

Características fundamentales de la reconstrucción paleoclimática y paleohidrológica



Gerardo Benito Ferrández

CSIC-Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid

¿Qué es el clima?

- **Clima:** Condiciones medias de una región a largo plazo (varias décadas).

Coria:

Temperatura media anual 17,2 °C,
 Temperatura media mes más cálido: 28,4°C
 Temperatura media mes más frío: 8.0°C
 Temperatura máxima absoluta: 45°C
 Temperatura mínima absoluta: -2°C
 Precipitación media anual: 700 mm

- **Tiempo atmosférico:** Meteorología y fluctuaciones a corto plazo (horas o días)

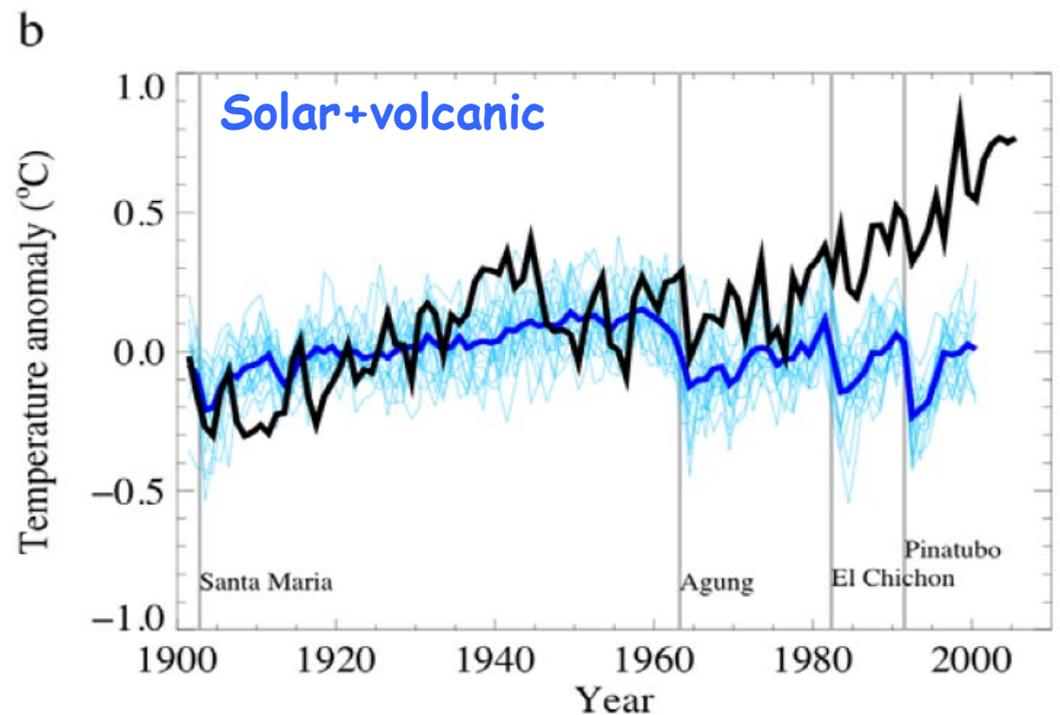
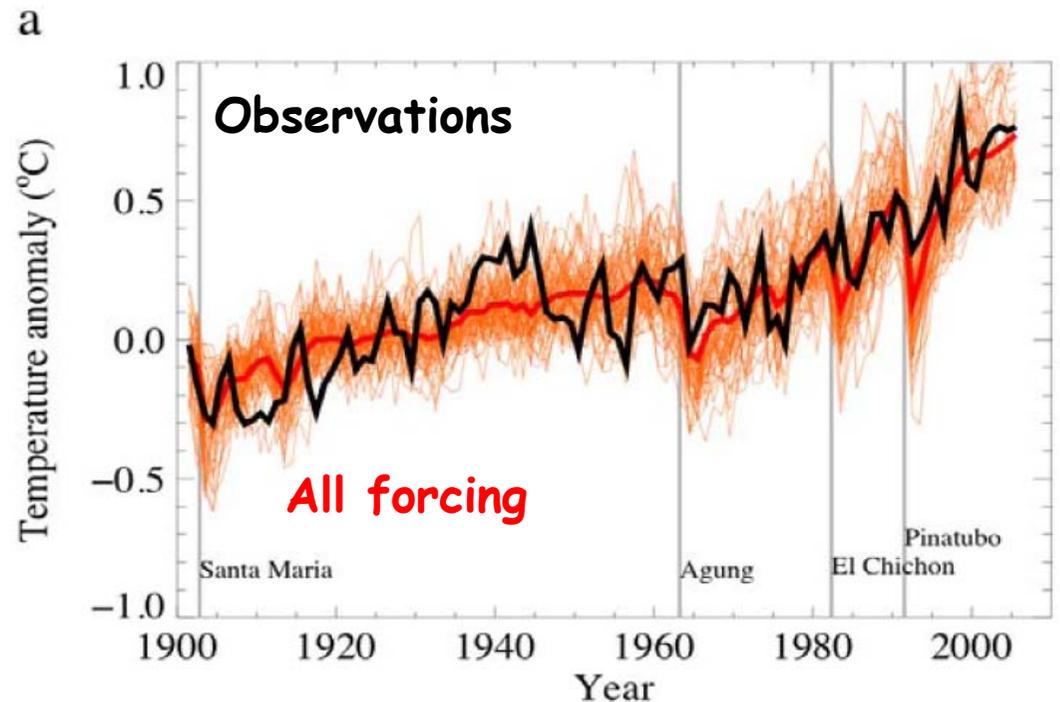
Fecha	vie 26			sáb 27				dom 28		lun 29		mar 30	mié 01	jue 02
	6-12	12-18	18-24	0-6	6-12	12-18	18-24	0-12	12-24	0-12	12-24			
Estado del cielo														
Prob. precip.	0%	15%	5%	0%	0%	0%	5%	5%	5%	0%	5%	5%	5%	5%
Cota nieve prov.(m)														
Temp. mín./máx. (°C)	14 / 26			9 / 19				5 / 17		6 / 18		8 / 19	8 / 20	8 / 22

Cambios en el Sistema Terrestre relacionados con el clima

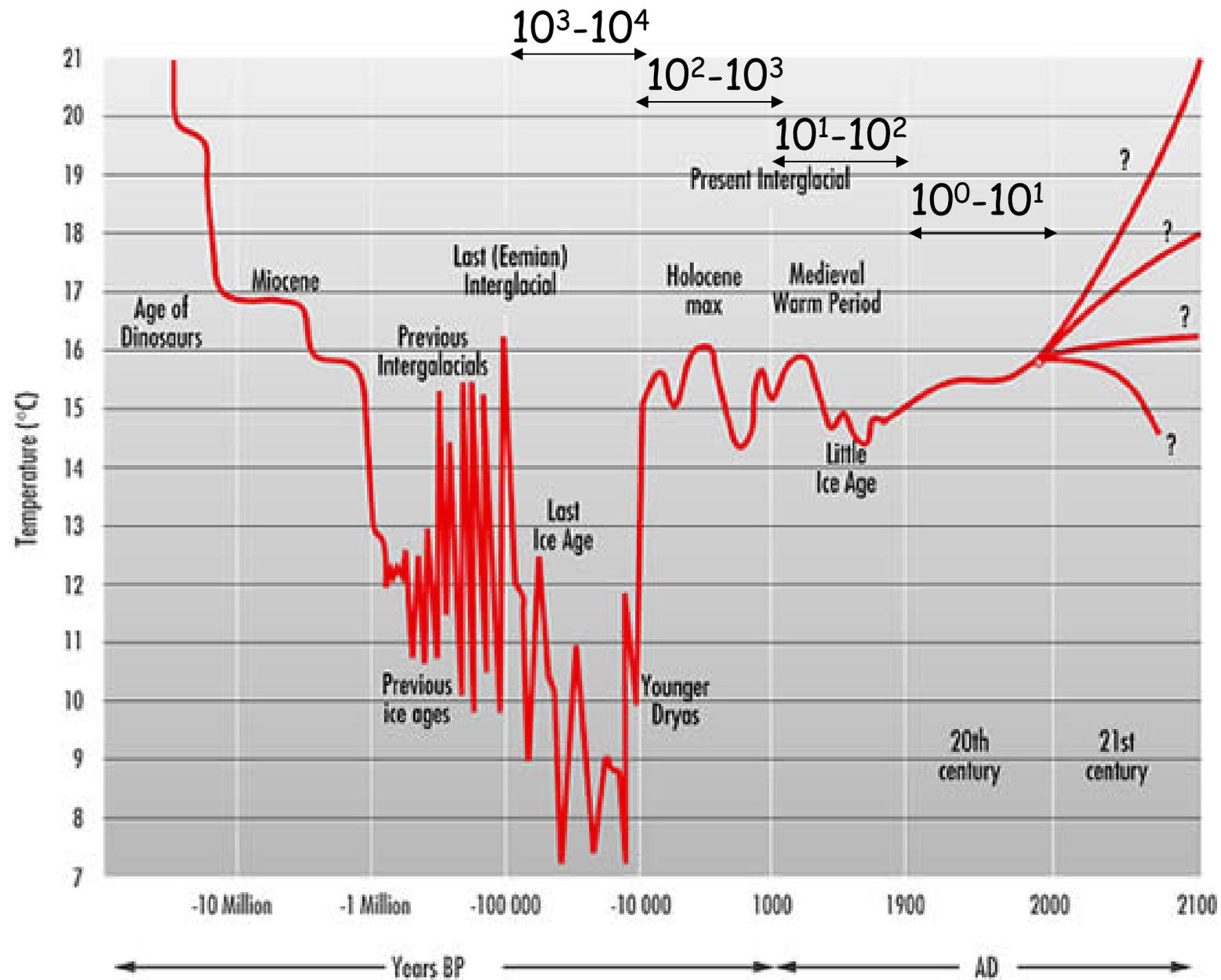
- Avance y retroceso de glaciares
 - Glaciares Alpinos se contraen en el siglo XX
- Adelgazamiento del hielo en el NW Groelandia
- Cambios en el nivel del mar
- Oscilaciones El Niño/La Niña
- Duración de la estación de crecimiento fenológico se incrementa en regiones del norte desde 1950 al presente
- Decrece la cobertura del hielo en el Ártico desde 1970 al presente

Atribución del Cambio Climático: ¿Natural o inducido por el hombre?

- ☑ Separar la señal natural de la debida al aumento GEI gases
- ☑ Incrementar el periodo de medición climática instrumental. Proporcionar una adecuada perspectiva de la variación climática y la evolución del clima actual y del futuro



Cambios climáticos a escala Geológica



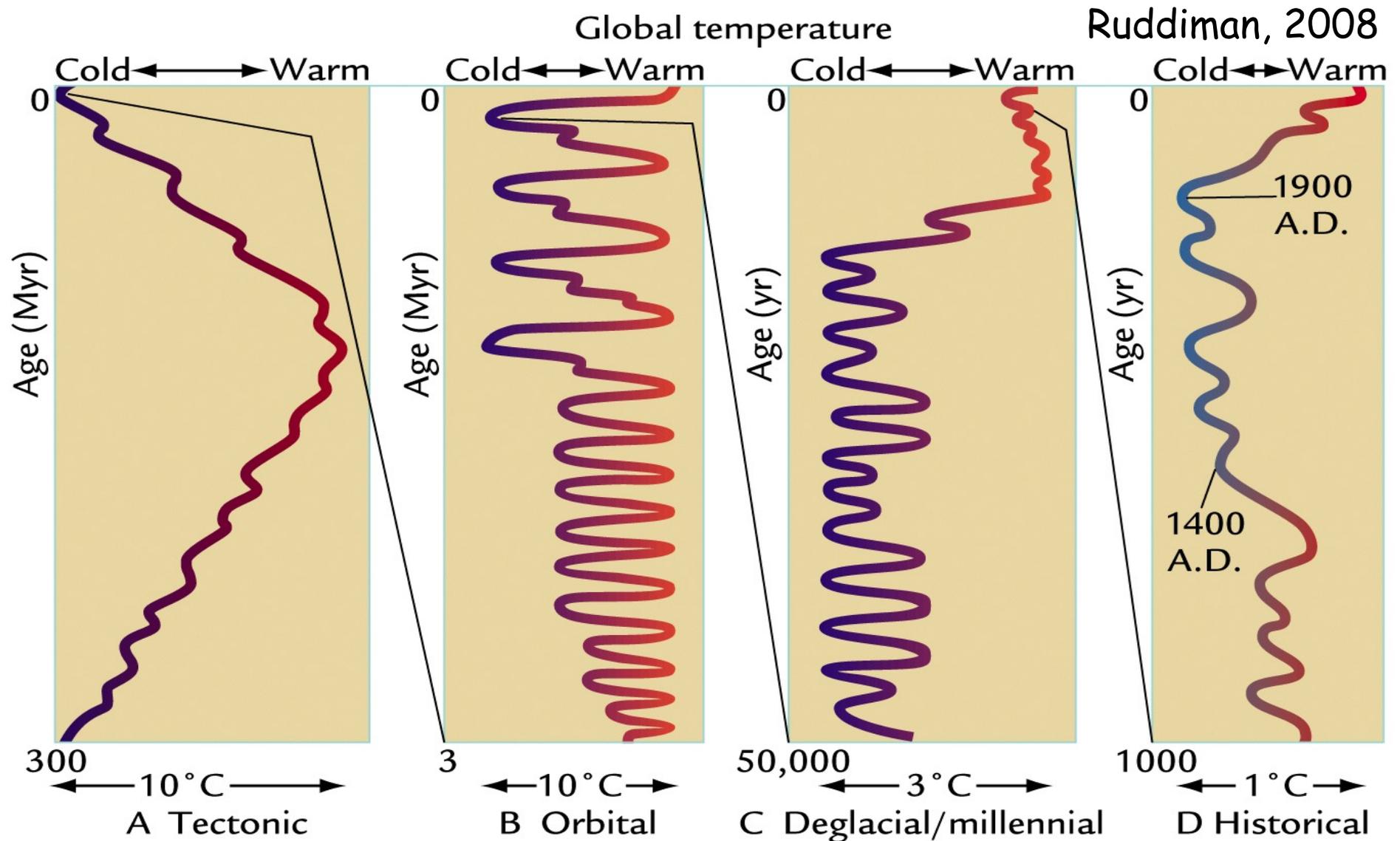
Paleoclimatología y Paleohidrología

- Estudio de la evolución del clima y del ciclo del agua en el pasado (anterior a los registros instrumentales)

