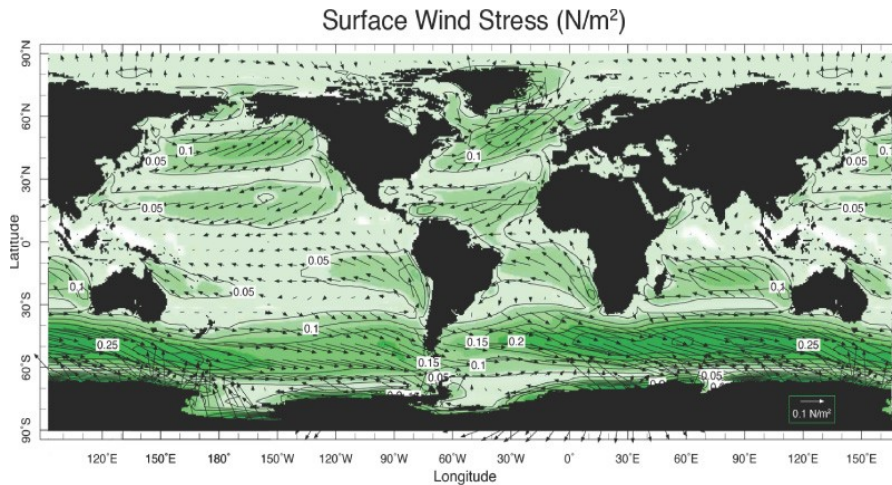


Componentes del Sistema Climático

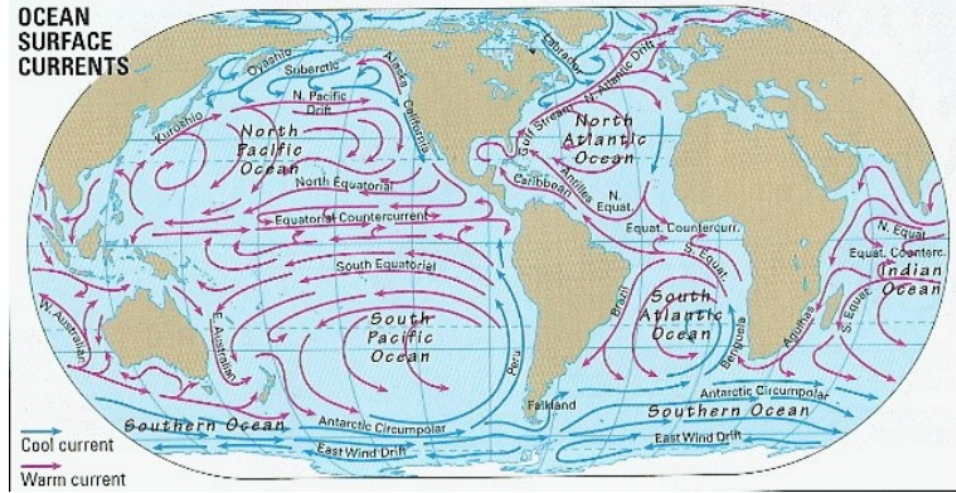
ATMÓSFERA - HIDRÓSFERA

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.

