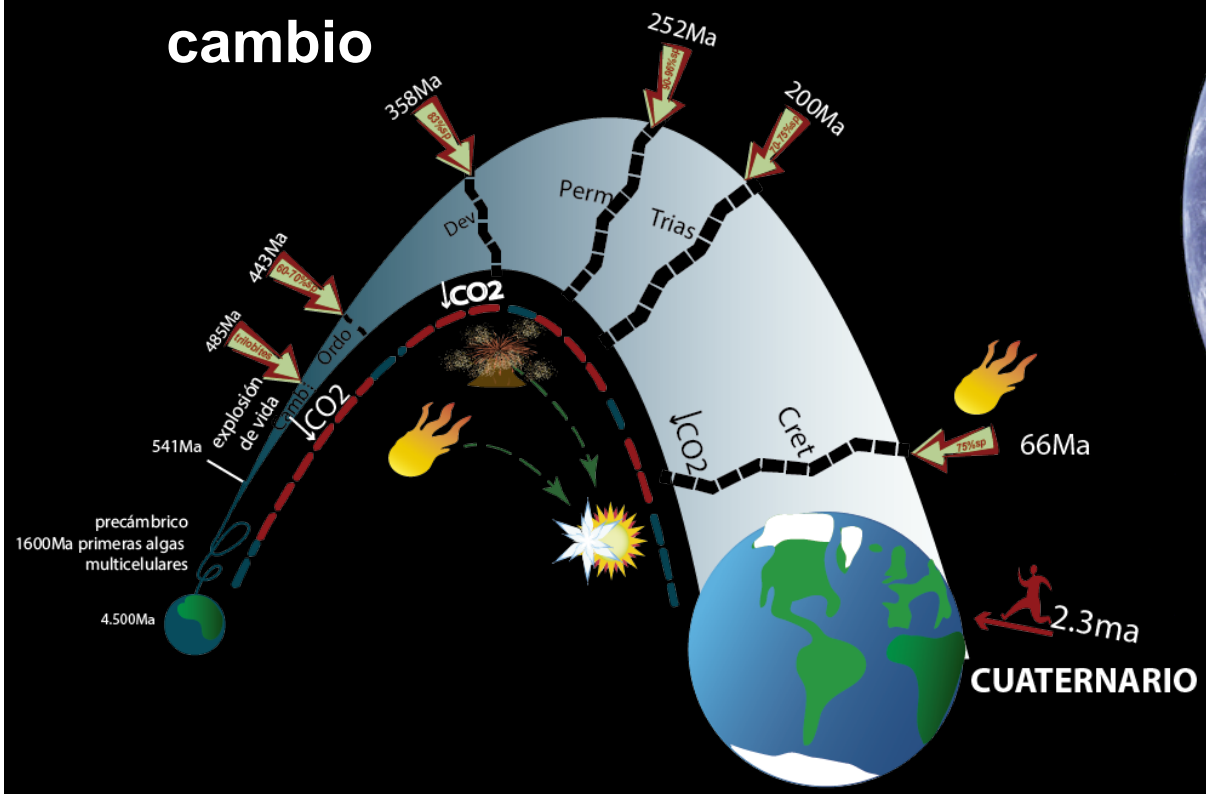
Causas de los cambios climáticos en la historia de la Tierra

Teresa Bardají

Universidad de Alcalá

El clima en el planeta Tierra

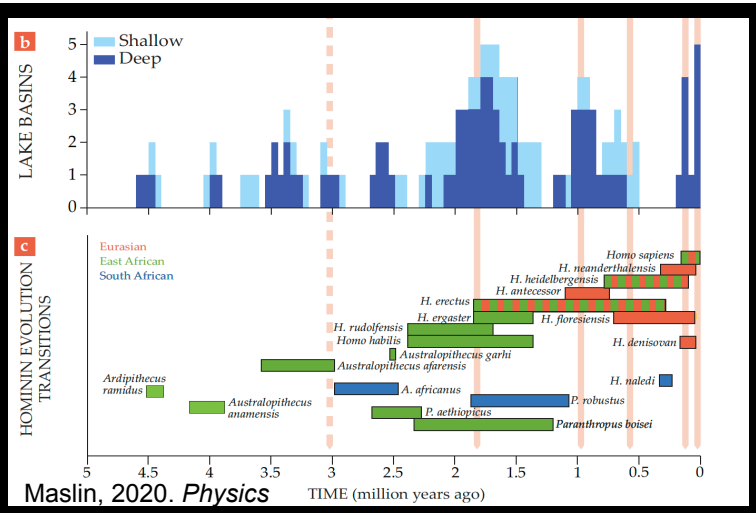
- 4500 Ma en constante **cambio**



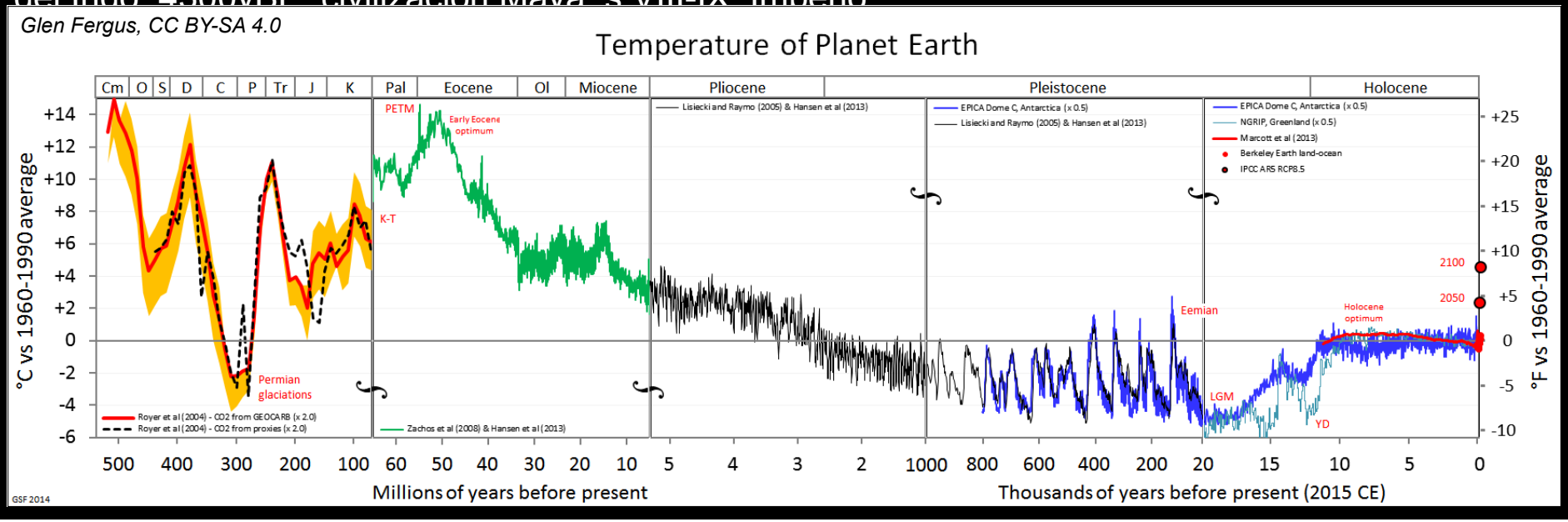
La "*canica azul*", 7 Diciembre 1972, Apolo 17, NASA

Cambios climáticos en la Tierra

- Cambios de muy diferente escala temporal
- Registros en hielo (150ka) → Cambios rápidos, decadales (Gr)
- Evolución y migración del género *Homo* (C.C. África)
- Cambios en el estilo de vida (agricultura en Oriente medio, período cálido inicio del Holoceno)
- Decadencia y colapso de importantes civilizaciones (valle del Indo, 4300yBP; civilización Maya, s VIII-IX; Imperio

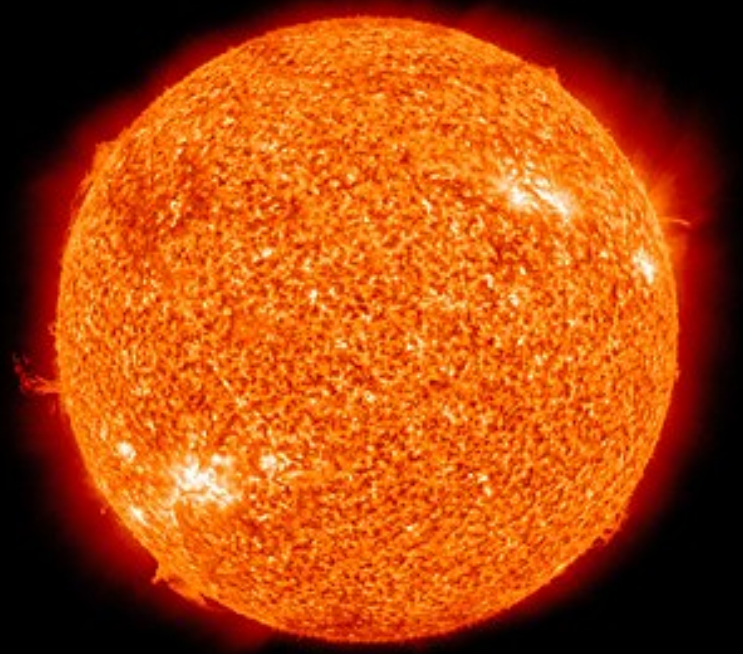


Maslin, 2020. *Physics*



El clima en la Tierra

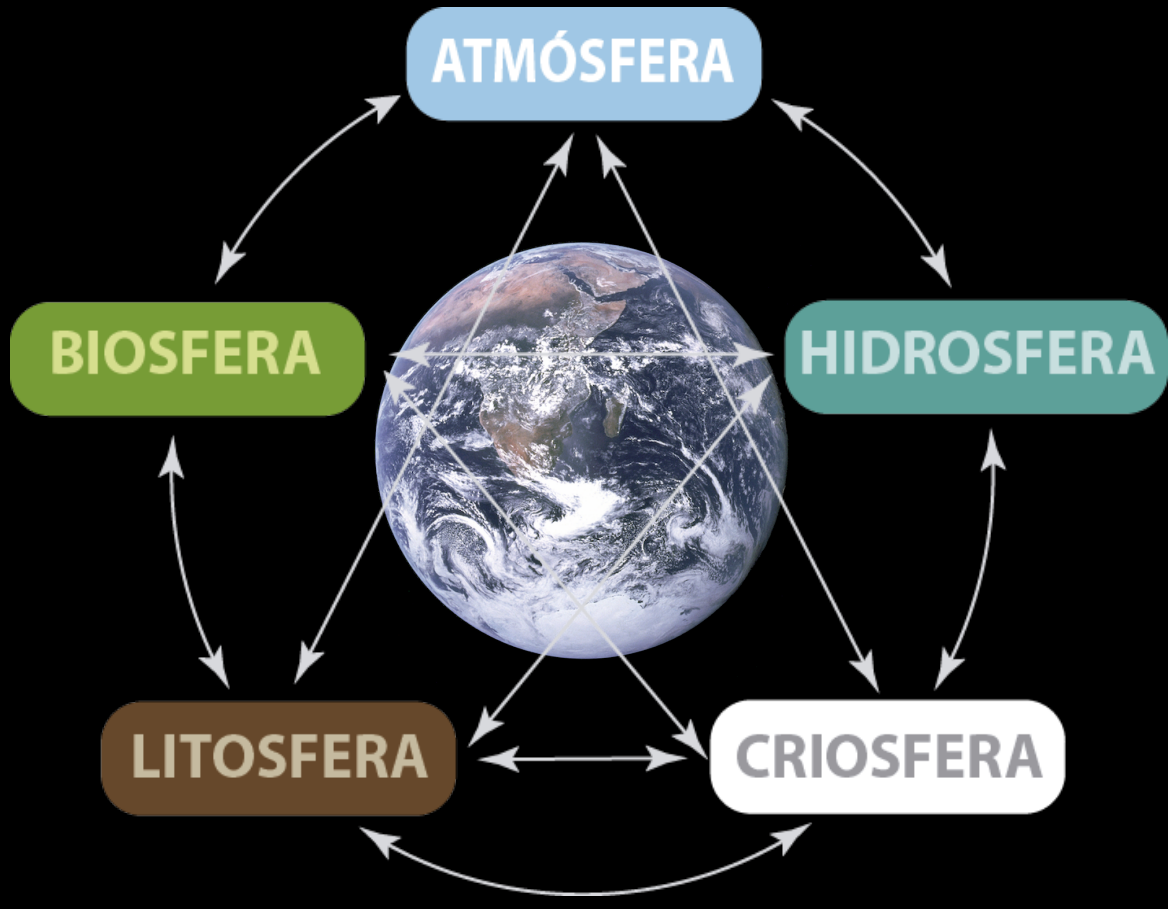
Condicionantes externos



Energía del **Sol**:

- Insolación recibida
- Energía emitida

Condicionantes internos



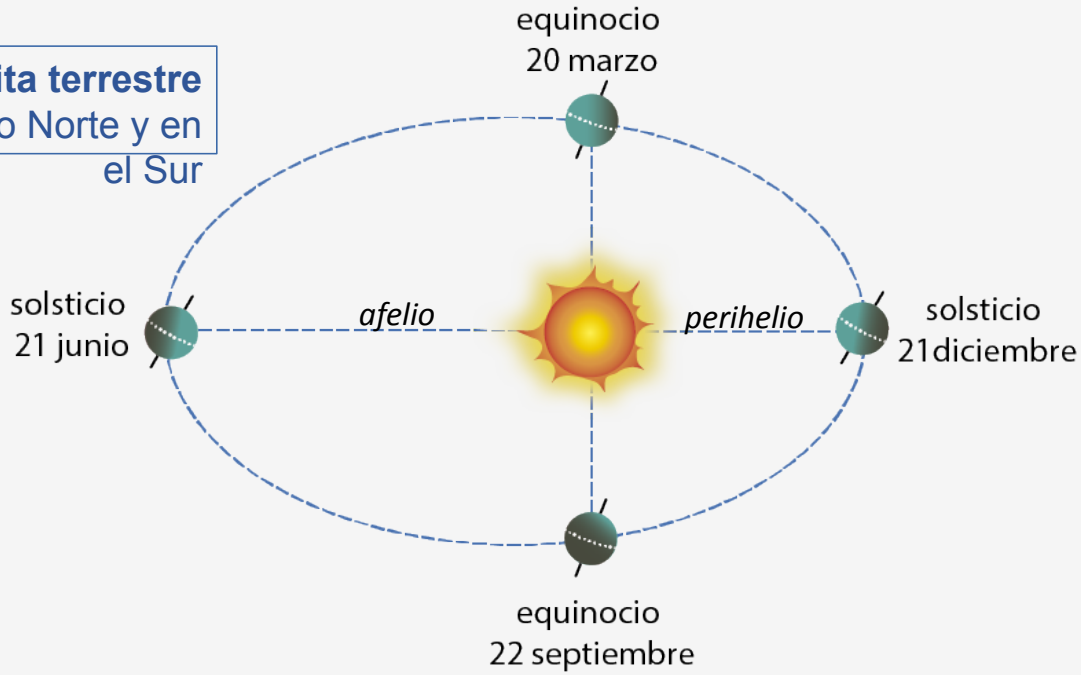
El clima en la Tierra: condicionantes externos

Insolación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

Milutin **Milankovitch**, matemático y climatólogo serbio, 1941:
Alteraciones en la órbita de la Tierra cambian la distribución de la energía en la superficie de la Tierra, **períodos glaciales e interglaciales.**
Latitud 65ºN → Insolación en verano no suficiente para fundir todo el hielo → Glaciación

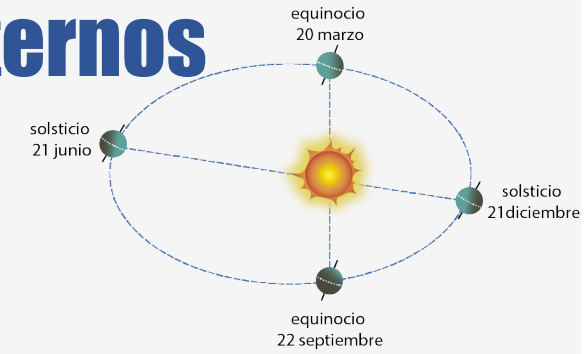
Características de la órbita terrestre
Diferencias en la insolación en el Hemisferio Norte y en el Sur

Parámetros Orbitales:
- Excentricidad
- Oblicuidad
- Precesión axial
- Precesión apsidal



El clima en la Tierra: condicionantes externos

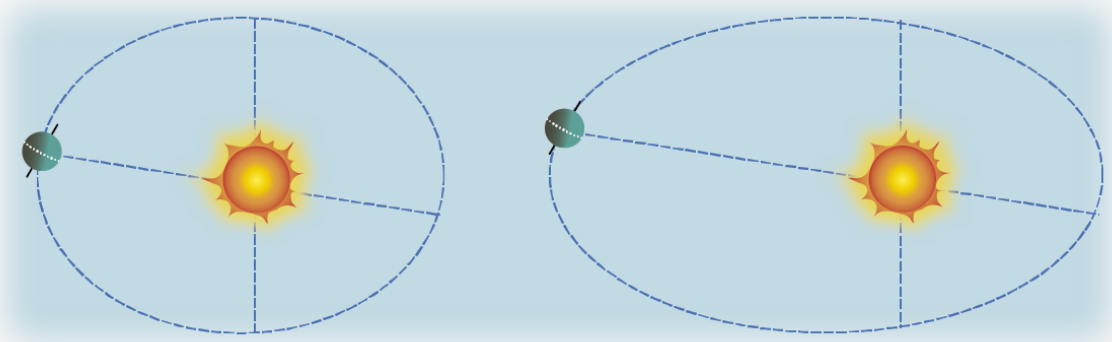
Insolación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

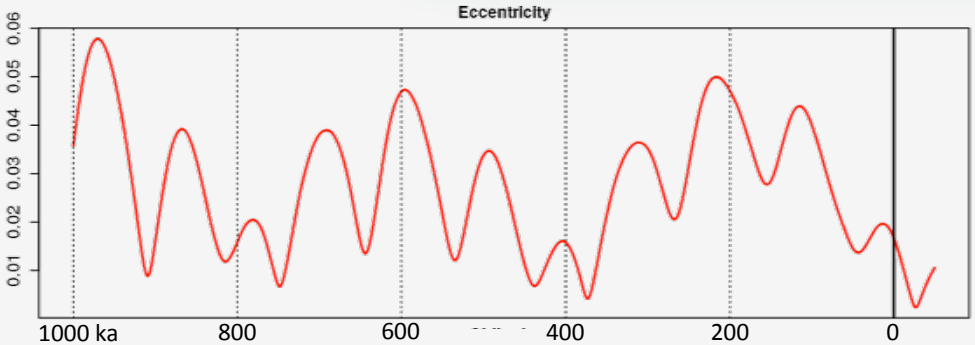


Parámetros Orbitales:

- Excentricidad
- Oblicuidad
- Precesión axial
- Precesión apsidal

Órbita terrestre es ligeramente elíptica. Excentricidad varía gradual y periódicamente según diferentes ciclos. Los principales: **405ka** y **~100ka**

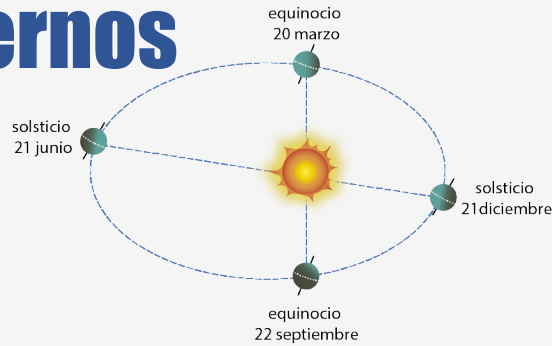




https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

El clima en la Tierra: condicionantes externos

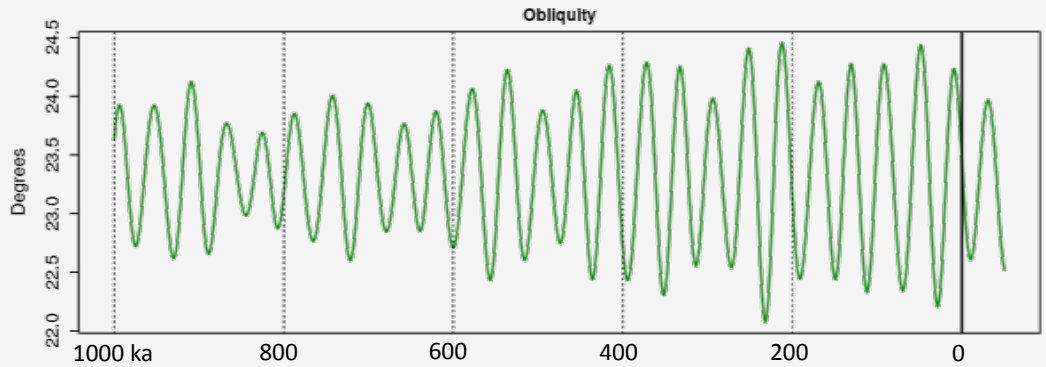
Insolación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")



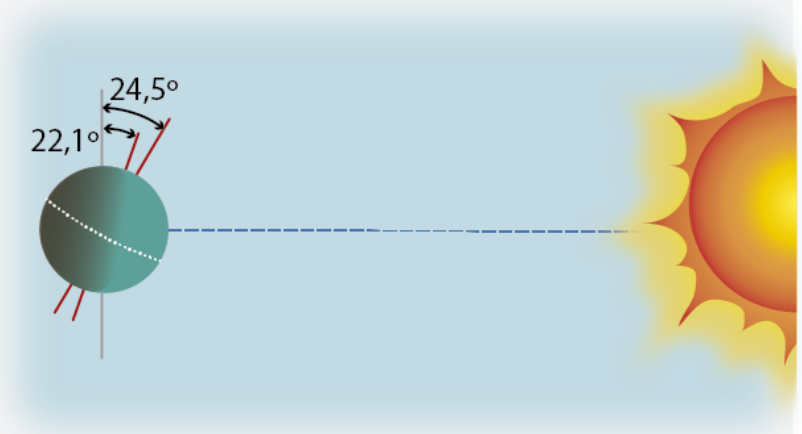
Parámetros Orbitales:

- Excentricidad
- Oblicuidad
- Precesión axial
- Precesión apsidal

Ángulo que forma el plano ecuatorial de la Tierra con la elíptica
Ciclo principal de **41.000 años**



https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

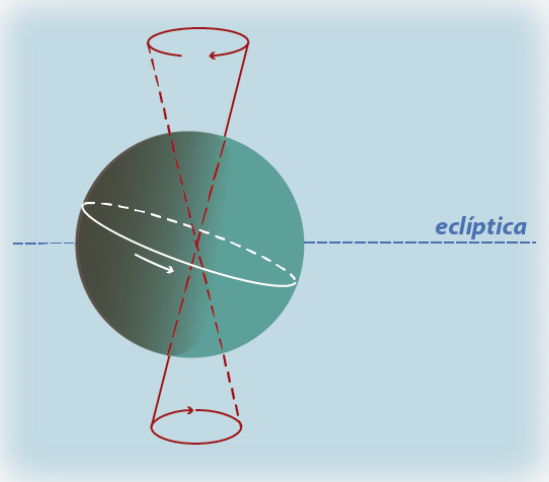


El clima en la Tierra: condicionantes externos

Insolación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

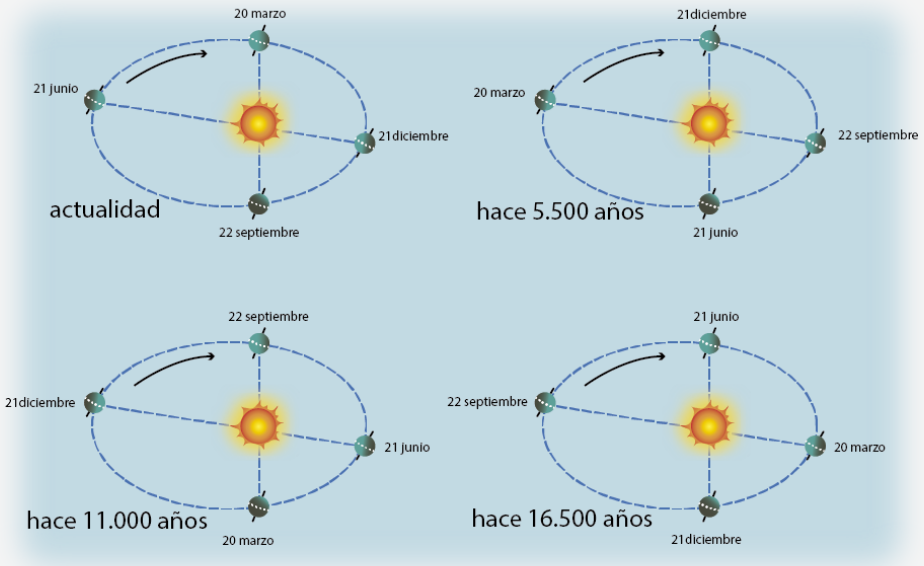
Parámetros Orbitales:
- Excentricidad
- Oblicuidad
- Precesión

- Precesión axial



Rotación gradual de la línea que conecta los ábsides de la órbita

- Precesión apsidal. Precesión de los equinocios



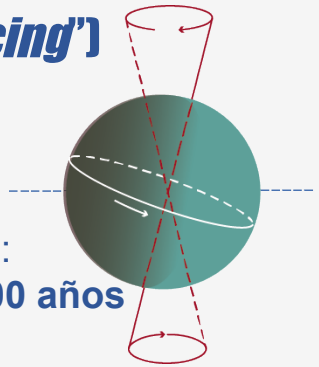
Rotación gradual de los equinoccios (mod. Martín Chivelet et al., 2015)