Interés de la paleoclimatología

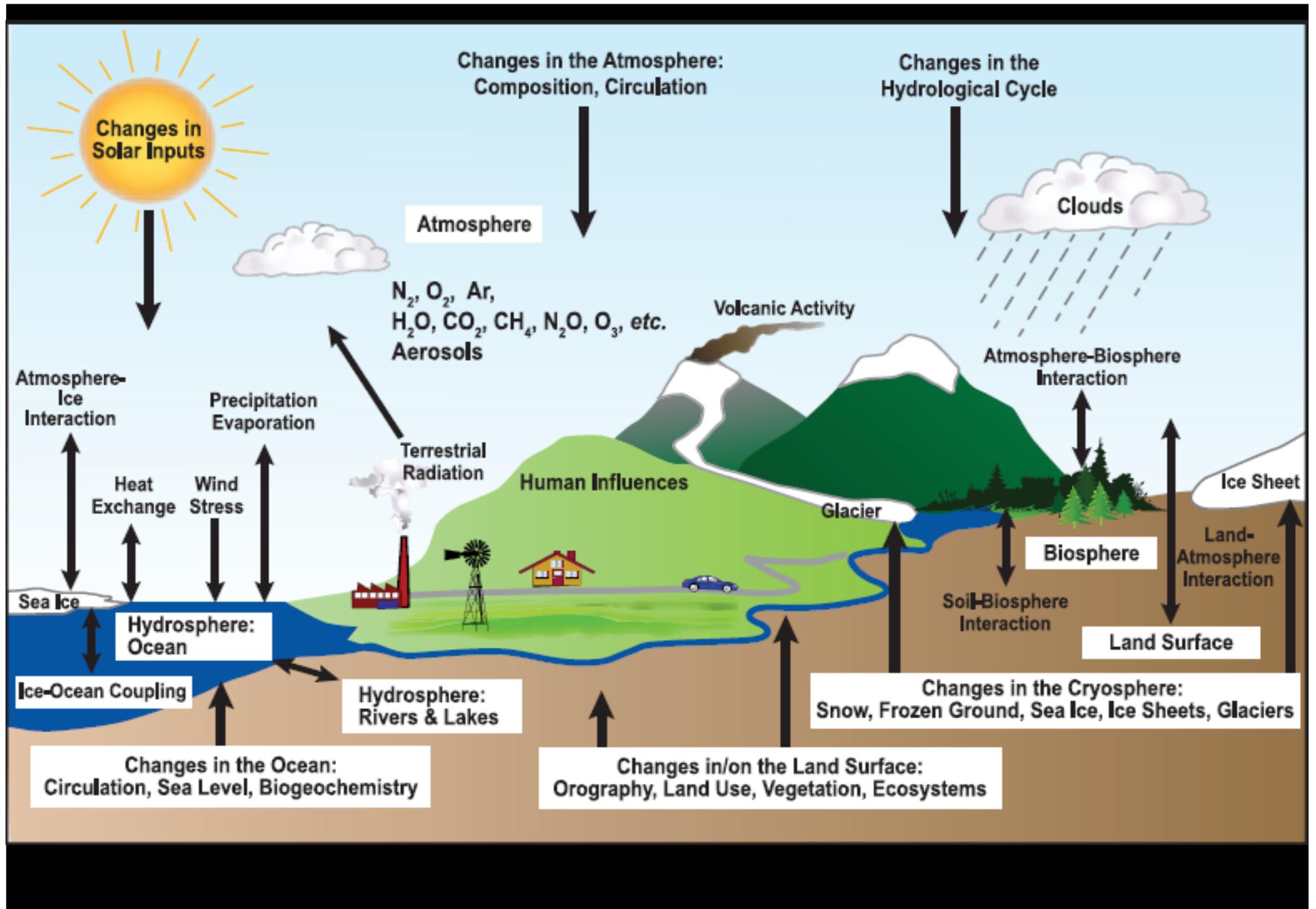
- Permite establecer las escalas de las variaciones y la variabilidad del clima
- Establece ideas cualitativas sobre la relación aparente entre los diferentes factores identificables correlacionados con el clima
- Establecimiento de los procesos, mecanismos y modelos explicativos.
- Permite intercomparación entre estados climáticos tomados globalmente, pertenecientes a épocas históricas distintas (recurrencia de situaciones y correlaciones entre variables)
- Permite la contrastación de las predicciones (retroactivas) de los modelos y mecanismos predictivos
- Permite encontrar análogos de las condiciones que podrían darse en el un futuro (e.g. Planeta más cálido)

Escalas de tiempo y amplitud del Cambio Climático



Sistema Climático Terrestre

- Compuesto por cinco subsistemas:
 - Atmósfera, agua, hielo, tierra y biosfera
- Cambios en el sistema climático terrestre
 - Dirigido por relaciones causa y efecto
- Términos usados: forzamiento y respuesta
 - Forzamiento (causa, variable de control)- factores que conducen a, o causan cambios
 - Respuestas (efecto)- cambio climático o variaciones climáticas que ocurre en el sistema



Changes in Solar Inputs

**Changes in the Atmosphere:
Composition, Circulation**

Changes in the Hydrological Cycle

Atmosphere

Clouds

**N₂, O₂, Ar,
H₂O, CO₂, CH₄, N₂O, O₃, etc.
Aerosols**

Volcanic Activity

Atmosphere-Biosphere Interaction

Atmosphere-Ice Interaction

Precipitation Evaporation

Heat Exchange

Wind Stress

Terrestrial Radiation

Human Influences

Glacier

Ice Sheet

Biosphere

Land-Atmosphere Interaction

Sea Ice

**Hydrosphere:
Ocean**

Soil-Biosphere Interaction

Land Surface

Ice-Ocean Coupling

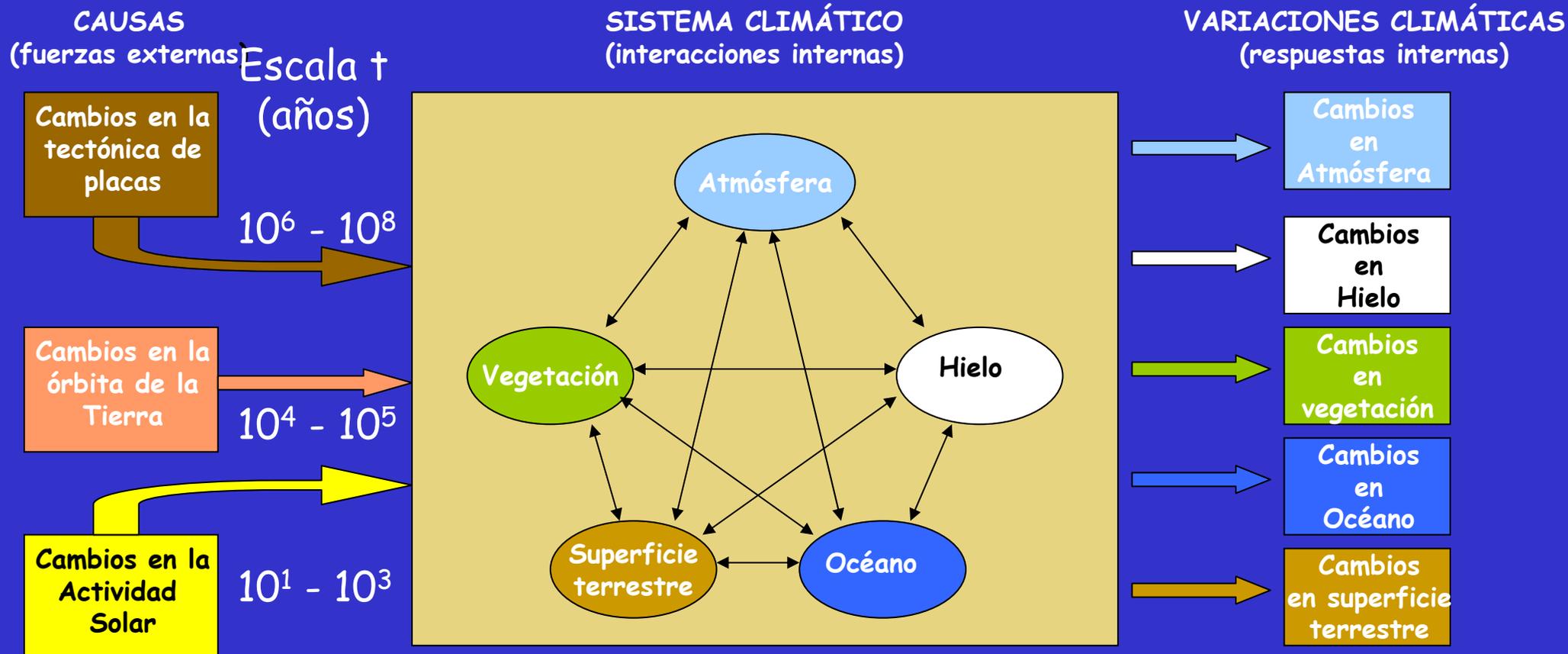
**Hydrosphere:
Rivers & Lakes**

**Changes in the Cryosphere:
Snow, Frozen Ground, Sea Ice, Ice Sheets, Glaciers**

**Changes in the Ocean:
Circulation, Sea Level, Biogeochemistry**

**Changes in/on the Land Surface:
Orography, Land Use, Vegetation, Ecosystems**

Forzamientos externos e interacciones del Sistema Climático



Forzamientos externos: variable de control del clima cuya evolución es independiente del estado o evolución del clima

Variables climáticas (mismo o distinto subsistema): variables en interacción mutua que se modifican con el estado o evolución del clima. En sistemas no lineales su influencia es variable y puede afectar en diferentes grados y direcciones

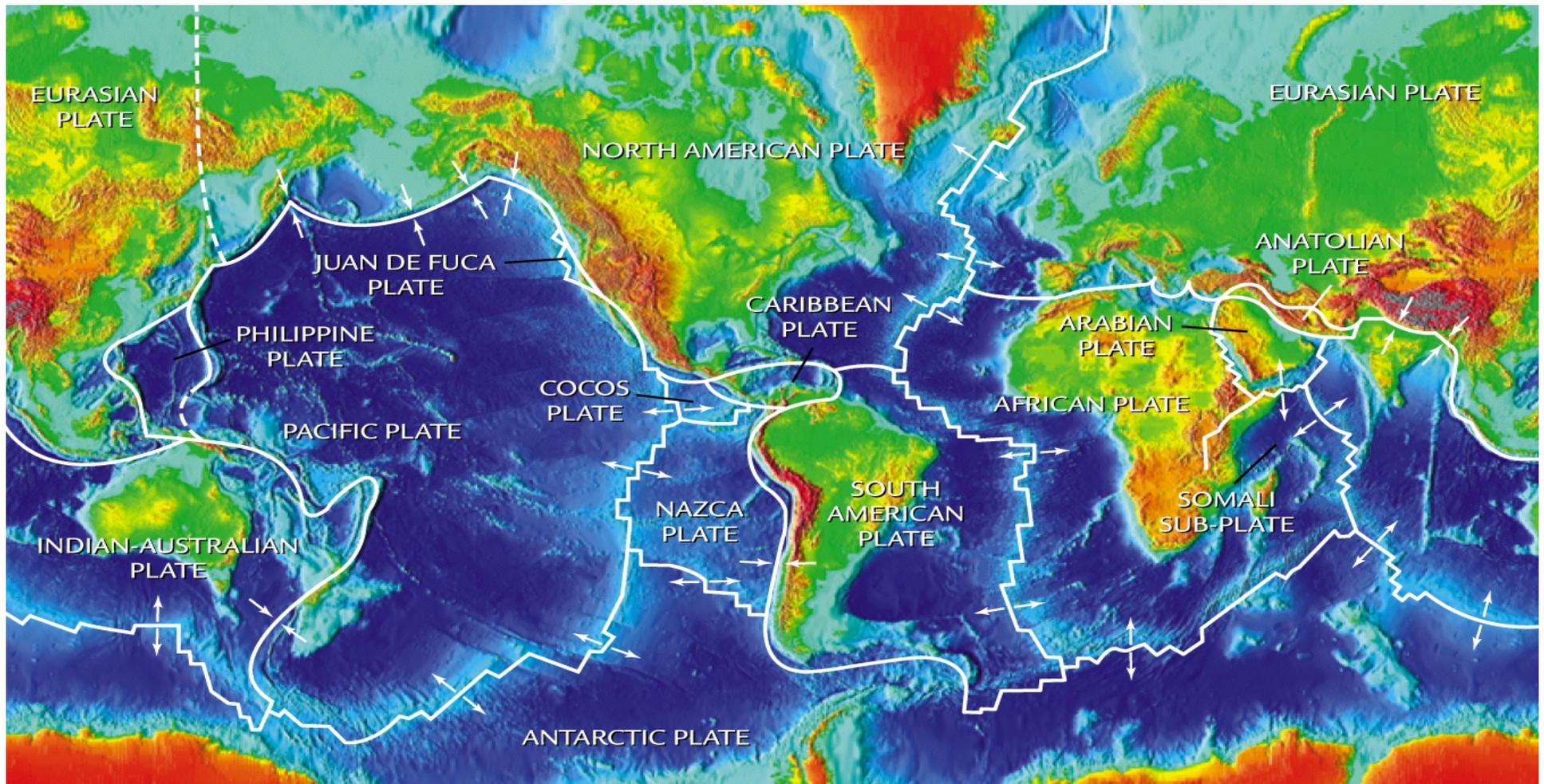
Forzamiento climático

- Procesos Tectónicos
 - Movimientos lentos de placas que afectan al clima muy lentamente
 - Influyen a escalas de tiempo 10^6 - 10^8 años

Tectónica de placas y Clima

- Posición de los continentes, emisión volcánica de CO_2 y elevación continental

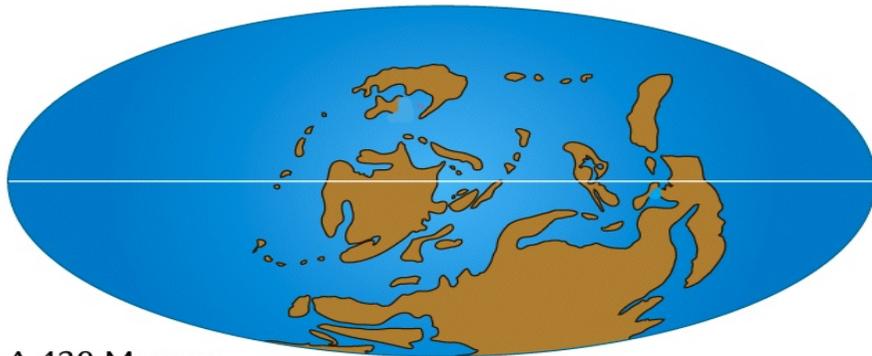
Pres and Siever, 1998



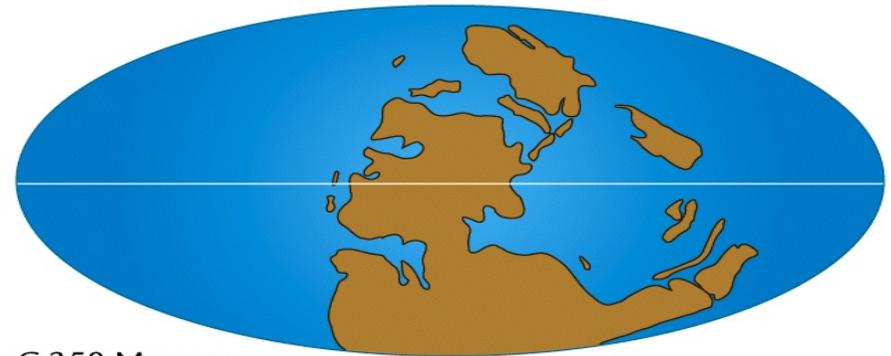
Topografía en falso color de Peter Schloss, NGDC, Boulder, Co

Posición Polar de los continentes

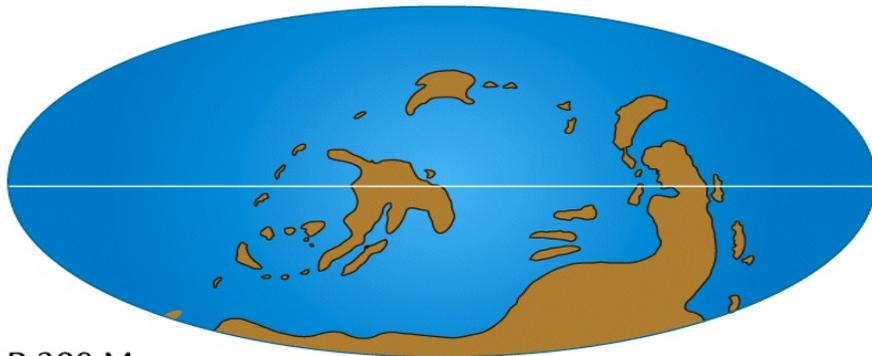
- La formación de Gondwana trasladó una extensa masa continental a través del Polo Sur
 - ¿Se desarrollaron Casquetes glaciares?



