

Historia del Clima en la Tierra: El Holoceno



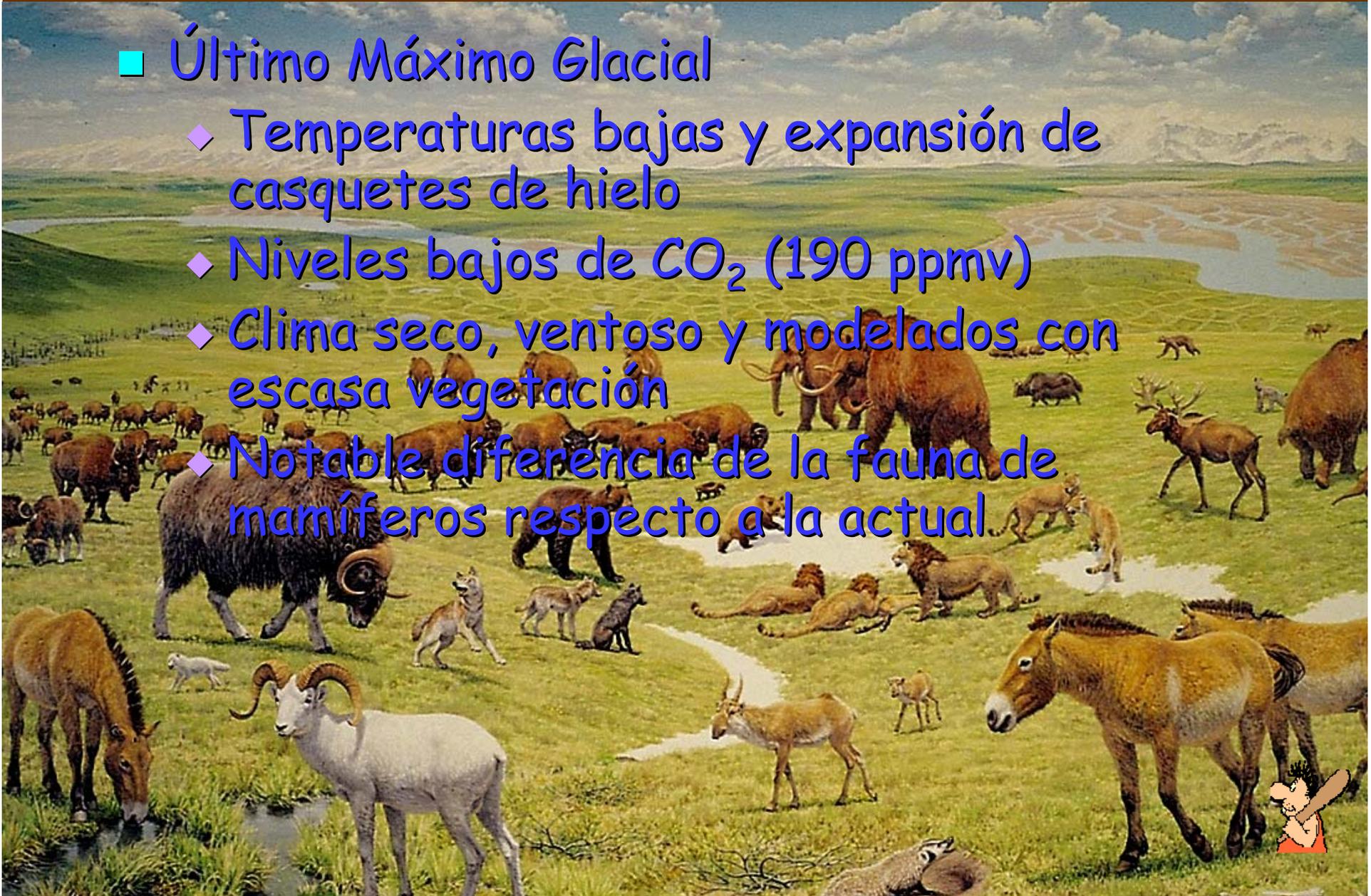
Gerardo Benito Ferrández

CSIC-Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid

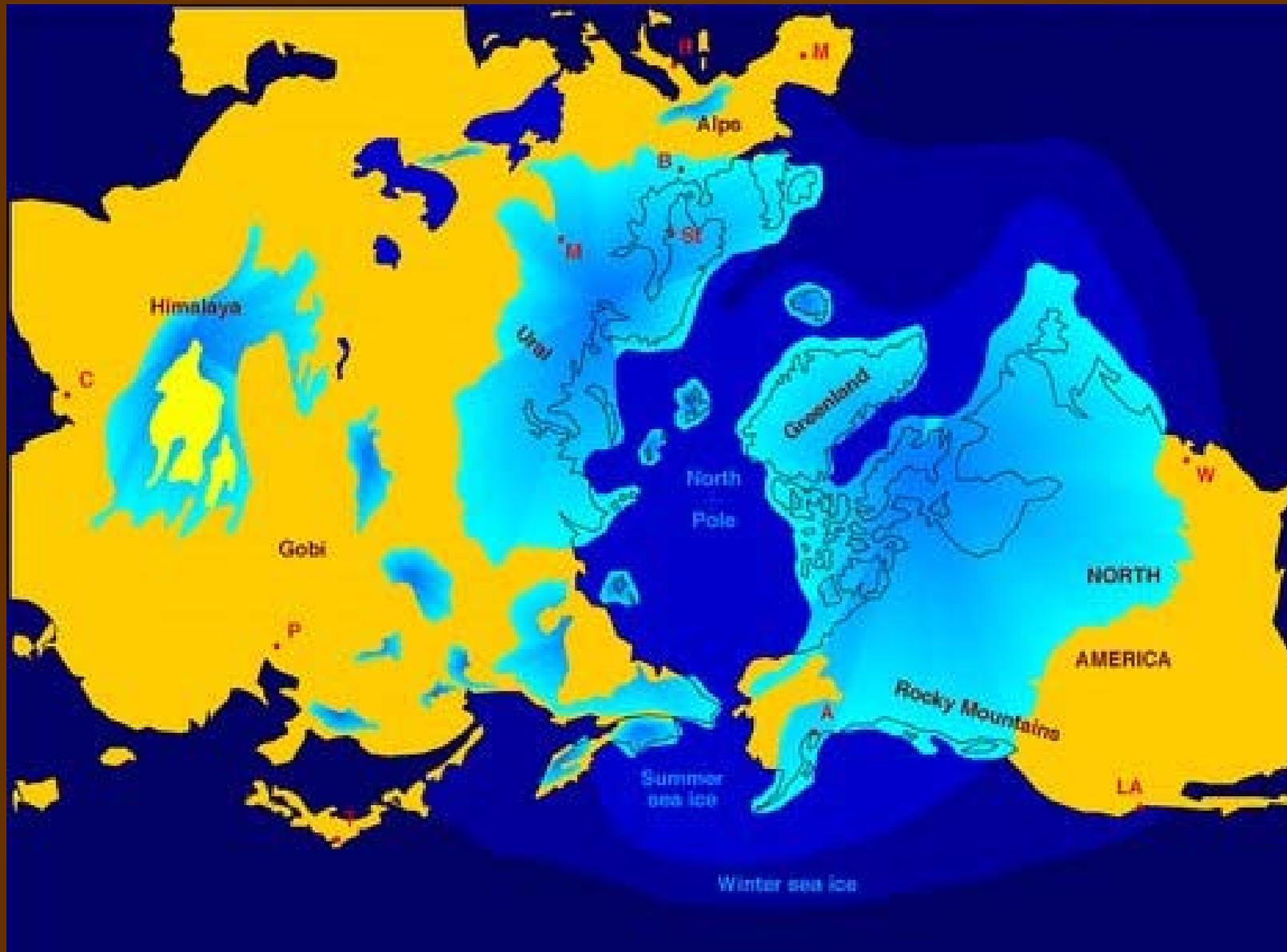
HOLOCENO

Clima en los últimos 20,000 años

- Último Máximo Glacial
 - ◆ Temperaturas bajas y expansión de casquetes de hielo
 - ◆ Niveles bajos de CO_2 (190 ppmv)
 - ◆ Clima seco, ventoso y modelados con escasa vegetación
 - ◆ Notable diferencia de la fauna de mamíferos respecto a la actual

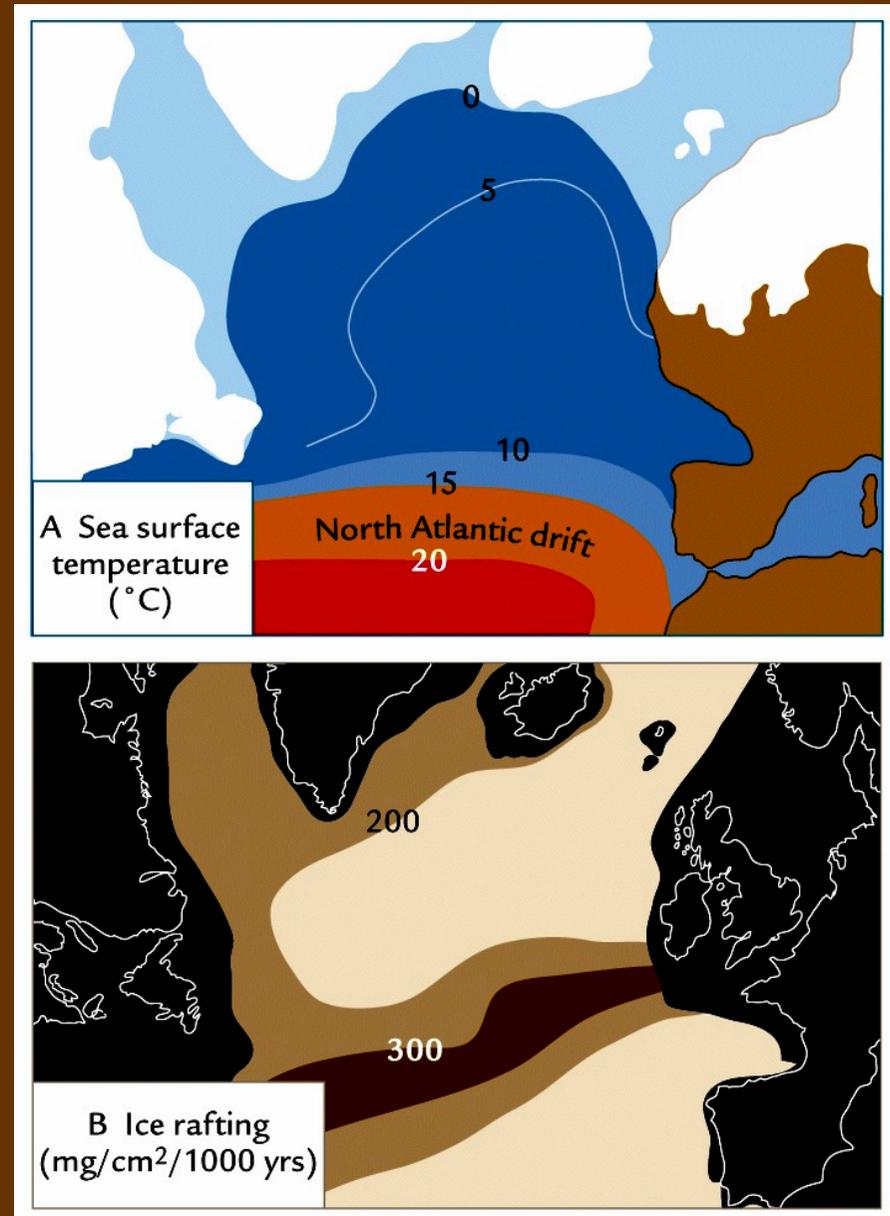


Extensión del Hielo HN, LGM



Reconstrucciones de CLIMAP, LGM

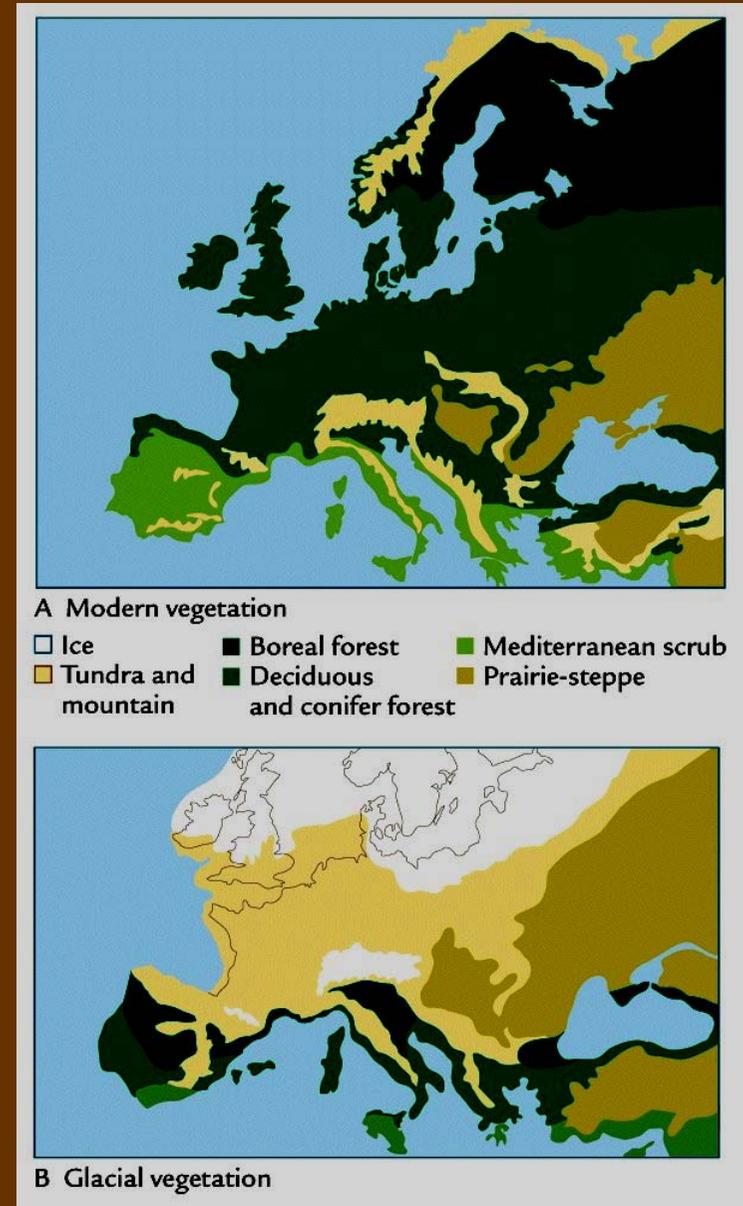
- Tierra 4°C más fría
- Atlántico N. 8°C más frío
- Hielo en océano más extenso
- Expansión del hielo sobre los océanos del Hemisferio Sur
- Temperaturas ecuatoriales algo más frías
- Nivel de mar 120 m por debajo del actual
- Enfriamiento del Atlántico N. y Corriente del Golfo queda en latitudes próximas a Portugal
- Flujo de icebergs y detritos próximos 50°N



A: McIntyre et al., 1976; B: Ruddiman, 1977

LGM en Europa

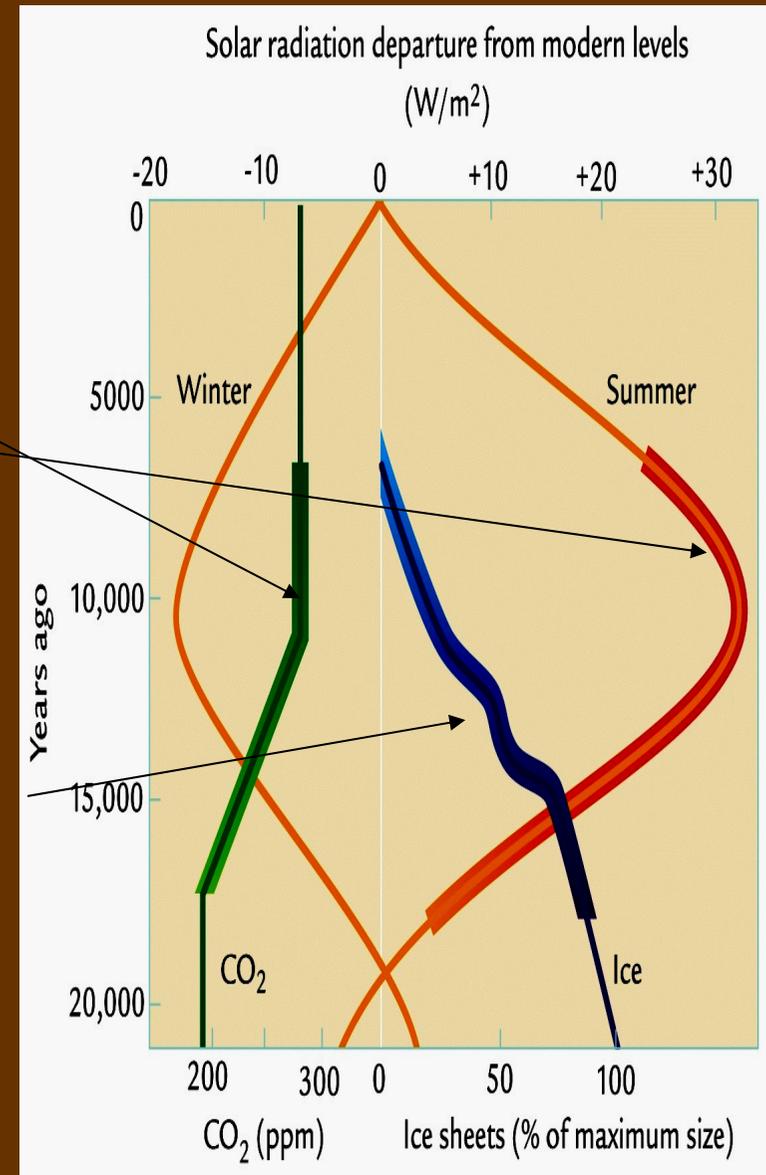
- Vegetación actual dominada por bosques
 - ◆ Coníferas en el norte
 - ◆ Caducifolios en el sur
- En LGM
 - ◆ Grandes áreas de tundra ártica al sur de los casquetes de hielo
 - ◆ Al este dominio de praderas y estepa
 - ◆ Bosques sólo en el margen sur



Ruddiman, 2008, adaptado de Flint, 1971

Deglaciación

- Clima en el LGM controlado por Casquetes de hielo y CO_2 atmosférico
- Durante la deglaciación se derivó hacia:
 - ◆ Mayor insolación y CO_2
 - ◆ Menor extensión de los casquetes
 - ◆ A medida que se incrementó la insolación
 - ◆ Casquetes se deshelaron
 - Menor influencia en el clima
 - ◆ CO_2 tuvo un papel secundario en el clima

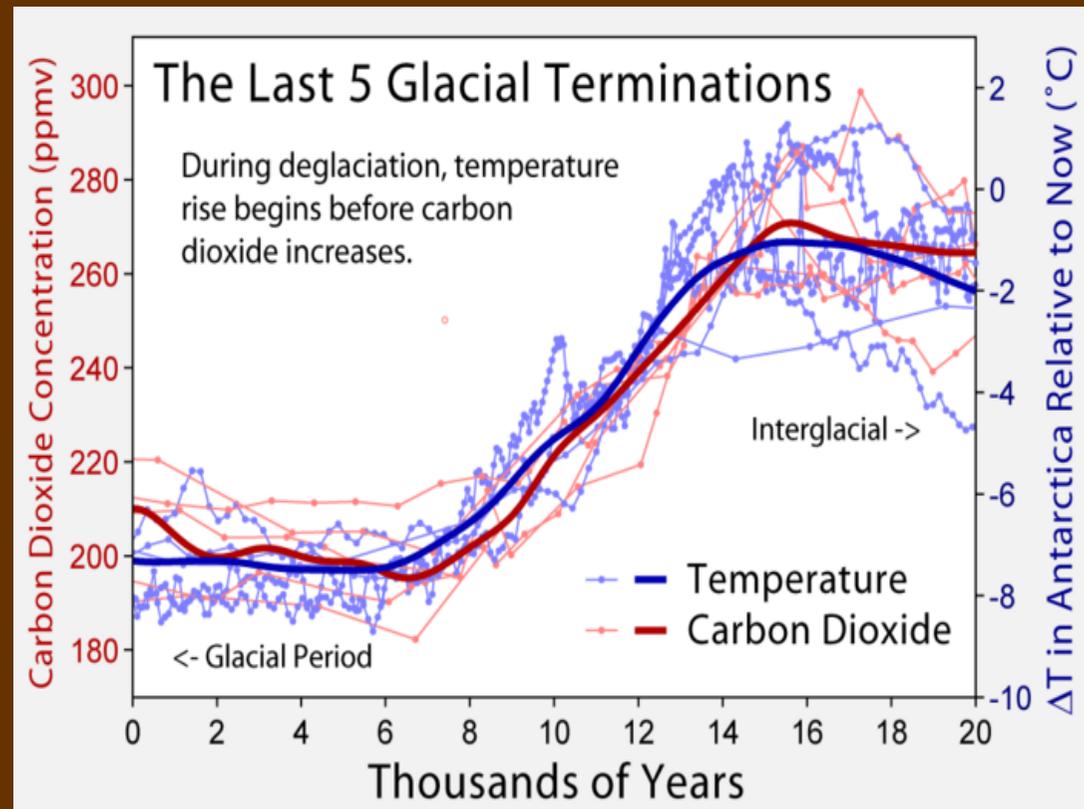


Ruddiman, 2008, adaptado de Kutzbach et al., 1998

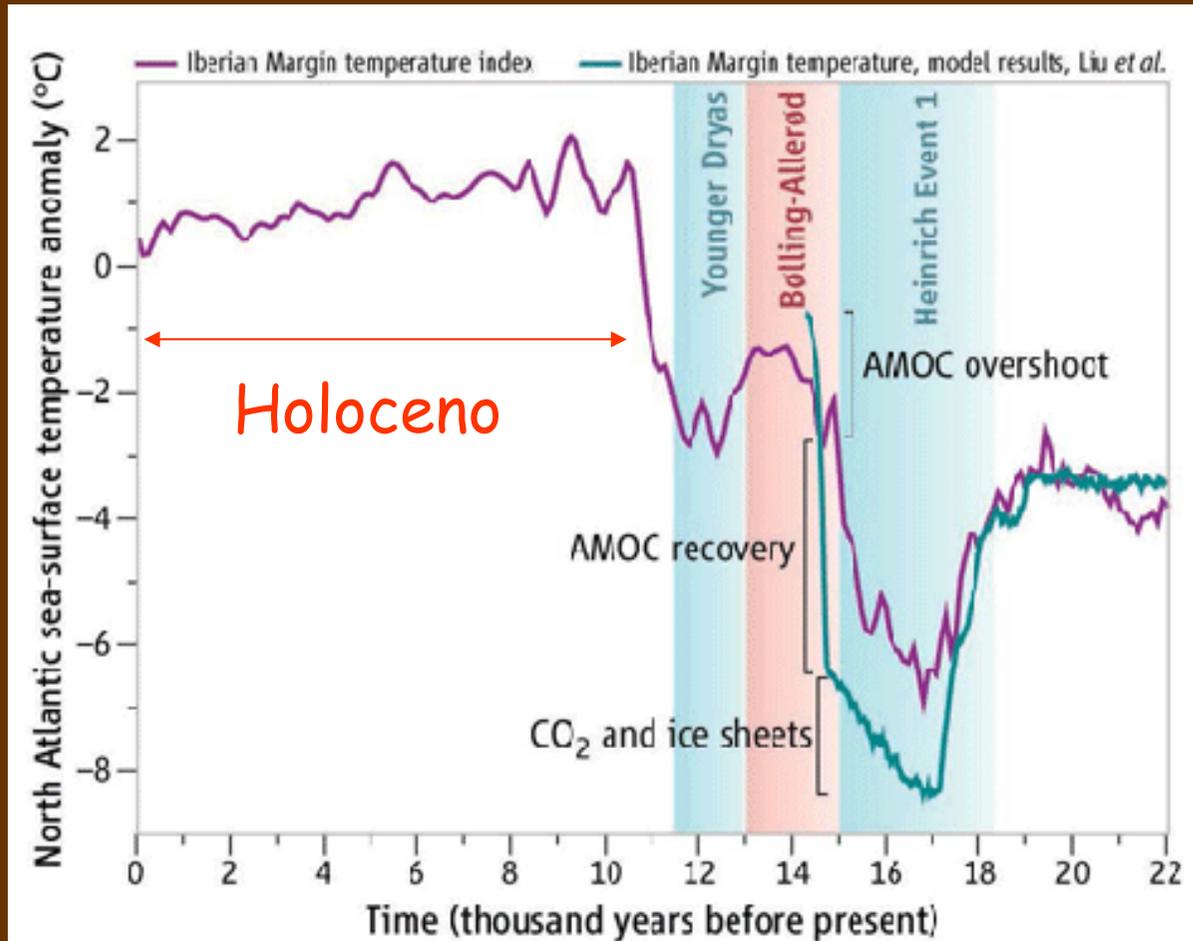
En la deglaciación...