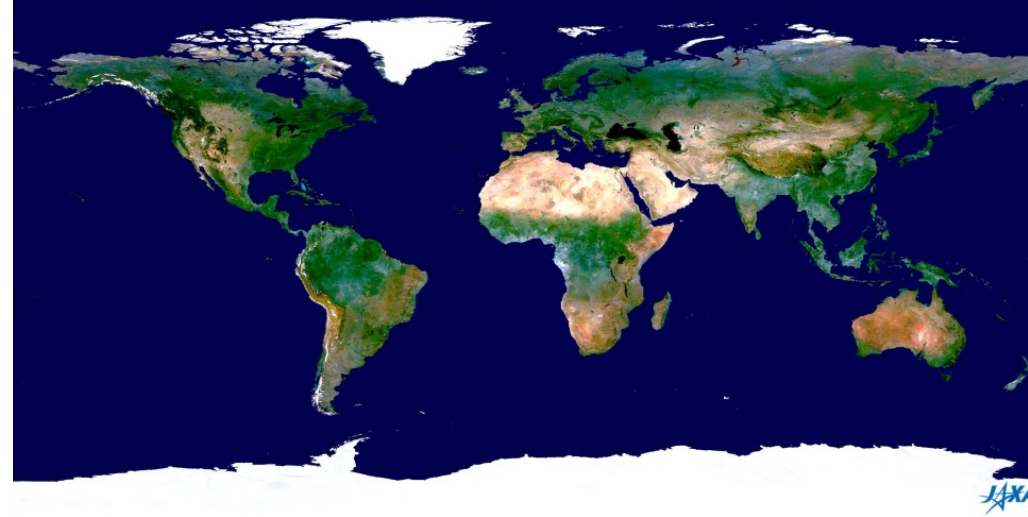


Componentes del Sistema Climático

LITÓSFERA

Influye en:

- Albedo
- Evaporación
- Conductividad térmica.



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

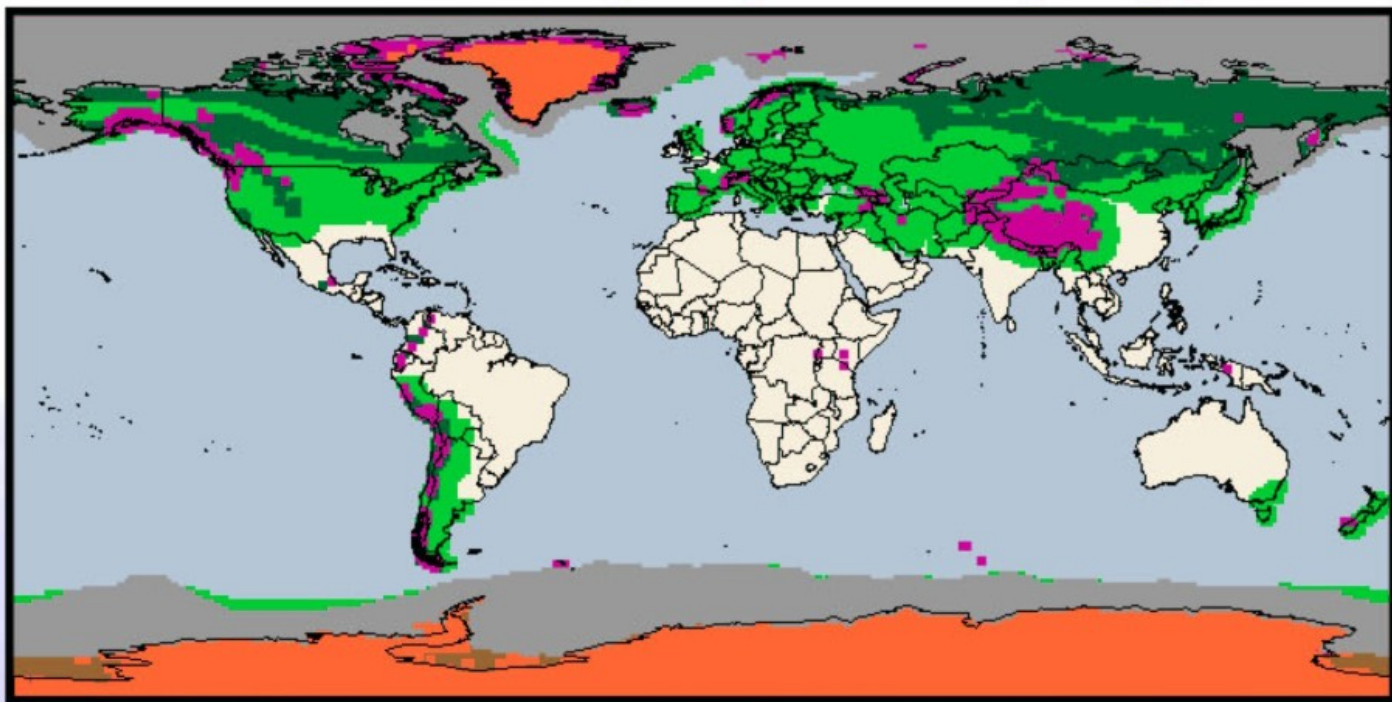
Componentes del Sistema Climático


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^a

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

^aNot 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 CO₂ y fuente de O₂

Fauna

Fuente de gases El

Sumidero de O₂

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 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