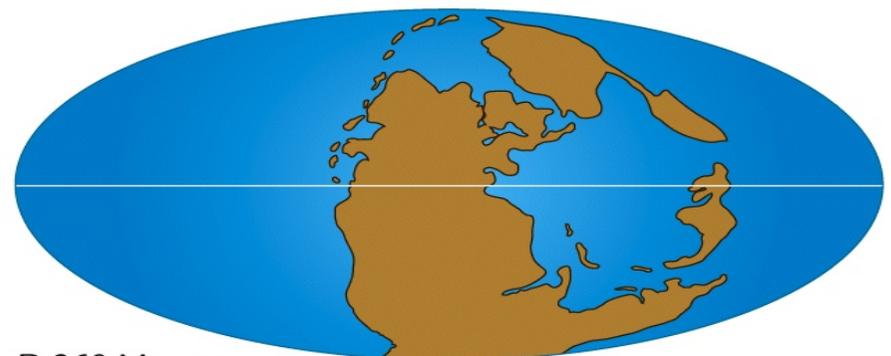
A 420 Myr ago



C 350 Myr ago



B 390 Myr ago



D 260 Myr ago

Stanley, 1999

Posición Polar y Casquetes de Hielo

- Partes de Gondwana se posicionaron sobre el Polo Sur durante ~100 my
- Existen evidencias de glaciaciones
- Las glaciaciones del Ordovícico (~430 my) duraron menos de 10 my y probablemente menos de 1 my



Hipótesis de la Posición Polar

- Presencia de los continentes en posiciones polares... ¿garantiza las glaciaciones?
- Testificar esta hipótesis requiere una buena preservación de los depósitos
- Otros factores que regulan el clima entran en juego a escala de tiempo tectónico-geológico

TABLE 5-1 Evaluation of the Polar Position Hypothesis of Glaciation

Time (Myr ago)	Ice sheets present?	Continents in polar position?	Hypothesis supported?
430	Yes	Yes	Yes
425–325	No	Yes	No
325–240	Yes	Yes	Yes
240–125	No	No	Yes
125–35	No	Yes	No
35–0	Yes	Yes	Yes

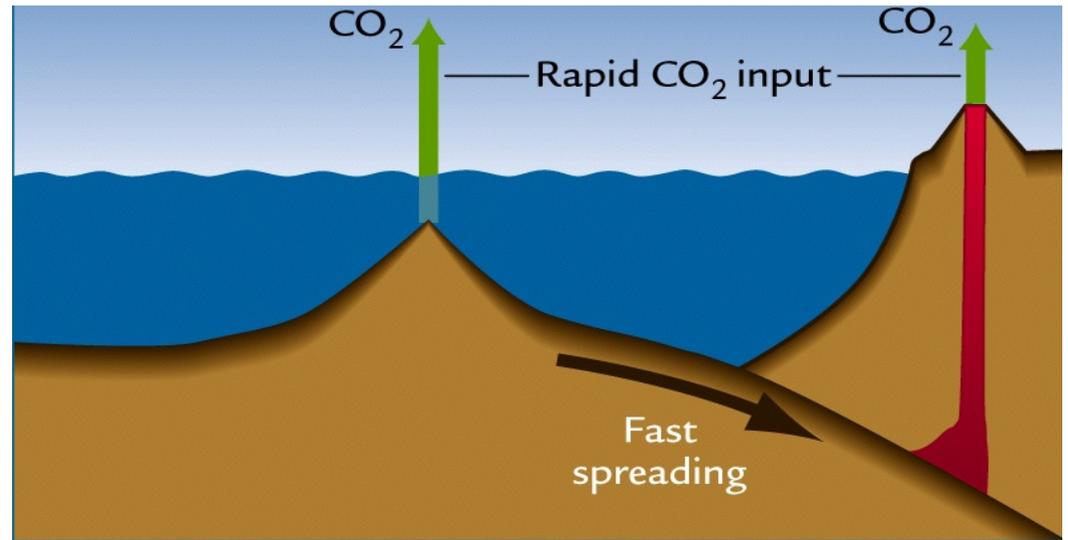
Cambios en CO_2 Atmosférico

- La posición Polar no explica las variaciones del clima durante los últimos 500 my
- Los cambios en CO_2 atmosférico jugaron un papel importante
 - Modelo de BLAG
 - Clima afectado por cambios en CO_2 que se deben a las emisiones procedentes de los fondos marinos como consecuencia de la deriva continental
 - Modelos de T. C. Chamberlain ó Raymo/Ruddiman
 - Clima afectado por los cambios en la tasa de levantamiento de los continentes y de la meteorización (sumidero de CO_2 en océanos)

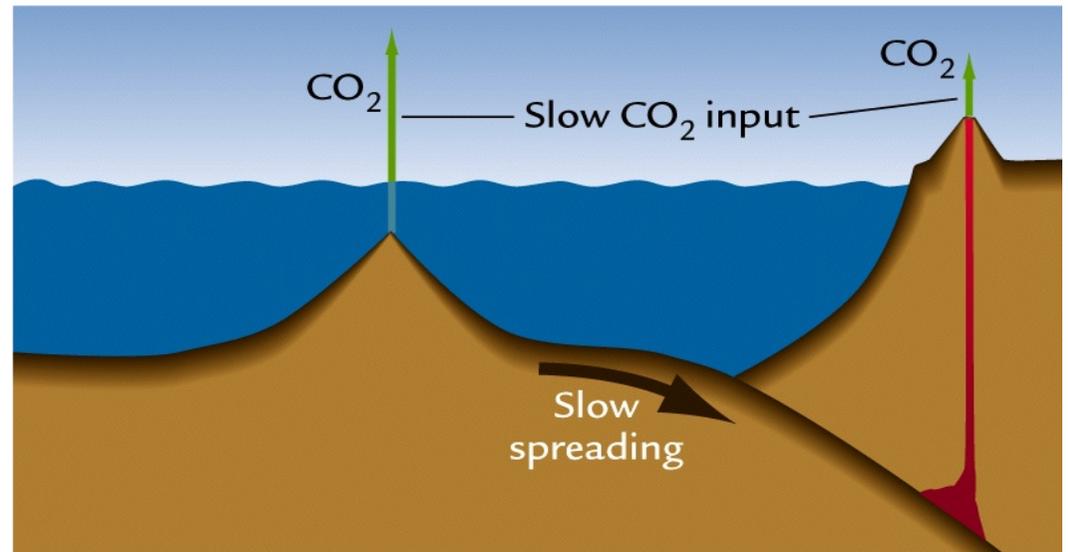
Modelo de BLAG

- La tasa de media global de propagación del fondo marino
 - Controla las emisiones de CO_2 a la atmósfera
 - Inyección directa de magma
 - Los cambios en CO_2 atmosférico controlan el clima

Ruddiman, 2008



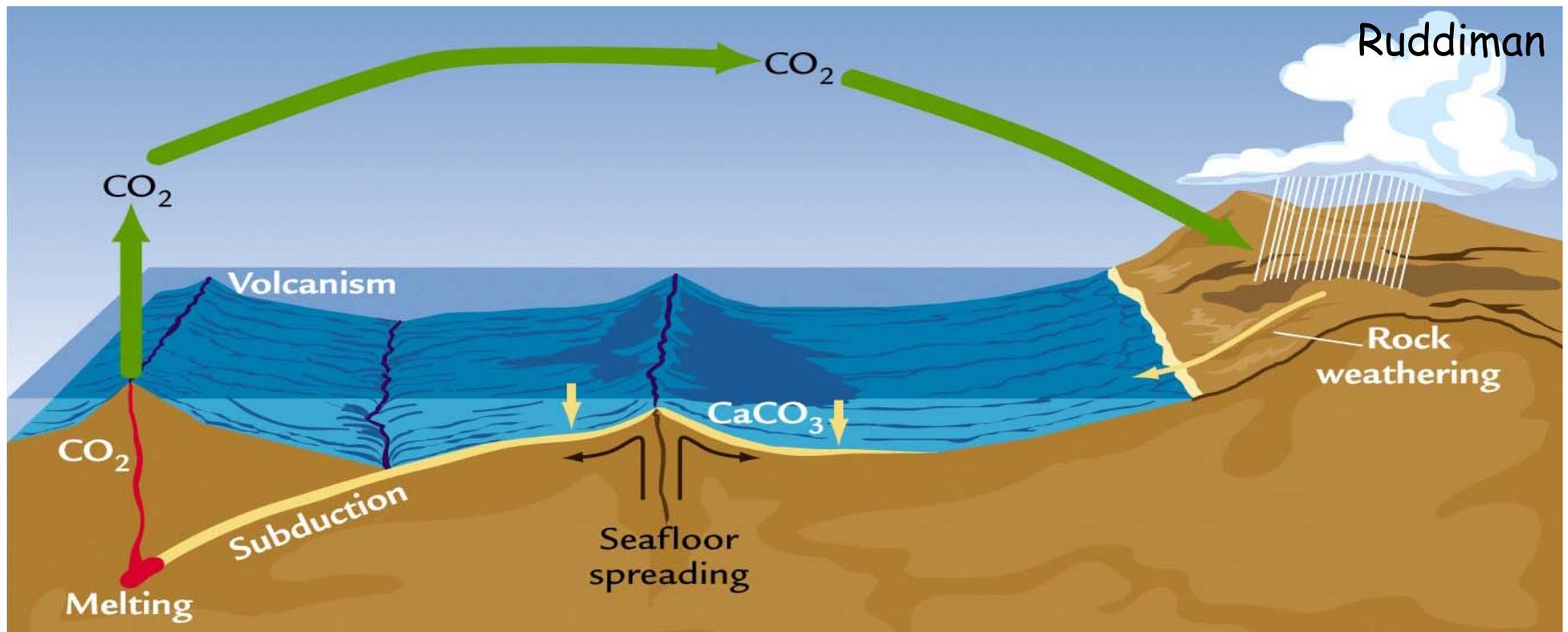
A



B

Reciclado de Carbono

- Los ciclos de carbono (no biológico) se produce de forma continua entre los reservorios en roca y la atmósfera
 - El CO_2 de la atmósfera se reduce durante los procesos de meteorización química, se deposita en los sedimentos oceánicos, que se subducen y vuelven a la atmósfera a través del vulcanismo

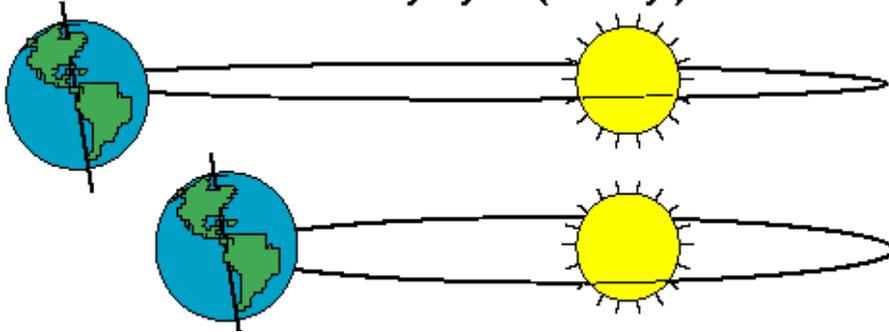


Forzamiento climático

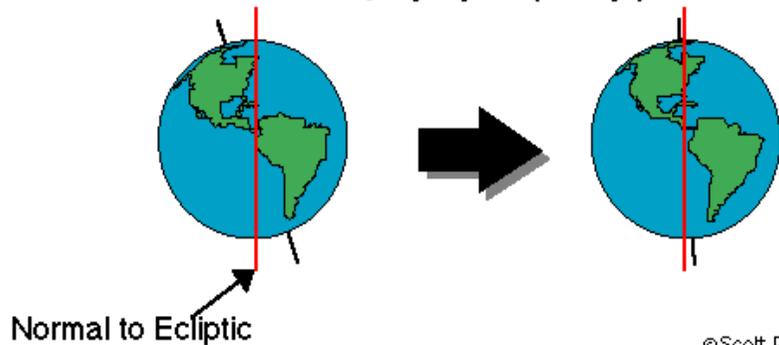
- Cambios Orbitales terrestres
 - Variaciones en la órbita terrestre alrededor del Sol y que afectan a la cantidad de radiación solar recibida por la superficie de la Tierra.
 - Son los conocidos ciclos de Milankovitch en relación con la precesión, oblicuidad del eje de rotación y el doble ciclo de la órbita.
 - Los cambios orbitales presentan ciclicidades de entre decenas a cientos de miles de años.

Cambios a escala orbital en los registros climáticos (Ciclos de Milankovitch)

Eccentricity Cycle (100 k.y.)

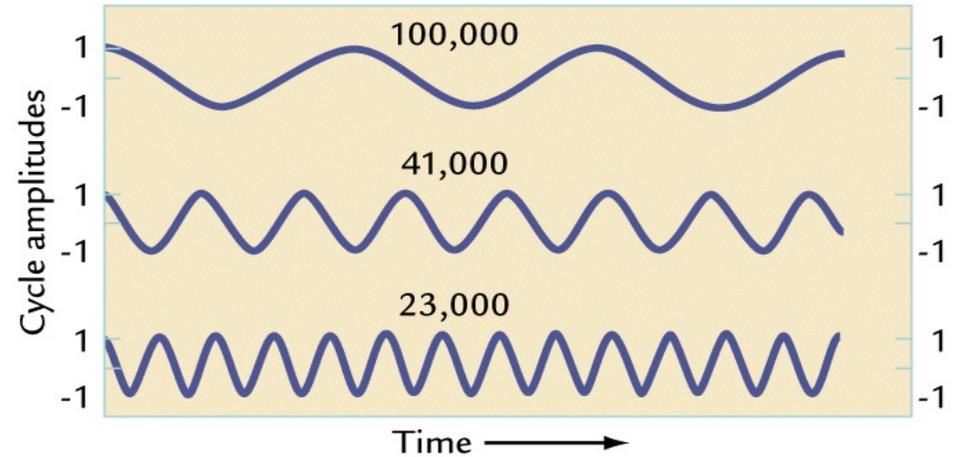
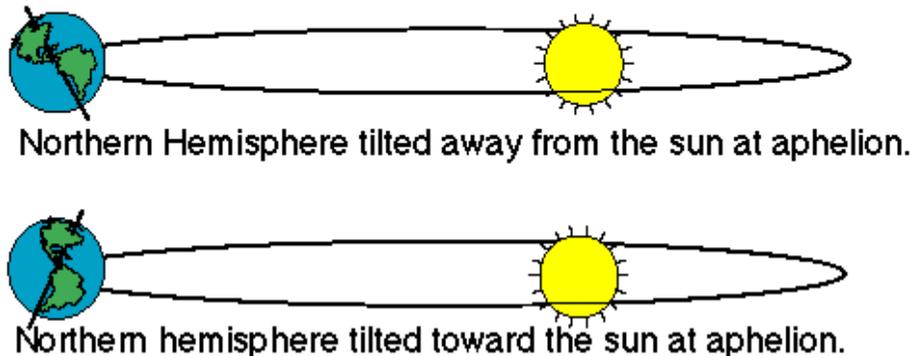


Obliquity Cycle (41 k.y.)