¿Qué aumentó primero el CO_2 o la T?

- La transición glacial-interglacial ~ 18 k años
- El inicio de $\uparrow T$ precede al $\uparrow \text{CO}_2$ en 800 ± 200 años
- Los cambios orbitales inducen al cambio y se especula que el $\uparrow T$ favorece la salida de CO_2 de los océanos, amplificando el calor
- La deglaciación en el H. Norte no se inicia hasta que se produce el $\uparrow \text{GH}$ gases
- Los GH se estiman contribuyen con el 30-40% al calentamiento. El resto se debe a cambios en albedo (- hielo y + vegetación).



Cambios abruptos desde LGM



Timmerman, A. and L. Menviel 2009: What Drives Climate Flip-Flops? *Science* 325: 273-274

Cambios del nivel del mar: 120 m

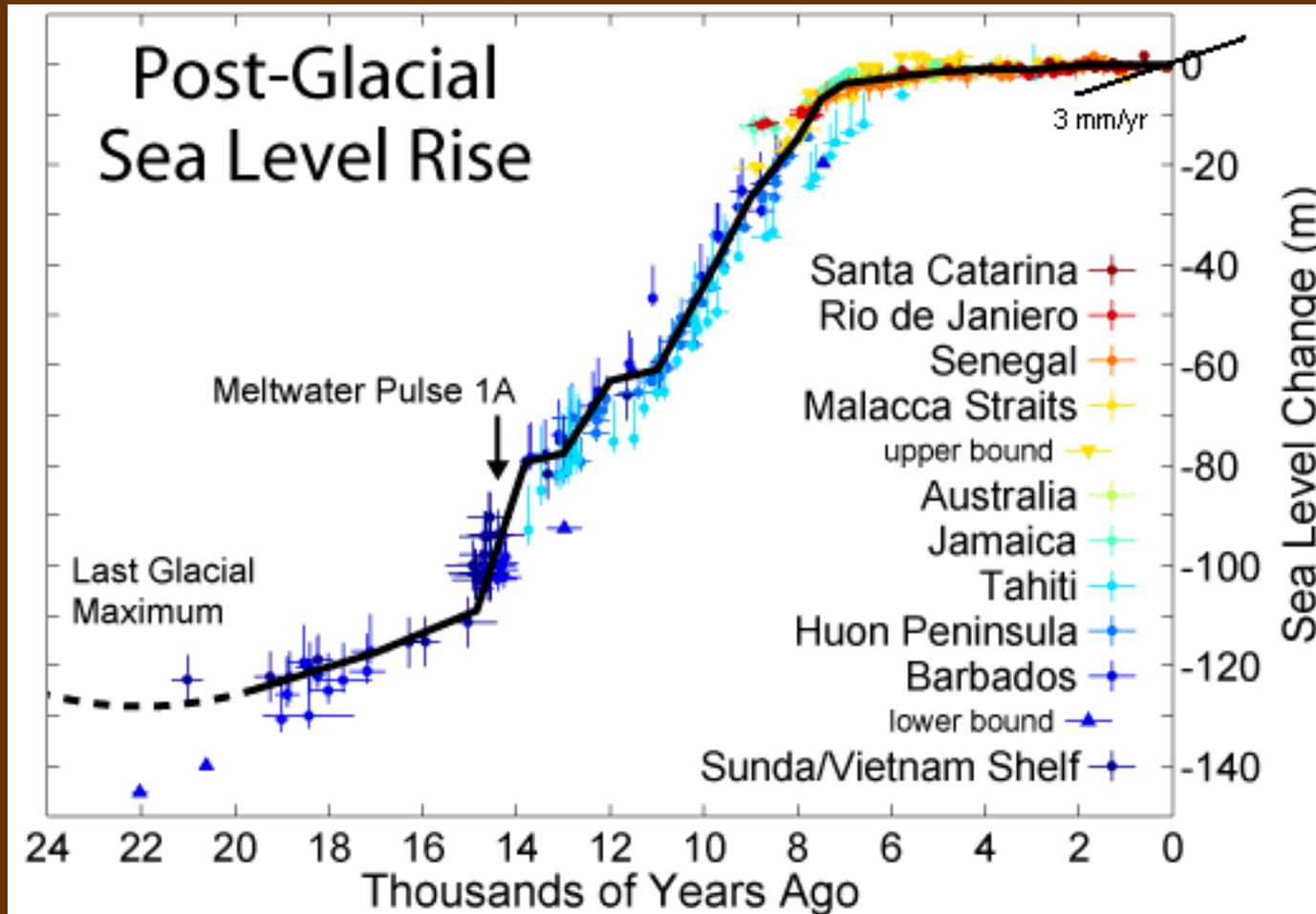
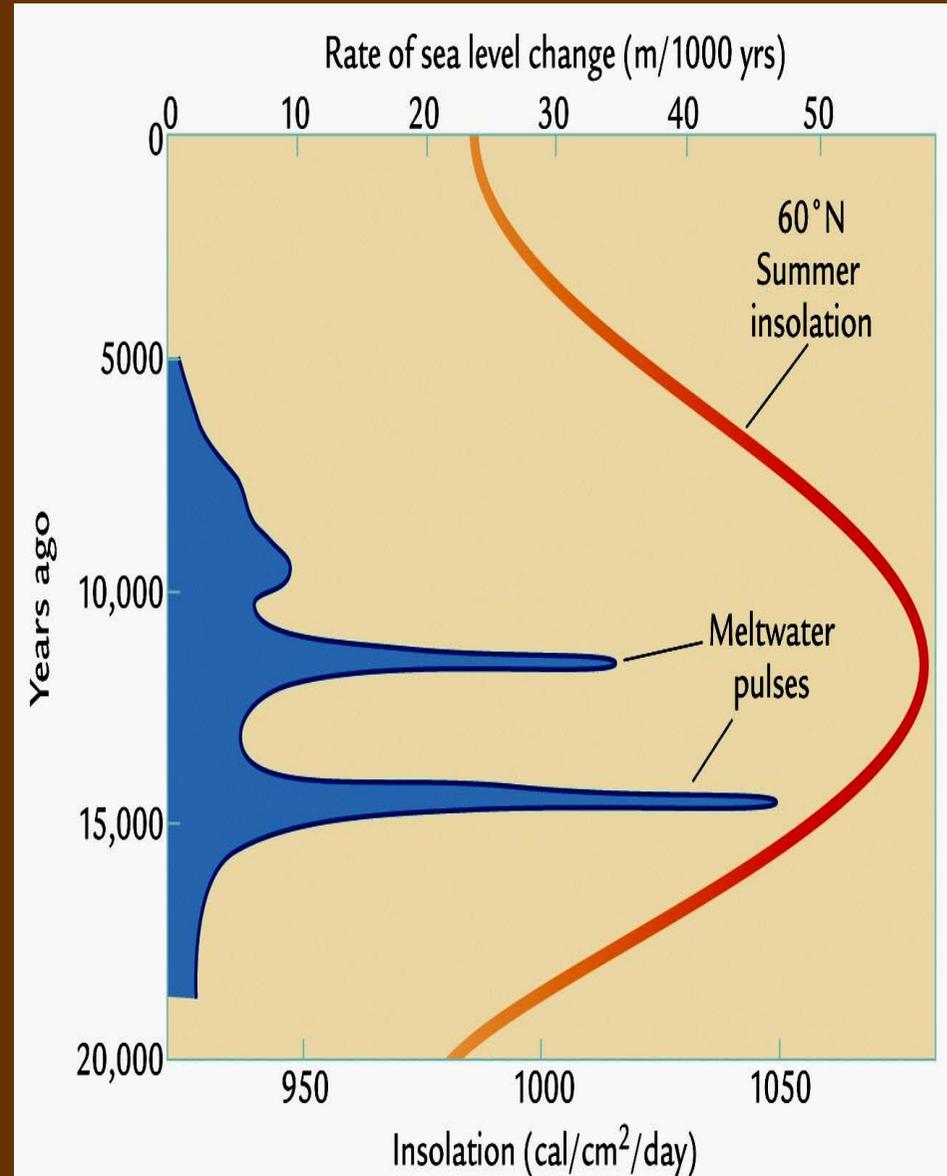


Gráfico basado en Robert Rodhe's *Global Warming Art*

Tasas de aumento del nivel del mar

- Existieron dos pulsos con entrada de flujo de agua fresca a los océanos en 15-14 ka y 12.7-11.5 ka BP.
- Deshielo de glaciares:
 - ◆ Deshielo episódico de glaciares
 - ◆ Flujo catastrófico y episódico de agua dulce hacia los océanos



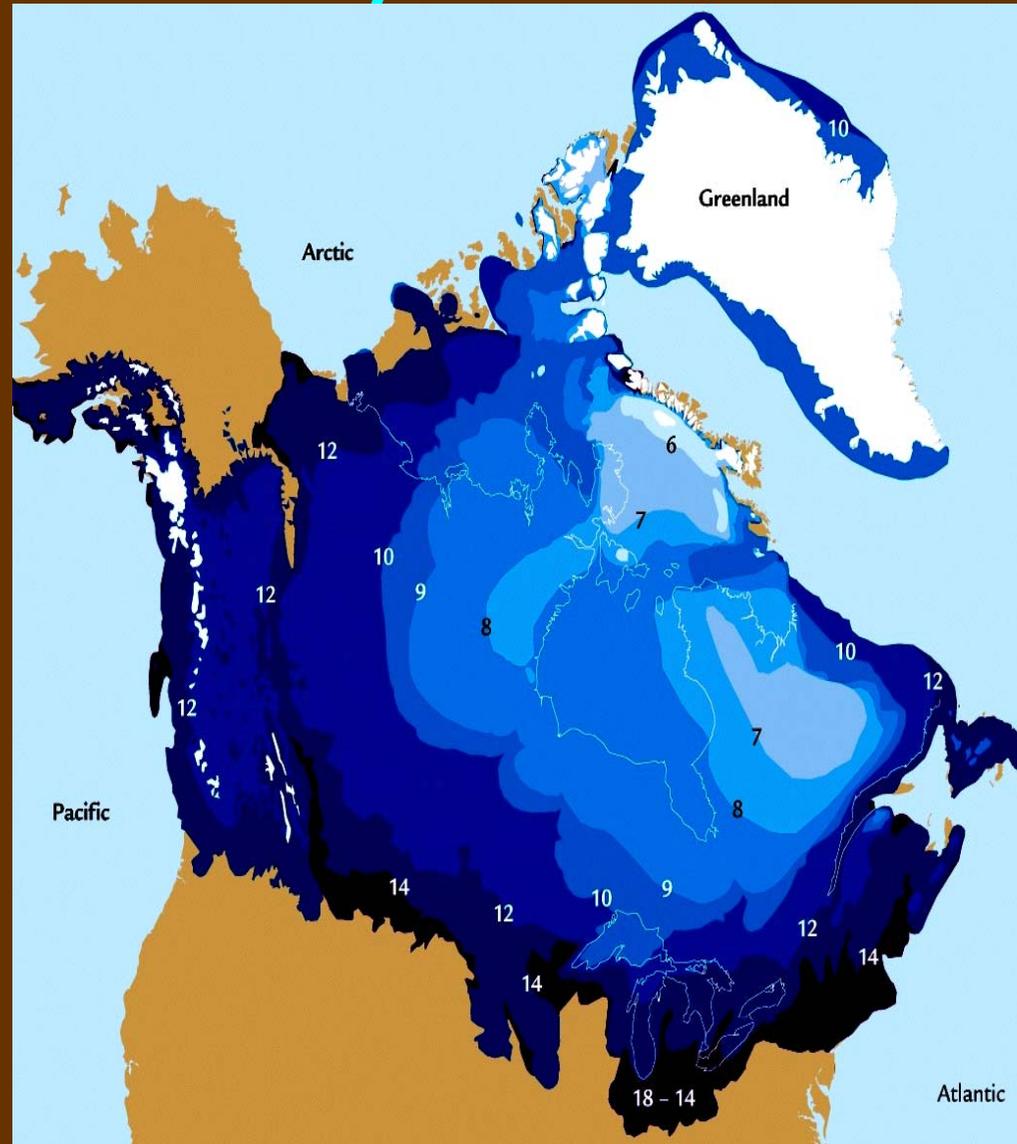
Principales Mega-inundaciones del Pleistoceno Tardío

Volumenes drenados por lagos proglaciares en km³



Tiempos en el deshielo de los casquetes Laurentido y Cordillerano

- Determinados a partir de radiocarbono
- Laurentido: comienza a retroceder hace 14,000 ^{14}C años BP
 - ◆ Desaparece hace 6,000 ^{14}C años BP
- Espesor de Hielo controvertido



Ruddiman, 2008, adaptado de Dyke, GSC, Ottawa

Flujos catastróficos y Younger Dryas

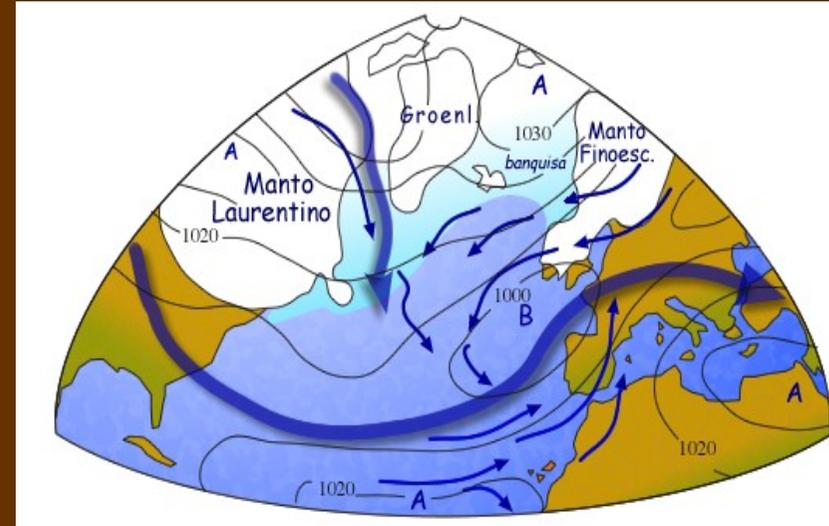
- Broecker propuso que la llegada de grandes volúmenes de agua al Atlántico N. podría detener la formación de agua profunda del AN
 - ◆ El agua de deshielo que drenaba al Golfo de México fue desviada al Atlántico N.
 - ◆ Pulsos de agua de baja salinidad pudieron ser responsables de la paralización de la formación de agua profunda en el Atlántico
 - ◆ Esto cortarían la transferencia de calor hacia las zonas subpolares desde los trópicos



GCM y Circulación zonal en altitud

La llegada de aguas frías de deshielo produce un efecto similar al deshielo de casquetes

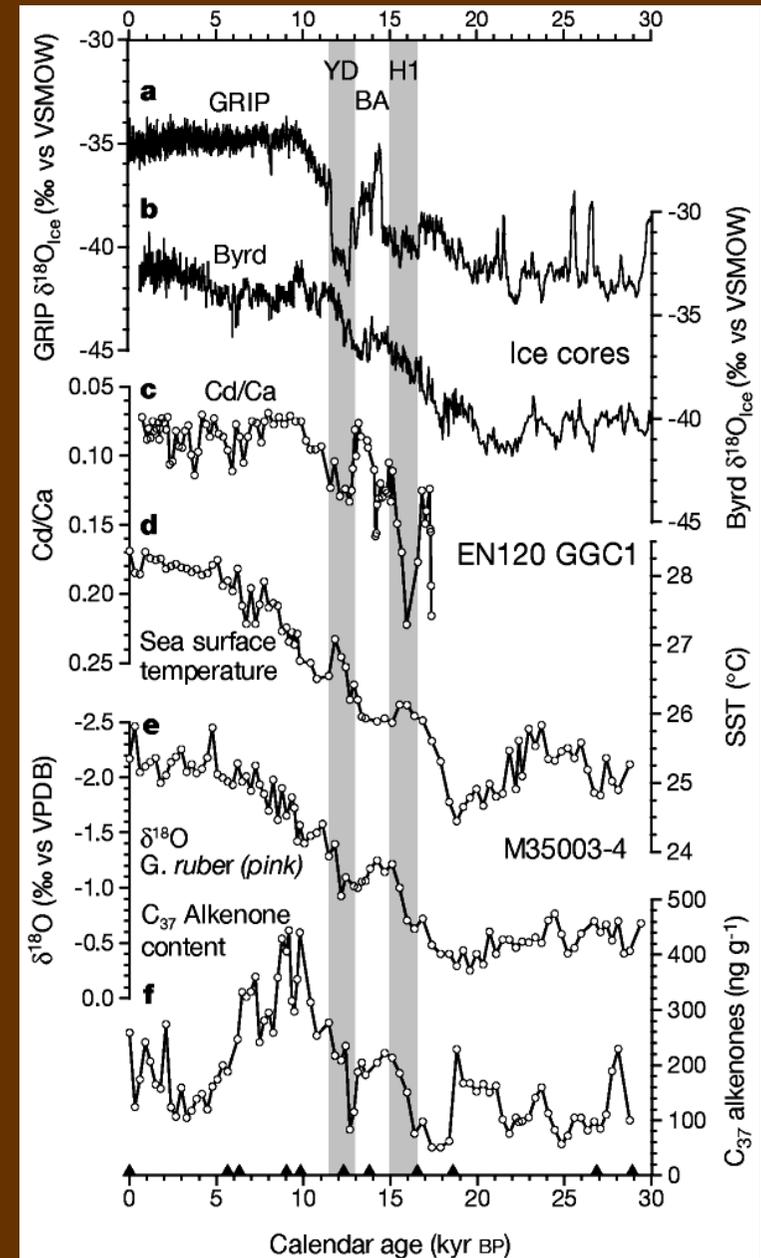
- ◆ Ruptura del sistema de corriente termohalina
- ◆ Ruptura de la Corriente del Golfo y de transferencia de calor de los trópicos al Atlántico subpolar
- ◆ Redirección de la corriente en chorro (jet stream)
- ◆ Niveles bajos de flujo atmosférico bloqueados por el hielo y las bajas temperaturas del océano
- ◆ Niveles altos de la corriente de chorro se desplazó en Europa hacia latitudes de 45-50°N



estadales fríos

YD: ¿Enfriamiento sincrónico o asincrónico?

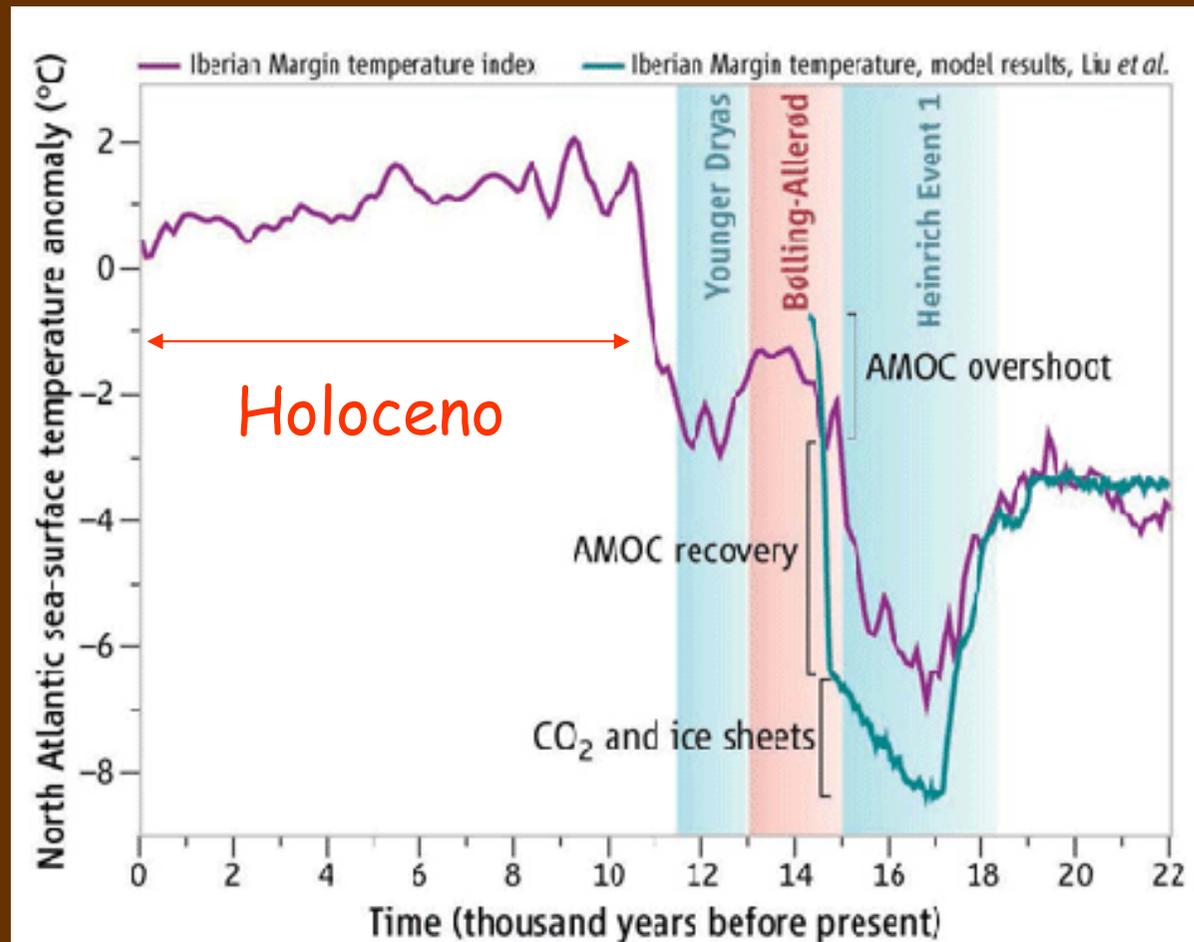
- Los registros de isótopos de Oxígeno procedentes de sondeos de hielo GRIP y Byrd:
 - ◆ Diferencias de temperaturas entre hemisferios N. y S.
 - ◆ Sugiere un enfriamiento asincrónico
- Algunos registros terrestres sugieren un enfriamiento sincrónico
 - ◆ Cambios en las concentraciones de gases invernadero
 - ◆ ¿Control Oceánico o Atmosférico?