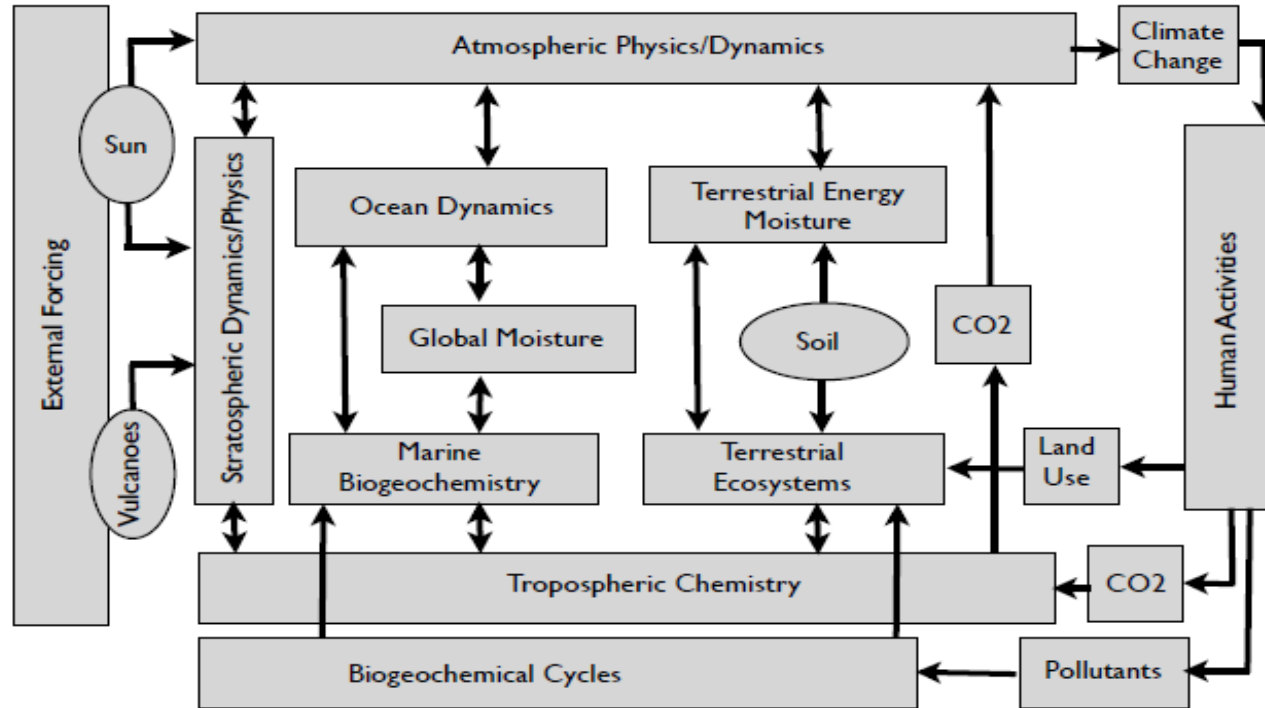


Figure 1.1 A schematic of the organization of the climate system, showing the different component and their connections (simplified from Bretherton (1988)).