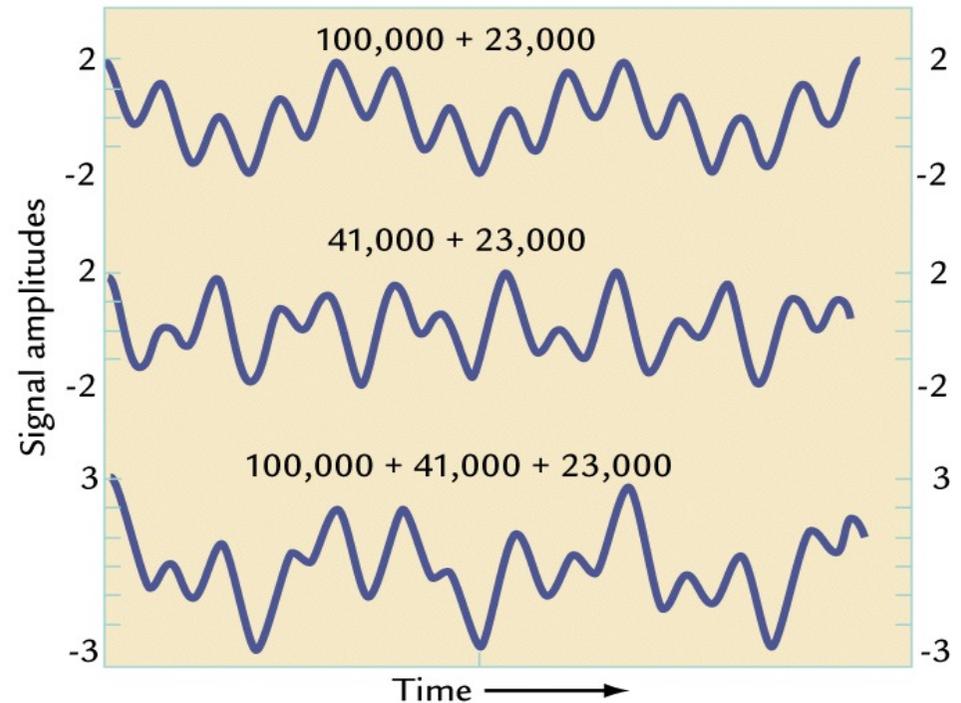


©Scott Rutherford (1997)

Precession of the Equinoxes (19 and 23 k.y.)

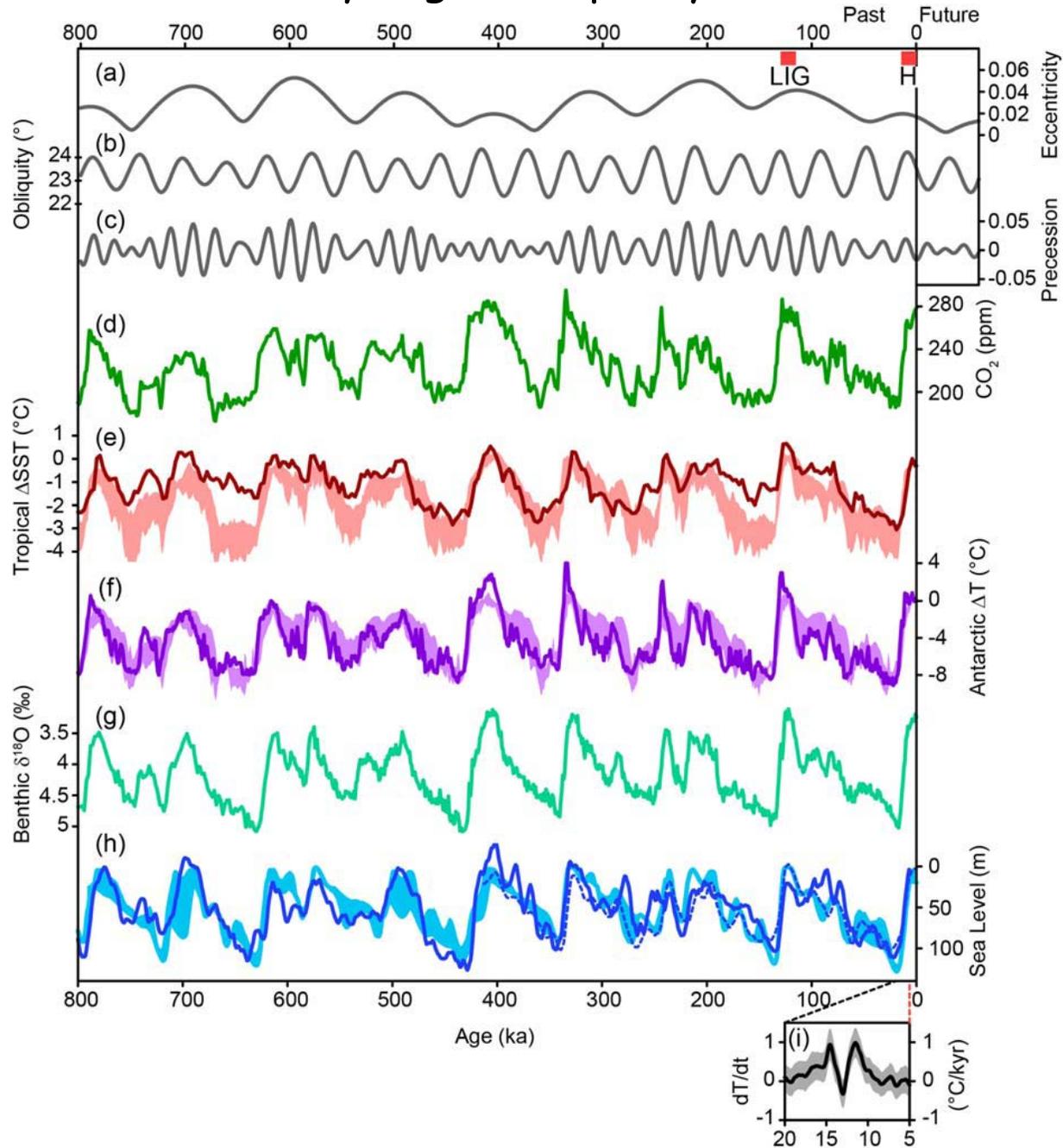


A Individual sine-wave cycles



B Combination of cycles

Parámetros orbitales y registros proxy durante los últimos 800 kyr

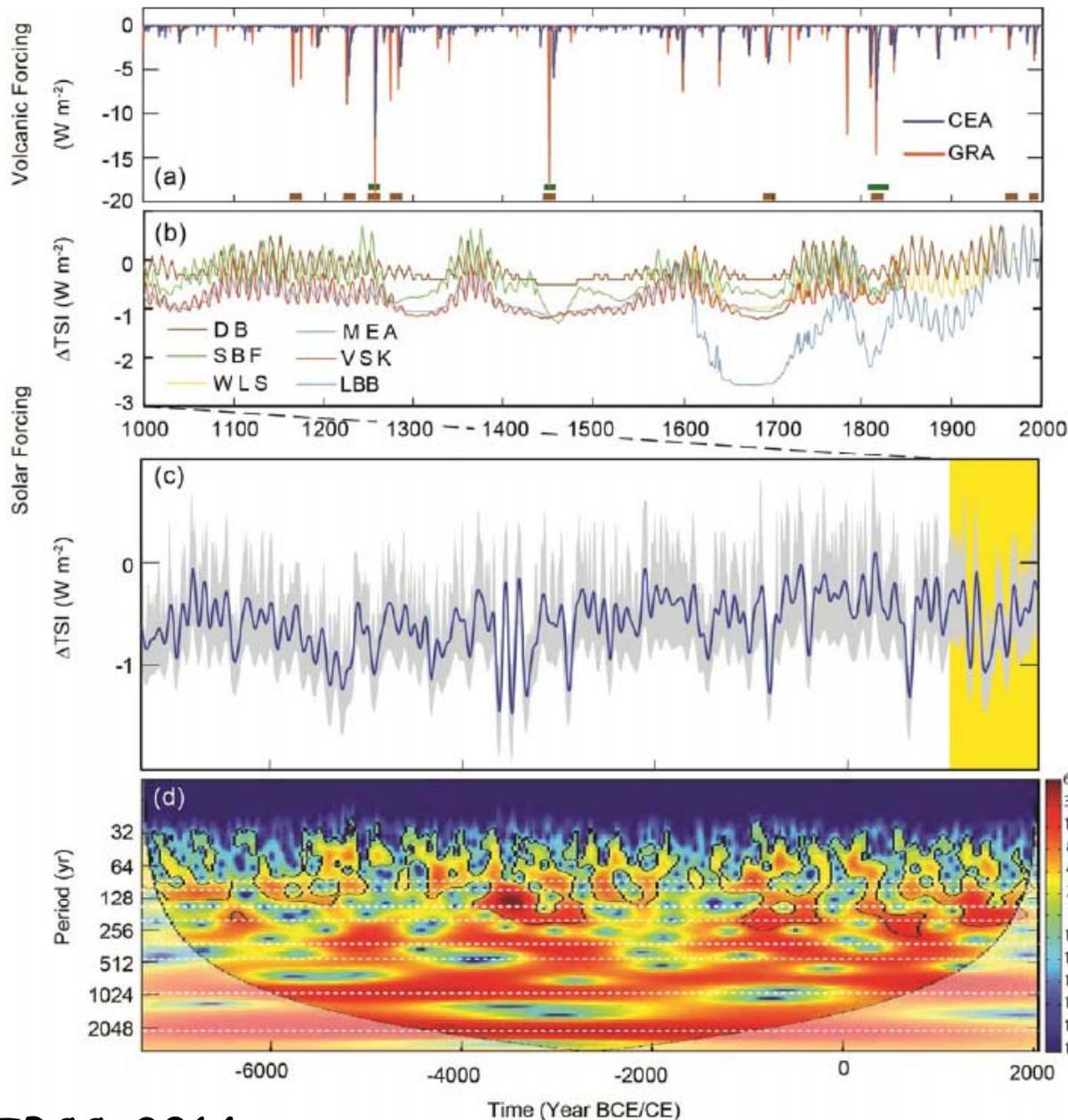


IPCC, 2014

Forzamiento climático

- Cambios en la constante solar o potencia radiante emitida por el Sol que intercepta la Tierra
 - Esta irradiancia solar no es constante.
 - Afectan a escalas de tiempo de entre cientos de millones de años a periodos cortos de entre decenas y miles de años.
 - Se han observado ciclos de 11 y 22 años en la irradiancia solar. Evidencias de ciclos más largos de 150-200 años (PEH).

Variaciones pasadas de forzamientos climáticos externos (WGI, 5AR IPCC, 2014)



(Schmidt et al., 2011).
GRA: (Gao et al., 2012);
CEA: (Crowley & Unterman, 2013)

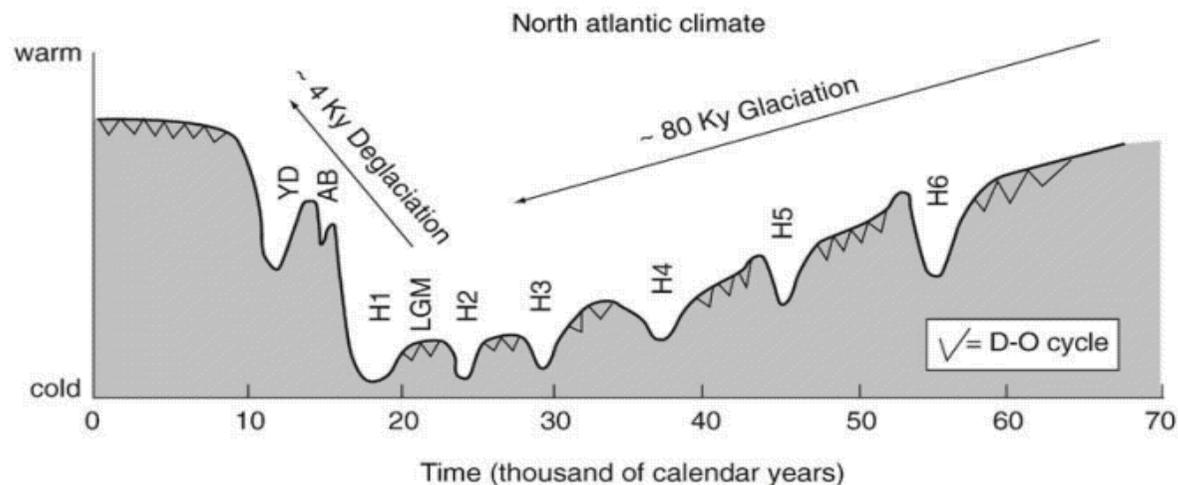
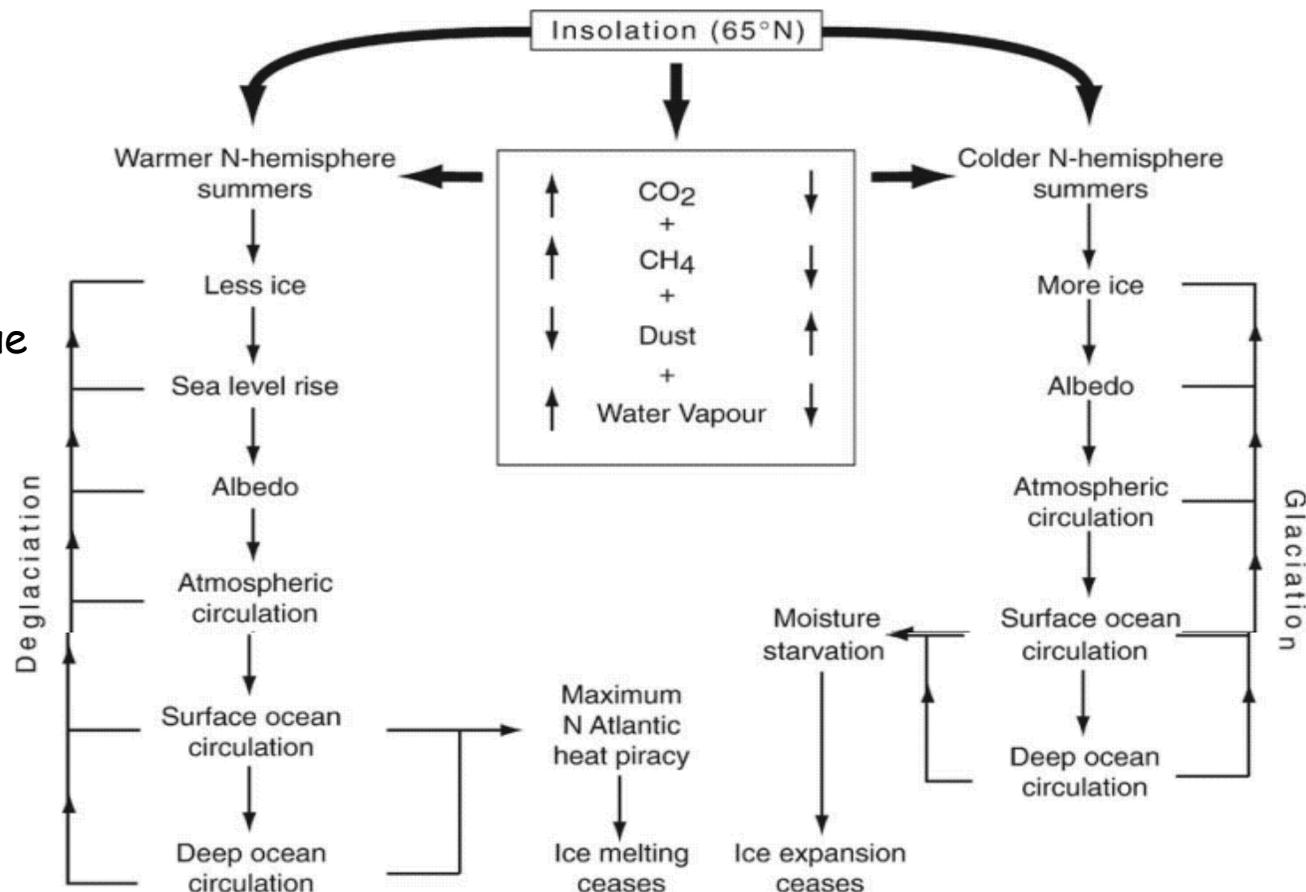
Lean et al., 1995b

Steinhilber et al., 2009

Anomalías relativas al valor medio del periodo 1976-2006 ($1366.14 W m^{-2}$) de Wang et al. (2005).