Últimas fases de deglaciación

- Se sugiere que la retroalimentación en el sistema climático aceleró el deshielo de los casquetes
 - ◆ Los icebergs incrementarían la tasa de deshielo (pérdida de masa)
 - ◆ Los bloques de hielo se mueven hacia aguas relativamente cálidas
 - ◆ Los casquetes en zonas marinas marginales son susceptibles de rápido deshielo
 - ◆ El flujo interno de los casquetes de hielo se incrementa a lo largo de los valles
 - ◆ Causa un adelgazamiento efectivo de los casquetes, reduciendo su volumen pero no su extensión

Holoceno, últimos 11.500 años



Timmerman, A. and L. Menviel 2009: What Drives Climate Flip-Flops? *Science* 325: 273-274

Holoceno en el contexto de otros periodos interglaciares

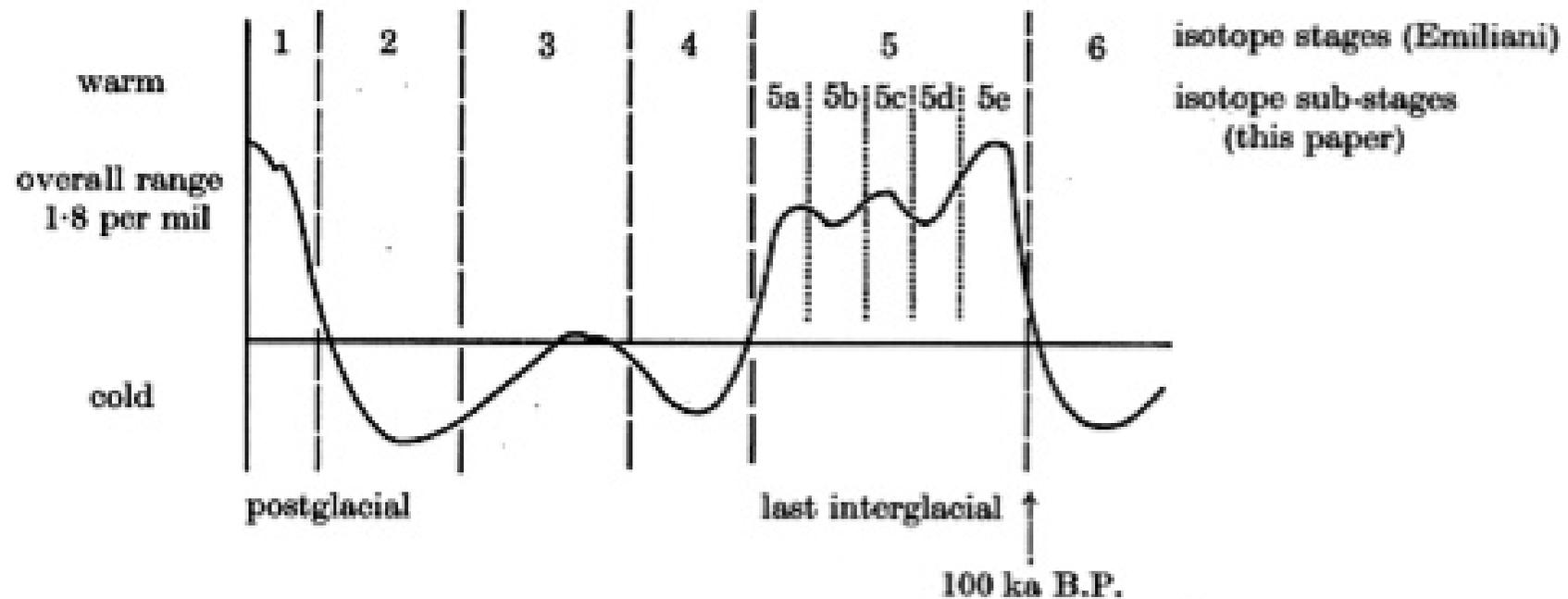
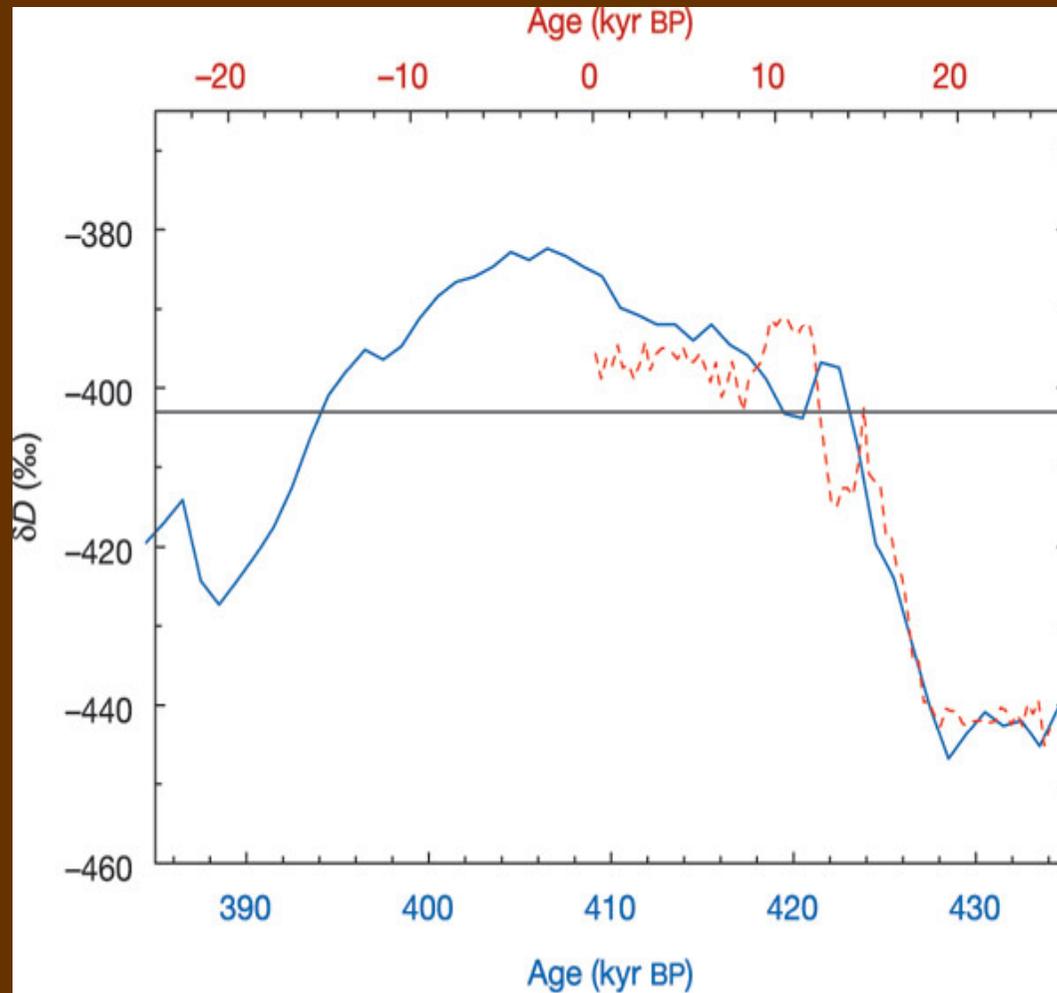


FIGURE 1. Generalized oxygen isotope palaeotemperature record through last six isotope stages, after Emiliani (1961).

Comparación de la Terminación V más MIS 11 con la Terminación I más Holoceno. Los datos de D para MIS 11 (medias de 1-kyr)



Cambios del nivel del mar: 120 m

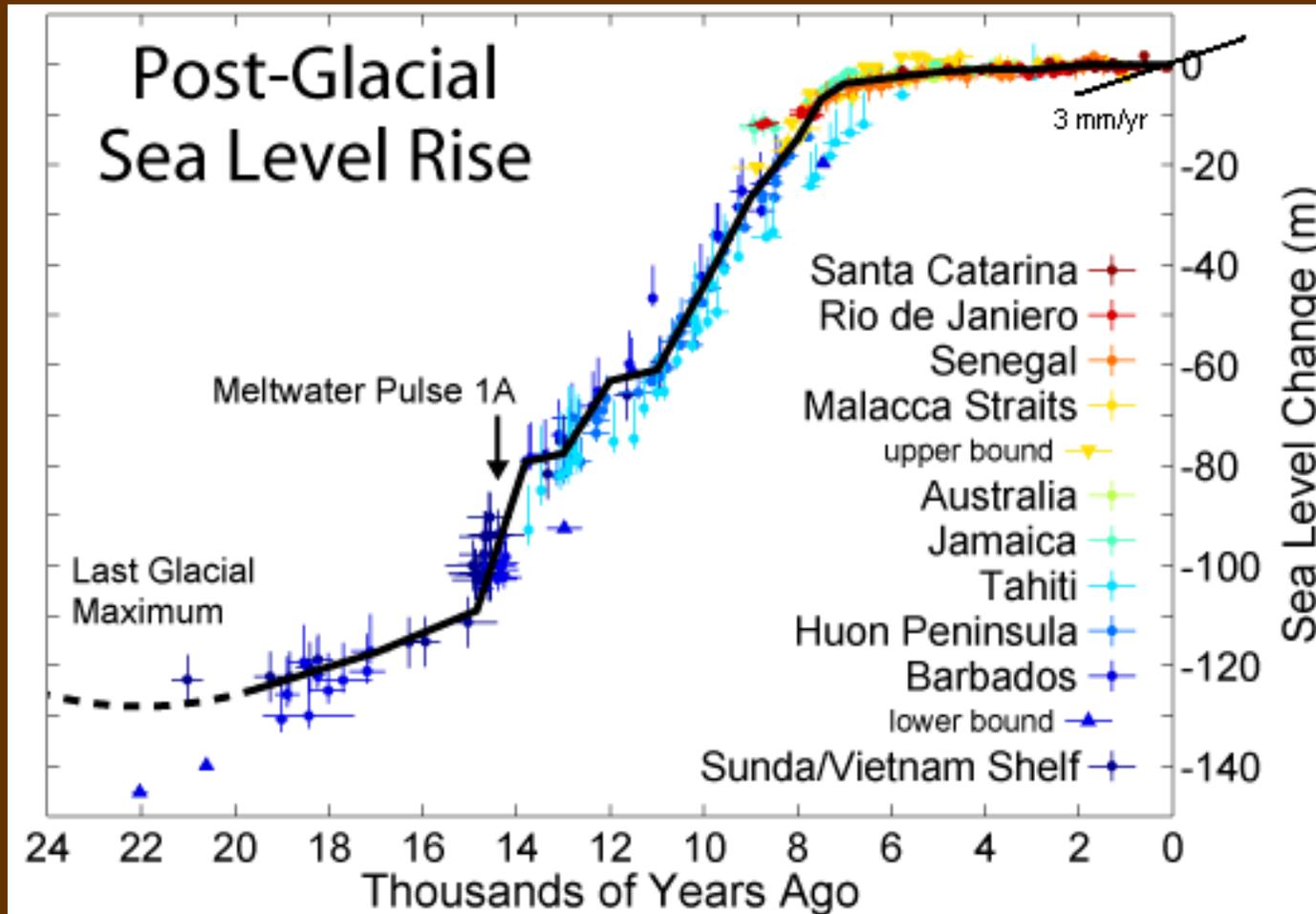


Gráfico basado en Robert Rodhe's *Global Warming Art*

Nivel del mar en el Holoceno

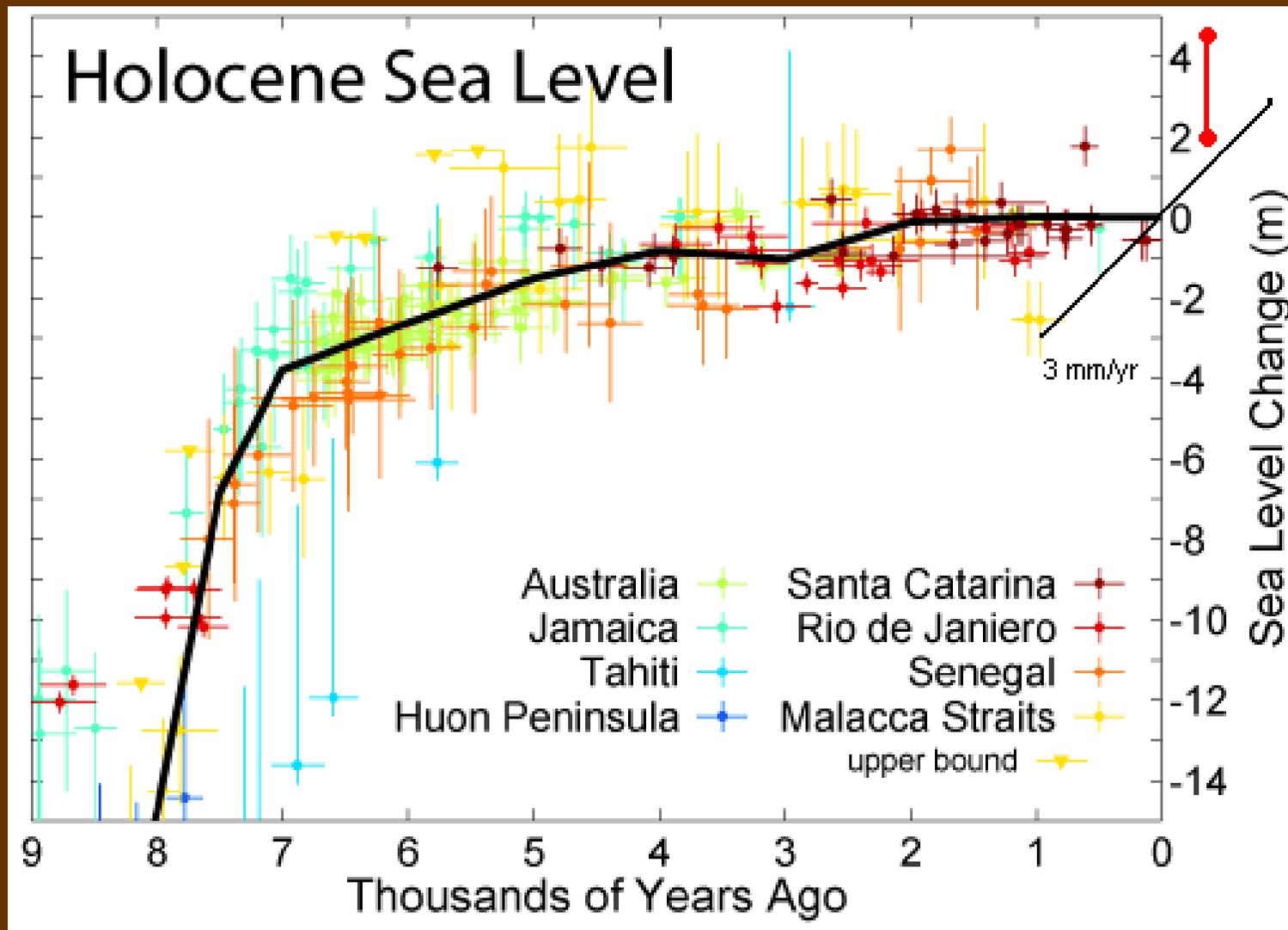
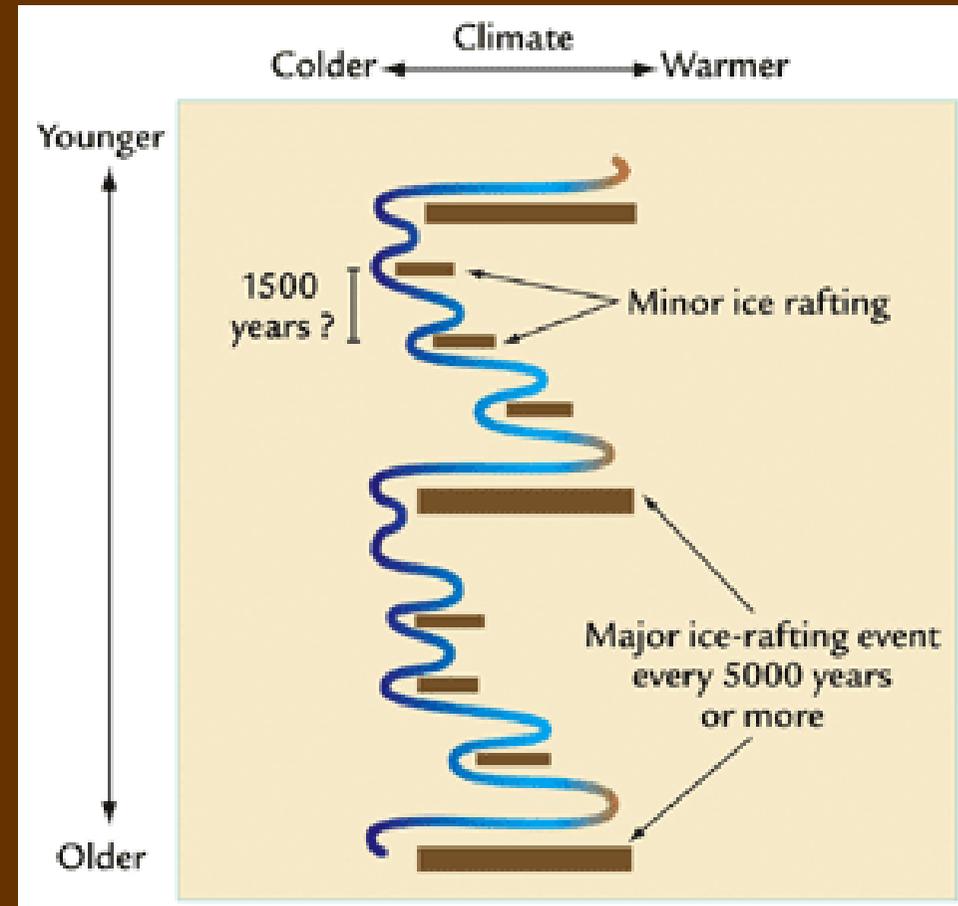


Gráfico basado en Robert Rodhe's *Global Warming Art*

¡A pesar del deshielo, la conexión del Atlántico Norte se mantiene!

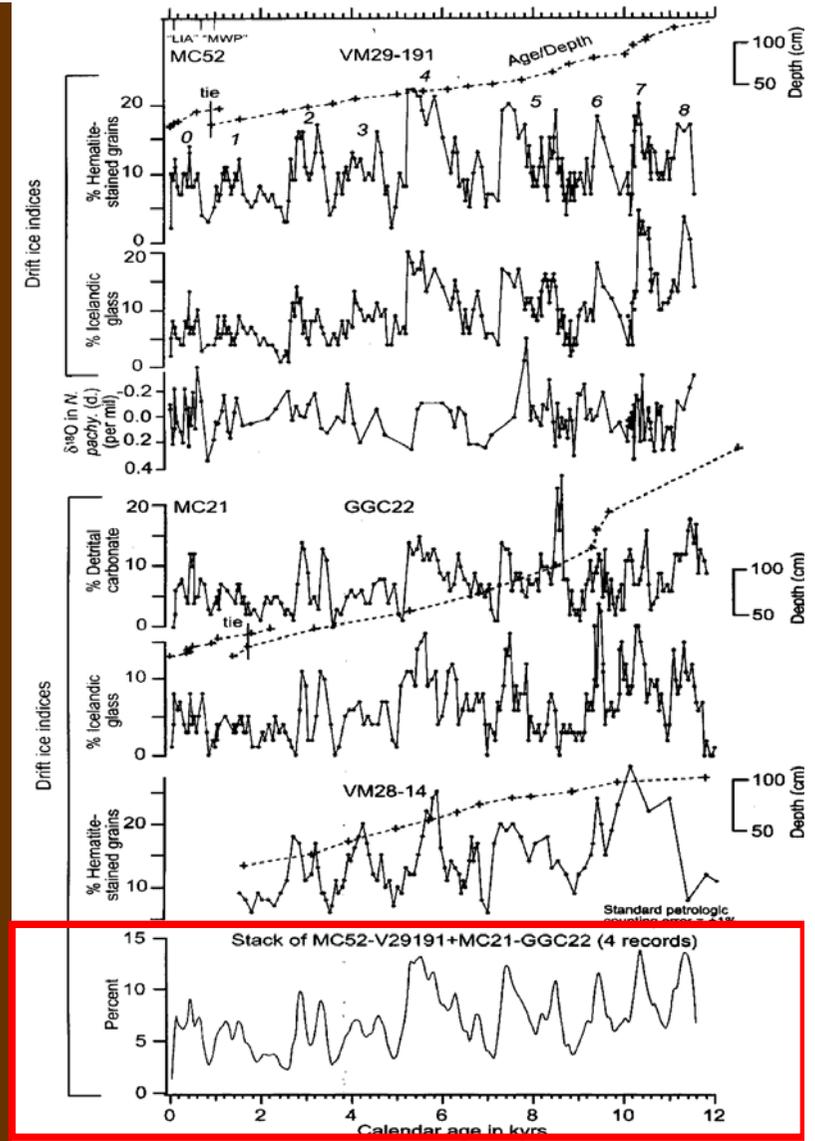
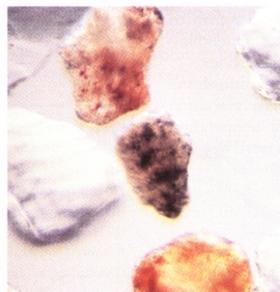
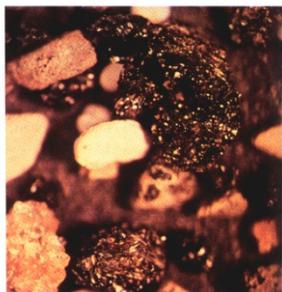
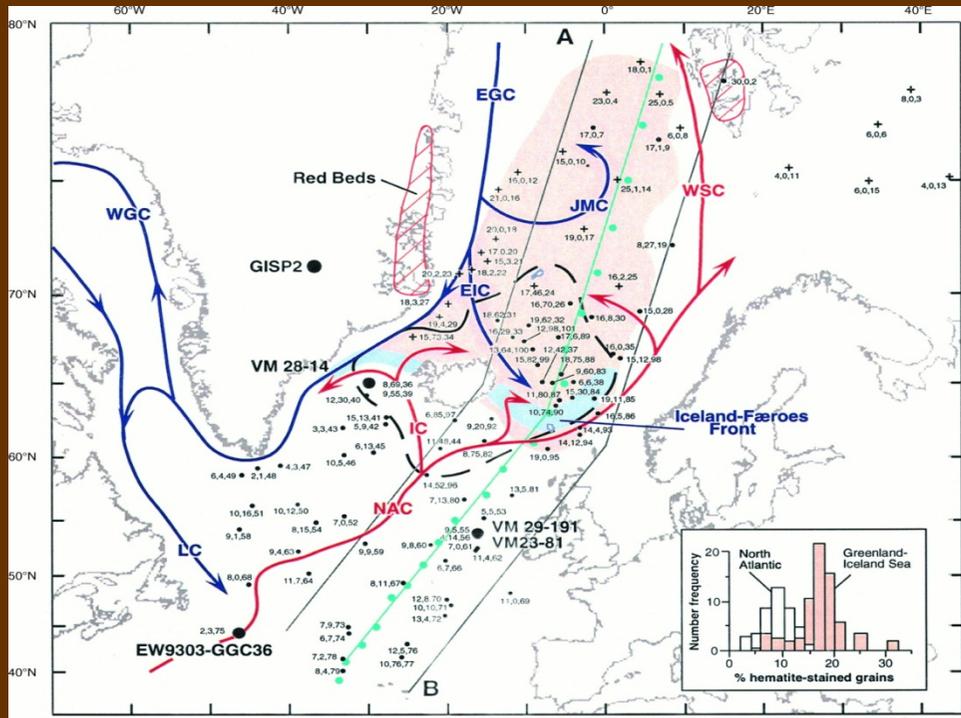
Los detritos transportados por icebergs (IRD) proporcionan evidencias de la variabilidad climática a escala milenaria.