Interacción del Sistema Climático/Tierra



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

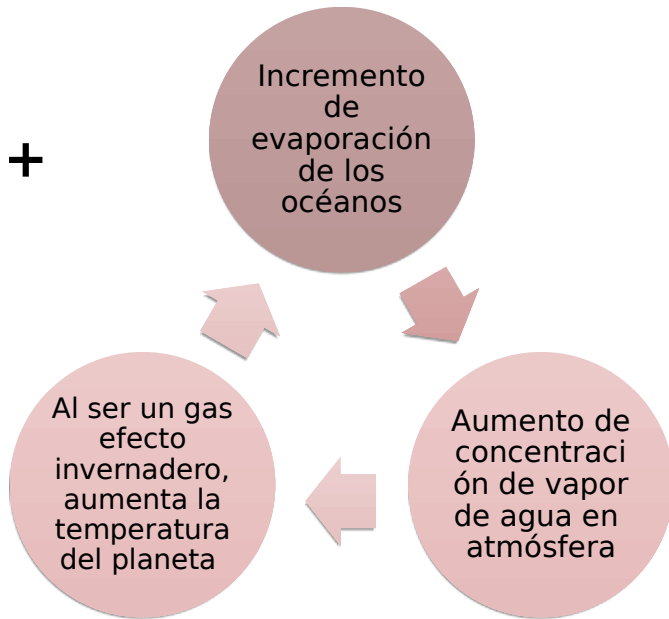
El sistema es una máquina que convierte y distribuye la energía que proviene del sol (240 W/m^2)

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

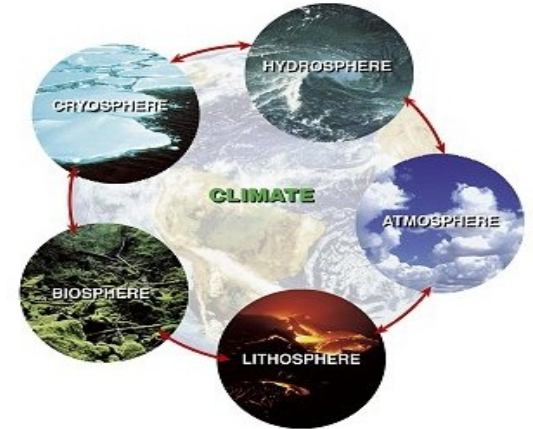
Interacción del Sistema Climático/Tierra

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

Retroalimentación



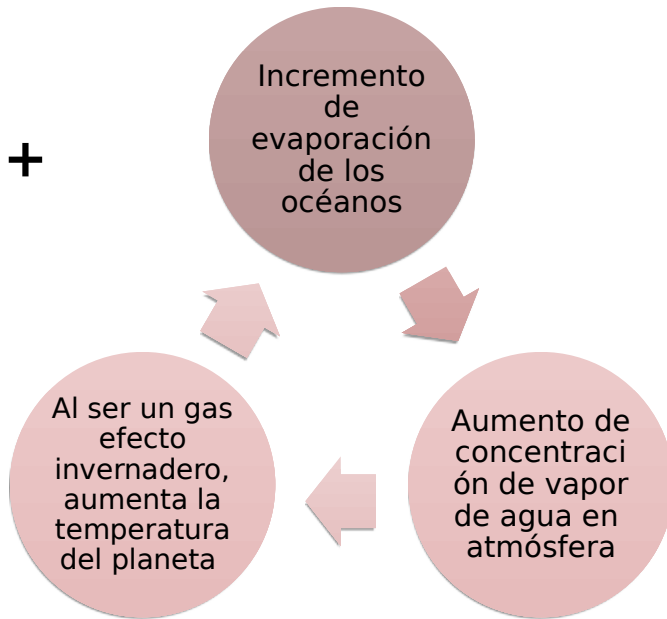
+: El resultado de la interacción es una amplificación de la perturbación.