Transformada Wavelet (Torrence and Compo, 1998) de las anomalías de TSI del panel c. Líneas blancas indican las periodicidades (Stuiver and Braziunas, 1993).

Mecanismos de retroalimentación forzados por insolación a 65°N que conducen a la glaciación y deglaciación. H: Heinrich events, LGM: Último Máximo Glaciar, AB interstadial Allerod Bolling; YD estadal Younger Dryas y D-O Ciclos Dansgaard-Oeschger. Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments

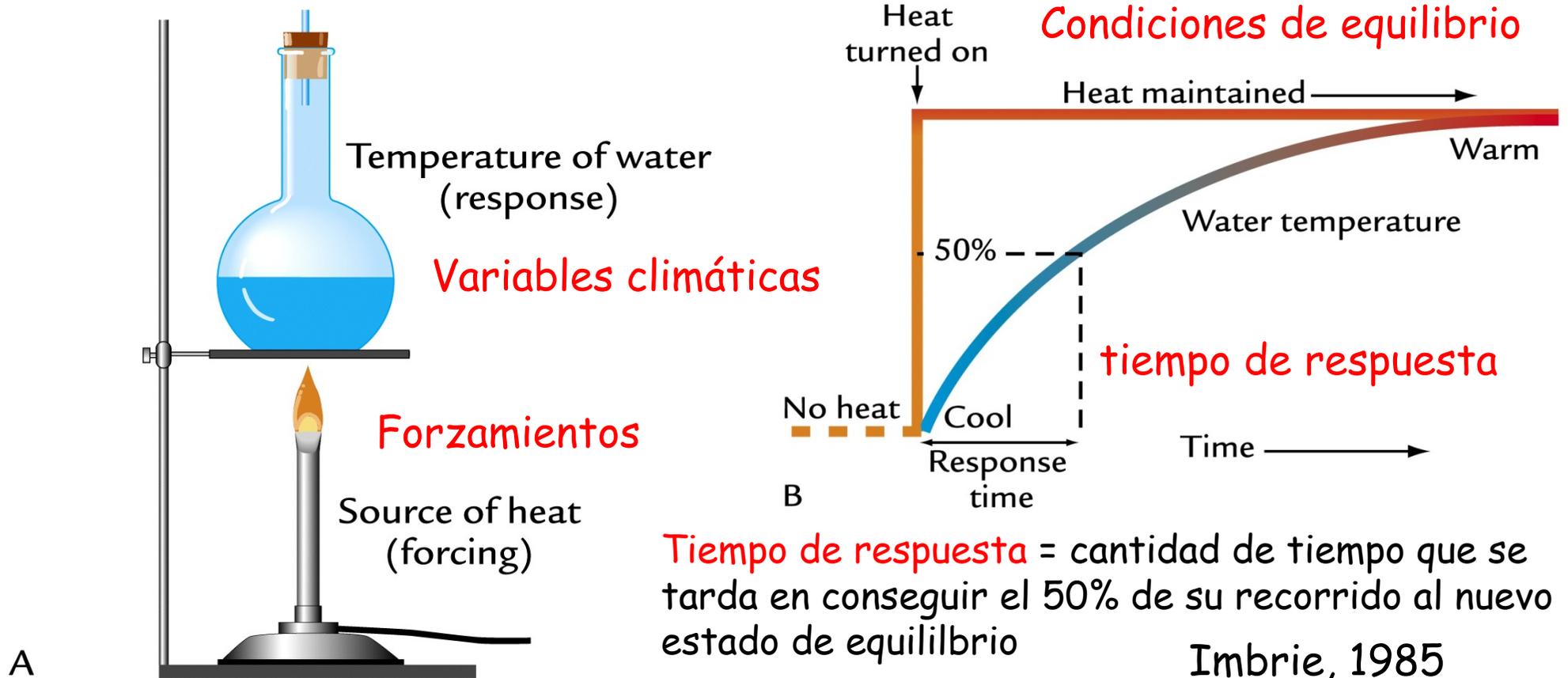


Forzamiento climático

- Forzamiento antropogénico
 - No forma parte del sistema climático natural
 - Se refiere a los efectos de las actividades humanas en el clima (e.g. agricultura, industria, transporte, etc)
 - Ejemplo: además de la emisión de gases a la atmósfera (CO_2 , N_2O , etc.), partículas de sulfato y carbono negro (hollín) procedentes de la quema del carbón y el petróleo y que dispersan la radiación

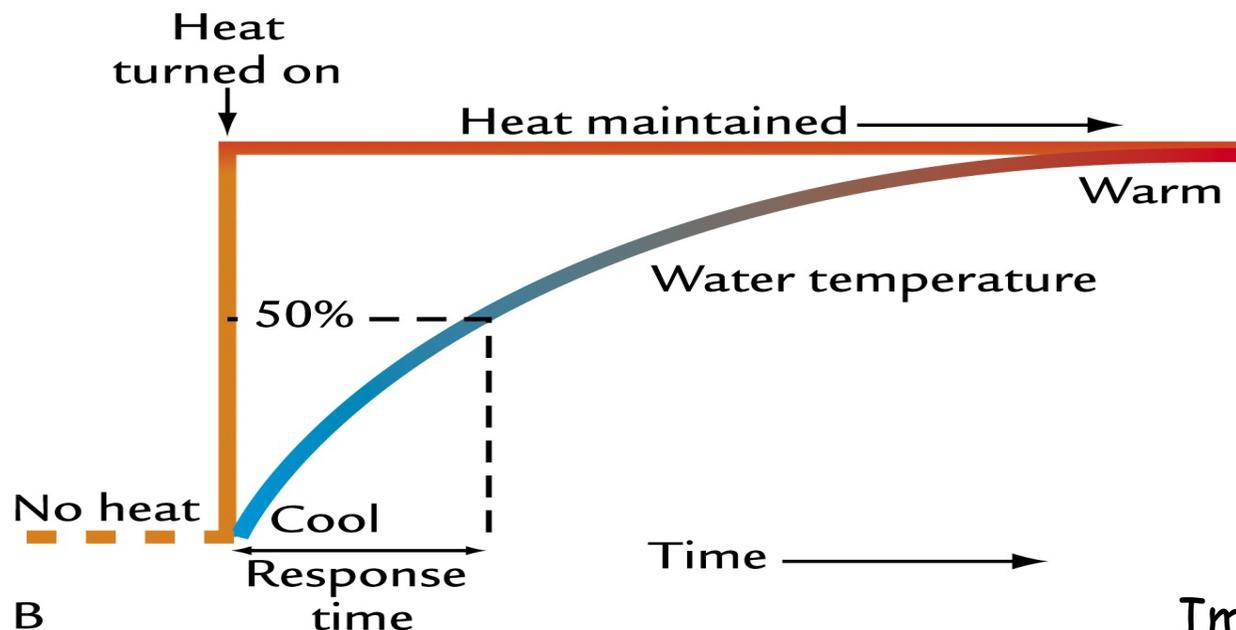
Tiempos de respuesta

- Tiempo de demora del sistema climático en reaccionar a un cambio en un forzamiento (tiempo de reacción)



Tiempo de respuesta

- Curva de respuesta exponencial
 - En el tiempo de respuesta el sistema se mueve a la mitad de su recorrido al estado de equilibrio
- La cantidad absoluta de cambio disminuye a lo largo del tiempo sin embargo la proporción (tasa) del cambio hasta alcanzar el estado de equilibrio es constante



Imbrie, 1985

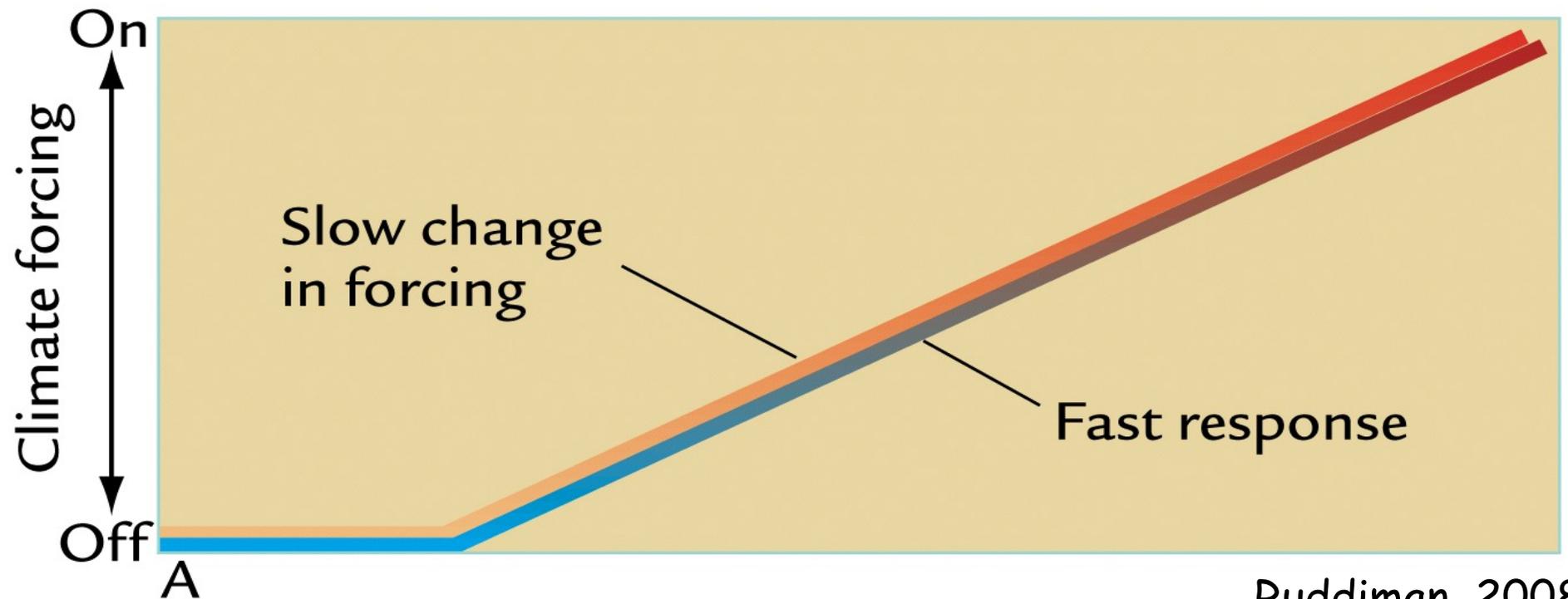
TABLE 1.1 Response Times of Various Climate System Components

Component	Response time (range)	Example
Fast responses		
Atmosphere	Hours to weeks	Daily heating and cooling Gradual buildup of heat wave
Land surface	Hours to months	Daily heating of upper ground surface Midwinter freezing and thawing
Ocean surface	Days to months	Afternoon heating of upper few feet Warmest beach temperatures late in summer
Vegetation	Hours to decades/centuries	Sudden leaf kill by frost Slow growth of trees to maturity
Sea ice	Weeks to years	Late-winter maximum extent Historical changes near Iceland
Slow responses		
Mountain glaciers	10–100 years	Widespread glacier retreat in 20th century
Deep ocean	100–1500 years	Time to replace world's deep water
Ice sheets	100–10,000 years	Advances/retreats of ice sheet margins Growth/decay of entire ice sheet

Ruddiman, 2008

Escala de tiempo: forzamientos vs. Respuesta

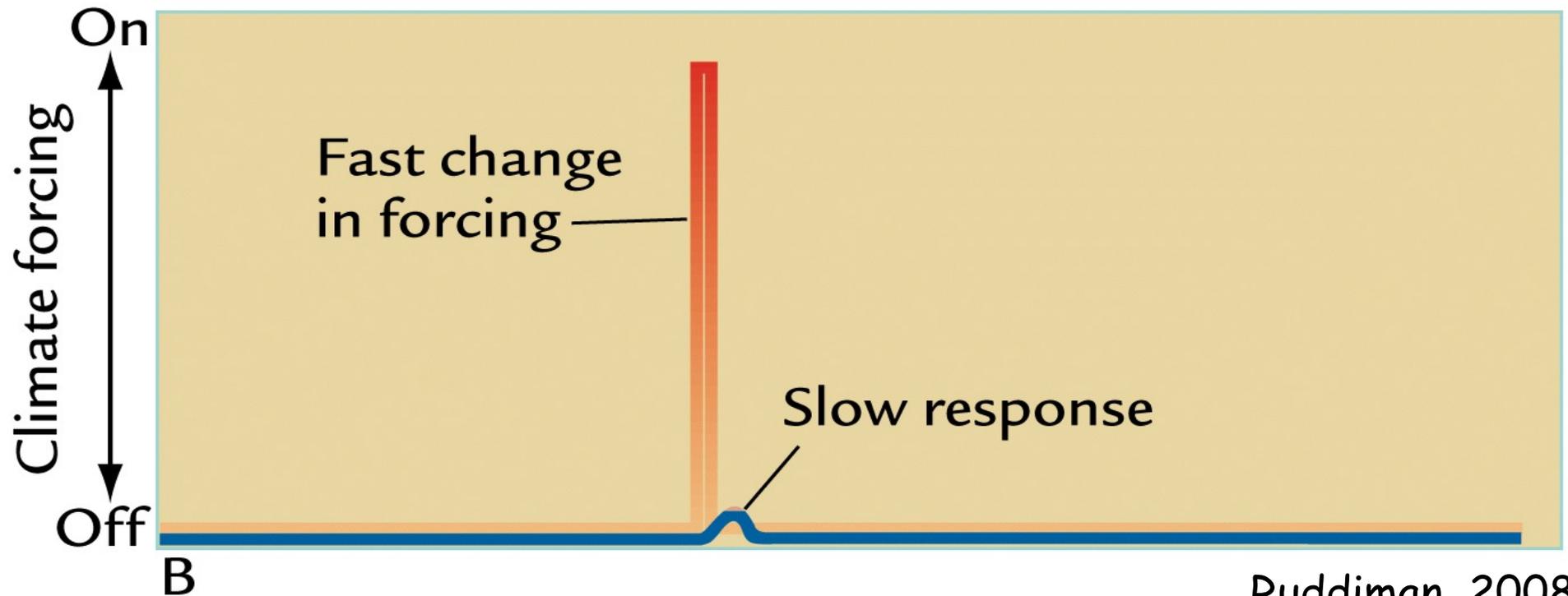
- Forzamiento lento comparado con la respuesta del clima
 - Sistema climático guía al forzamiento (sin tiempo de demora)
 - Típico del cambio climático asociado a forzamiento tectónico



Ruddiman, 2008

Escala de tiempo: forzamientos vs. Respuesta

- Forzamiento es rápido comparado con la respuesta
 - Pequeña respuesta al forzamiento climático
 - Típico de eventos estocásticos breves (e.g. erupción volcánica)