Se ha observado ciclos de 1500 años de acumulación de IRD denominados eventos Bond (Bond, 2001)



Eventos Bond, Bond et al., 1997

Variabilidad climática del Holoceno en los registros marinos del Atlántico Norte



Bond et al., (1997)

Eventos de icebergs a la deriva:
Vidrio volcánico y granos de hematite

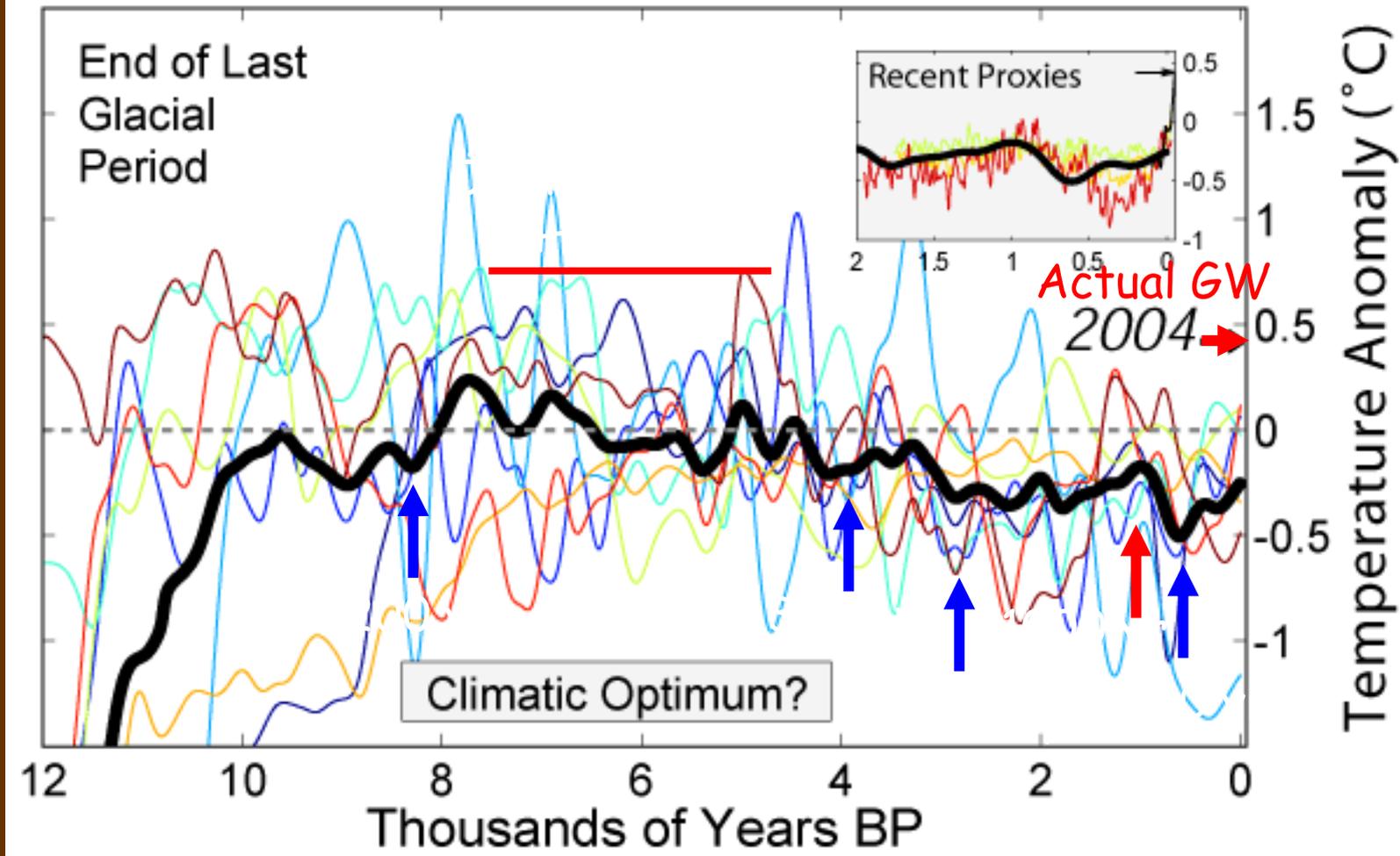
Eventos Bond

- Los eventos Bond NO tienen una señal climática unívoca; unos corresponden a periodos de enfriamiento, otros coinciden con aridificación de algunas regiones:
- $\approx 1,400$ BP (Evento Bond 1) — Corresponde al periodo de migraciones Bárbaras (450-900 AD)
- $\approx 2,800$ BP (Evento Bond 2) — Corresponde con el periodo frío de la Edad de Hierro, finales del Bronce en España (900-300 BC)
- $\approx 4,200$ BP (Evento Bond 3) — Se correlaciona con el evento 4.2 ka event (correlaciona con el colapso del Imperio acadio que fue un gran reino de Mesopotamia)
- $\approx 5,900$ BP (Evento Bond 4) — Correlaciona con el evento 5.9 ka (final del Neolítico B, y llegada de los pastores nómadas al Oriente Próximo)
- $\approx 8,100$ BP (Evento Bond 5) — Correlaciona con el evento 8.2 ka
- $\approx 9,400$ BP (Evento Bond 6) — Correlaciona con el evento Erdalen de actividad glacial en Noruega
- $\approx 10,300$ BP (Evento Bond 7) — Sin nombre, se correlaciona con el inicio de la agricultura de cereal en el Oriente Próximo)
- $\approx 11,100$ BP (Evento Bond 8) — Coincide con la transición del Younger Dryas al Boreal

Holoceno

- Holoceno comienza aproximadamente 11.700 BP
- Blytt-Sernander propuso una clasificación basada en cambios en la vegetación (clima) en Europa, que actualmente tiene un uso limitado:
 - ◆ Preboreal (10 ka - 9 ka),
 - ◆ Boreal (9 ka - 8 ka),
 - ◆ Atlántico (8 ka - 5 ka),
 - ◆ Subboreal (5 ka - 2.5 ka) and
 - ◆ Subatlántico (2.5 ka - present).
- Los arqueólogos dividen el Holoceno en Mesolítico, Neolítico, Calcolítico, Edad del Bronce, E. de Hierro, E. Romana, Medieval y Moderno
- Climáticamente el Holoceno puede dividirse en Hipsitermal y periodo Neoglacial, cuyo límite se sitúa en la edad del Bronce

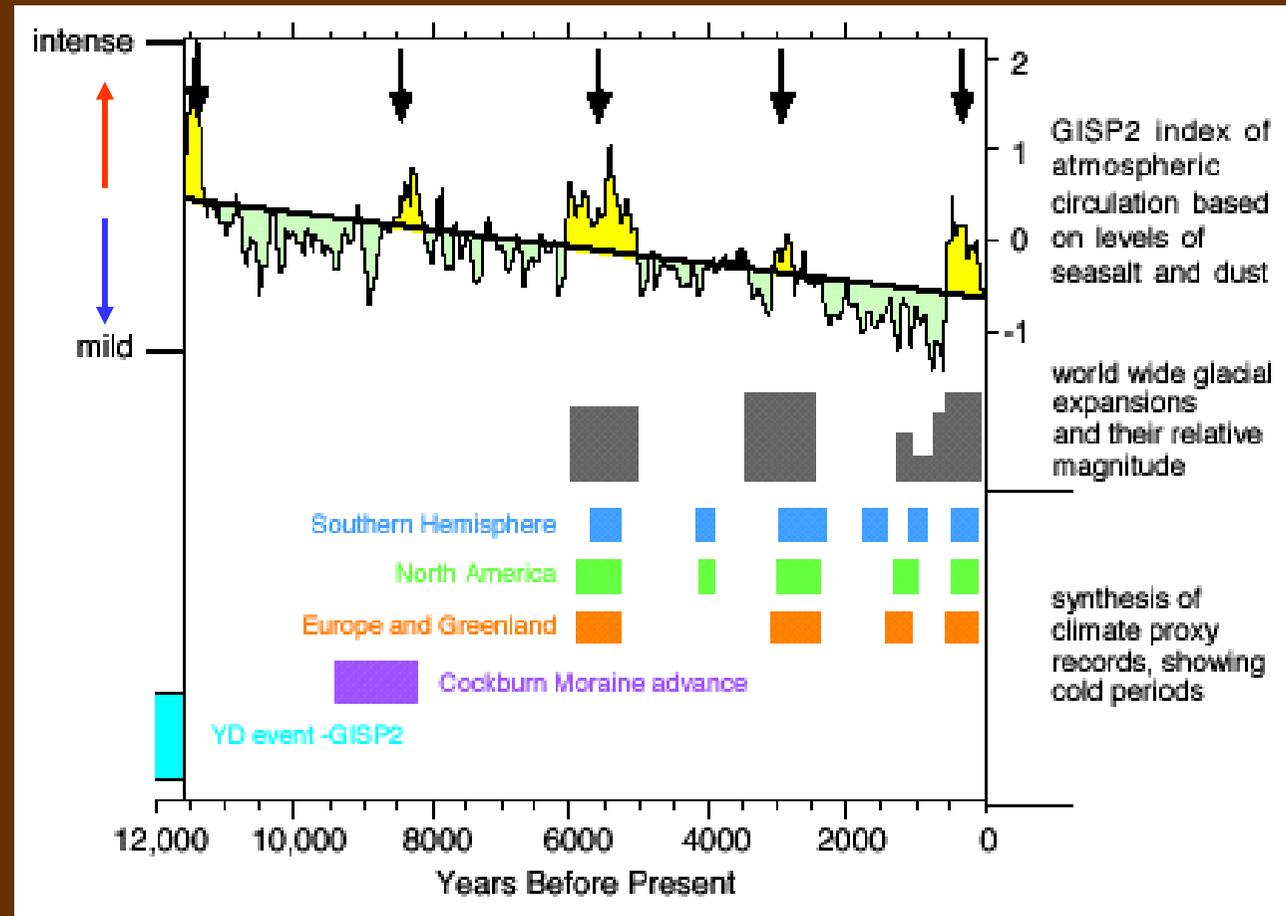
Holocene Temperature Variations



- Ciclos climáticos de 1500 años
- Máxima amplitud de 2°C , en general entre $\frac{1}{2}$ y 1°C
- 8.2 ka evento frío duró 200 años (mitad amplitud que YD)
- No claro que afectaran a todo el globo
- Cambios en pocas décadas y afectaron a la circulación atmosférica (e.g. m)

Avances glaciares del Holoceno

Circulación
atmosférica



GISP2 Holocene EOF1 (composite measure of major chemistry representing atmospheric circulation) (O'Brien, et al., 1995). Worldwide glacier expansions and syntheses of various climate proxy records from Europe, Greenland, North America, and the Southern Hemisphere showing cold periods (Denton and Karlen, 1975; Harvey, 1980; Andrews, et al., 1972) that match the GISP2 EOF1 (atmospheric circulation).

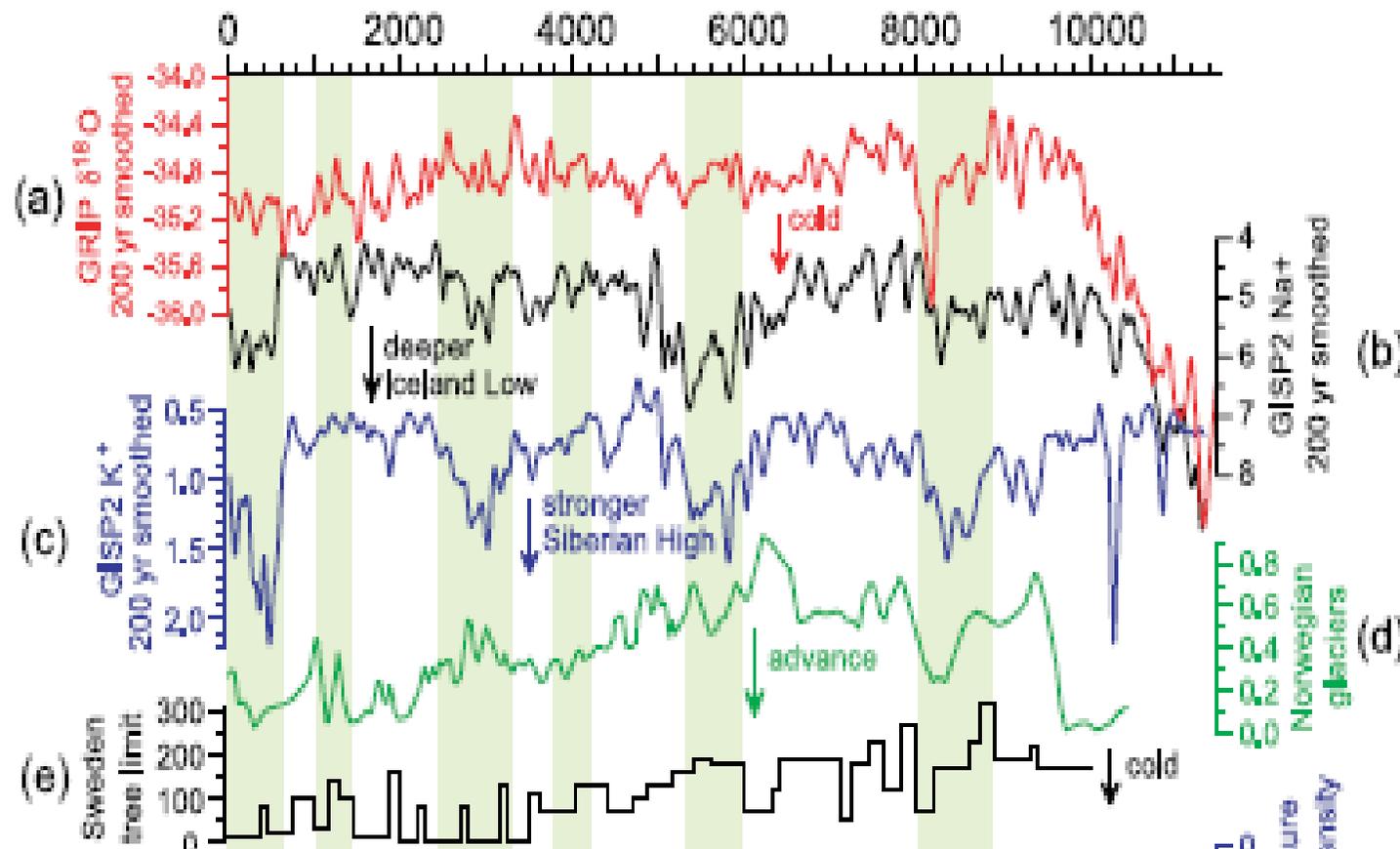
Cambios Climáticos Rápidos (RCC)

- Descritos en Mayewski et al. 2004, Quaternary Research 62, 243-255)
- Estos cambios han sido suficientemente rápidos desde el punto de vista de las civilizaciones humanas (i.e. pocos siglos e inferiores).
- Algunos se identifican en los registros glaciares durante los periodos temporales comprendidos entre 9000-8000, 6000-5000, 4200-3800, 3500-2500, 1200-1000 cal yr BP, y desde hace 600 años hasta el presente

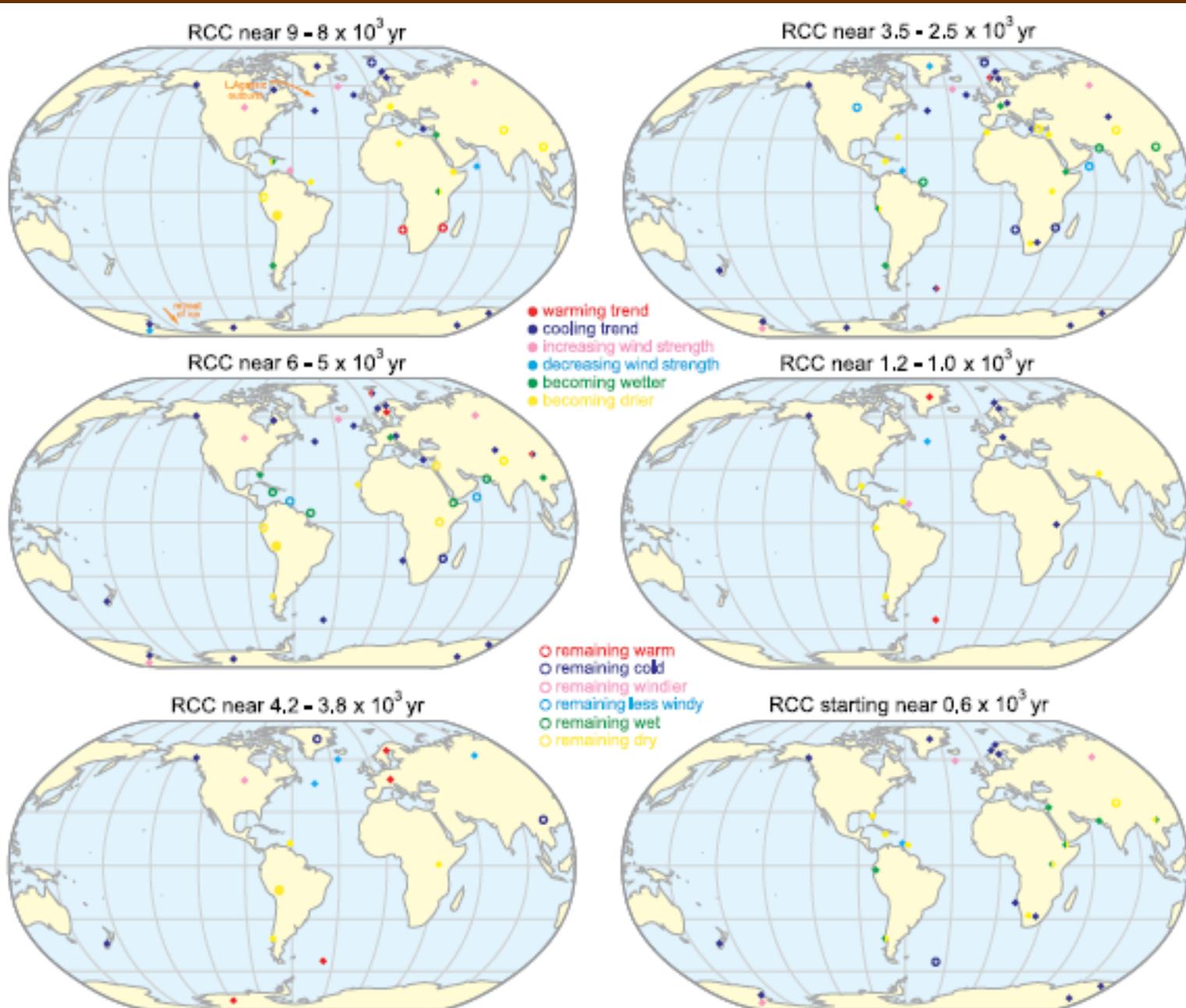
Holocene Atmospheric Variability

RCC en el Holoceno:
9000-8000, 6000-5000,
4200-3800, 3500-2500,
1200-1000, y desde
600 cal yr B.P.

Rapid Climate Changes
(Mayewski et al., 2004)

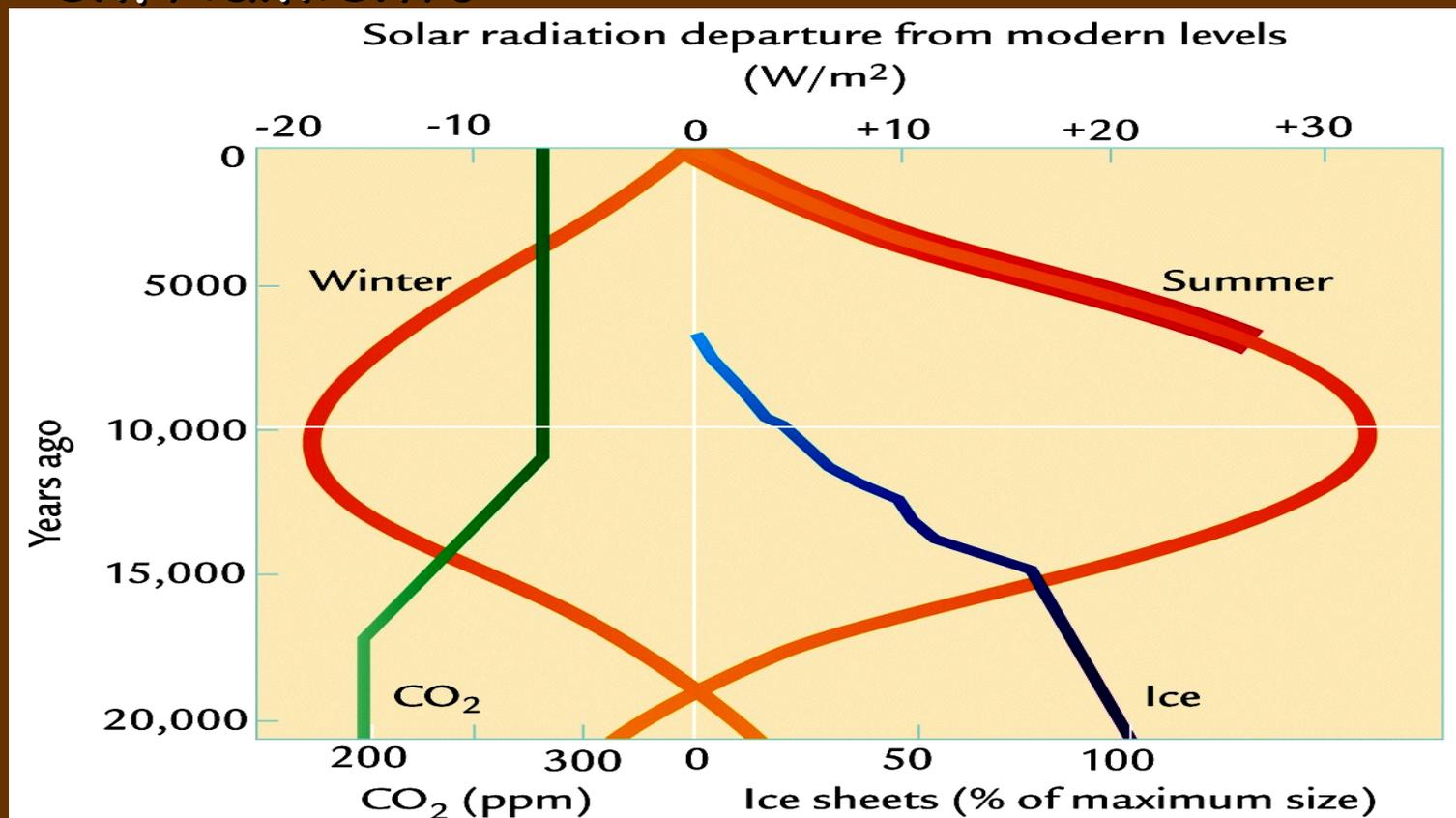


Indicadores proxy de RCC en varios periodos temporales



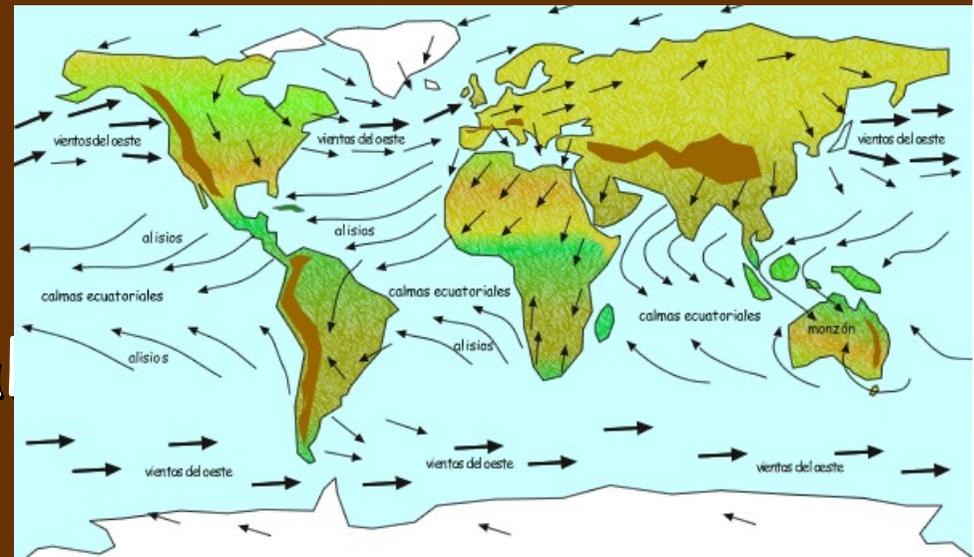
Cambio Climático en los últimos 10K años

- ◆ Deshielo reduce su influencia
- ◆ Niveles de CO_2 atmosférico estable y alto
- ◆ Insolación de verano decrece gradualmente
 - ◆ Clima esperable más caliente, seguido de enfriamiento