El clima en la Tierra: condicionantes externos

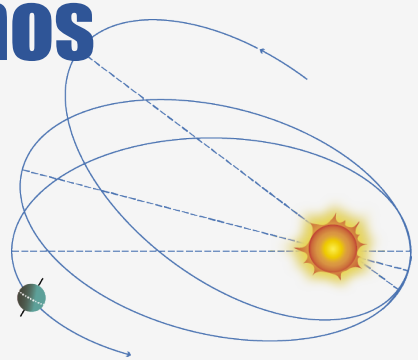
Insolación recibida → Forzamiento orbital ("*Orbital forcing*")

Parámetros Orbitales:

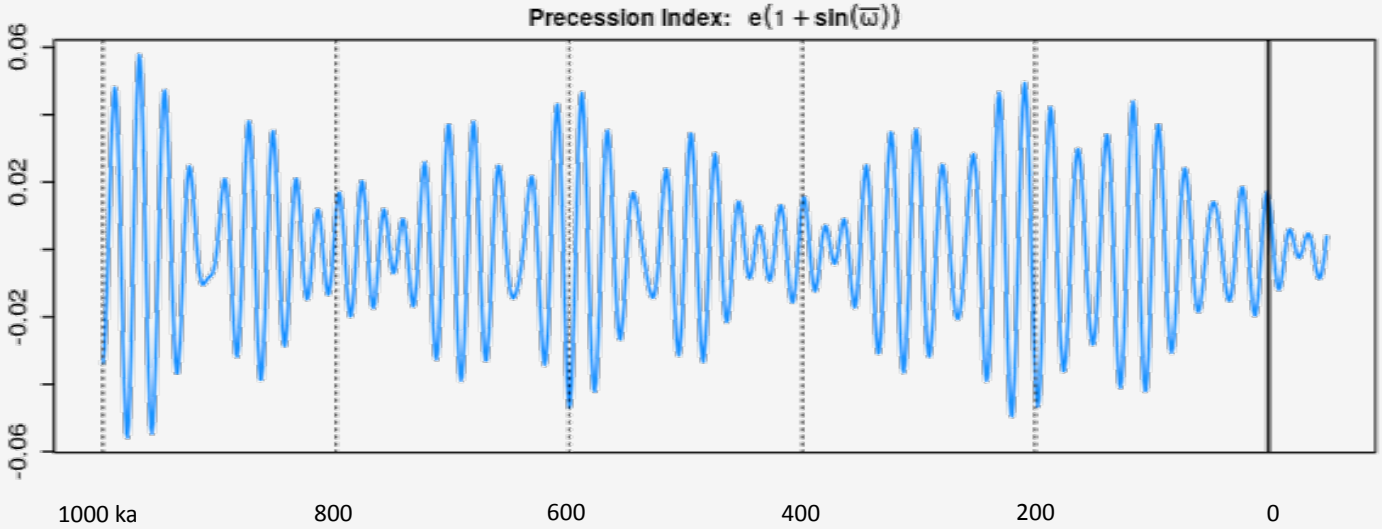
- Excentricidad
- Oblicuidad
- Precesión axial
- Precesión apsidal o precesión de los equinocios



Precesión axial:
Ciclos de **26.000 años**



Precesión apsidal:
Ciclos de **112.000 años**



https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

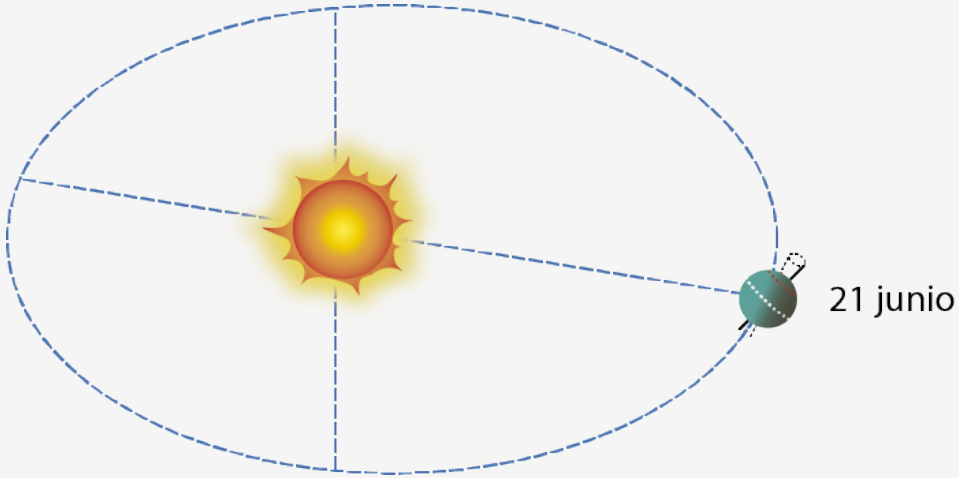
La combinación de ambos da lugar a la precesión de los equinocios, período de entre **21.000 y 23.000años**

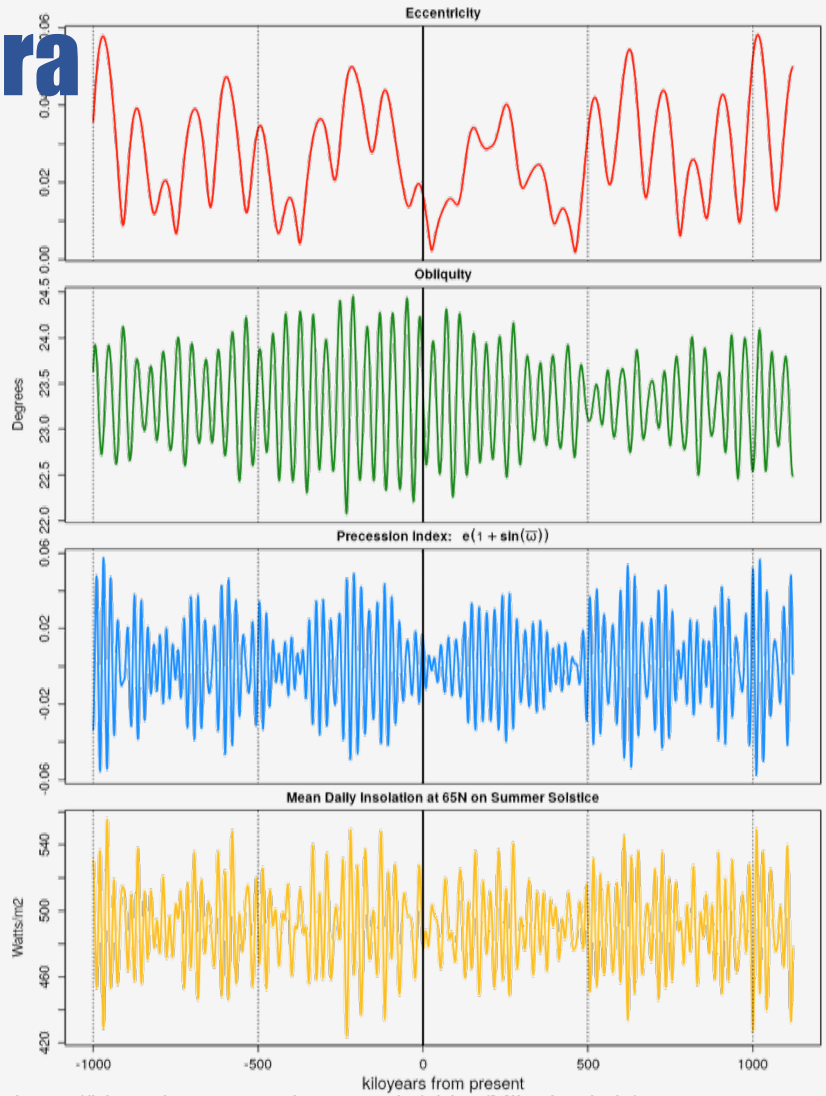
Cambios climáticos en la Tierra

Insolación recibida → Forzamiento orbital

La combinación de todos estos ciclos condiciona la cantidad de radiación recibida (**insolación**) en una latitud dada.

Curva de insolación presenta un patrón complejo.
Períodos en los que los tres parámetros se suman
→ máxima insolación
Períodos en los que la insolación es mínima → glaciación

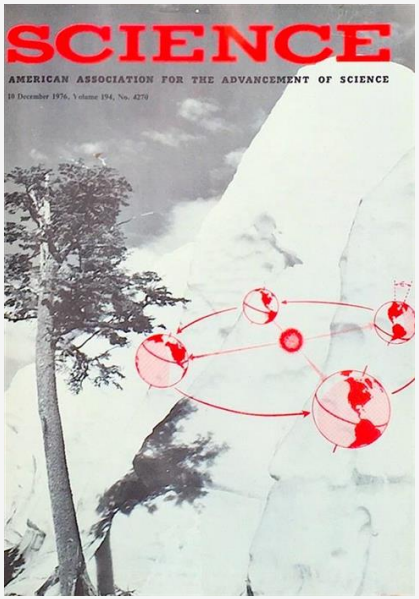




https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

Cambios climáticos en la Tierra

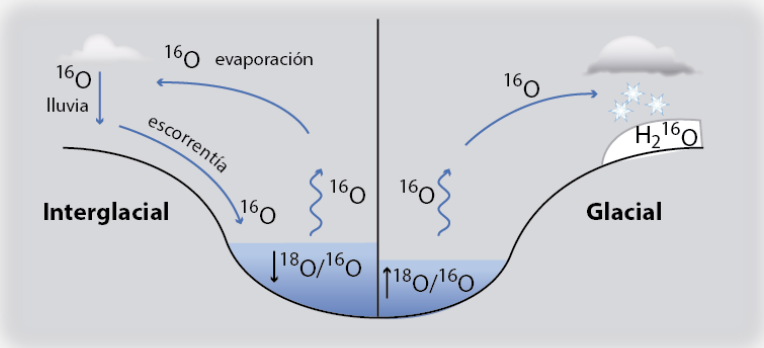
Insolación recibida → Forzamiento orbital
Registro de estas variaciones

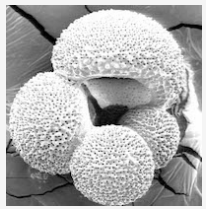


J.D. Hays, J. Imbrie & N.J. Shackleton (1976). Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages (The Milankovitch theory validation).

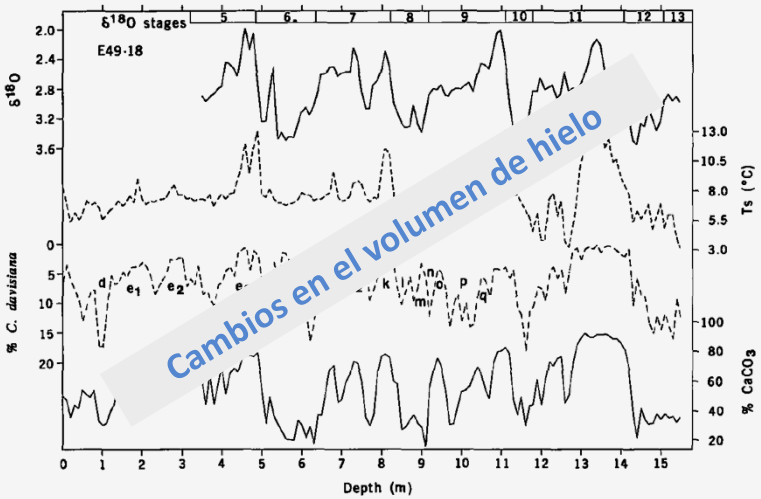
Confirmación de que las variaciones en la órbita terrestre son la causa fundamental de la sucesión de las glaciaciones en el Pleistoceno superior

Dos sondeos oceánicos profundos; tres parámetros (zooplancton) climáticamente sensibles (**$\delta^{18}O$** en *Globigerina bulloides*; Ts según análisis estadísticos de asociaciones de radiolarios; % de *Cycladophora davisiana*, radiolario no utilizado para Ts); últimos 500 ka