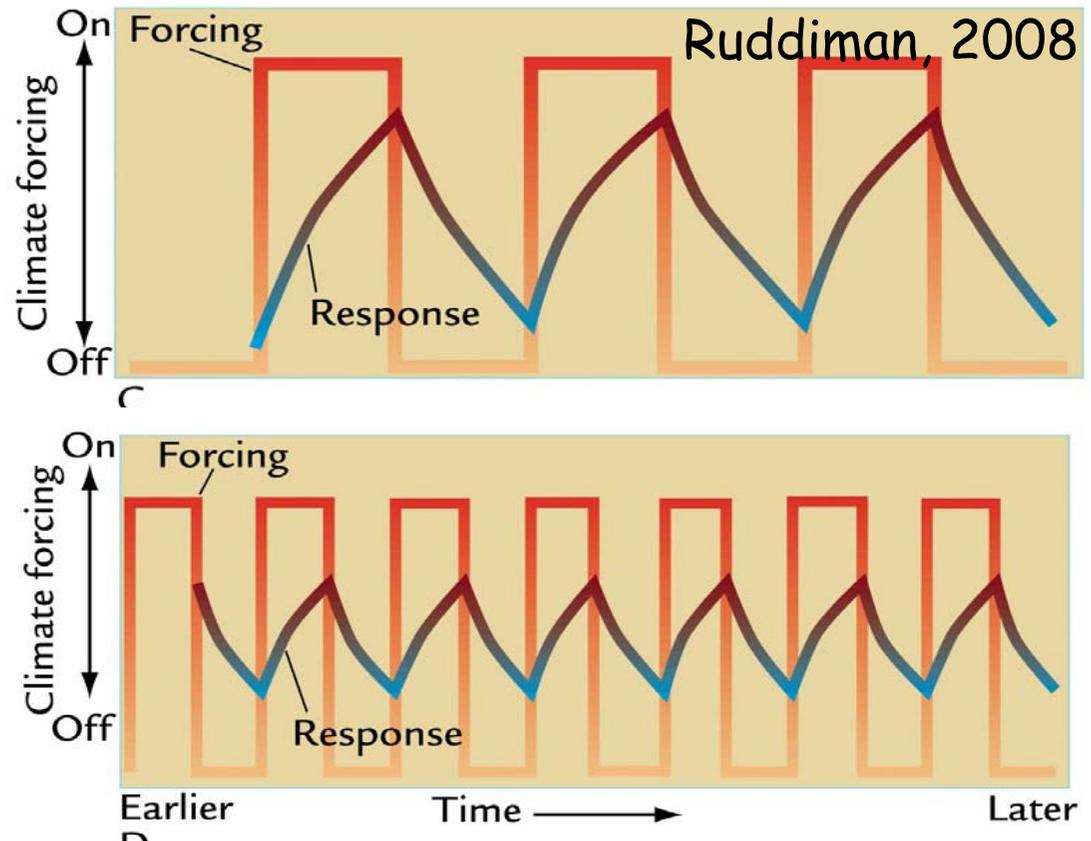
Escala de tiempo:

forzamientos vs. Respuesta

- Escala de tiempo del forzamiento = tiempo de respuesta
- Proporciona una respuesta realista y dinámica

Frecuencia del forzamiento tiene un efecto directo en la magnitud de la respuesta

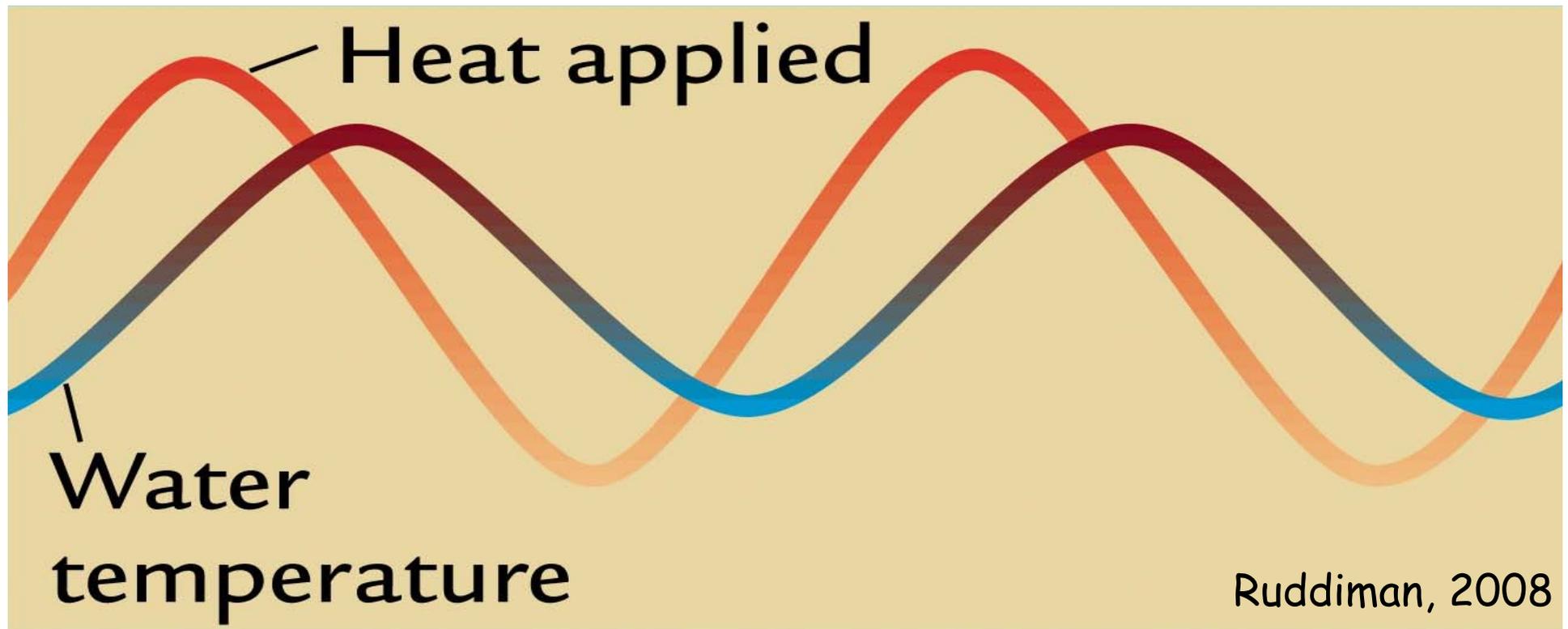
La escala de tiempo del forzamiento no es lo suficientemente larga como para permitir alcanzar el estado de equilibrio



Forzamiento cíclico y Respuesta

- Forzamiento natural del clima puede variar de forma cíclica produciendo una respuesta cíclica
- Igual tiempo de respuesta; cambio en el forzamiento → tiempo de respuesta diferente

Irradiancia solar: ciclos día-noche; estacionales

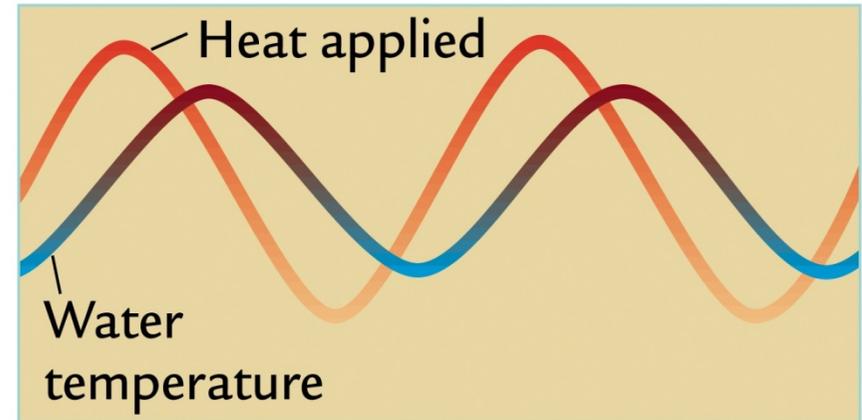


Forzamiento cíclico y respuesta

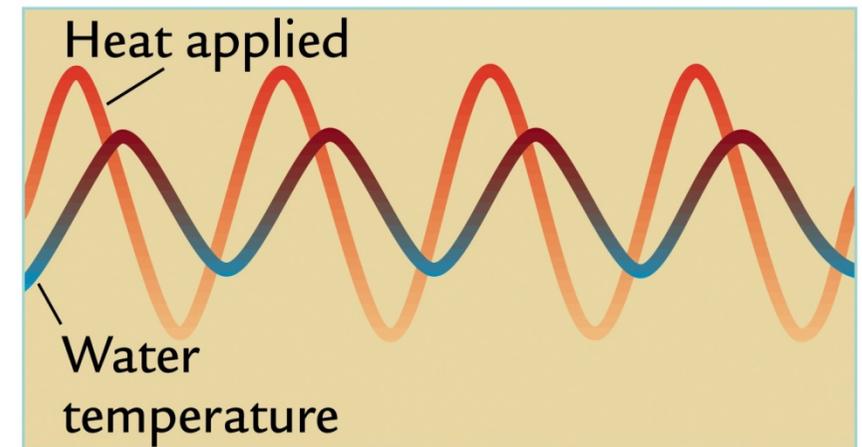
- Dado que el forzamiento está cambiando constantemente, el valor de equilibrio del sistema también cambia
 - Valores de equilibrio establecidos por la tasa y dirección del cambio en el forzamiento
- Independientemente de la tasa de cambio del forzamiento
 - La tasa de respuesta del sistema es más rápida cuando el sistema está más alejado del equilibrio.

Forzamiento cíclico y respuesta

- La frecuencia del forzamiento afecta a la amplitud de la respuesta
 - Ciclos más lentos producen una respuesta más larga - existe mas tiempo para reaccionar
 - Ciclos más rápidos producen una respuesta menor - menos tiempo para reaccionar



A



B

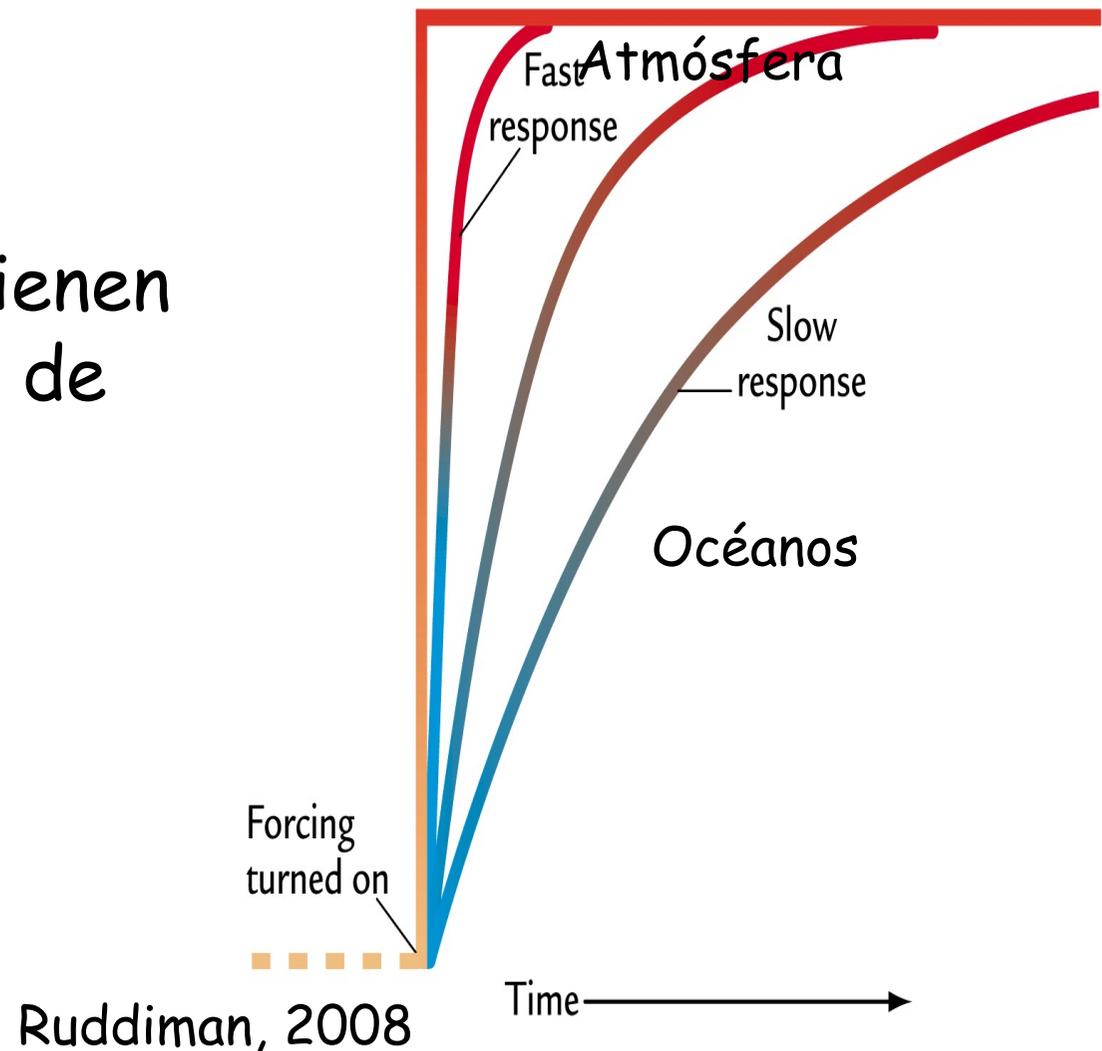
Time →

Forzamiento cíclico y respuesta

- Forzamientos cíclicos y respuesta típica de los ciclos orbitales de Milankovitch
 - Cambios de la radiación solar que recibe la Tierra debida a que la órbita terrestre varía cíclicamente en periodos de decenas de miles de años.
 - Tiempo de respuesta de los grandes casquetes polares también cambian con una ciclicidad de decenas de miles de años.