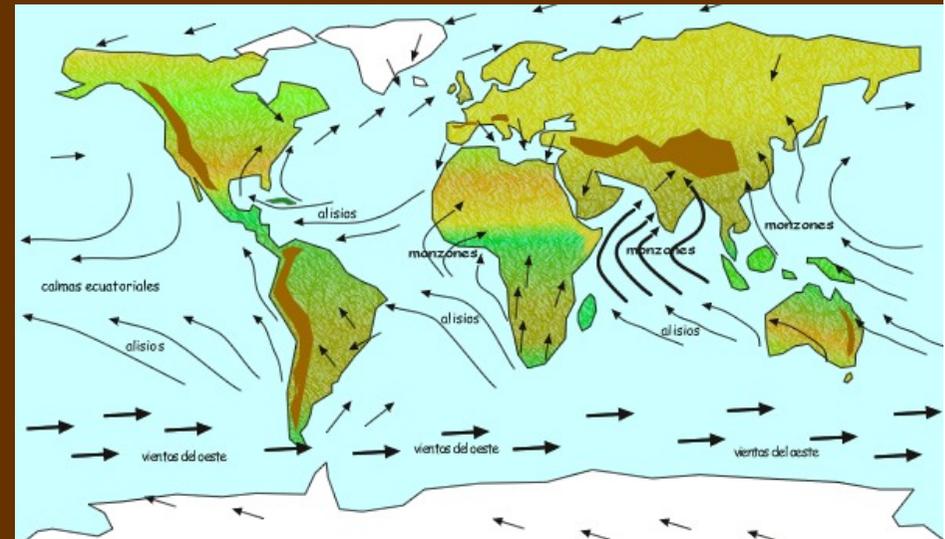


Aumento de la insolación activó los monzones

- La configuración orbital de la Tierra hace 10K años
 - ◆ Insolación de verano 8% mayor que la actual
 - ◆ Mayor intensidad del monzón de verano
- Las simulaciones con modelos apoyan las observaciones paleoclimáticas
 - ◆ Niveles en lagos aumentaron en Arabia, Norte de África y SE Asia



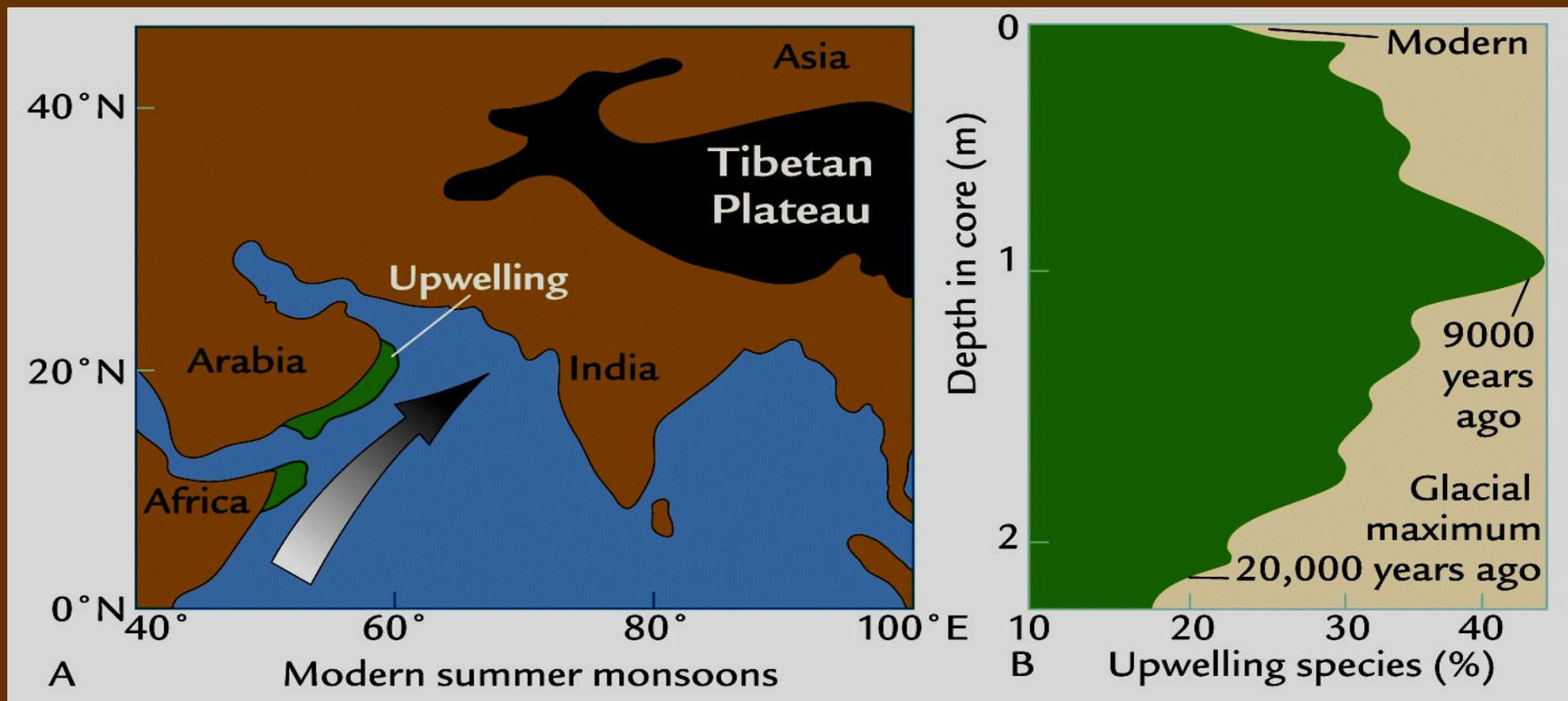
Vientos predominantes en el mes de Enero



Vientos predominantes en el mes de Julio

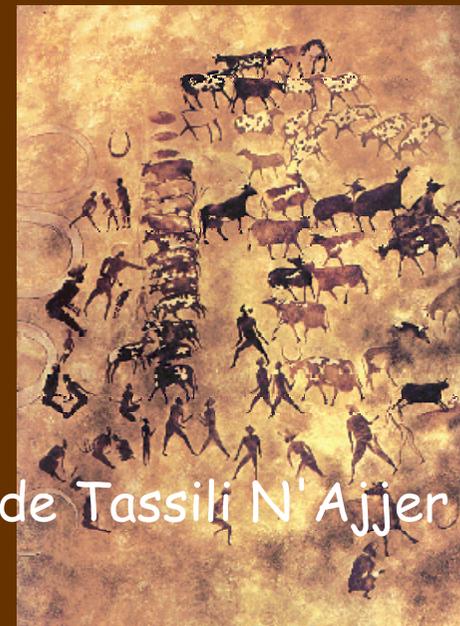
Aumento de afloramientos marinos en el mar de Arabia

- Fuertes vientos monzónicos a través de Somalia y Este de Arabia
 - ◆ Aumento de afloramientos marinos costeros
 - ◆ Alteración de las especies de foraminíferos planctónicos

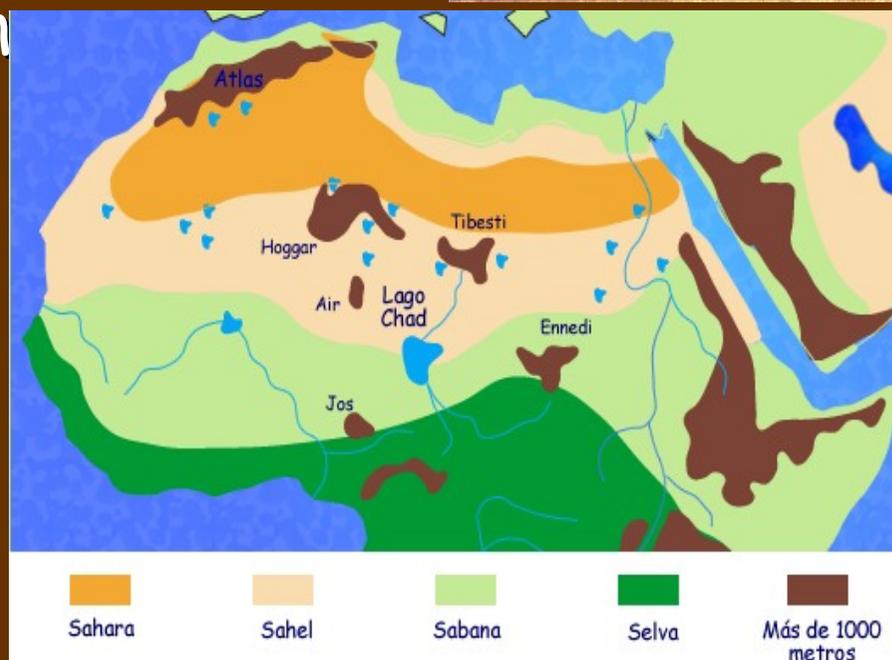


Evidencia de Clima Húmedo 10ka

- Evidencia de clima húmedo a partir de
 - ◆ Valles secos de grandes ríos en el desierto
 - ◆ Lagos presentando niveles 24% mayores en volumen
 - ◆ Evidencia de fósiles como
 - ◆ Polen de gramíneas en depósitos de lagos
 - ◆ Variedad de animales que viven próximos a zonas húmedas (hipopótamos, cocodrilos, tortugas, rinocerontes, etc)

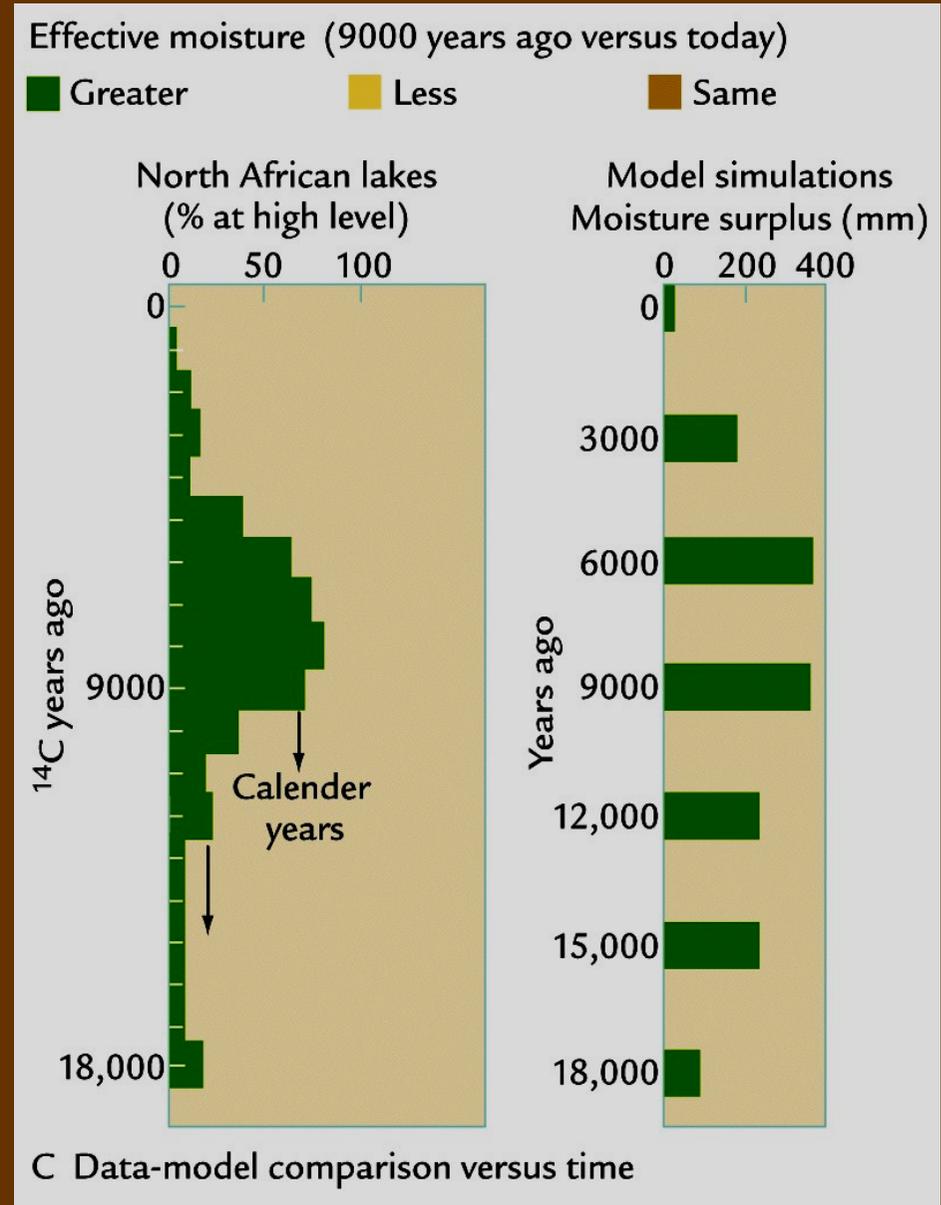
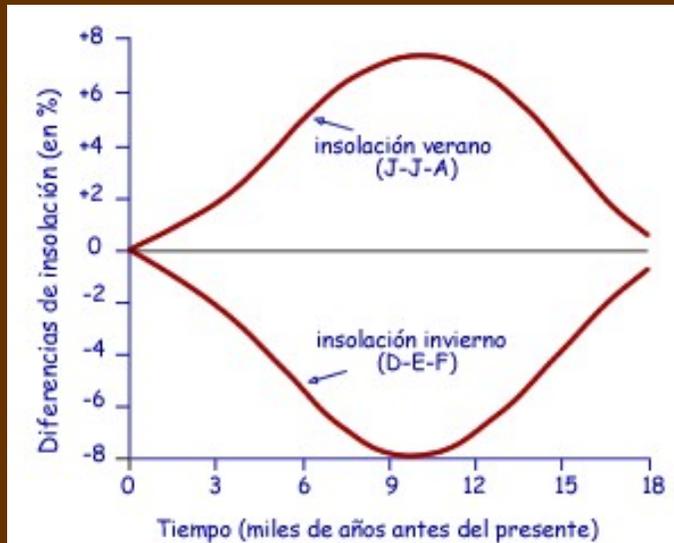


Grabados de Tassili N'Ajjer en Algeria

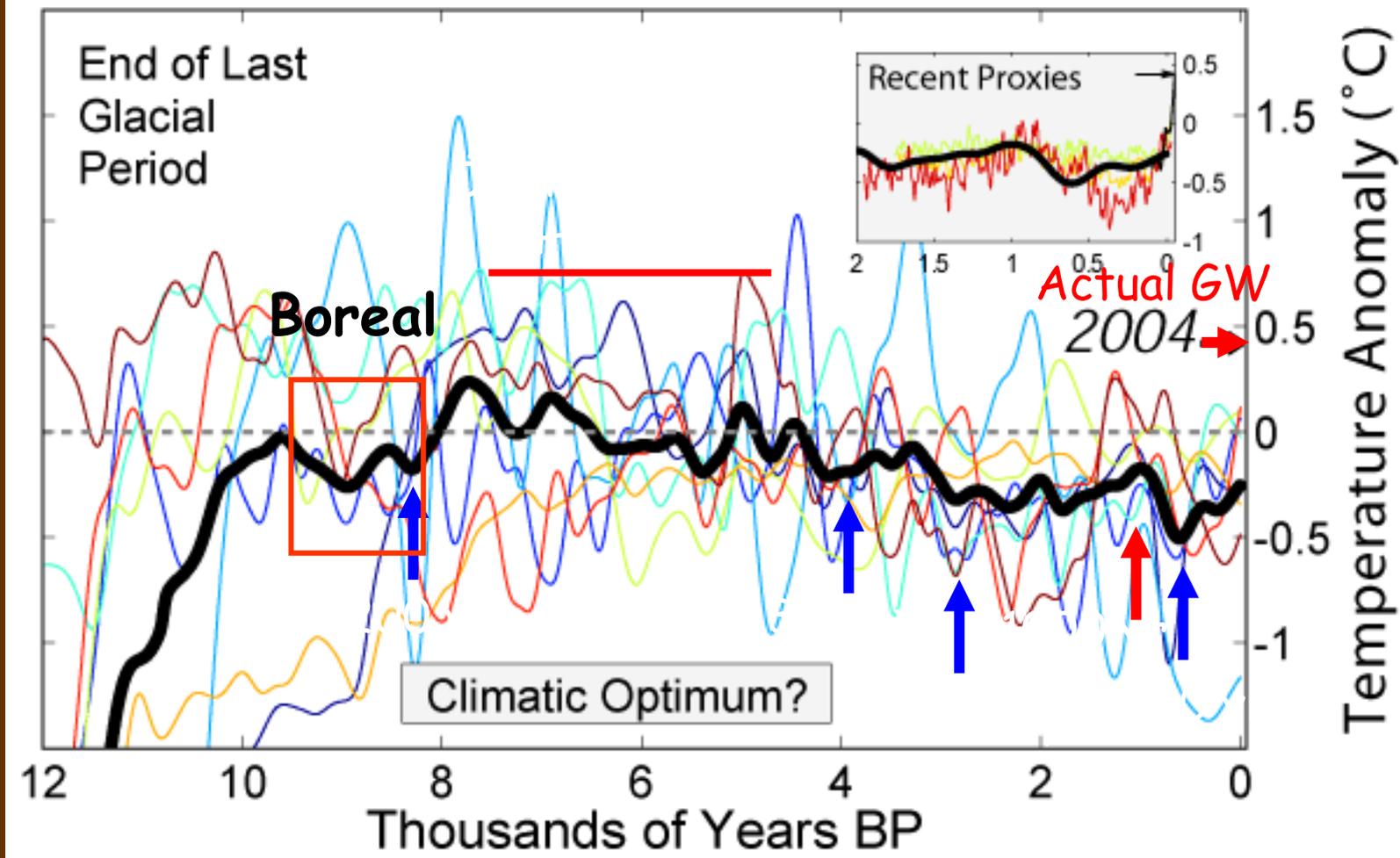


Marco temporal

- Dataciones de ^{14}C en depósitos de lagos en N. África
 - ◆ Encajan con la insolación máxima a los 10K años



Holocene Temperature Variations



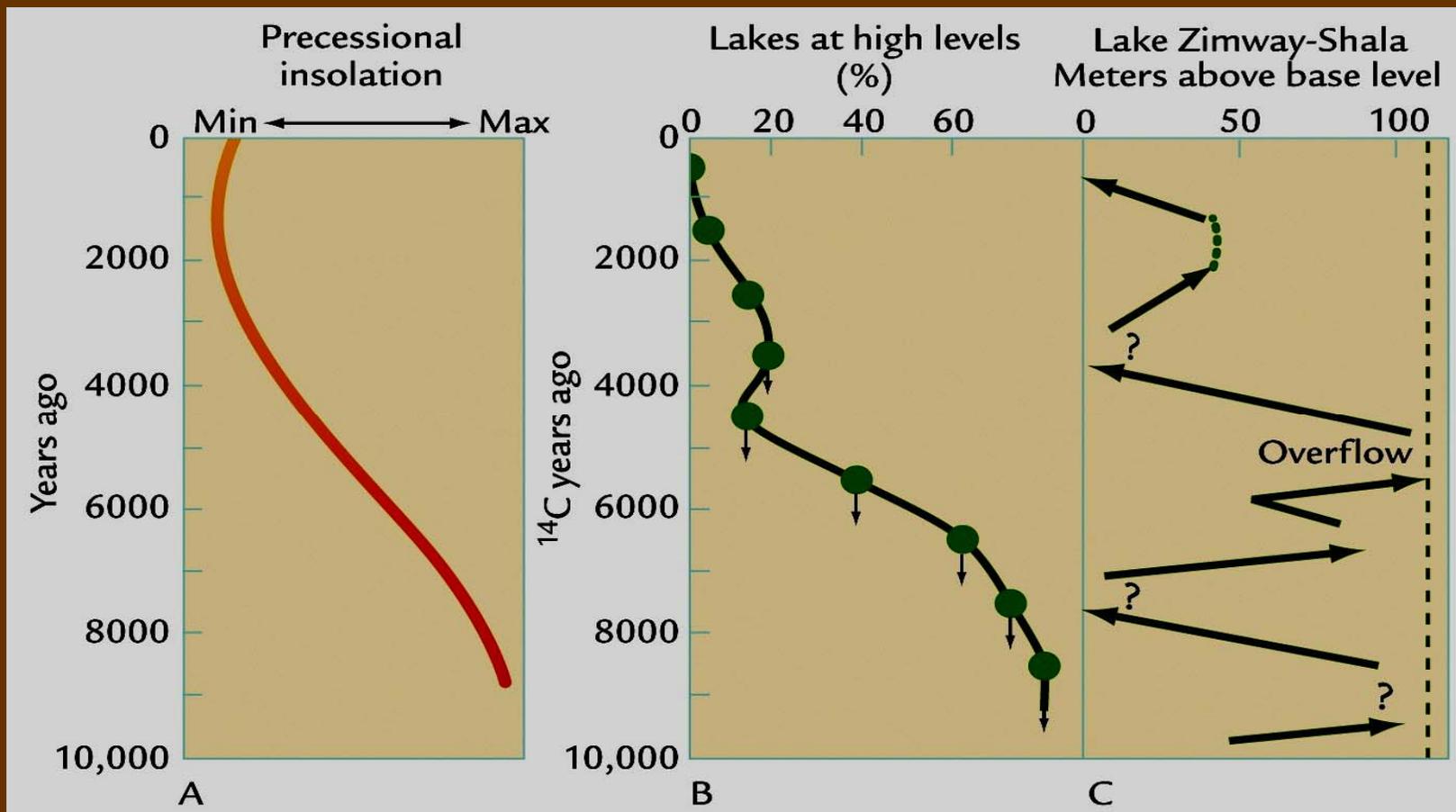
- Ciclos climáticos de 1500 años
- Máxima amplitud de 2°C , en general entre $\frac{1}{2}$ y 1°C
- 8.2 ka evento frío duró 200 años (mitad amplitud que YD)
- No claro que afectaran a todo el globo
- Cambios en pocas décadas y afectaron a la circulación atmosférica (e.g. m)

RCC 9000 - 8000 cal yr BP (Boreal)

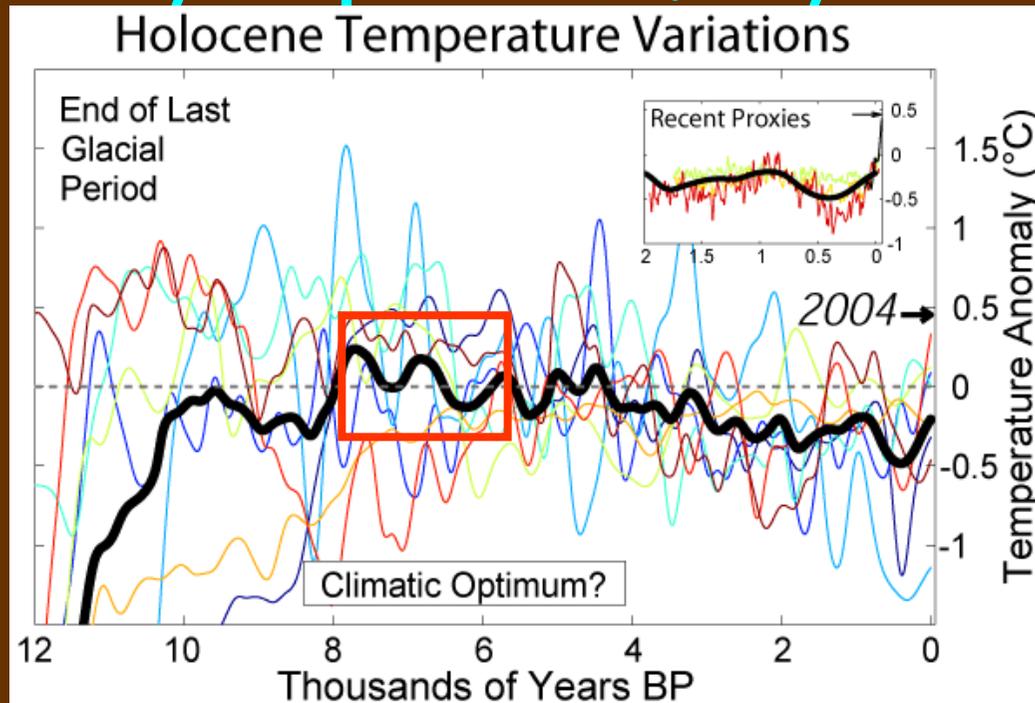
- Polos fríos, trópicos secos. HN con más extensión de hielo que en la actualidad. Vuelta hacia condiciones glaciares.
- Periodo con contenido elevado de SO₄ en el HN. Aerosoles volcánicos asociado con erupciones
- Enfriamiento del clima en HN, y debilitamiento de la circulación monzónica Afro-asiática → aridez de los trópicos
- En el Atlántico Norte evento corto: 8200 yr (Alley et al., 1997). Episodios con icebergs en Atlántico N, reforzamiento de la circulación atmosférica en Atlántico Norte y Siberia.
- Avances de glaciares de montaña en Norte América y Escandinavia, y retroceso en Alpes, probablemente reflejando condiciones secas de los vientos del norte.
- En latitudes bajas, periodo de aridez que interrumpe un periodo de humedad prolongada que se inicia a principios del Holoceno (deMenocal et al., 2000).
- Se debilitan los monzones sobre el Mar de Arabia y Africa tropical. En el Caribe los alisios se intensifican y la precipitación fluctúa dramáticamente.
- Acumulación de nieve E. Antártica disminuye.