Interacción de todo el Sistema Climático/Tierra

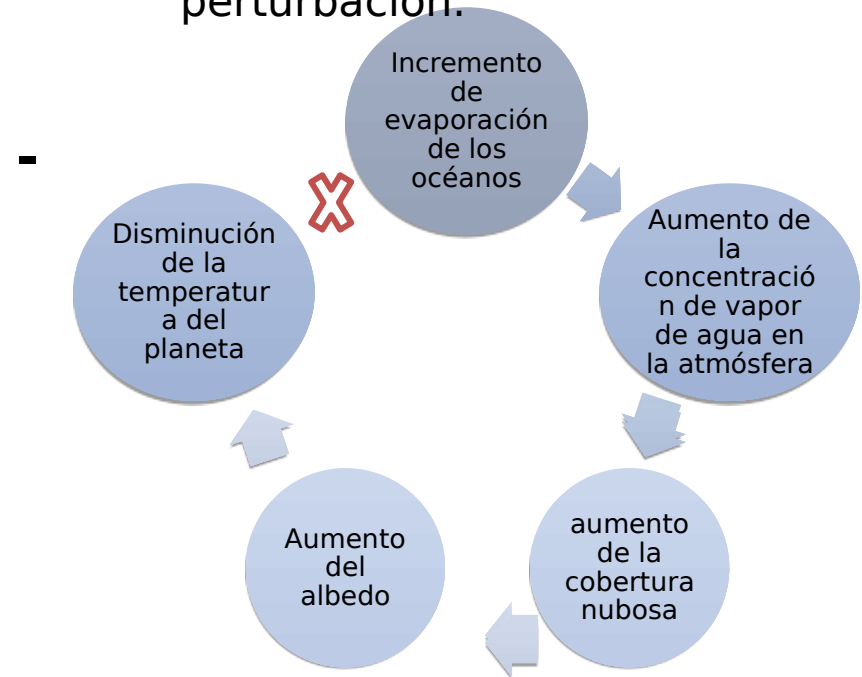
La interacción entre los subsistemas da lugar a procesos de Retroalimentación.

Retroalimentación



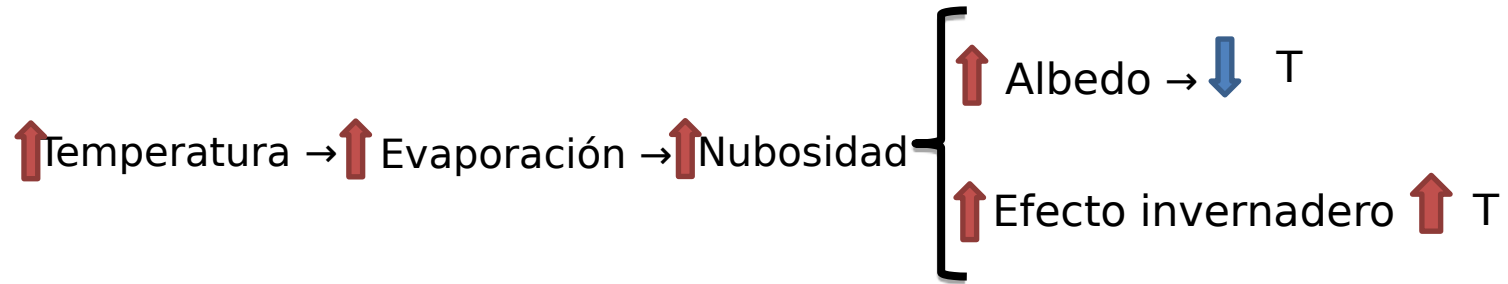
+ : El resultado de la interacción es una amplificación de la perturbación.