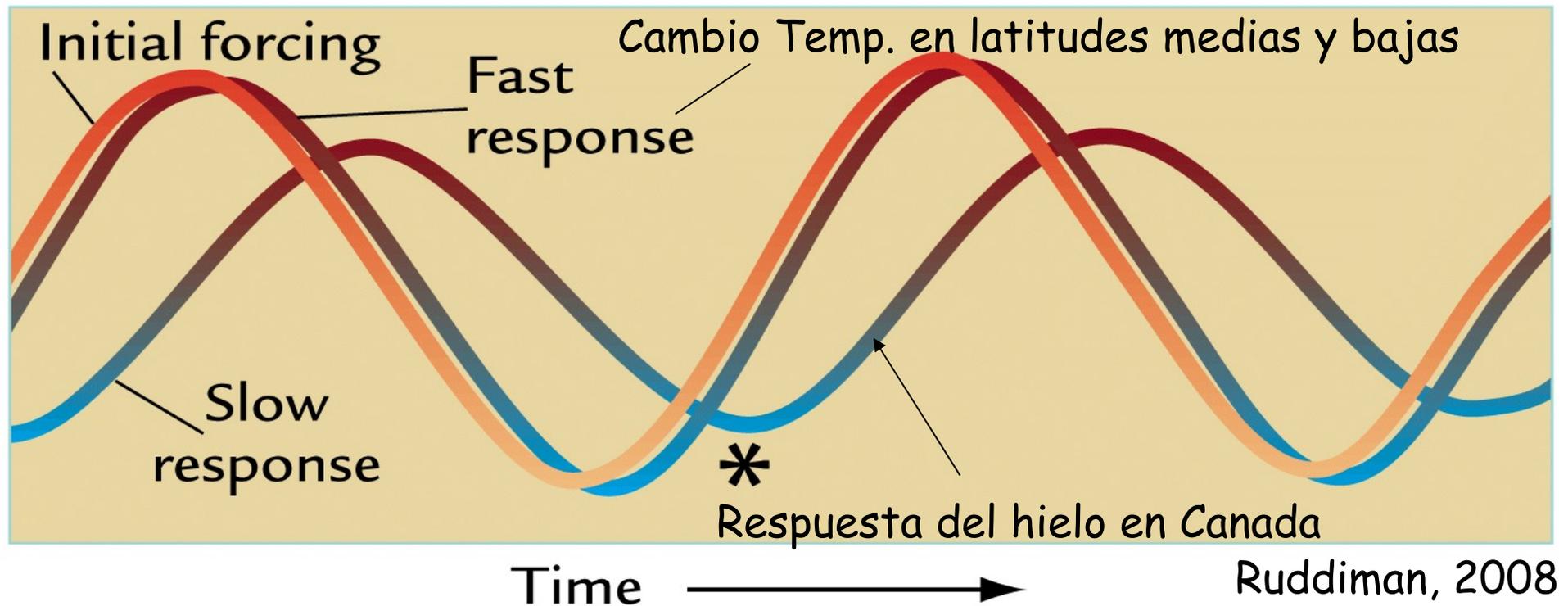
Tasas de respuesta e interacciones

- Diferentes componentes del sistema climático tienen diferentes tiempos de respuesta
 - Los diferentes componentes responderán a los cambios de los forzamientos con diferentes tasas

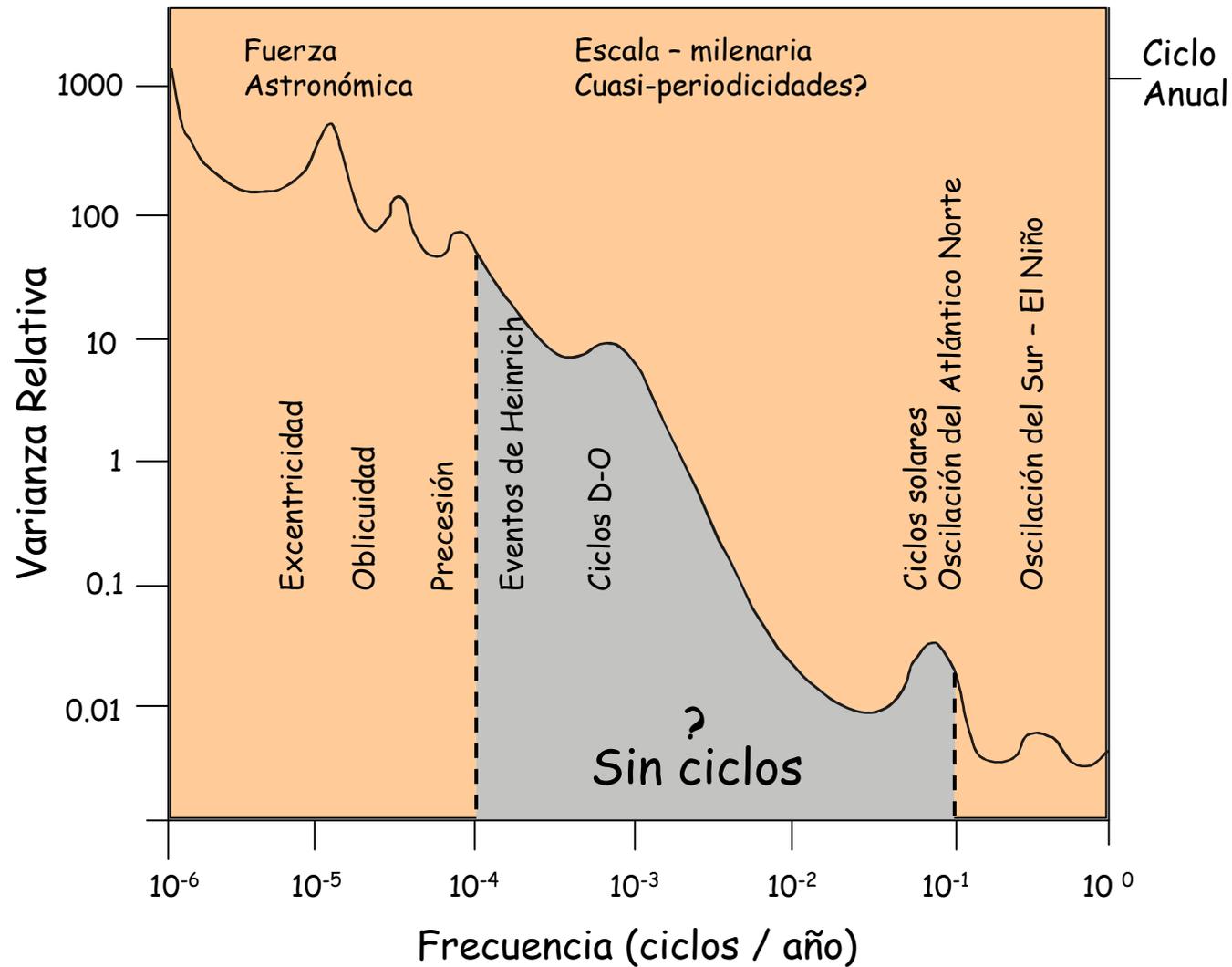


Tasas de respuesta e interacciones

- Si los forzamientos del clima varían de forma cíclica, también se producirán diferentes respuestas cíclicas en el sistema climático.
 - Respuesta rápida guía al forzamiento
 - Respuesta lenta se demora respecto al cambio en el forzamiento

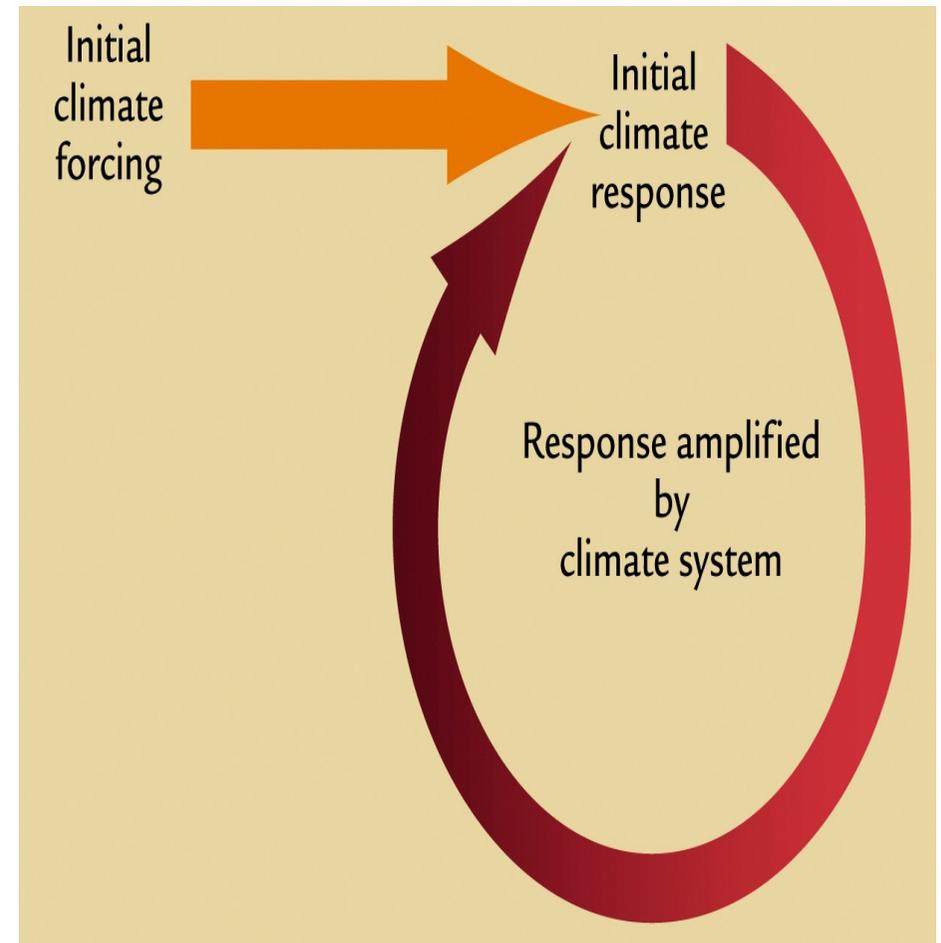


Espectro de varianzas en la temperatura



Retroalimentaciones en el Sistema Climático

- Las interacciones pueden producir una retroalimentación
 - Retroalimentación o retroacción (feedback) positivo: produce respuesta adicional a la desencadenada por forzamiento inducido inicialmente.
 - Amplifica los cambios

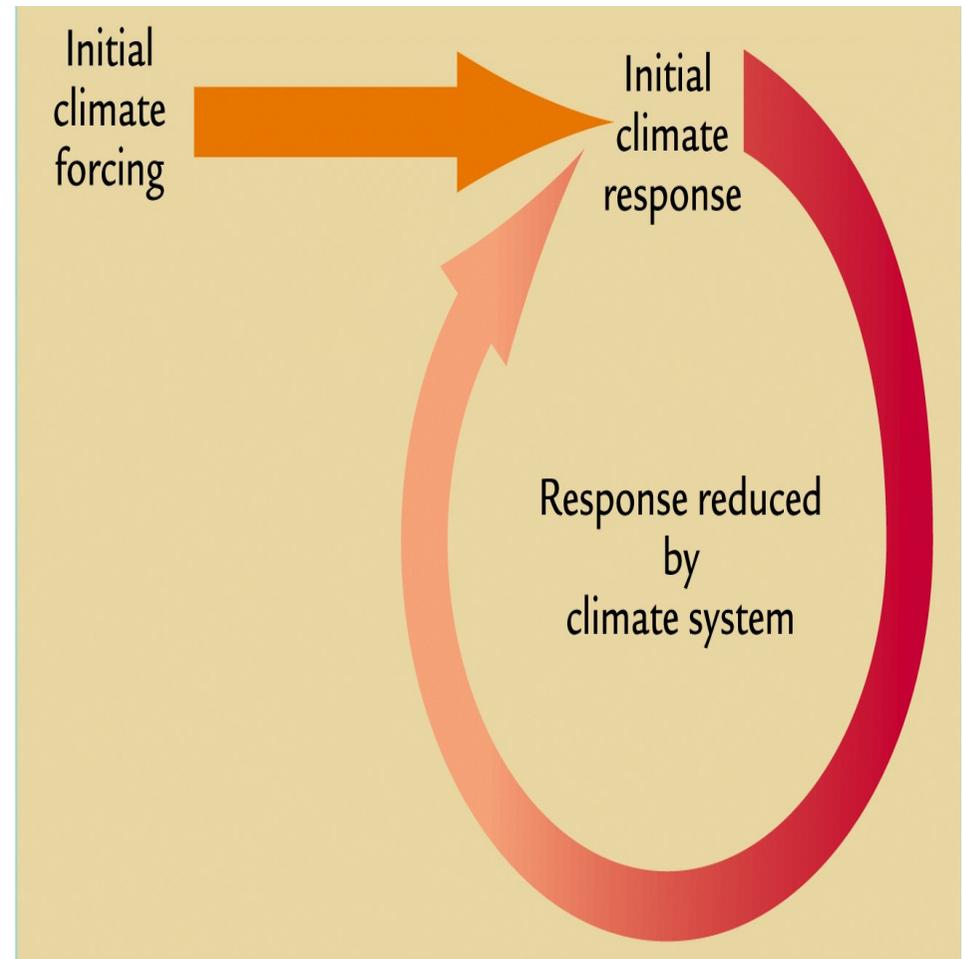


A Positive feedback

Ruddiman, 2008

Retroalimentaciones en el Sistema Climático

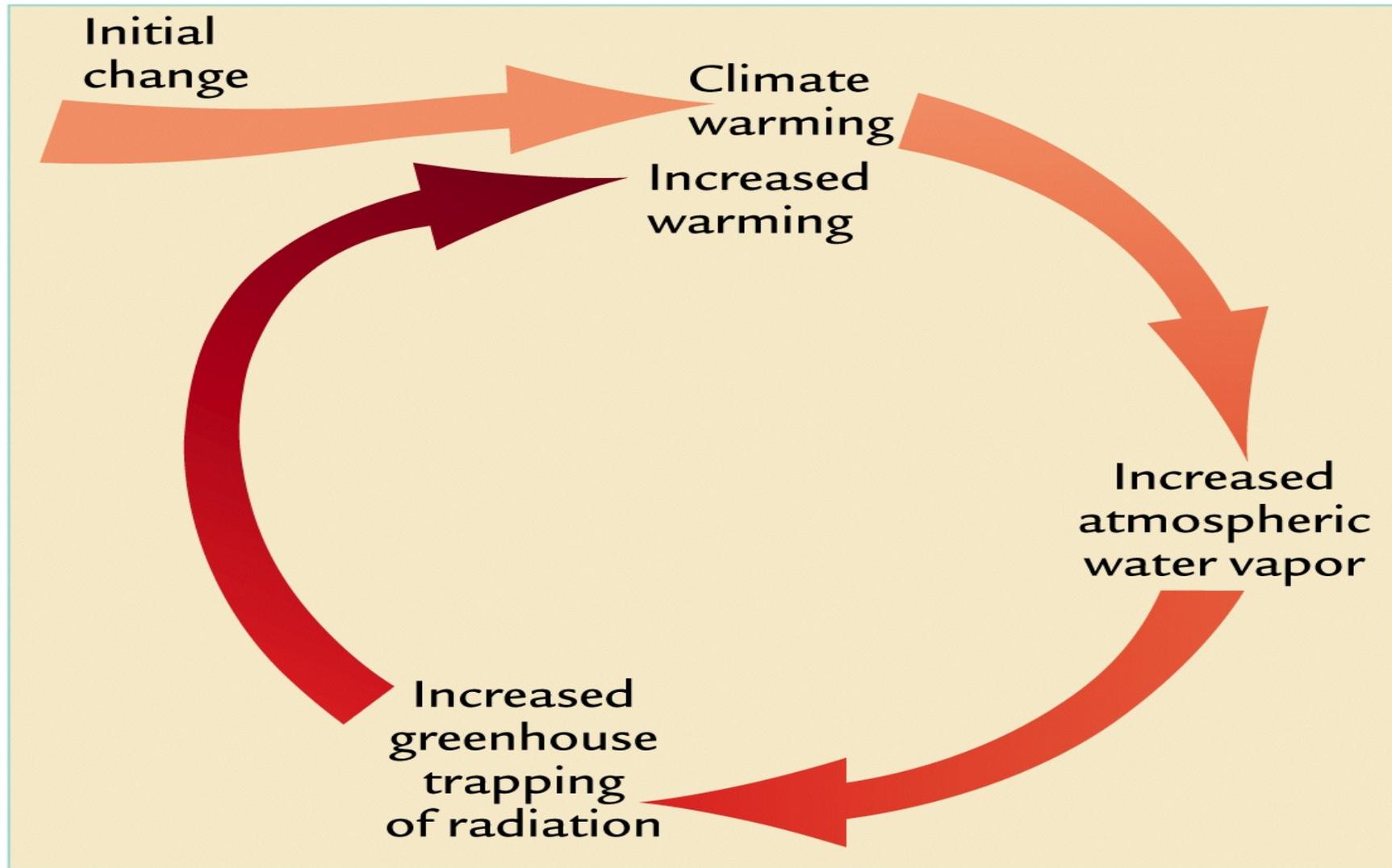
- Las interacciones en el sistema pueden generar una retroalimentación negativa
 - Retroalimentación negativa: reduce la respuesta que habría causado el forzamiento.
 - Suprime o atenúa el cambio climático