Insolación disminuyó los monzones

- Descenso de insolación del verano se espera que debilitara los monzones de verano
- Nivel de lagos en el N. Africa encaja bien con los patrones esperados
 - ◆ La mayoría de los lagos actuales tienen niveles más bajos o están secos



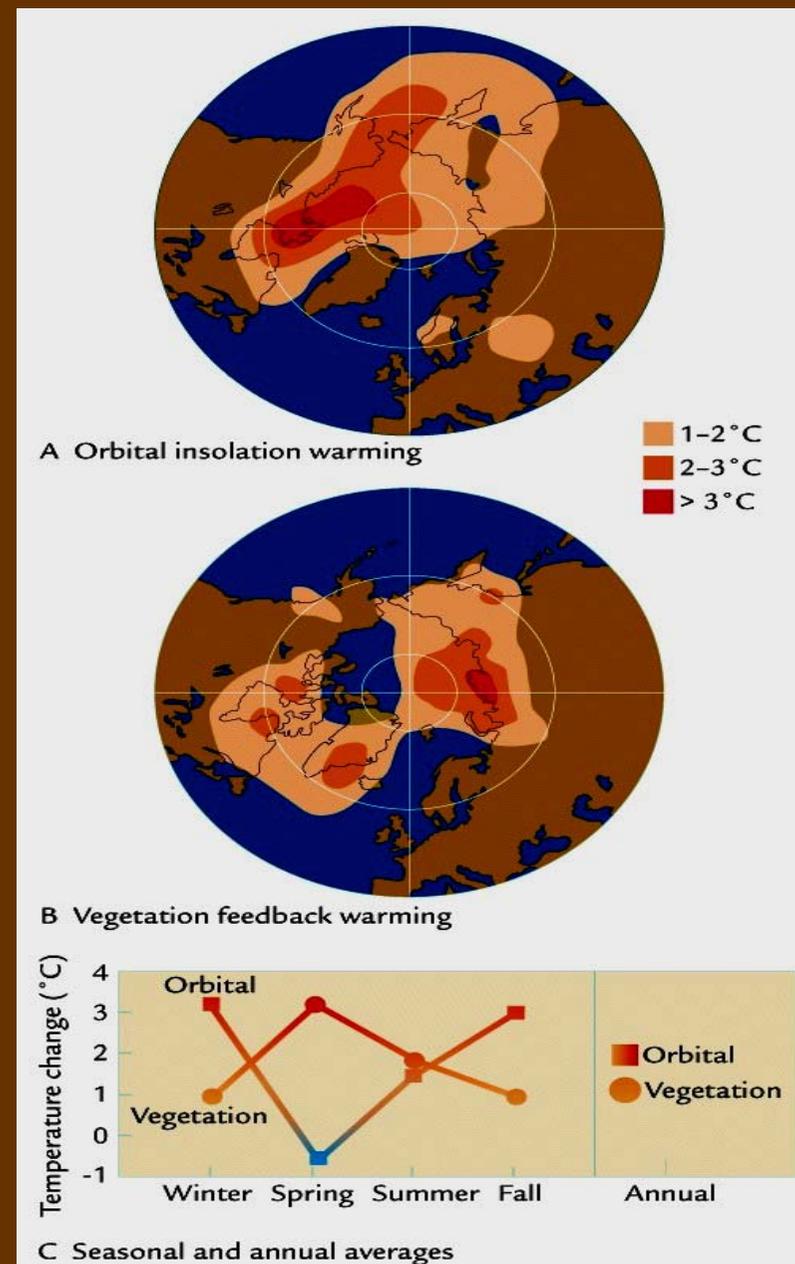
Óptimo climático Holoceno (Atlántico, Hipsitermal, Altitermal)



- Periodo cálido entre 8000 y 5700 años BP (=Atlántico).
- Temperatura entre 0,5-2 °C más cálida que actualmente (+ 4 °C cerca del Polo Norte)
- Calentamiento probablemente no fue uniforme en todo el mundo
- A continuación, comenzó el Neoglacial, en el cual las temperaturas disminuyeron progresivamente hasta el siglo XX

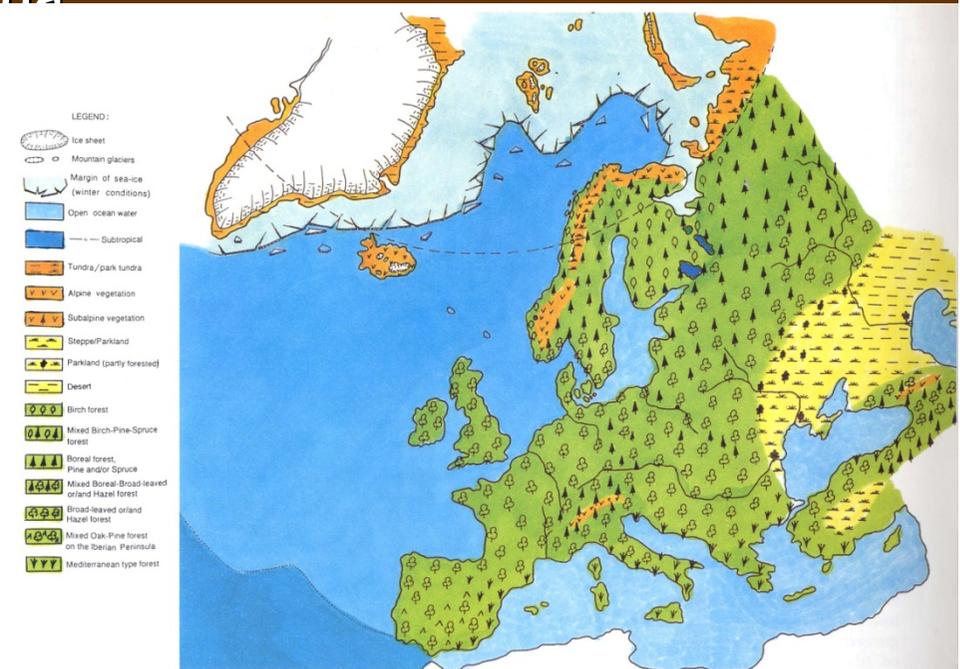
Calentamiento máximo hace 6Ka

- Con niveles de CO_2 atmosférico estacionario y elevado
- Hielo glaciario mínimo
 - ◆ Insolación de verano y cambios en la vegetación afectados por la temperatura
- Insolación 5% superior en latitudes altas
- Desplazamiento del albedo elevado de la tundra por un albedo bajo de las coníferas (*Picea*) que causa una retroalimentación positiva: Mayor calentamiento



Vegetación en Europa el Óptimo Holoceno

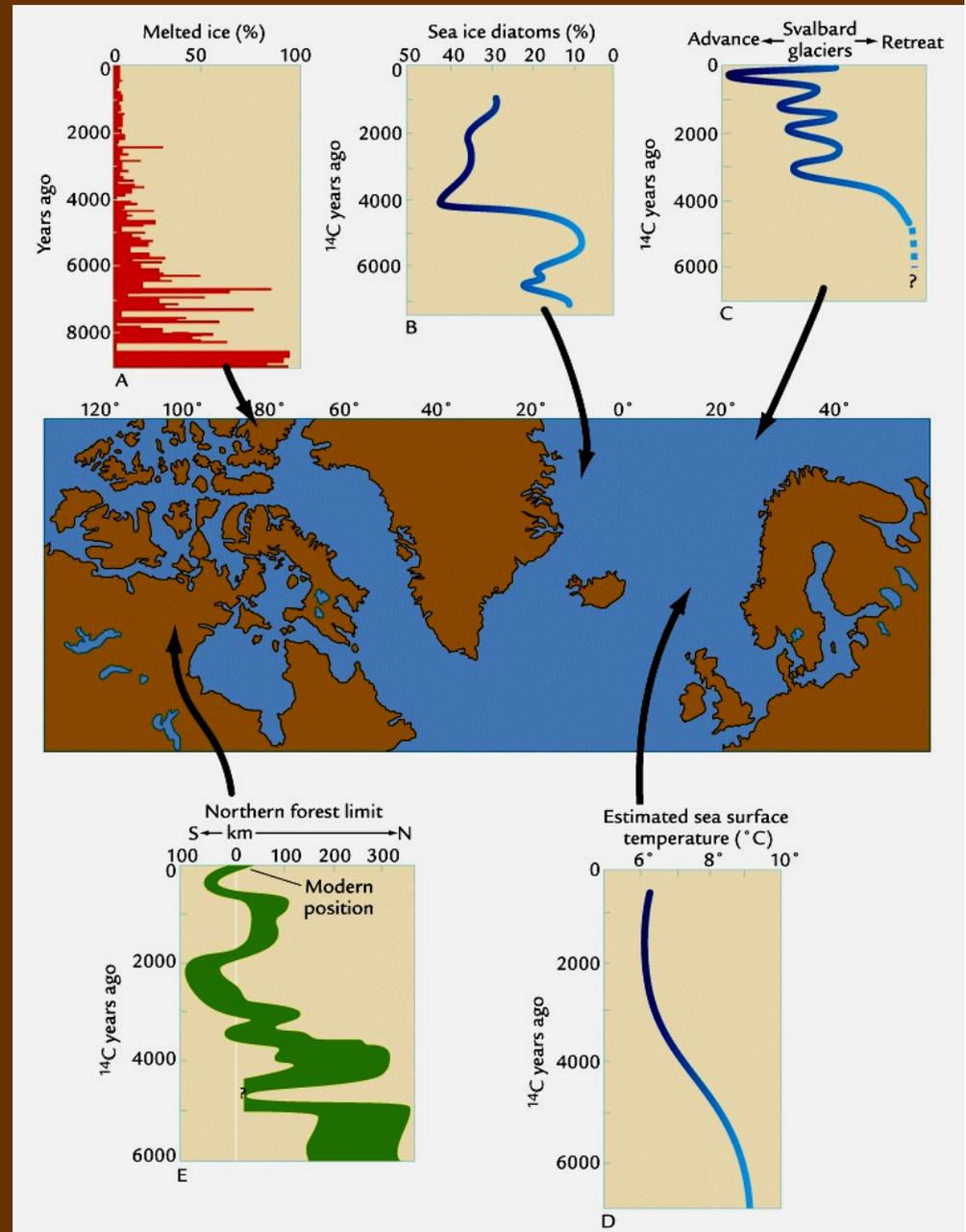
- Las vegetación se ha dispersado desde las zonas refugio
 - ◆ Tundra y Bosques boreales, bosques de caducifolias, estepa semiárida
- Las comunidades que se adaptan a las condiciones de clima mediterráneo aparecen hace 5000 años
 - ◆ Zonas altitudinales
 - ◆ 800/1000m: Pino/Quercus o maquis o garriga
 - ◆ 1300m: Bosques caducifolios
 - ◆ 2500m: Coníferas:
 - ◆ Elevada diversidad faunística (carnívoros)



Subboreal, 5700-2600 BP

Numerosas evidencias de enfriamiento gradual

- ◆ La insolación de verano ha disminuido en los últimos 10 Ka
- ◆ Menos frecuentes pérdidas de hielo en los casquetes
- ◆ Aumenta la frecuencia del hielo en los mares fuera de Groelandia indicado por el descenso en diatomeas
- ◆ Avances de los casquetes de hielo en las islas del Artico
- ◆ Menor SST en el Atlántico
- ◆ Desplazamiento hacia el sur en el límite entre tundra y coníferas (Pinea)



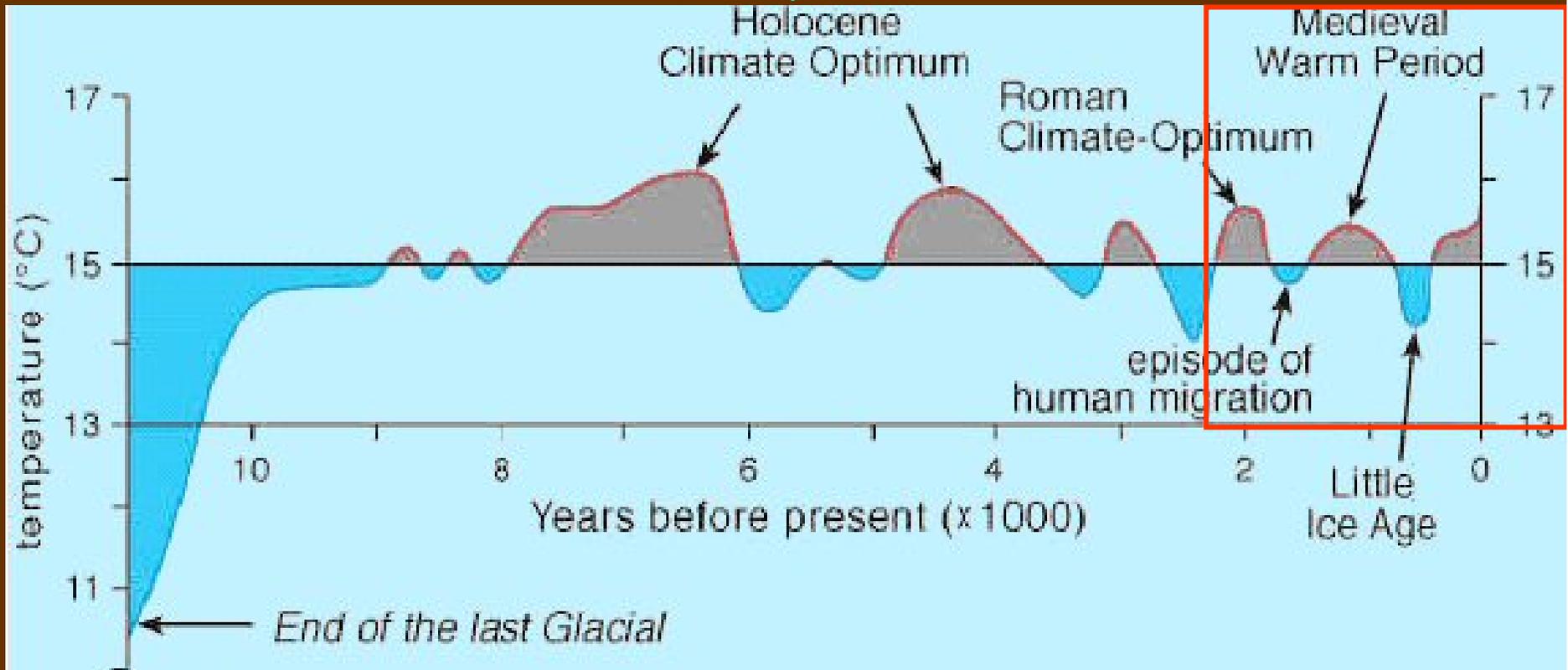
Edad de los metales

- La utilización de los minerales:
 - ◆ Minerales
 - ◆ Piedra y sal
 - ◆ Cobre y estaño
 - ◆ Hierro
 - ◆ Edad del Bronce en Europa (ca 2000-750 AC) y Edad del Hierro temprano (750-1 AC) como sociedades agrarias estables
 - ◆ Procesos incipientes de urbanización

Episodio frío del 2850 BP

- Coincide con un evento corto y frío que se cree causado por forzamiento solar (van Geel et al., 1998) y que se registra en diversos proxy del Atlántico Norte incluido registros de detritos procedentes de icebergs (Bond et al., 2001).
- Coincide con una elevada frecuencia de crecidas de elevada magnitud en España (Thorndycraft y Benito, 2006), así como en otras partes de Europa (Macklin and Lewin, 2003).
- El papel del clima y de los cambios de uso no están bien determinados para este periodo (Macklin and Lewin, 1993; Brown, 2003), aunque en el caso de España el impacto humano no se generaliza hasta el periodo Romano.

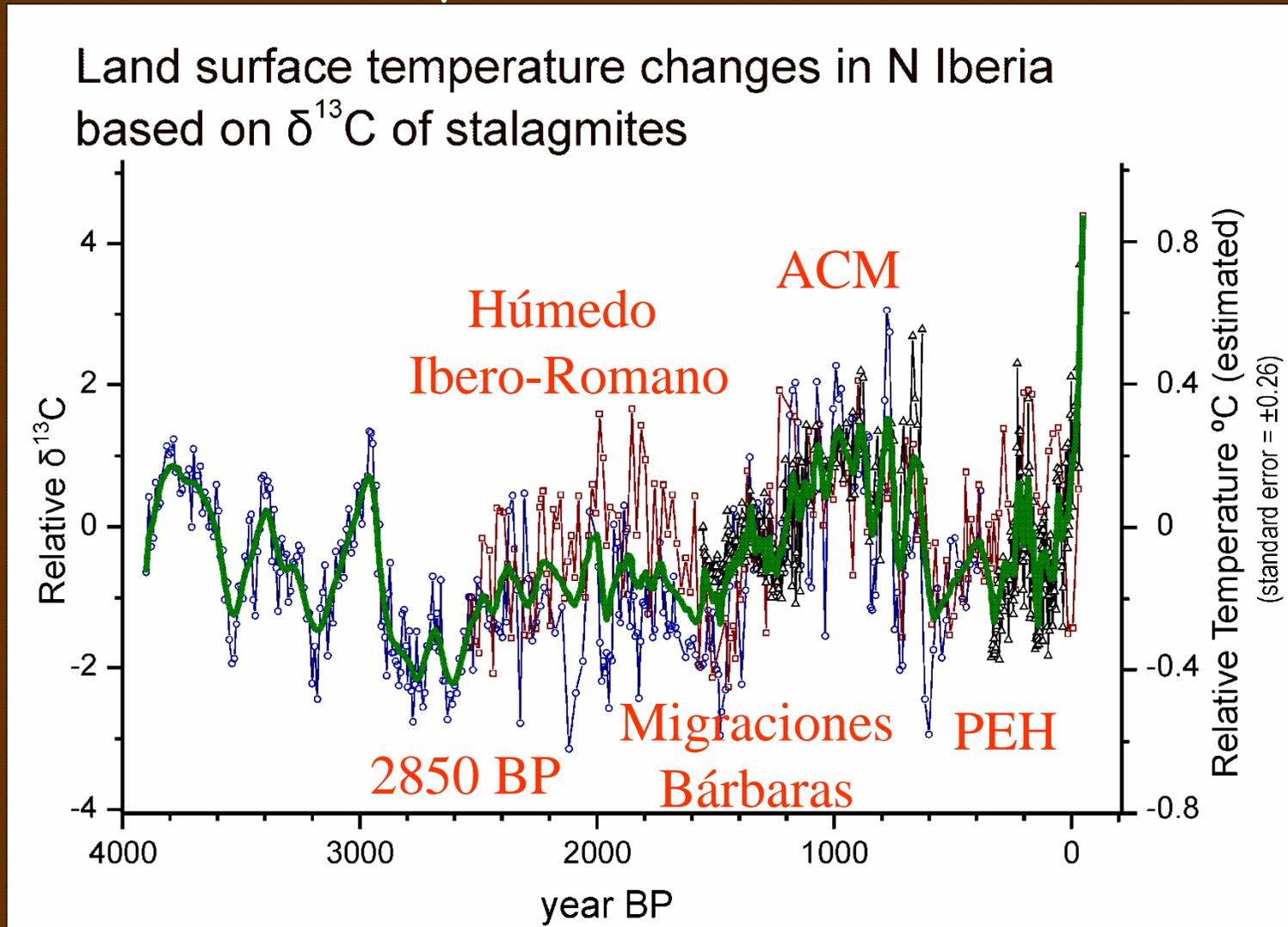
Subatlántico, 2600-0 BP



Average near-surface temperatures of the northern hemisphere during the past 11,000 years (after Dansgaard et al., 1969, and Schönwiese, 1995)

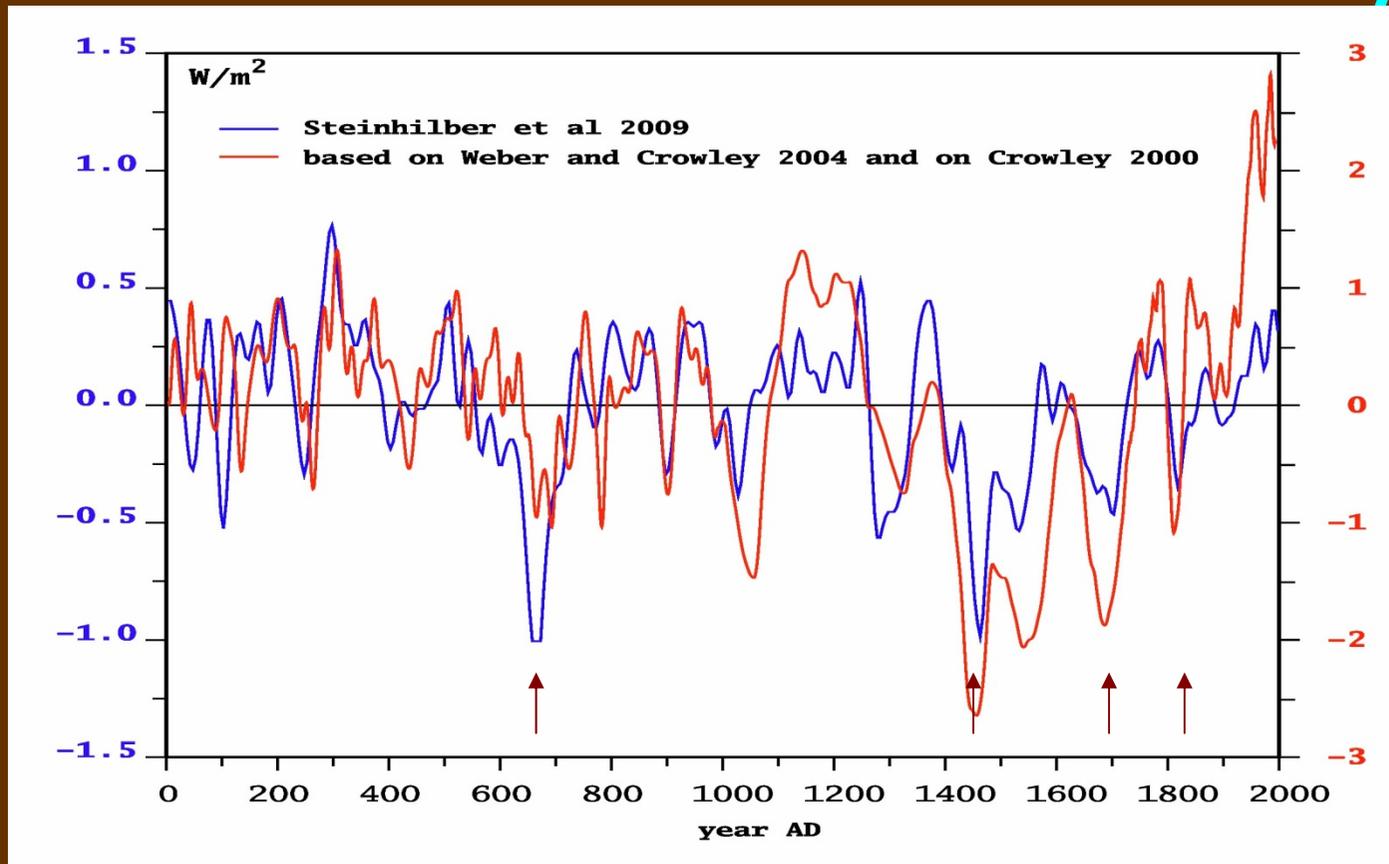
Periodo con alternancias frías y cálidas, pero con predominio de las condiciones cálidas.