G. bulloides
NOAA reports



Cambios climáticos en la Tierra

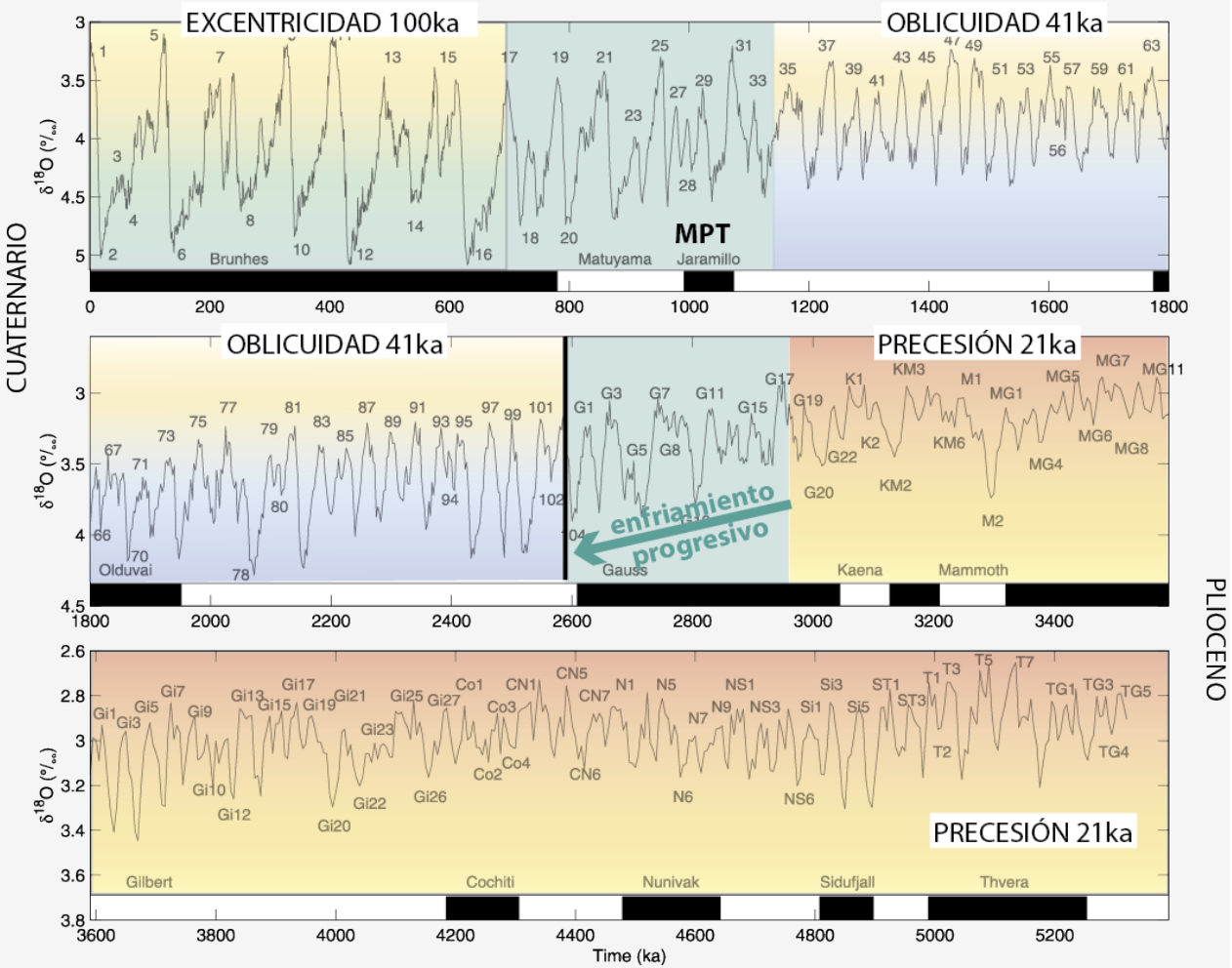
Últimos 5 Ma: forzamiento orbital

- **Plioceno**. Ciclos climáticos irregulares con predominio de la precesión, **~21-23ka**
  Clima en la Tierra es muy **cálido**

- Tránsito al Cuaternario → **enfriamiento**
  Se superponen los ciclos de 41ka

- **Pleistoceno inferior**. Alternancia períodos glaciales e interglaciales
  Predominio de la oblicuidad, **41ka**

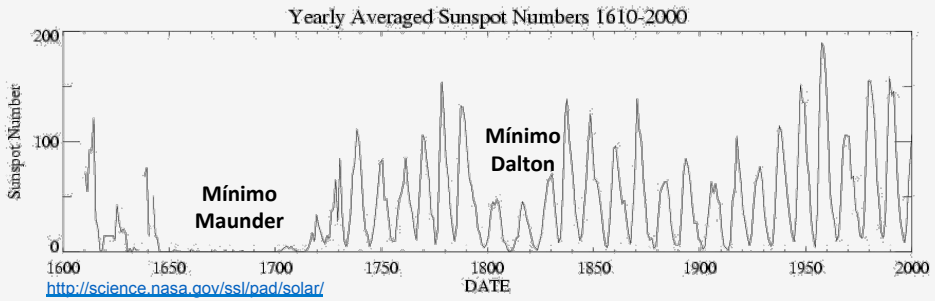
- **Transición del Pleistoceno Medio (MPT).** Cambio hacia una ciclicidad dominada por la excentricidad, 100ka. **Glaciaciones extremas, deglaciaciones abruptas**



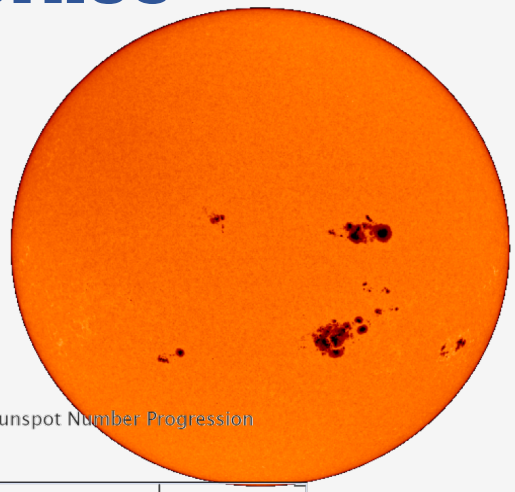
Escala isotópica Lisiecki & Raymo (2005). Paleoceanography 20

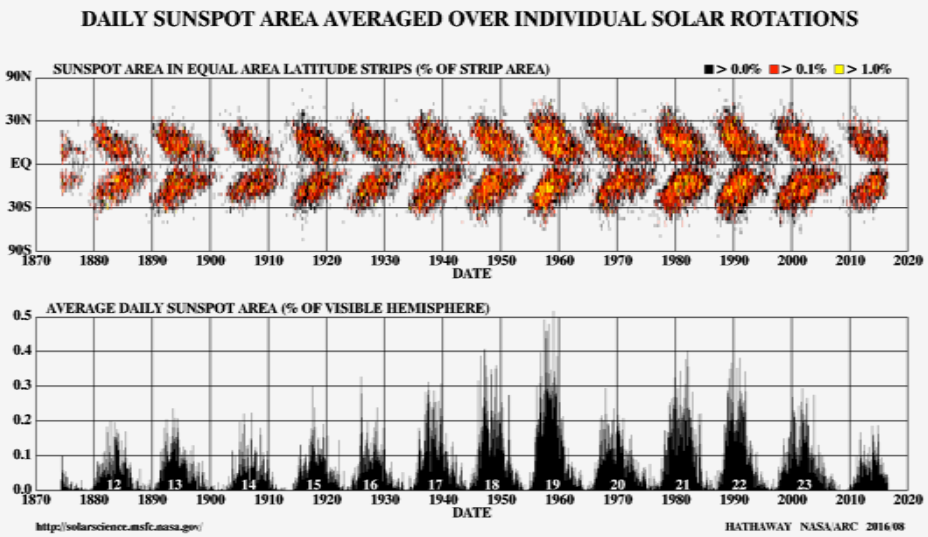
El clima en la Tierra: condicionantes externos

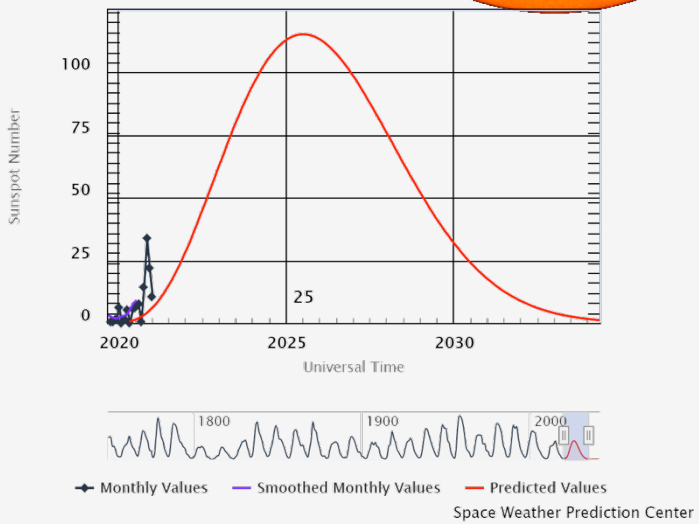
Cambios en la actividad solar (Irradiación).



Ciclos de menor escala temporal: **11** y 100 (87) años



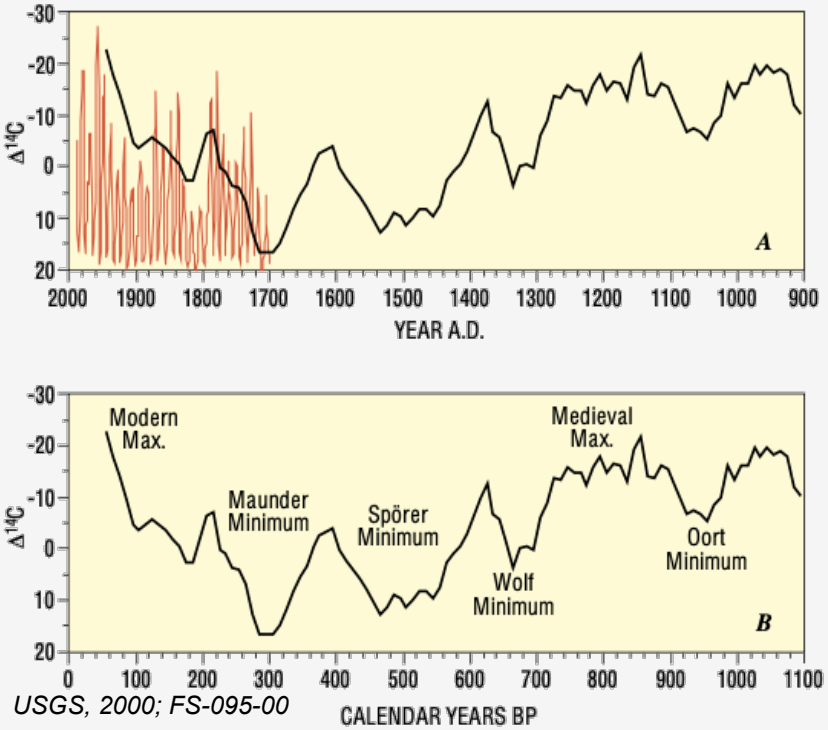




NOAA, Public domain, via Wikimedia Commons

El clima en la Tierra: condicionantes externos

Cambios en la actividad solar (irradiación).

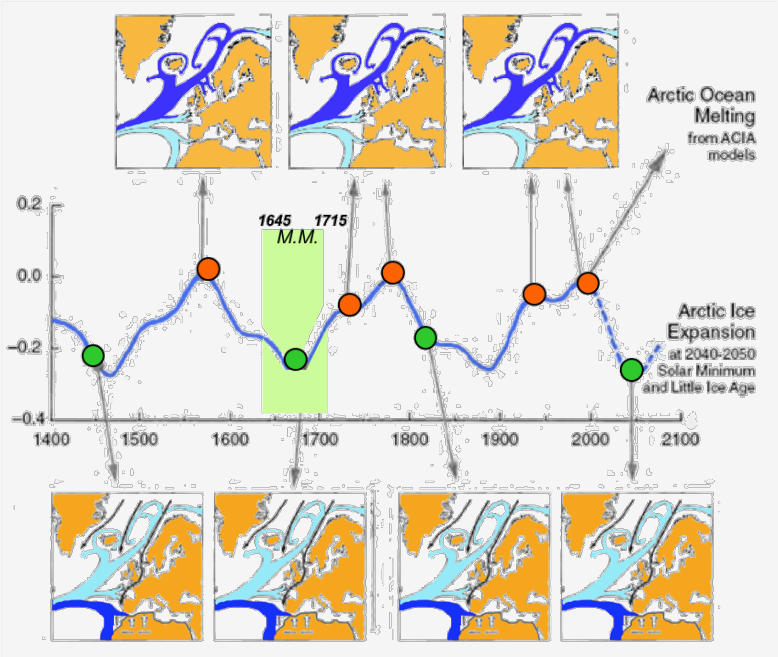


USGS, 2000; FS-095-00

- Relación con el registro de manchas solares

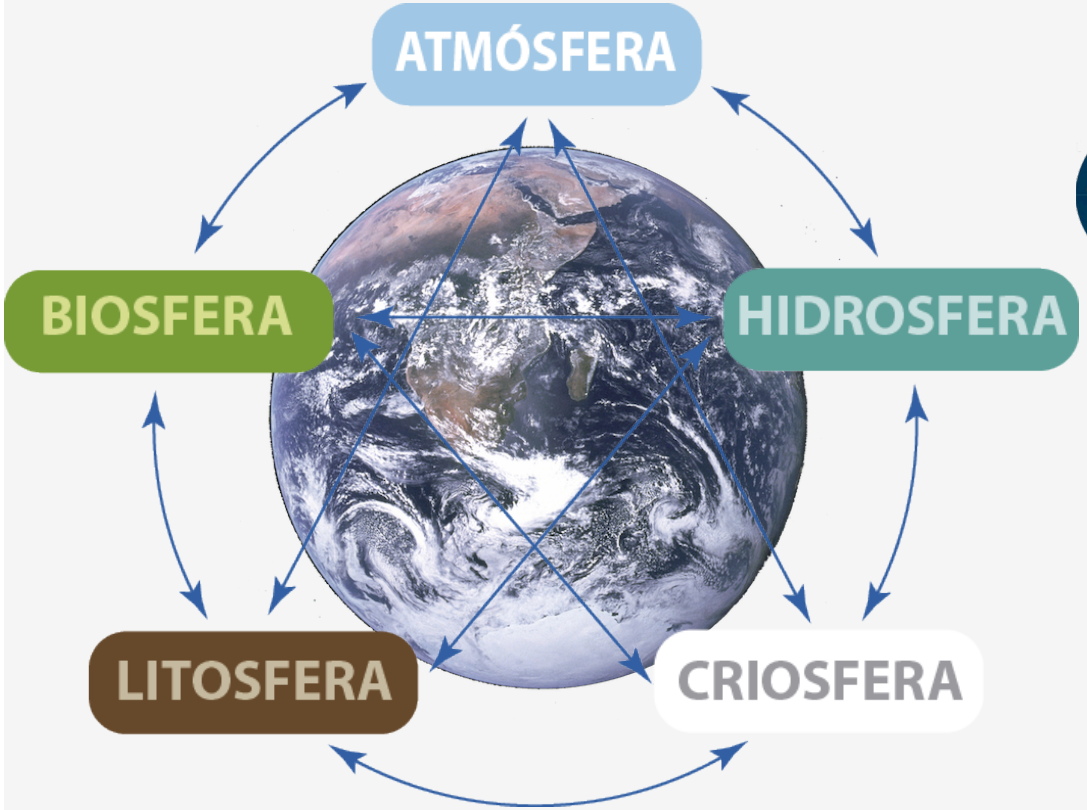
Cambios en la actividad solar (manchas, viento solar):