B Negative feedback

Ruddiman, 2008

Retroacción del Vapor de Agua

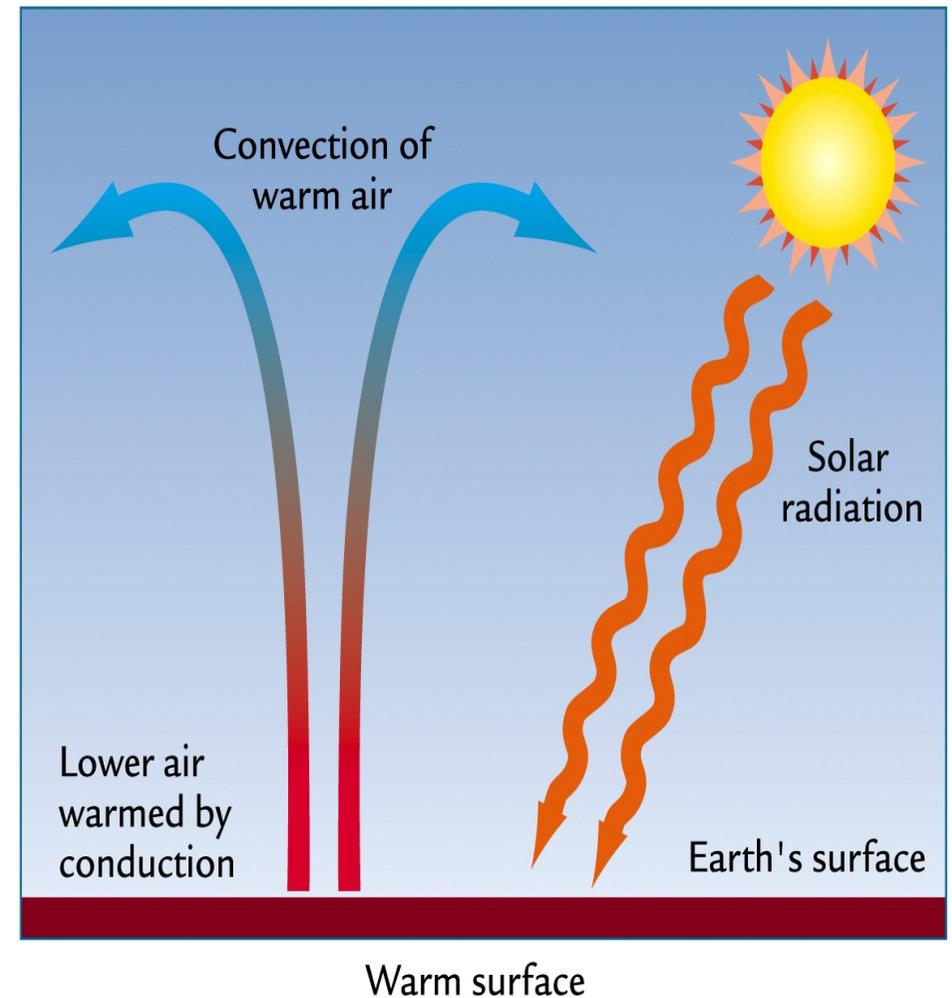
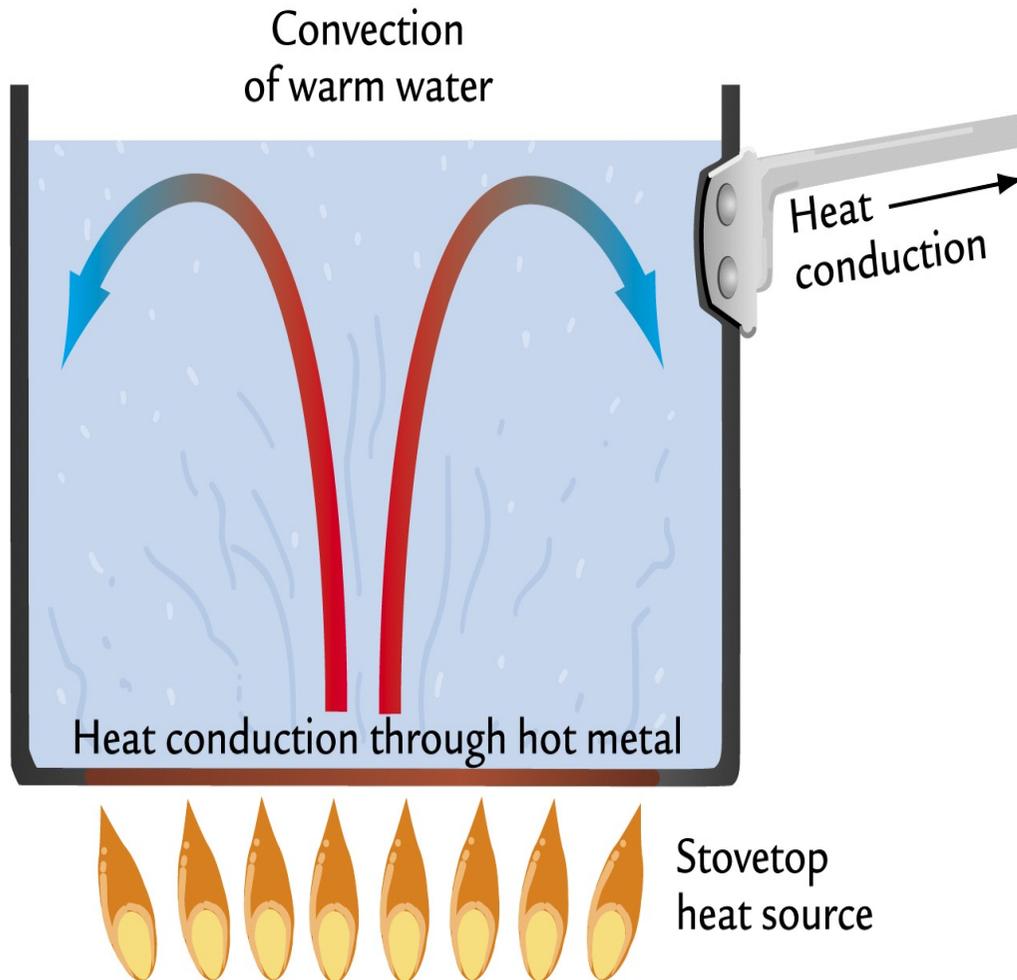


Ruddiman, 2008

Retroalimentación negativa de la conducción y convección

- El transporte de calor desde la superficie del planeta hasta las capas atmosféricas altas más frías tiene un efecto estabilizador neto, aunque más débil que el primero, sobre un eventual incremento de la temperatura superficial. Este transporte aumentado de calor (convección) presiona a la baja sobre el incremento de calor.
- Igualmente, durante los ciclos estacionales contribuyen a suavizar los extremos térmicos, mediante mayor/menor disipación de calor en la estación fría cuando el calentamiento ha sido mayor/menor en la estación cálida.

Retroalimentación negativa de la conducción y convección

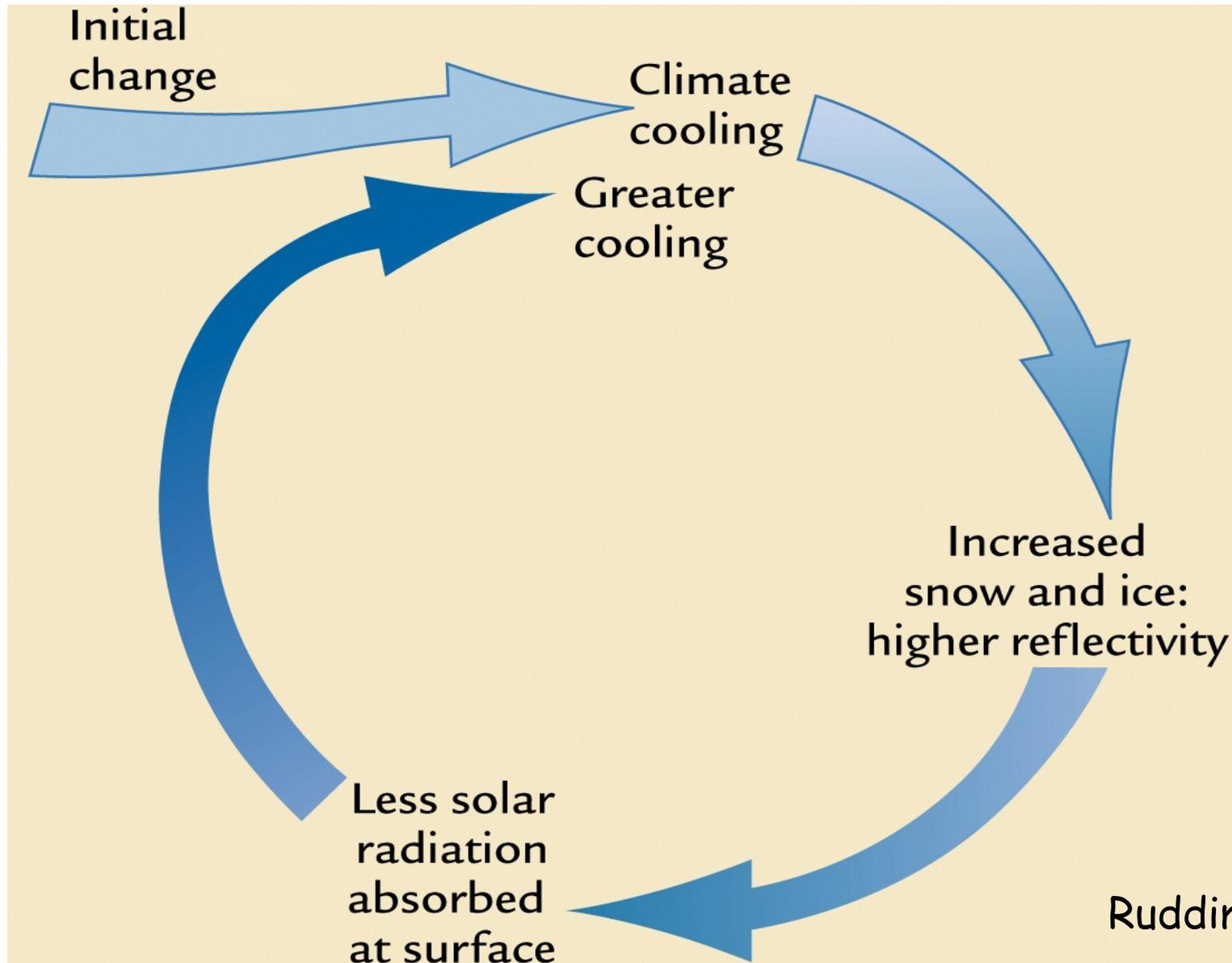


Ruddiman, 2008

Retroalimentación positiva entre albedo del hielo y la temperatura

- La capa de hielo polar y la nieve continental tienen un fuerte efecto de retroalimentación positiva sobre cualquier cambio en la temperatura atmosférica.
- Las regiones con hielo presentan el mayor albedo del planeta, con un fuerte efecto de enfriamiento sobre las regiones que les rodean. Una eventual disminución de temperatura incrementará la extensión de los hielos lo cual incrementará aún más el albedo, disminuyendo aún más las temperaturas regionales.

Retroacción Albedo-Temperatura



Retroacción + hielo-temperatura

- Budyko (1969) propone que la temperatura media y clima durante el Cuaternario tiene dos regímenes de funcionamiento: Interglacial y glacial. La retroalimentación hielo-temperatura es crítica en el paso de una situación a otra, pues amplifica las ligeras variaciones de irradiancia que los forcing de Milankovitch provocan.
- Se indica la existencia de un punto crítico para la extensión del hielo hacia latitudes bajas (50°N) que, caso de ser alcanzado, convertiría en dominante la retroacción positiva hielo-albedo sobre la acción combinada de todas las retroacciones estabilizadoras en el Sistema Climático. Las glaciaciones del Cuaternario se acercaron a esta eventualidad que provocaría casi con seguridad la desaparición de la biosfera.

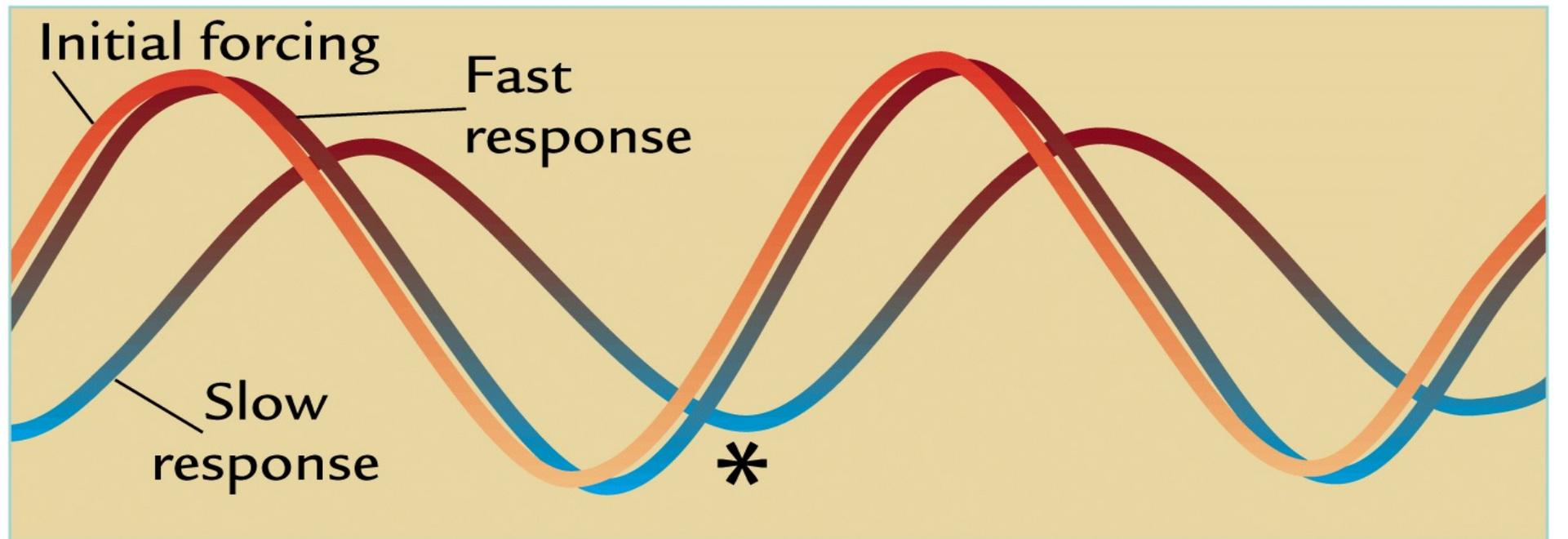
Tasas de respuesta e interacciones

- ¿Que sucede con la temperatura del aire cerca de un frente glaciar si la radiación solar aumenta lentamente?



Interacciones en el sistema climático

- Tiempo de respuesta influenciado por ambos (casquete y radiación)
- El tiempo de respuesta del aire será más rápido que la respuesta del hielo, pero igualmente se producirá un retraso en relación al forzamiento solar.



Time →

Ruddiman, 2008

Interacciones en el Sistema Climático

- Los diversos componentes (subsistemas) del sistema climático no responden de forma pasiva al forzamiento.
 - Existe una interacción dinámica entre los sistemas
- Las interacciones desdibujan la distinción entre forzamiento y respuesta
 - Dificultad para determinar qué sistema o sistemas están reaccionando al forzamiento

Interacciones en el Sistema Climático

- No olvidar que el clima NO es un sistema cerrado, sino abierto, fuera del equilibrio, y que se autoorganiza en parte, lo cual implica también cierta autonomía propia de producción de pautas, no controlada externamente.

Bibliografía recomendada

- Ruddiman, W.F. 2008. *Earth's Climate. Past and Future. Second Edition*, W.H. Freeman and Company. Chapter 1. *Overview of Climate Science*. pp. 4-16.
- Imbrie, J. 1985. A theoretical framework for the Ice Ages. *Journal of the Geological Society* 142: 417-432.