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



Interacción del Sistema Climático/Tierra

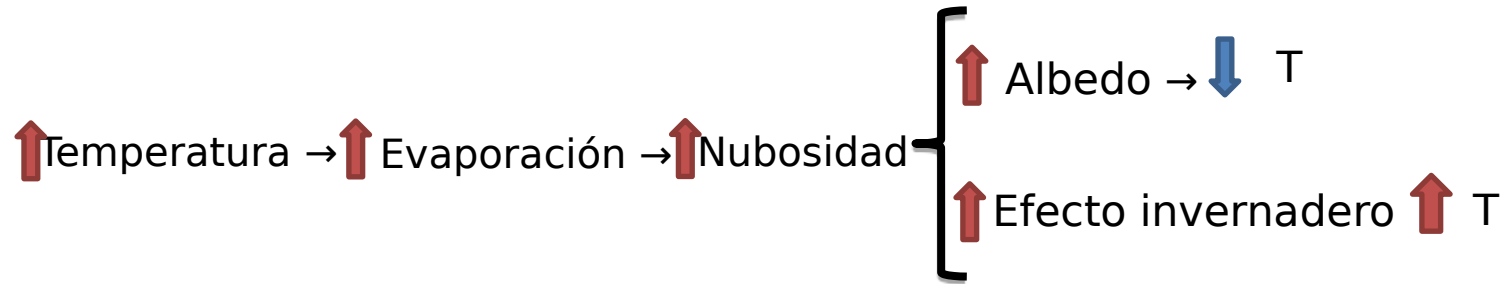
Ejemplo: Nubosidad



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

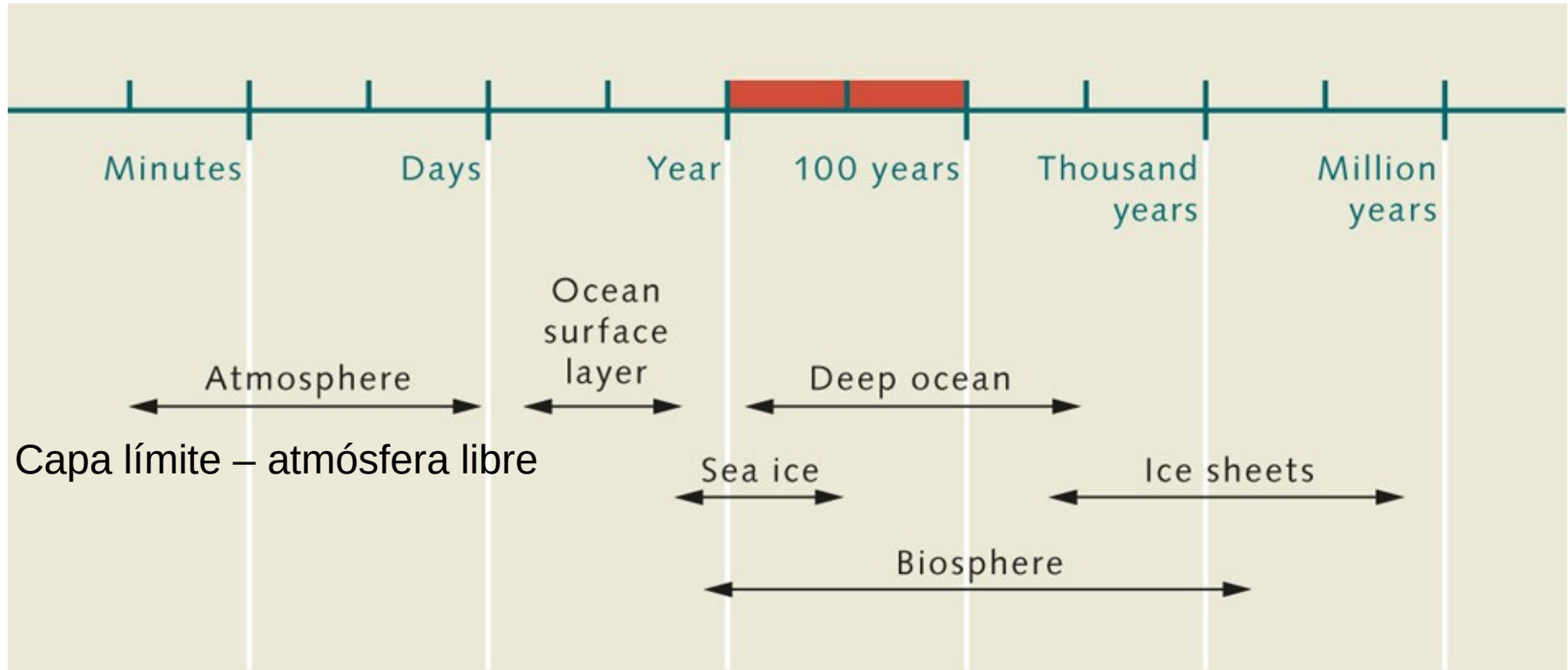
- Redistribución de energía a nivel global
- Distribución de temperaturas en la superficie
- Distribución de agua en superficie

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**

Escalas 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.