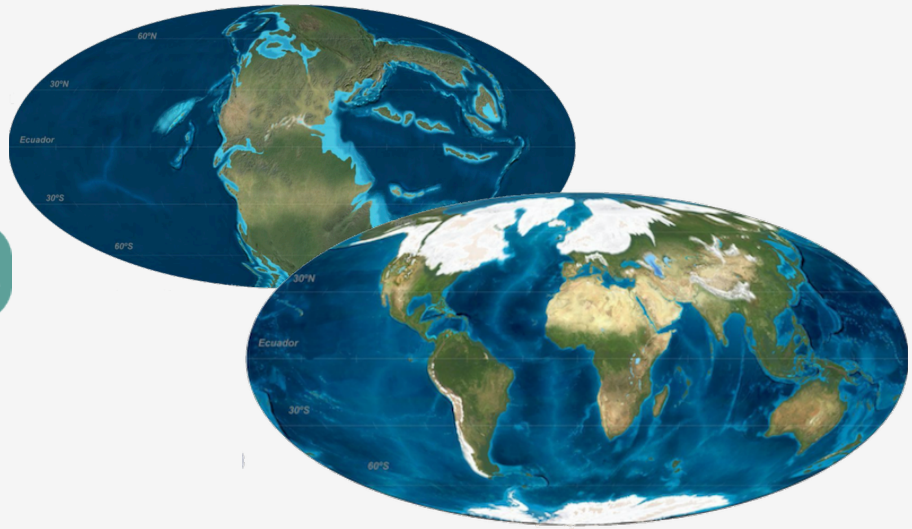
- Cambios en la producción de ^{14}C (bombardeo de ^{14}N con rayos cósmicos en capas altas de la atmósfera)
  - > actividad solar < producción
- Ciclos de ~200 años



- Relación con la circulación oceánica (Mörner, 2005)

El clima en la Tierra: condicionantes internos

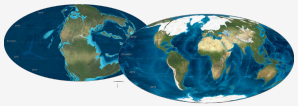




Distribución de las placas tectónicas:

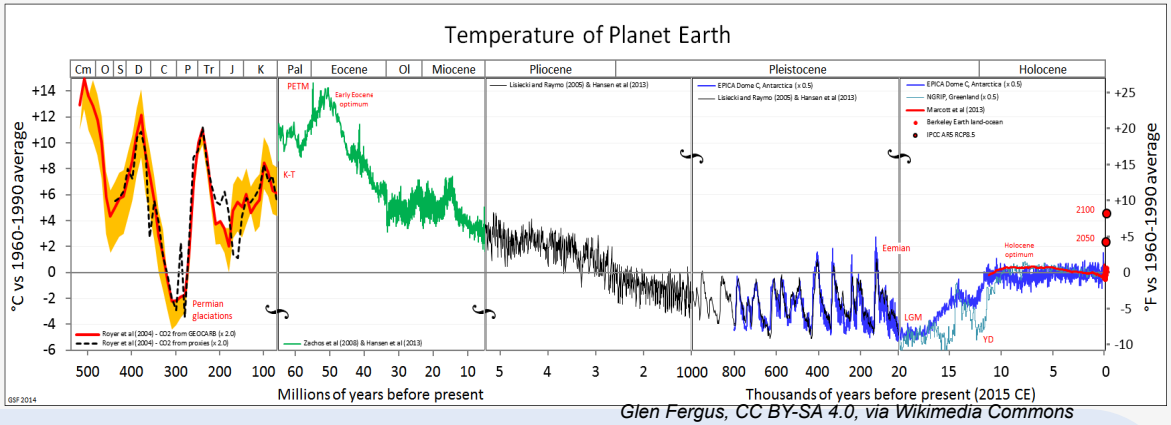
- Redistribución de la energía recibida

El clima en la Tierra: condicionantes internos

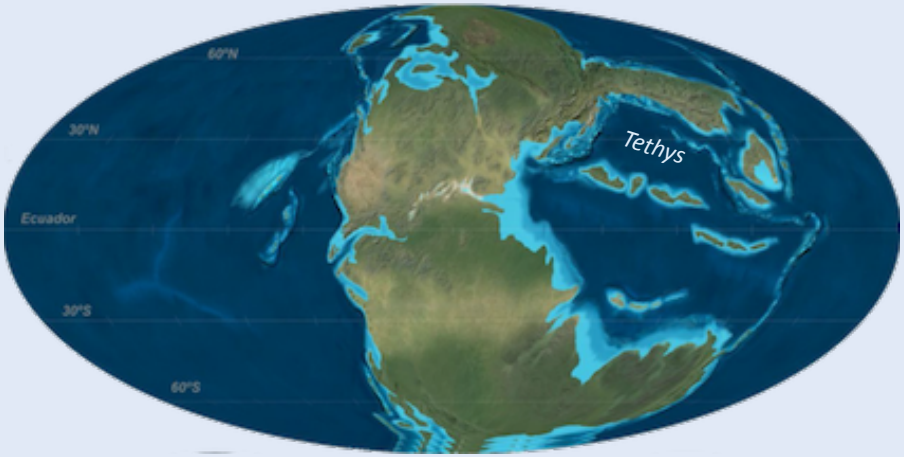


Redistribución de la energía recibida

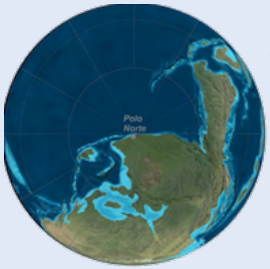
- Distribución de las masas terrestres
- Circulación oceánica
- Circulación atmosférica
- Glaciaciones uni- → bipolares

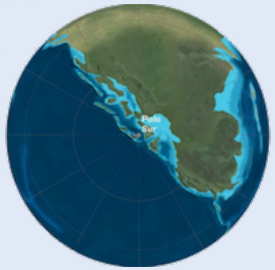


Glen Fergus, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons



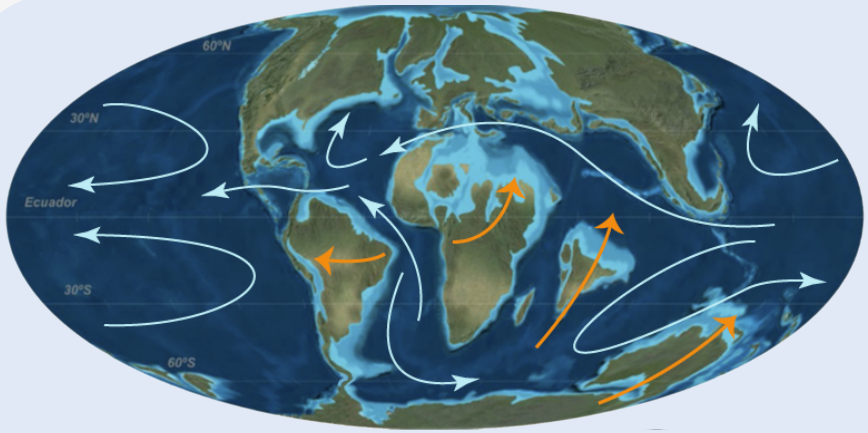
- Hace **200 Ma**
- Tierra emergida concentrada en una única masa continental → PANGEA



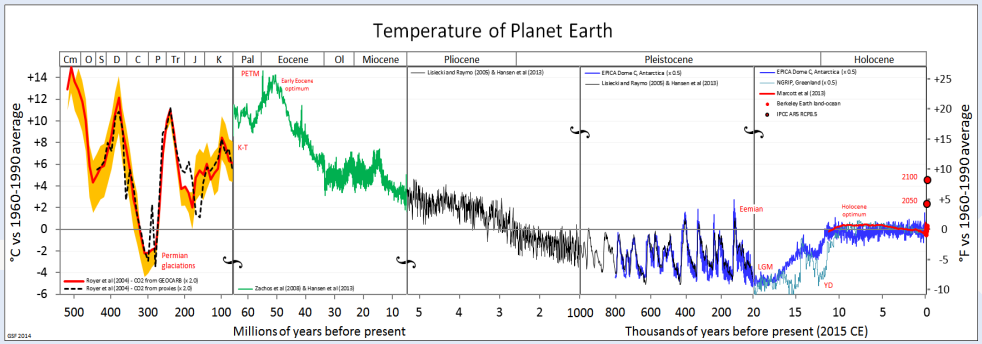


Mapas base de Colorado Plateau Geosystems, 2019

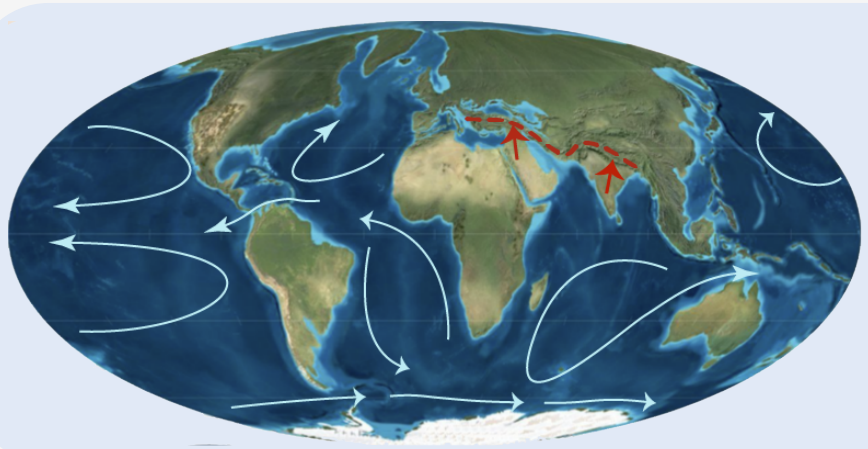
El clima en la Tierra: condicionantes internos



- Hace **66 Ma** (final del Cretácico)
- Apertura del Atlántico
- Desplazamiento hacia el N de India y Australia
- Circulación ecuatorial



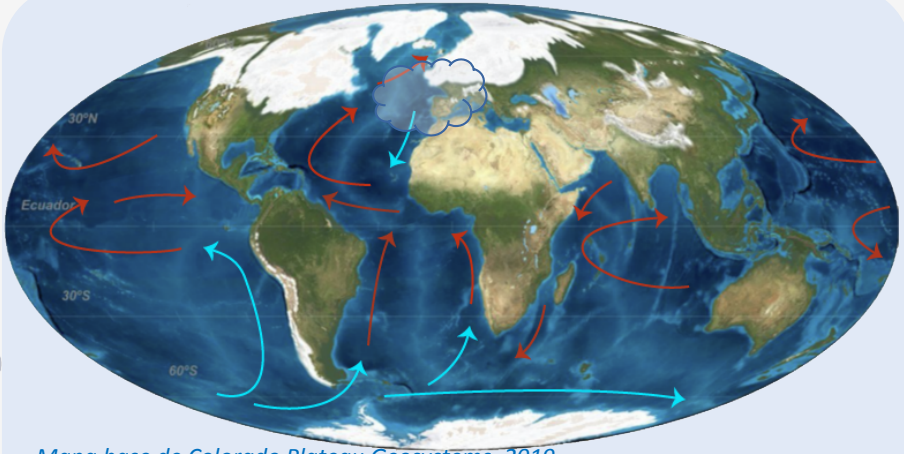
Glen Fergus, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons



- Entre **35-20 Ma**
- <u>Colisión de la India, elevación del Himalaya</u>
  - Intensificación monzones
  - Aumento masivo de alteración química
- Península arábiga migra hacia el N
  - Cierre del Tethys oriental
- Apertura Estrecho Drake → CCA
- Glaciación unipolar (Casquete HS, W Antártida)