Reconstrucción de las temperaturas para los últimos 4000 años en el Norte Peninsular a partir de estalagmitas y otros depósitos de cuevas



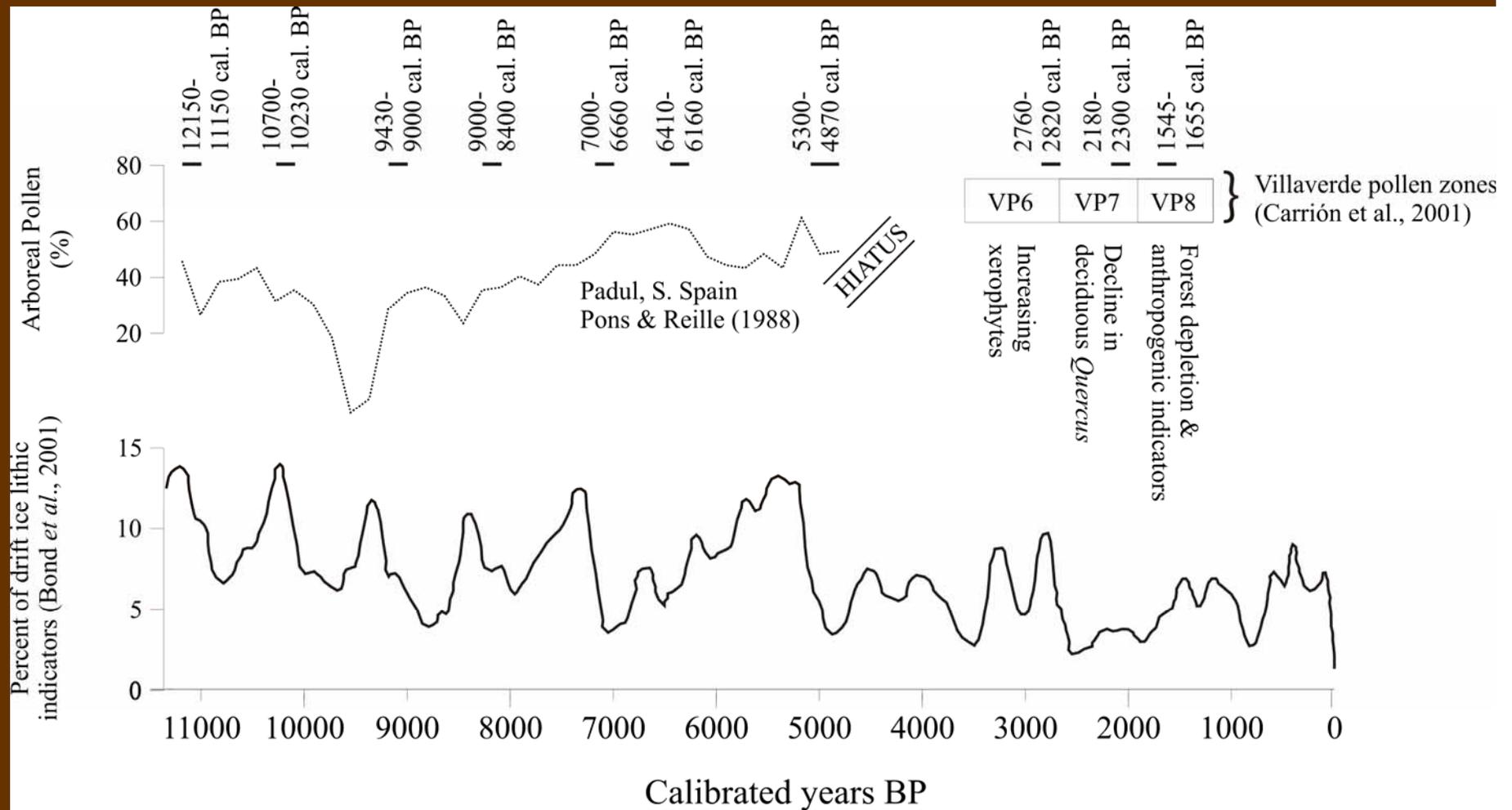
Según Martín-Chivelet et al., 2011

Reconstrucciones de la irradiancia Solar total en los últimos 2000 years

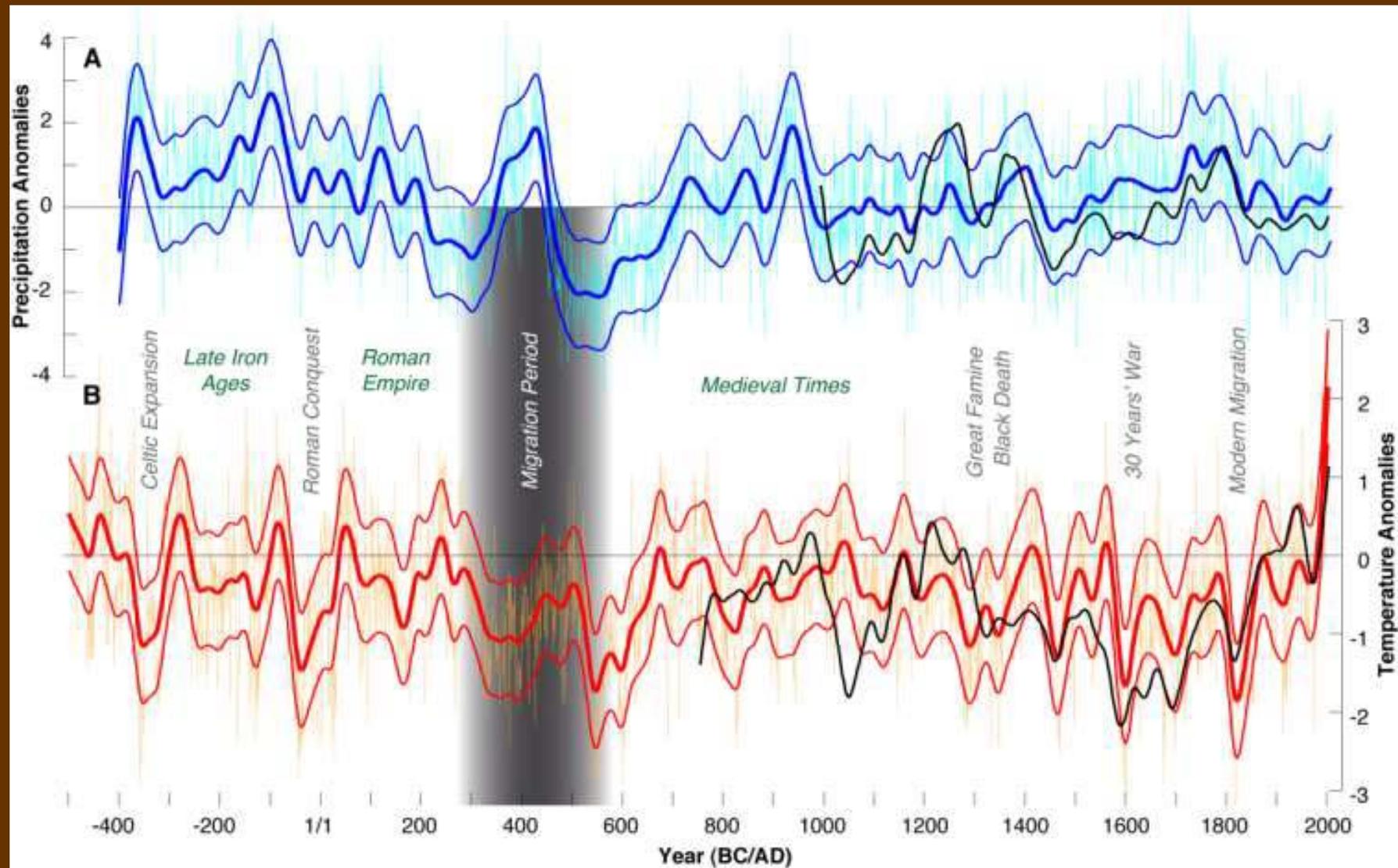


Según Steinhilber et al. (2009) basadas en registros de ^{10}Be . Línea roja basada en registros de ^{14}C en anillos de árboles para edades entre 0-1000 y de ^{10}Be con anterioridad. Ambas curvas tienen escalas diferentes.

Vegetación en Iberia



Periodo frío de las Migraciones



Büntgen et al., 2011, Science 331, 578-582)

"Dark Ages" o Periodo de las Migraciones

- A partir del siglo II, varios indicadores de la civilización romana evidencian su declive (urbanismo, comercio, población). Durante el periodo entre AD 150 y AD 400 la población del Imperio Romano desciende de 65 millones a 50 millones (20%).
- Este declive se ha relacionado con el periodo frío contemporáneo a las invasiones bárbaras (Dark Ages Cold Period, 300-700), cuando desciende la temperatura causando un impacto en la producción agrícola.

El Clima en el Periodo Histórico

Auscenna.

Manch gñete leer will ich dir gñben/
 Den volg nach/frische dir din liden.
 Im Jenner din bidt thalt by vier/
 Doch off dem Dum mugst lassen schier.
 Und denn binnach wol nemmen acht/
 Was dir all Monas dinges trafft.

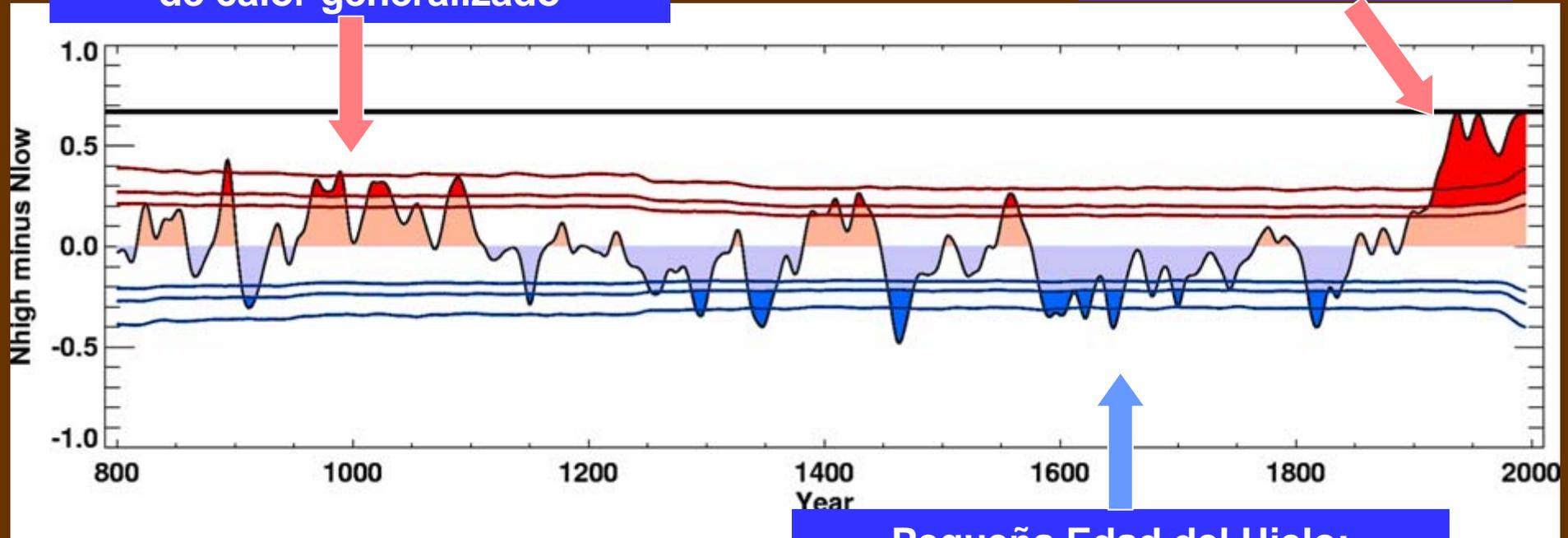
1 gar guin hale vñ es-jungelich den
 2 gar guin hale noch mit dem leben in glanz
 3 guin hale un-widert un-greus. danach fombfien
 4 munge trit in hale. Nach un-wis was liden
 5 un-greus liden. Nach un-wis was liden
 6 warm was in liden-was
 7 vil wind in vil regne warm mit liden
 8 warm in regne
 9 warm in mit un vil regne
 10 trit in regne
 11 mit un warm
 12 warm in gar trit. Die liden. mittel
 13 vil was mittel
 14 gar hale mittel. noch un-wis was liden
 15 mit in zimlich warm. nach un-wis
 16 zimlich warm
 17 un-wis zimlich warm in mit
 18 zimlich warm in mit
 19 un-greus warm hale. danach mit nach vil
 20 zimlich warm in mit. nach un-wis vil regne
 21 dinst un-greus was vil regne
 22 dinst un-wis was un-greus was
 23 mit
 24 trit in liden-was
 25 un-greus was vil regne zimlich warm
 26 mit in hale
 27 mit in hale
 28 trit in hale mittel
 29 mit gar hale vil mittel off den bergun
 30 vil regne hale
 31 un-wis hale. off den alen was liden. III



La extensión geográfica de temperaturas cálidas o frías

Periodo Medieval:
más calor que frío,
pero no existe un gran periodo
de calor generalizado

Siglo XX:
Cerca de 100 años de
calor generalizado



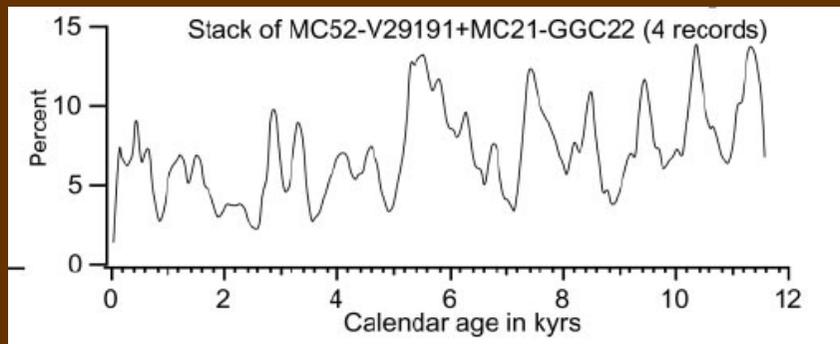
Pequeña Edad del Hielo:
mas registros fríos que calientes,
pero no periodos continuados
de frío generalizado

Periodo referencia continuo 800-1995
Osborn & Briffa (2007)

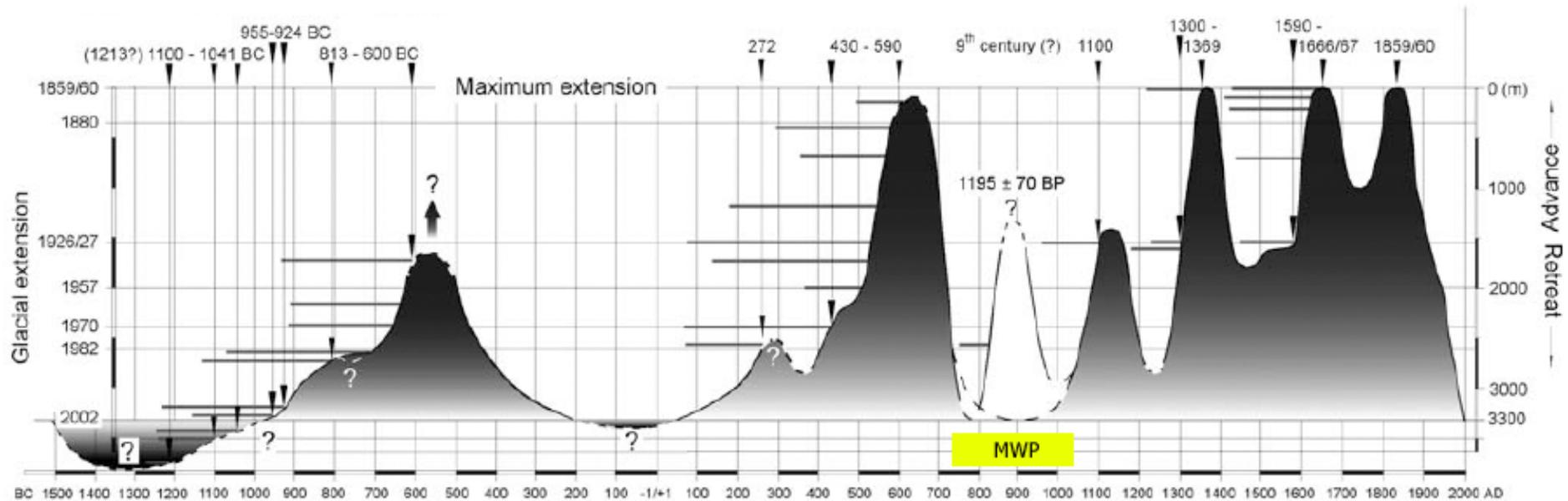
Anomalía Climática Medieval

- Corresponde a un periodo cálido en la región del Atlántico Norte
- Su duración corresponde al periodo entre AD 950-1250.
- A pesar de las incertidumbres, especialmente durante el periodo anterior a AD 1600 cuando los datos eran escasos, este periodo sería el más cálido de los últimos 2.000 años, aunque su temperatura sería probablemente entre 0.1°C and 0.2°C inferiores al periodo 1961 - 1990, y significativamente menores que las registradas después de 1980.

Invasiones Vikingas en ACM



3500 años de registro Glaciar en los Alpes Suizos (Great Aletsch glacier)



Glacial Extension of the Great Aletsch Glacier (Alps of Valais, Switzerland) over the past 3500 years as adapted from Holzhauser et al. The Medieval Warm Period is indicated by the yellow shading above the x-(year) axis.

Holzhauser, H., Magny, M. and Zumbuhl, H.J. 2005. The Holocene 15: 789-801. Las fluctuaciones del glaciar son el resultado del balance entre periodos hostiles (caliente/seco) y favorables (frío/húmedo) a los glaciares. T durante MWP similares a las actuales

Pequeña Edad de Hielo

- Corresponde al periodo frío que sucede al Periodo Cálido Medieval.
- Comprende al periodo entre los siglos XVI y XIX, aunque no existe consenso sobre su inicio y final
- Existen evidencias de avances de glaciares en Europa, Alaska, Nueva Zelanda, y Patagonia. Sin embargo, el momento de los avances difiere entre regiones, lo que sugiere que se trata de cambios de clima regional independientes, y no una señal global.
- Las evidencias disponibles no corroboran que PEH o ACM se traten de periodo de cambio climático global y sincrónico. La PEH se puede considerar sólo como un modesto enfriamiento del Hemisferio Norte, de menos de 1°C en relación con las temperaturas del Siglo XX.
- Algunas de las causas descritas incluyen: bajas cíclicas en radiación solar, aumento de la actividad volcánica, cambios en la circulación oceánica, y la inherente variabilidad en el clima global, y la actividad antrópica.

Fozamiento volcánico en el Clima histórico



600 AÑOS DE ERUPCIONES VOLCANICAS

Caldera	Fecha
Mount Pinatubo	1991, Jun 15
Novarupta	1912, Jun 6
Santa María	1902, Oct 24
Mount Tarawera	1886, Jun 10
Krakatoa	1883, Aug 26-27
Mount Tambora	1815, Apr 10
Grimsvotn and Laki	1783-85
Long Island (Papua New Guinea)	1660
Kolumbo, Santorini	1650, Sep 27
Huaynaputina	1600, Feb 19
Billy Mitchell	1580
Bardarbunga	1477
Quilotoa	1452-53