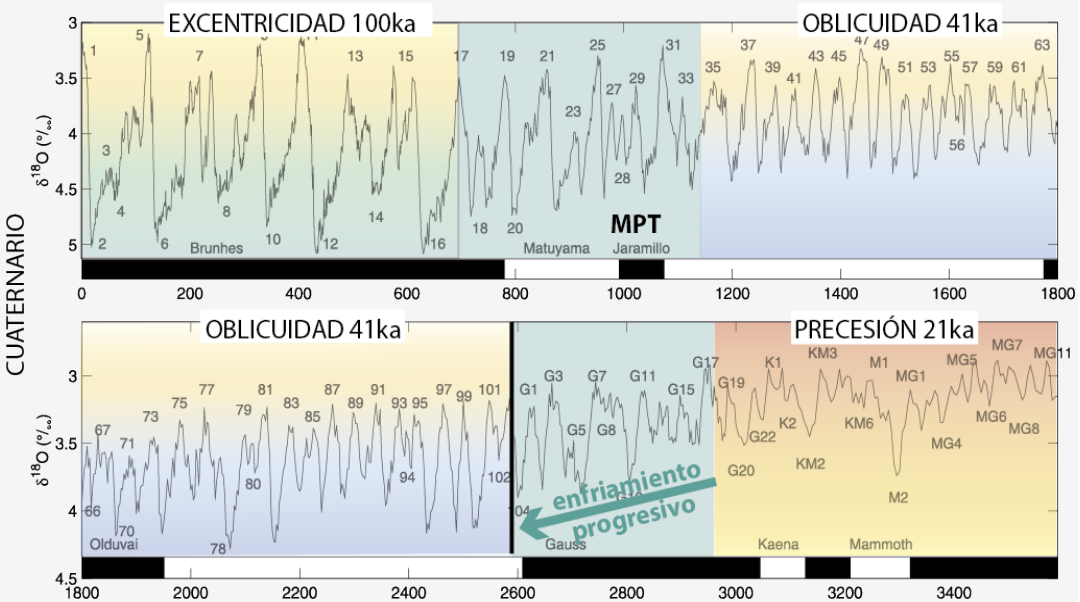
Mapas base de Colorado Plateau Geosystems, 2019

El clima en la Tierra: condicionantes internos



Mapa base de Colorado Plateau Geosystems, 2019

- **3 -2,6 Ma**
- Se cierra el **istmo de Panamá**
- Corriente cálida del Golfo circula hacia el N
- >Evaporación
- >Precipitación en forma de nieve
- > Albedo
- > amplitud ciclos oblicuidad → > estacionalidad



Escala isotópica Lisiecki & Raymo (2005). Paleoceanography 20

- **Elevación del Himalaya**: > exposición > alteración química
- Carbonatación del agua de lluvia (CO_2 se elimina de la atmósfera). $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow HCO_3^- + \mathbf{H^+}$
- HCO_3^- + Ca^{++}: metabolizados por plancton marino
- Reducción CO_2 atmosférico → enfriamiento

Completo desarrollo casquete polar HN
Glaciación bipolar

Causas alternancia Glacial-Interglacial ¿?

Ciclos Glacial - Interglacial

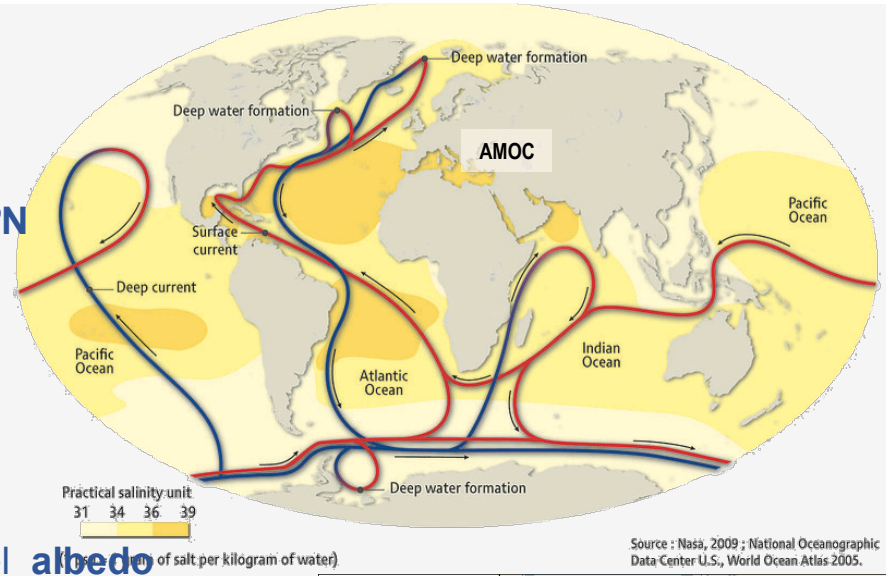
Interacción Atmósfera – Hidrosfera – Criosfera

Glaciación/deglaciación → cambios en la insolación 65ºN

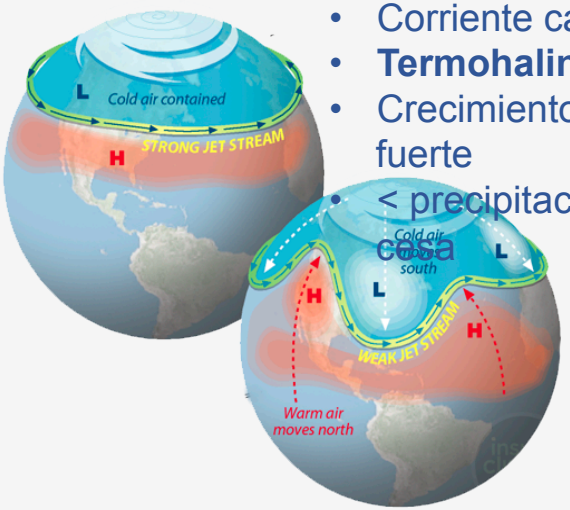
Cambios en los parámetros orbitales

↓

Mecanismos internos de respuesta. Retroalimentación

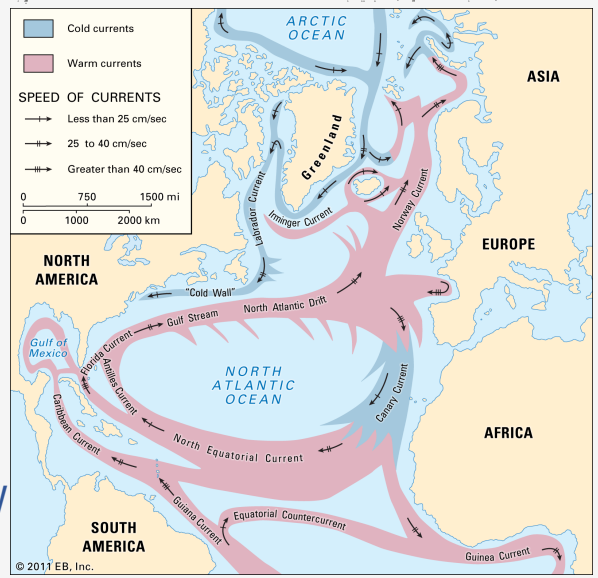


- Inicio glaciación → aumento progresivo del **albedo**
- Corriente cálida del Golfo no puede subir a latitudes altas
- **Termohalina** se frena. Reducción de NADW
- Crecimiento casquete polar HN → **Corriente del Chorro** fuerte
- < precipitación continuada de nieve → expansión hielo



P. Horn/InsideClimate (Source: NOAA,Scient.Am.)

- Deglaciación → mucho más rápida
- Retroceso glaciar → disminuye el **albedo**
- **Corriente del Chorro** sinuosa
- Se reactiva la Circulación superficial (C. del Golfo)
- **Termohalina** se activa. Formación de NADW



Últimos 400 ka

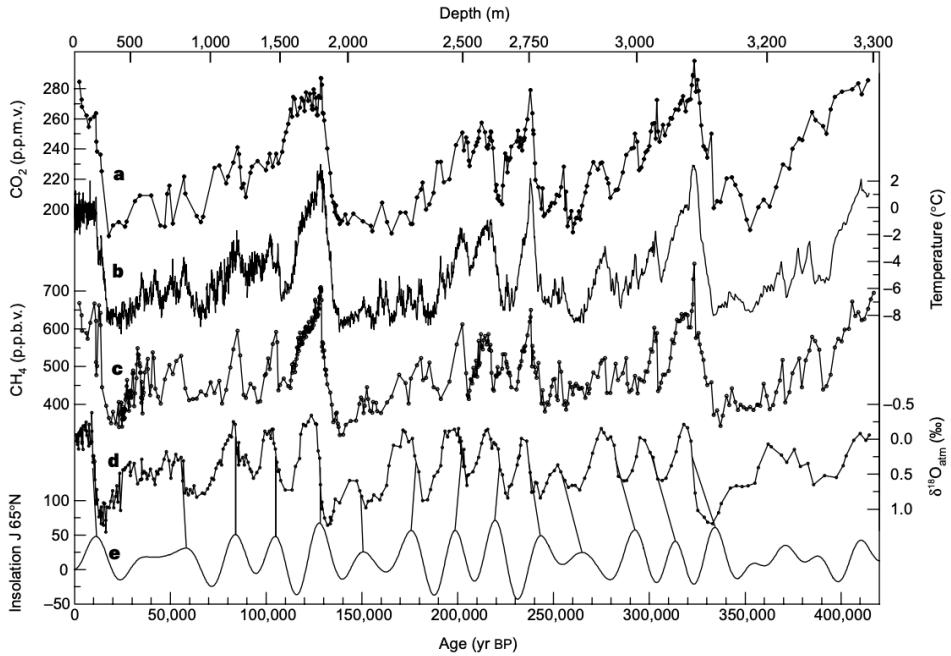
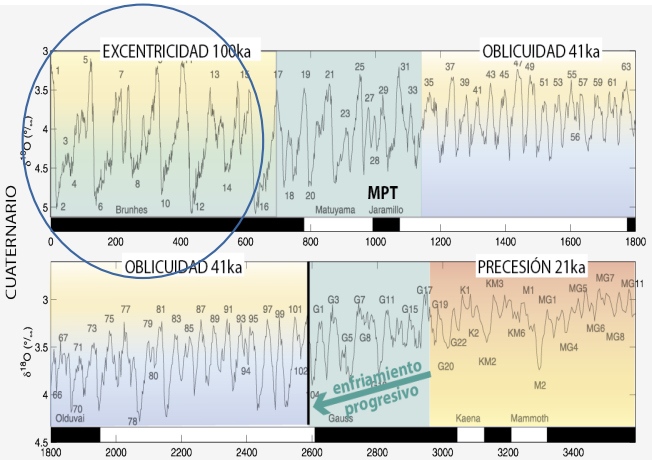


Figure 3 Vostok time series and insolation. Series with respect to time (GT4 timescale for ice on the lower axis, with indication of corresponding depths on the top axis) of: **a**, CO_2; **b**, isotopic temperature of the atmosphere (see text); **c**, CH_4; **d**, $\delta^{18}O_{atm}$; and **e**, mid-June insolation at 65° N (in $W m^{-2}$) (ref. 3). CO_2 and CH_4 measurements have been performed using the methods and analytical procedures previously described[5,9]. However, the CO_2 measuring system has been slightly modified in order to increase the sensitivity of the CO_2 detection. The thermal conductivity chromatographic detector has been replaced by a flame ionization detector which measures CO_2 after its transformation into CH_4. The mean resolution of the CO_2 (CH_4) profile is about 1,500 (950) years. It goes up to about 6,000 years for CO_2 in the fractured zones and in the bottom part of the record, whereas the CH_4 time resolution ranges between a few tens of years to 4,500 years. The overall accuracy for CH_4 and CO_2 measurements are ±20 p.p.b.v. and 2–3 p.p.m.v., respectively. No gravitational correction has been applied.

Petit et al.

NATURE | VOL 399 | 3 JUNE 1999 | www.nature.com

© 1999 Macmillan Magazines Ltd



Escala isotópica Lisiecki & Raymo (2005). Paleoceanography 20

- Sondeo de hielo en Vostok (Antártida)
- 400ka
- Similar patrón de variación que sondeos oceánicos (cambios volumen de hielo)
- Cambios orbitales de Tª, **CO_2** y **CH_4**
- **CH_4**: ciclos de 23 ka
- ¿Causa o consecuencia?
- Cambios en la intensidad de los monzones en latitudes bajas
- Fusión superficial del permafrost en latitudes altas

Últimos 400 ka

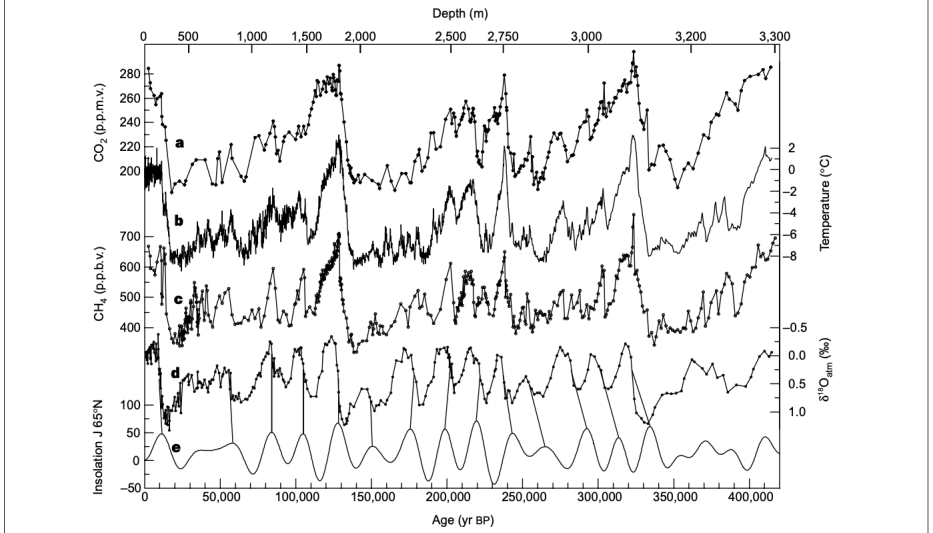
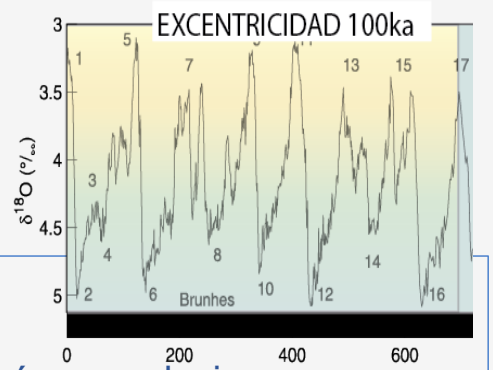


Figure 3 Vostok time series and insolation. Series with respect to time (GT4 timescale for ice on the lower axis, with indication of corresponding depths on the top axis) of: **a**, CO_2; **b**, isotopic temperature of the atmosphere (see text); **c**, CH_4; **d**, $\delta^{18}O_{atm}$; and **e**, mid-June insolation at 65° N (in $W m^{-2}$) (ref. 3). CO_2 and CH_4 measurements have been performed using the methods and analytical procedures previously described[5,9]. However, the CO_2 measuring system has been slightly modified in order to increase the sensitivity of the CO_2 detection. The thermal conductivity chromatographic detector has been replaced by a flame ionization detector which measures CO_2 after its transformation into CH_4. The mean resolution of the CO_2 (CH_4) profile is about 1,500 (950) years. It goes up to about 6,000 years for CO_2 in the fractured zones and in the bottom part of the record, whereas the CH_4 time resolution ranges between a few tens of years to 4,500 years. The overall accuracy for CH_4 and CO_2 measurements are ±20 p.p.b.v. and 2–3 p.p.m.v., respectively. No gravitational correction has been applied.

Petit et al.
NATURE | VOL 399 | 3 JUNE 1999 | www.nature.com

© 1999 Macmillan Magazines Ltd



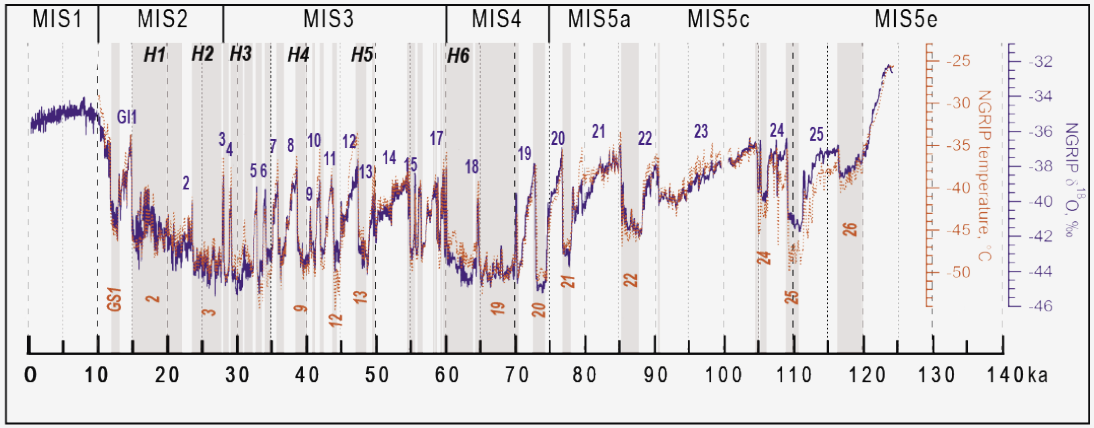
CO_2:
- Ciclos de 100ka
- Reducción 90ppm en épocas glaciares
- Relación **cambios volumen de hielo - CO_2 atmosférico**
- ¿cambios CO_2 → cambios volumen hielo?
- ¿cambios volumen hielo→ cambios CO_2?

CAUSAS
- Reducción vegetación y suelos → NO suficiente
- Propiedades físicas de las aguas superficiales
  - Agua fría incorpora mejor el CO_2 (-22ppm)
  - Agua más salina dificulta la disolución CO2 (+11ppm)
- Redistribución bioquímica y química de océanos (-75ppm)
  - Zonas de *upwelling*
  - > productividad superficial
  - > fotosíntesis (fitoplancton)
  - Almacenamiento en océanos profundos

Ruddiman (2001). Earth's Climate: Past and Future

Últimos 100 ka

- **Atmósfera-Hidrosfera-Criosfera**
- **Cambios climáticos muy rápidos**
- **Escala milenaria**

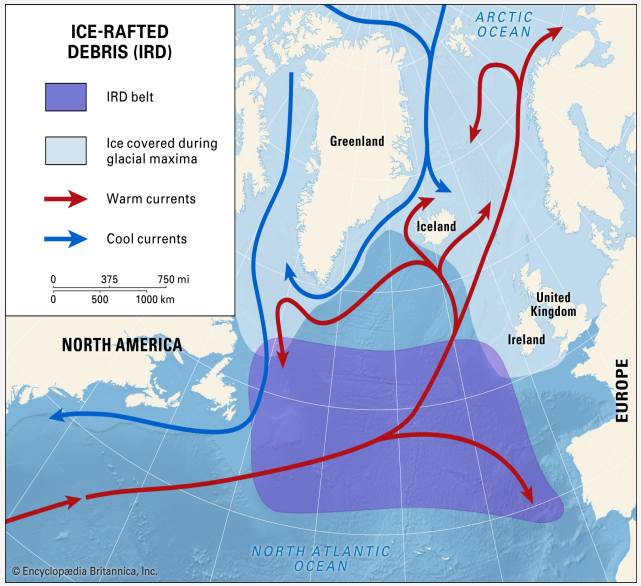


Ciclos Dansgaard – Oescher (1500±500 a)

- Ciclos casi periódicos de menor amplitud y mayor frecuencia
- 25 ciclos (GI/GS)
- Persisten en el Holoceno (Bond events)
- Calentamiento muy rápido (décadas), enfriamiento un poco más gradual
- Duración pocos siglos

Eventos Heinrich (intervalos irregulares, 7200±2400 a)

- 6 eventos registrados en el Atlántico Norte (40-55ºN)
- Elevado % de sedimentos de grano grueso (IRD) en sondeos oceánicos profundos; <% foraminíferos
- Importantes descargas de icebergs
- Inestabilidad climática glacial
- 3-6ºC menos
- 60 – 16,8 ka
- Bajada 1-2ºC en SST, y reducción SSS 4‰



https://www.britannica.com/science/Heinrich-event#/

Últimos 100 ka: Causas de los eventos Heinrich

Condicionantes externos (Heinrich, 1988)

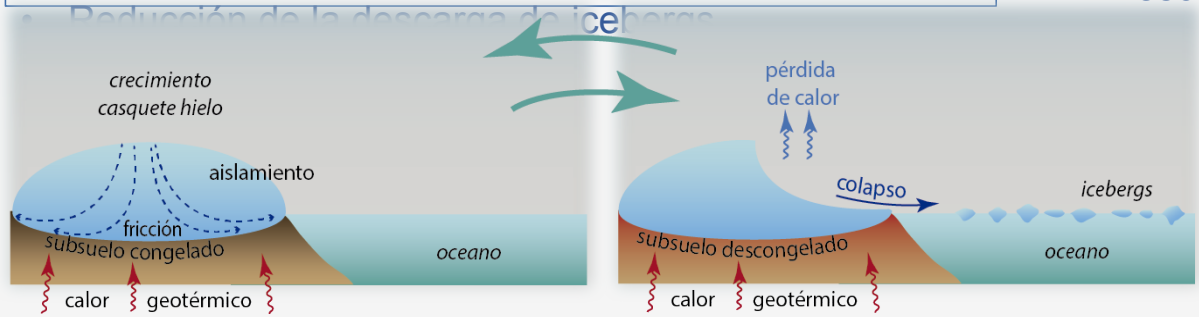
- Variaciones orbitales menores
- Enfriamiento global o aumento de la humedad relativa
- Rápido crecimiento/expansión del casquete polar
- Inestabilidad + descarga de icebergs

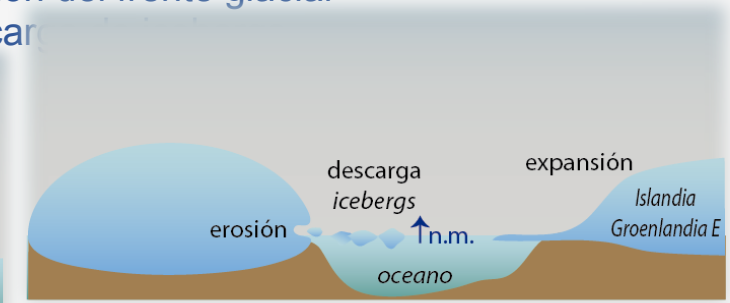
Inestabilidades internas (MacAyeal, 1993)

- Menor masa de hielo → menor descarga
- Calor geotérmico + calor por fricción base del hielo
- Aislamiento por el propio hielo
- Aumento de la temperatura de los sedimentos subglaciares
- Derretimiento → Lubricación → flujo masivo de hielo
- Menor masa de hielo→ menor efecto aislante
- Reducción de la descarga de icebergs

Desestabilización casquete polar HN (Sarnthein et al, 2000)

- Enfriamiento y expansión del casquete polar (1500 a)
- Subida del nivel del mar
- Erosión del frente glacial
- Descar



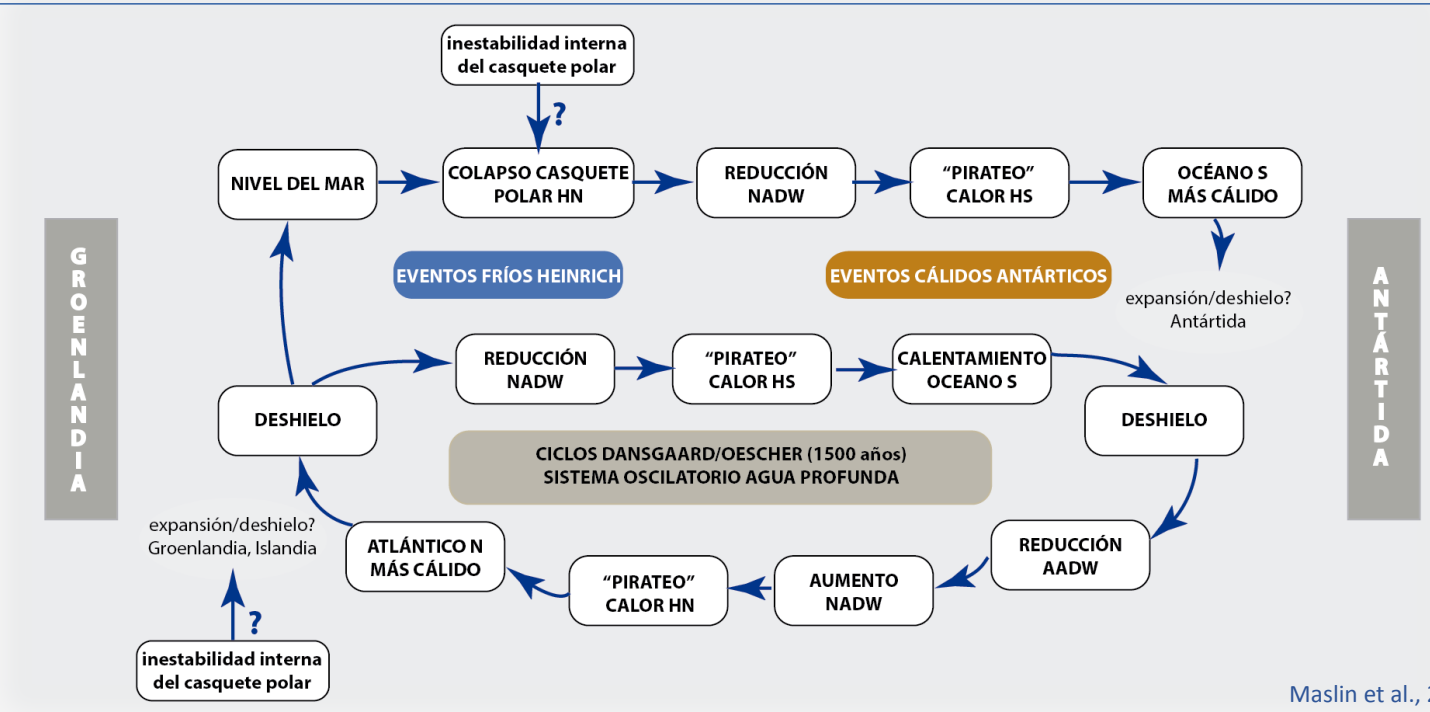


Maslin et al., 2001. Gephysical Monograph Series

Últimos 100 ka: Causas de estas variaciones milenarias

Estrecha relación entre eventos Heinrich y ciclos D/O
"Balancín" bipolar climático y de circulación oceánica profunda

- Desfase en el clima entre los dos hemisferios (Eventos Heinrich coinciden con eventos cálidos antárticos)
- Sistema climático global debe funcionar como un "balancín" bipolar controlado por la atmósfera y/o el océano
- Desencadenante D/O: Variaciones orbitales menores (armónicos)



Maslin et al., 2001. Geophysical Monograph Series

ÚLTIMO 10.000 AÑOS

Transición última glaciación – presente interglacial

Cambios muy rápidos y abruptos, globales

- Calentamiento muy rápido (Bølling-Allerød, 14,9-12,7 Ka)
- Enfriamiento severo pero “gradual” (Younger Dryas, 12,7 – 11,5 ka)
  - Breves calentamientos (~1500 años)
- Transición muy rápida YD – Holoceno
  - sucesivas fases de calentamiento (≤50 años)

Causas La mitad del calentamiento no más de 15 años

BA → Cambios orbitales (máximo de insolación)

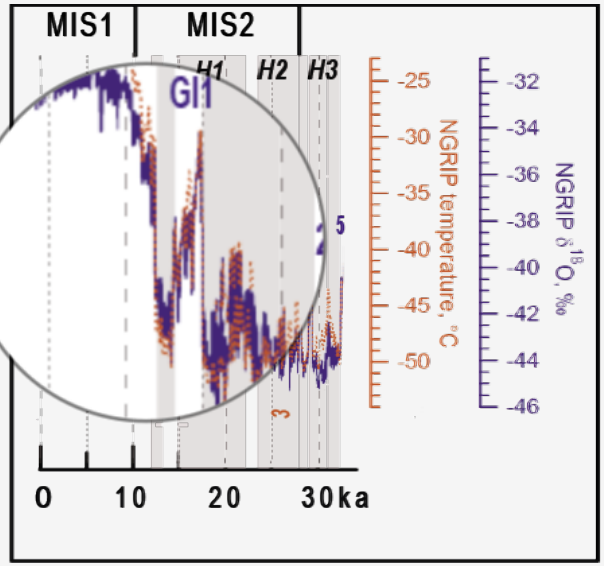
Reducción casquetes polares

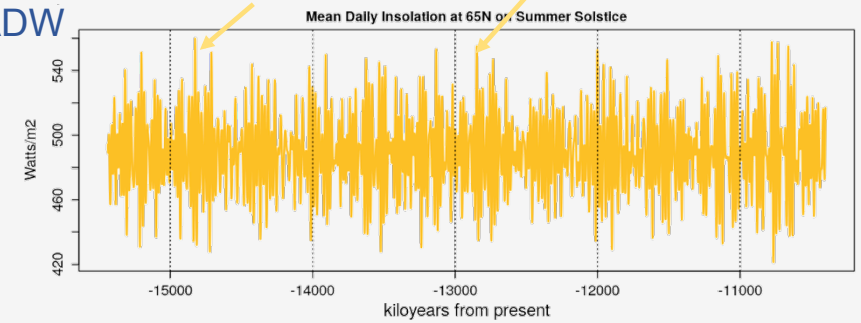
Cambios en la circulación oceánica

YD → Máximo de insolación

Llegada súbita de agua dulce fría procedente de N.América y/o Europa

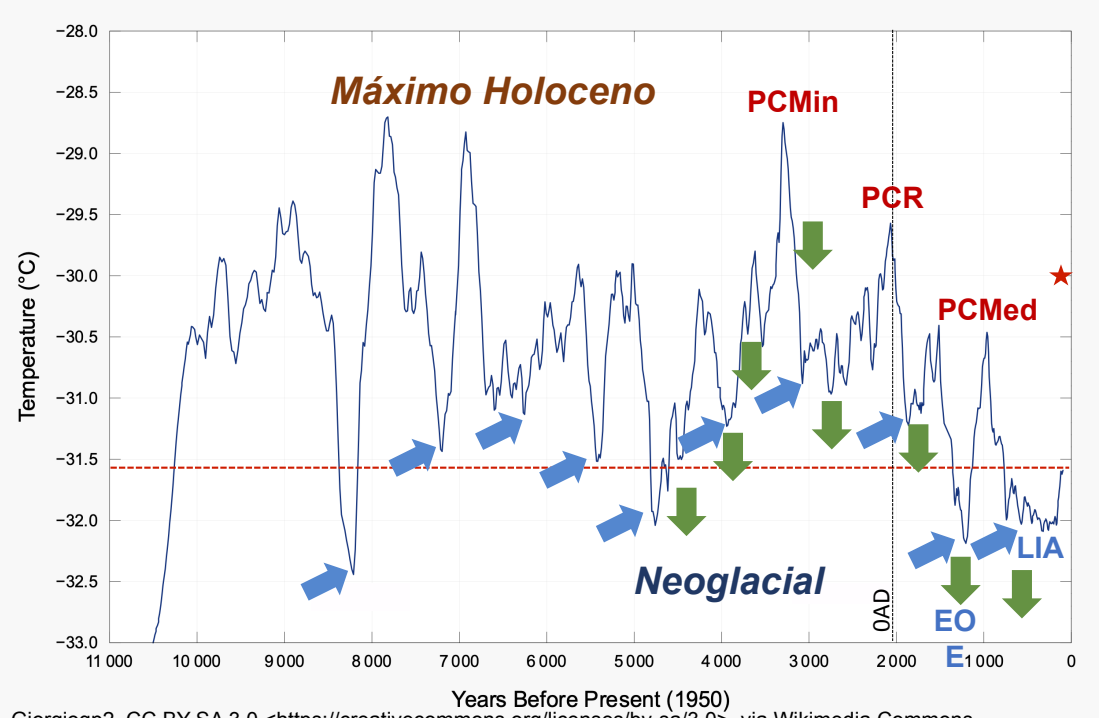
Se frena NADW





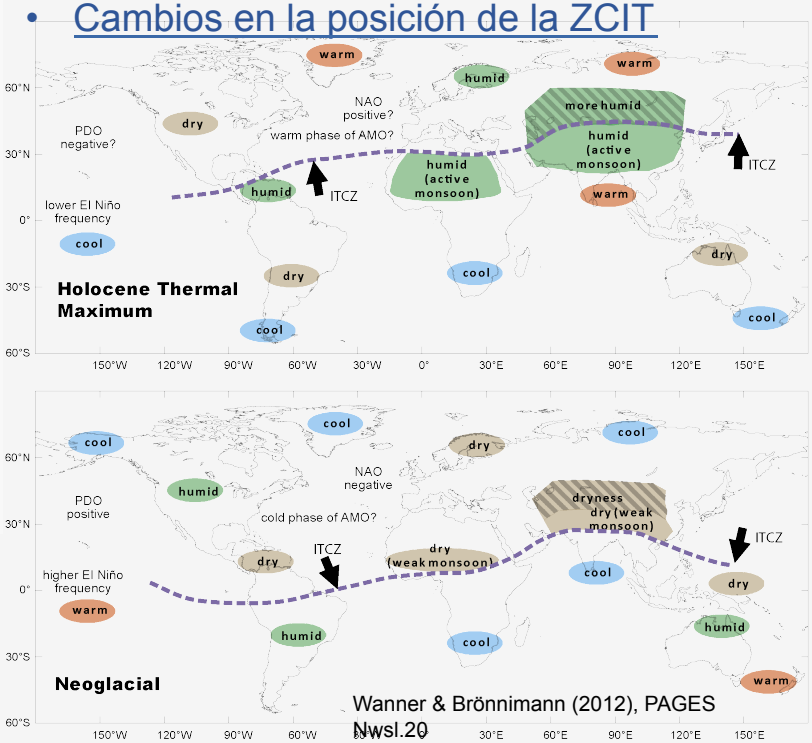
https://biocycle.atmos.colostate.edu/shiny/Milankovitch/

ÚLTIMO 10.000 AÑOS



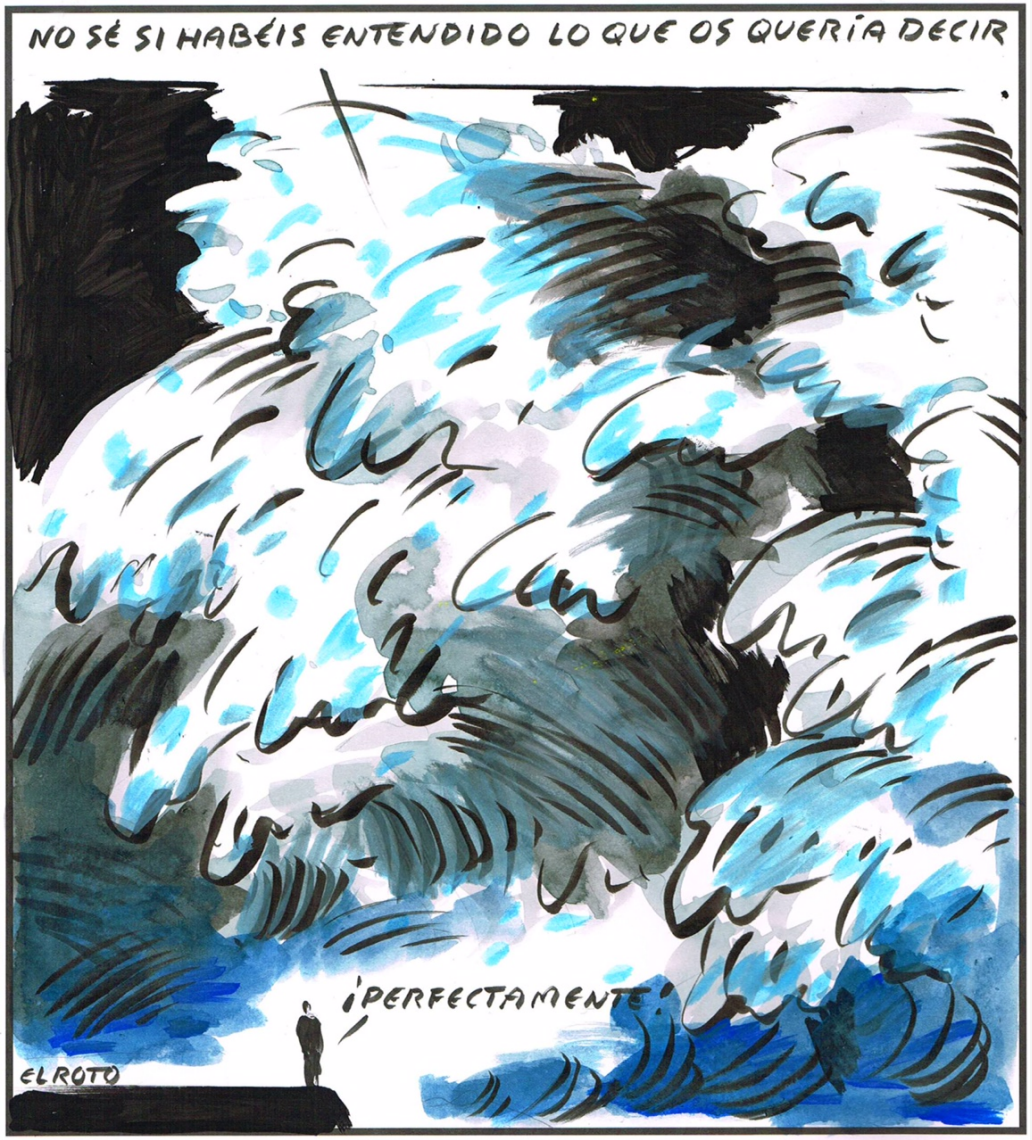
Giorgiogp2, CC BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>, via Wikimedia Commons

- Máxima insolación HN (disminuyendo últimos 7ka)
- Reorganización hidrográfica tras la deglaciación
- Variaciones de diferente escala temporal
- Cambios en la posición de la ZCIT



Wanner & Brönnimann (2012), PAGES Nwsl.20

- Eventos fríos interrumpen periodos cálidos relativamente estables
- Escala multidecadal o multicentenial
- Disminución insolación combinado con debilitamientos de la termohalina


NO SÉ SI HABÉIS ENTENDIDO LO QUE OS QUERÍA DECIR
¡PERFECTAMENTE!
EL ROTO