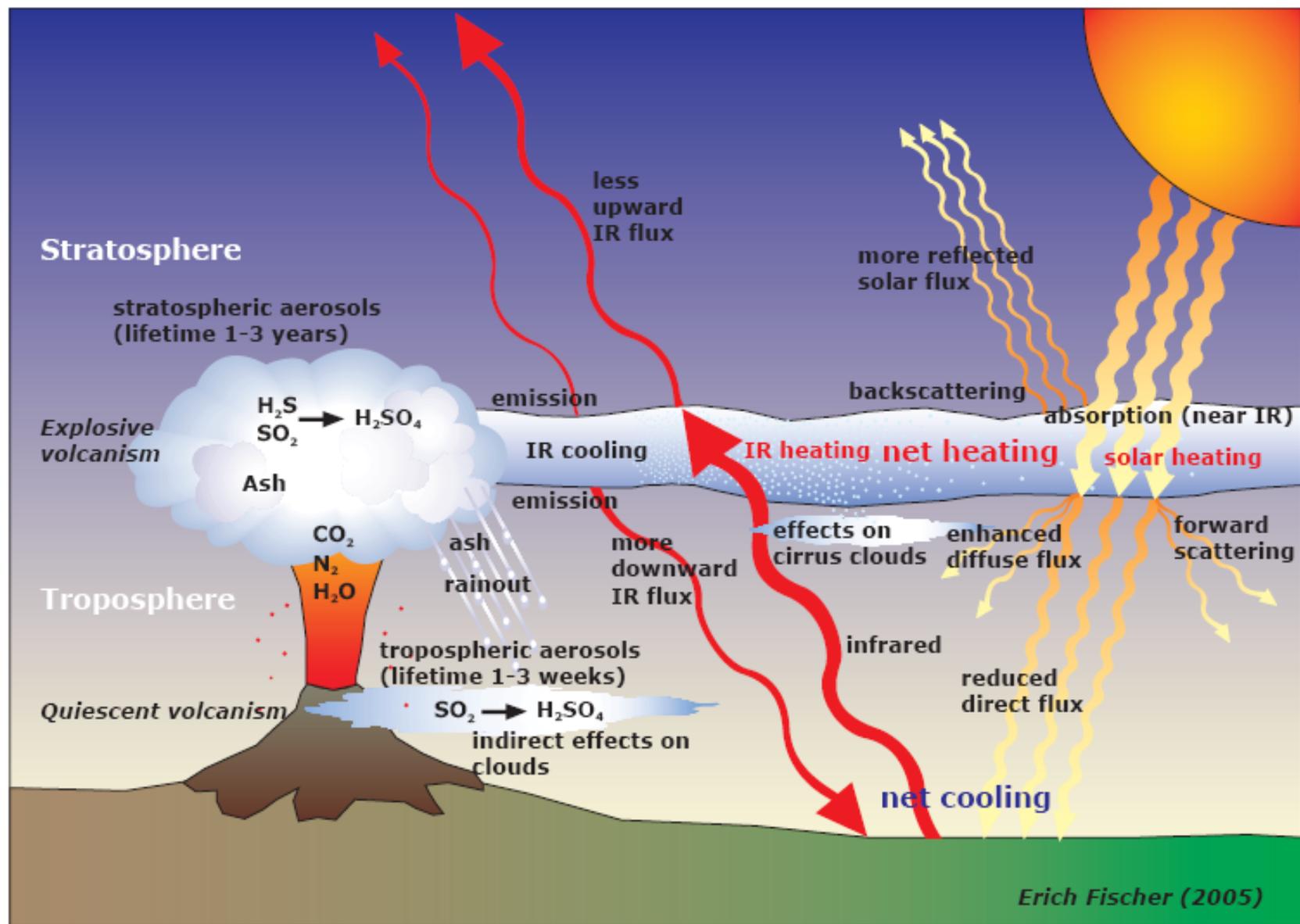
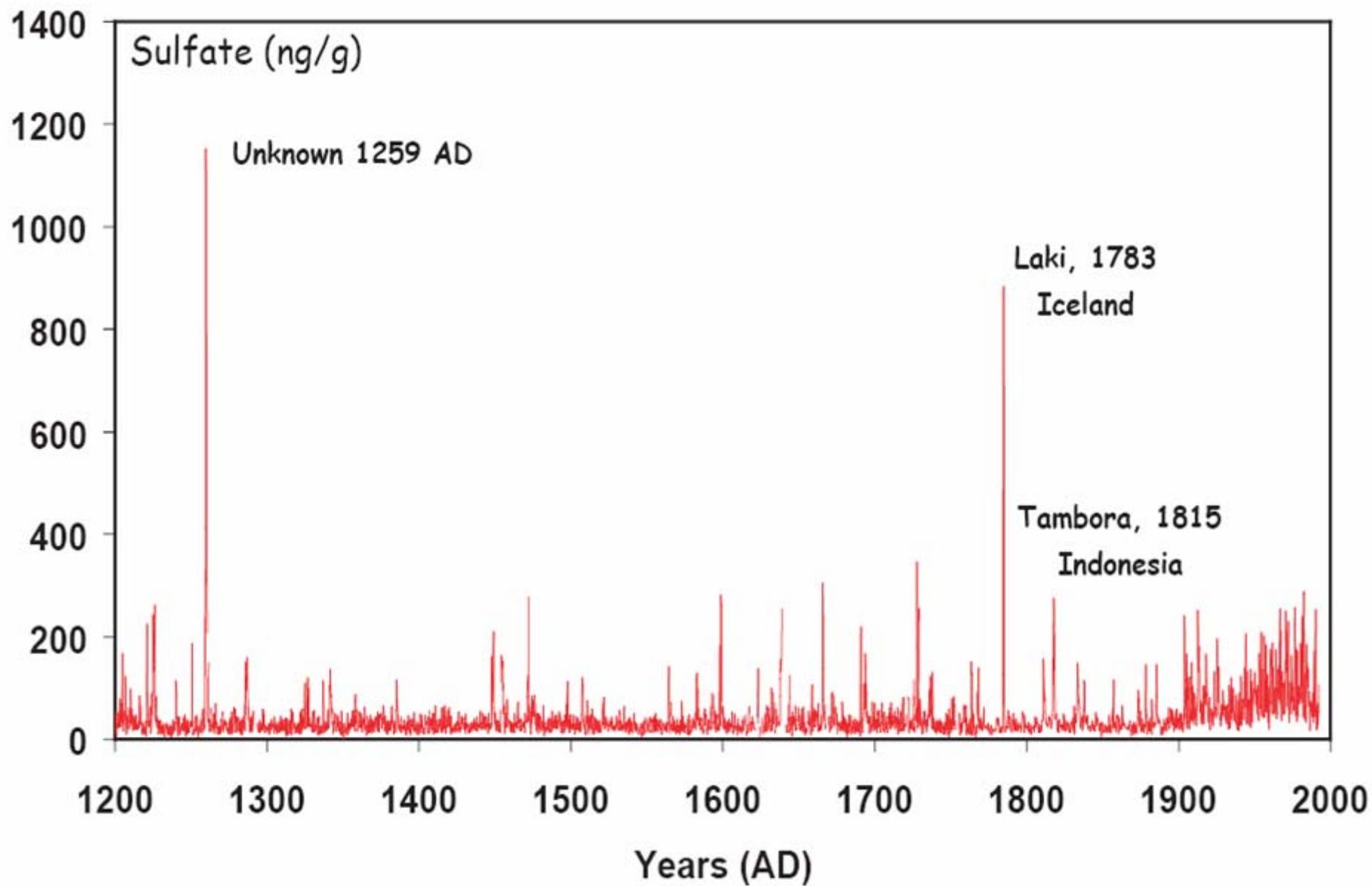
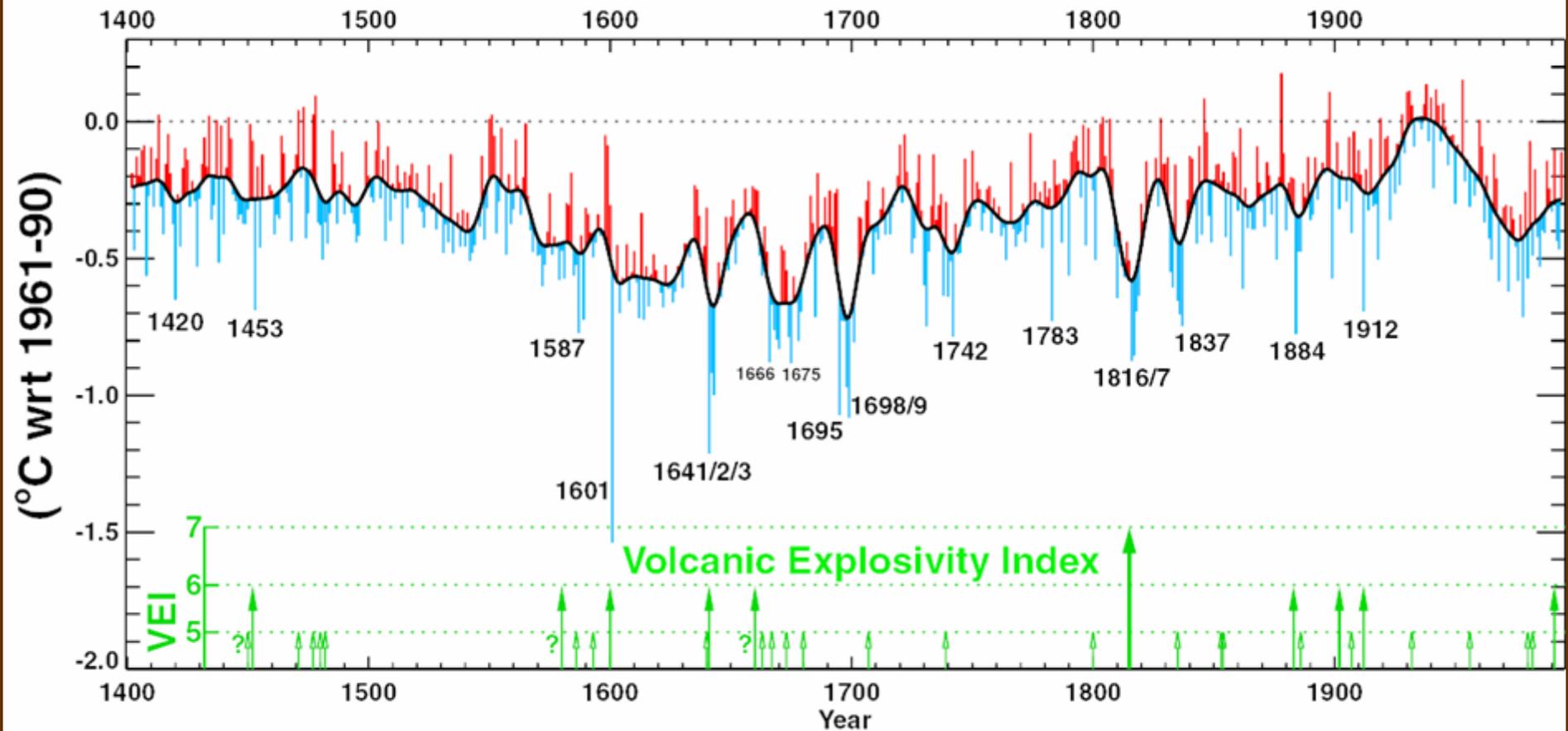


Figure 1: Schematic diagram of the impact of quiescent and explosive volcanism on the Earth's radiative balance. Redrawn after Robock (2000).



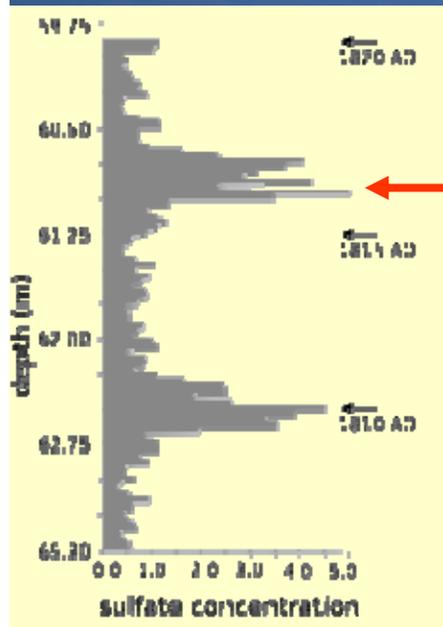
Savarino (2006)

Land north of 20°N temperature anomaly



Northern temperatures (inferred from tree-ring density network) and volcanic eruptions

Año 1816 sin verano



Tambora

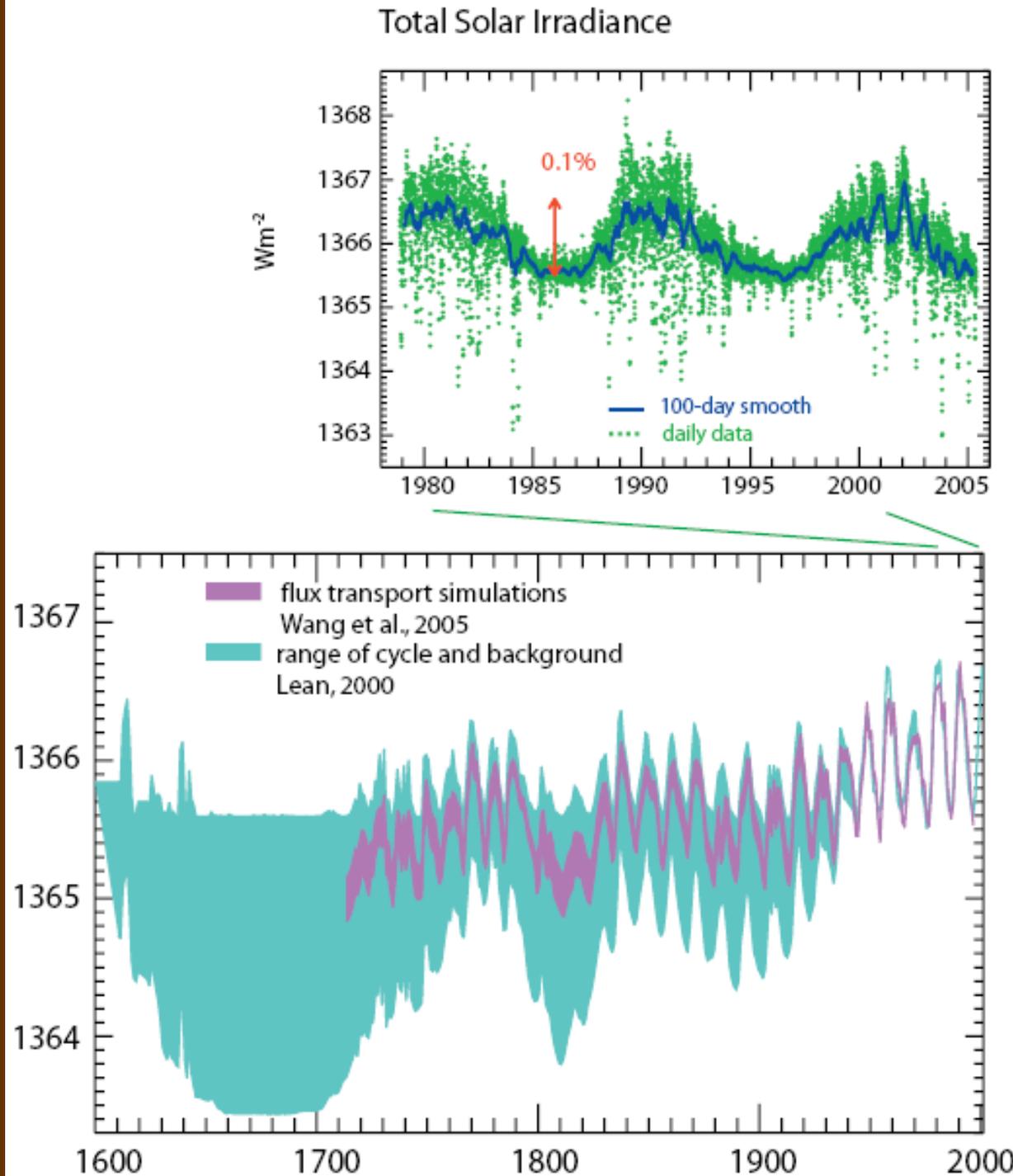
La erupción del Volcán Tambora entre el 5 y el 15 de abril en la isla de Sumbawa (Indonesia), arrojando 1.5 millones de toneladas de cenizas, conllevó importantes alteraciones de la temperatura en los tres años sucesivos. Las temperaturas mundiales descendieron debido a la reducción de irradiación del Sol sobre la superficie terrestre.

En Norte América se registraron tormentas de nieve en Junio, así como hielo en algunos ríos durante meses de verano. Europa padeció de escasez de comida. En Suiza, el gobierno declaró el estado de emergencia por hambrura.

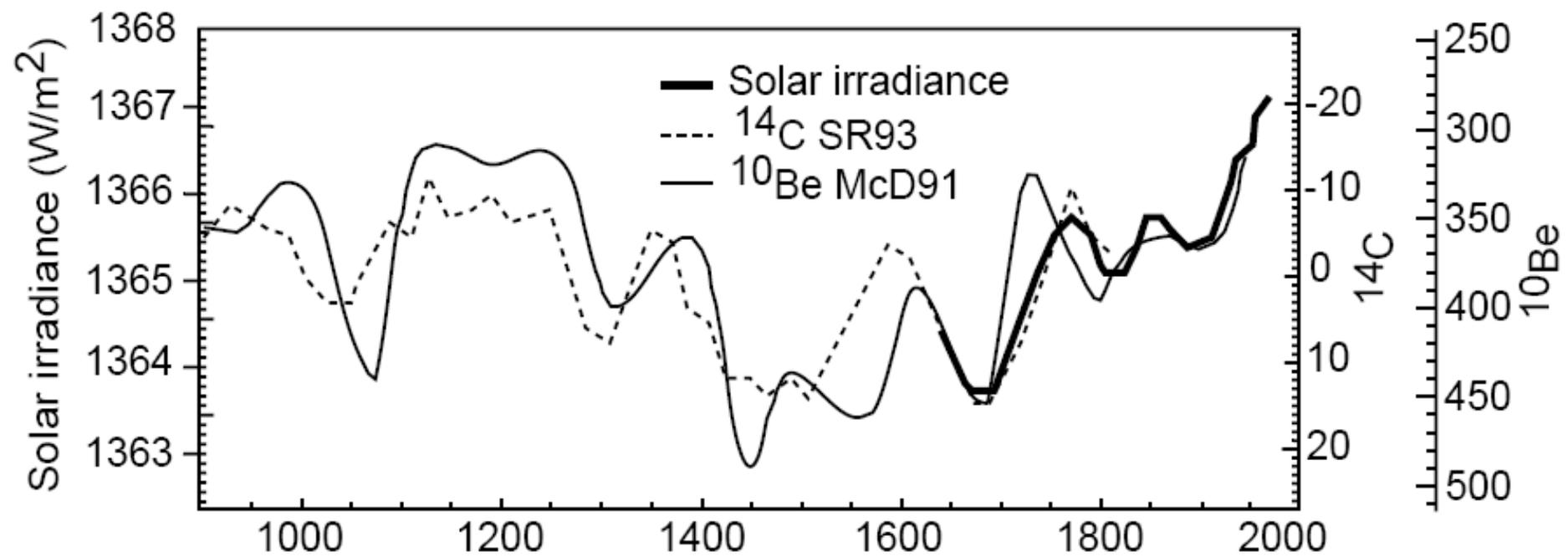
En Madrid la temperatura media de Julio y Agosto estuvo por debajo de los 15°C. En otoño Montserrat y Montseny se cubrieron de nieve y se heló el río Llobregat.

Depósitos de sulfuros medidos en Groenlandia. El pico de 1816 corresponde a la erupción del Tambora

Radiación Solar

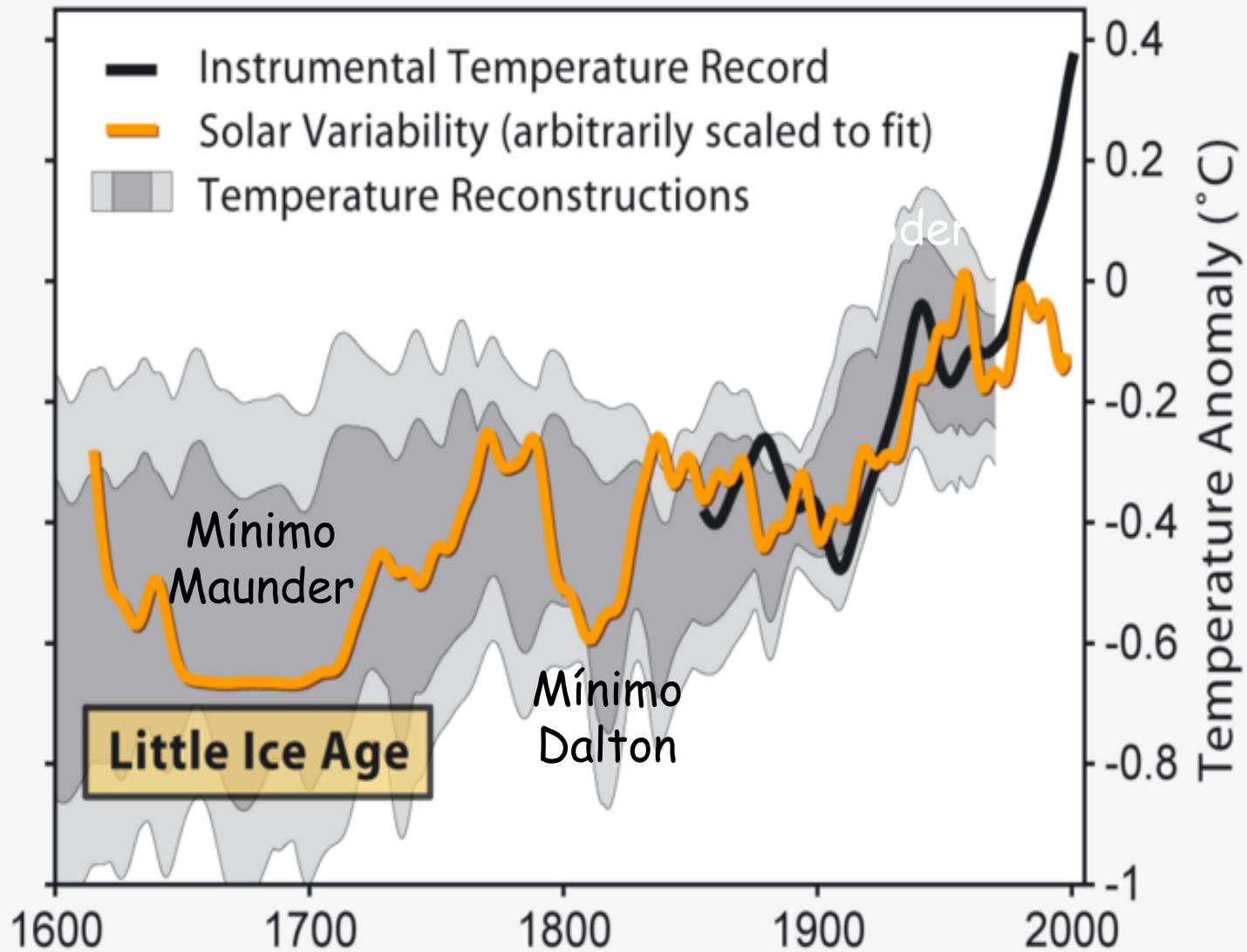


Lean (2006)

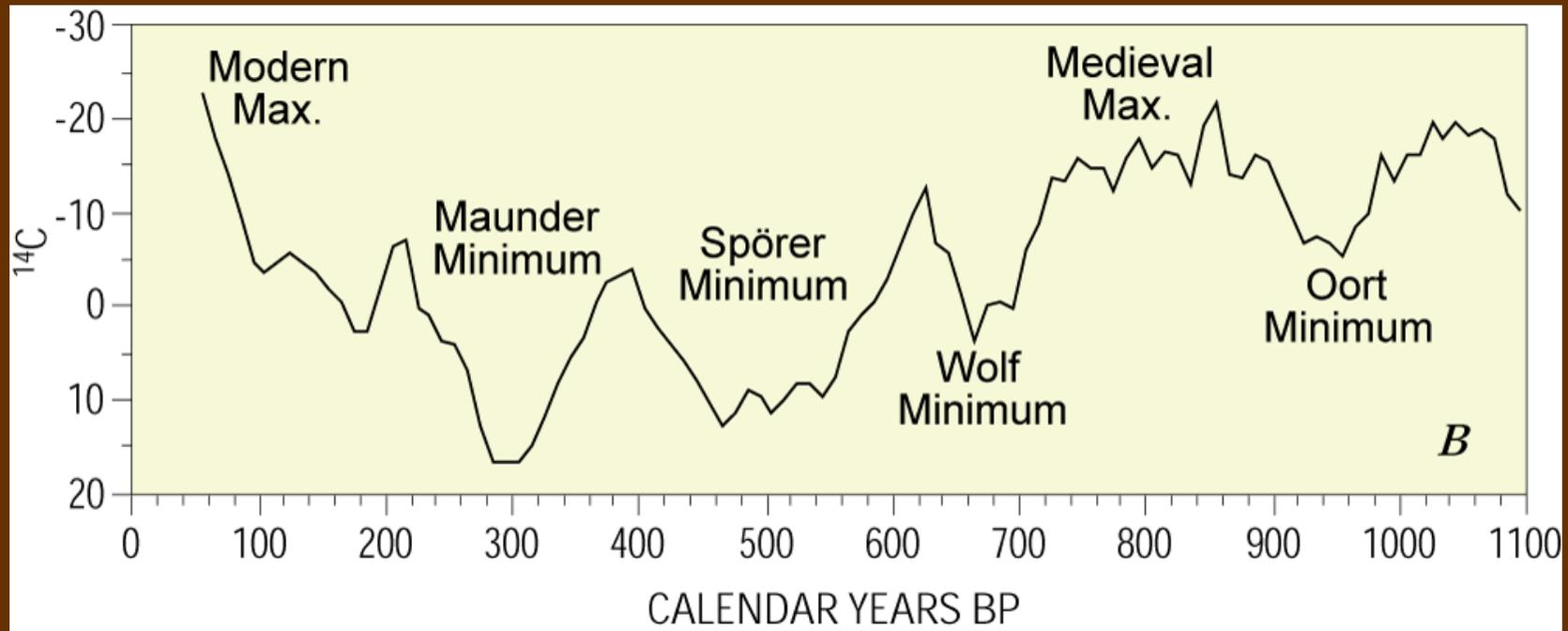


Bradley et al (2003)

Temperature and Solar Comparison

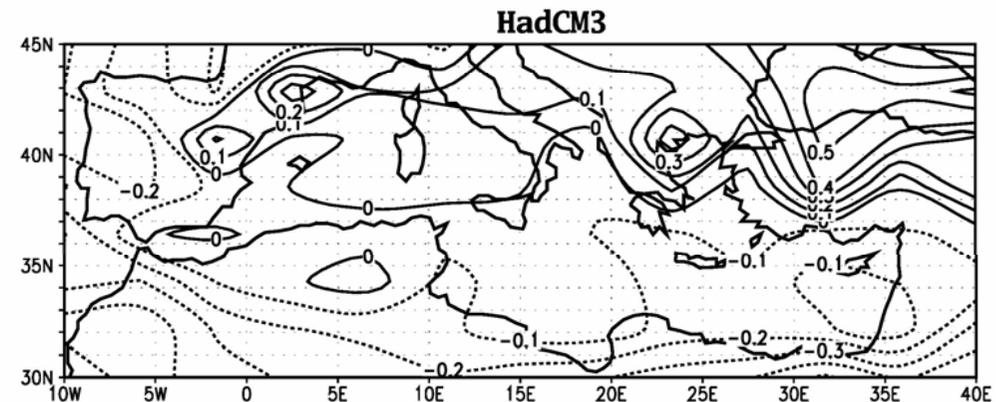
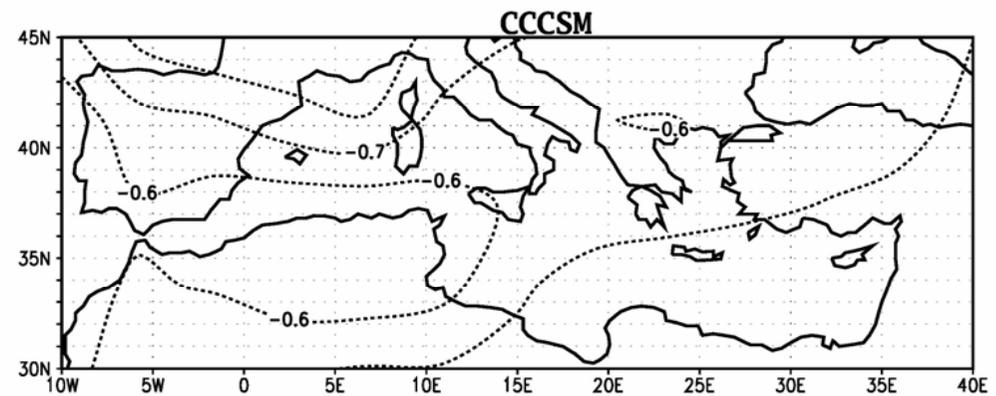
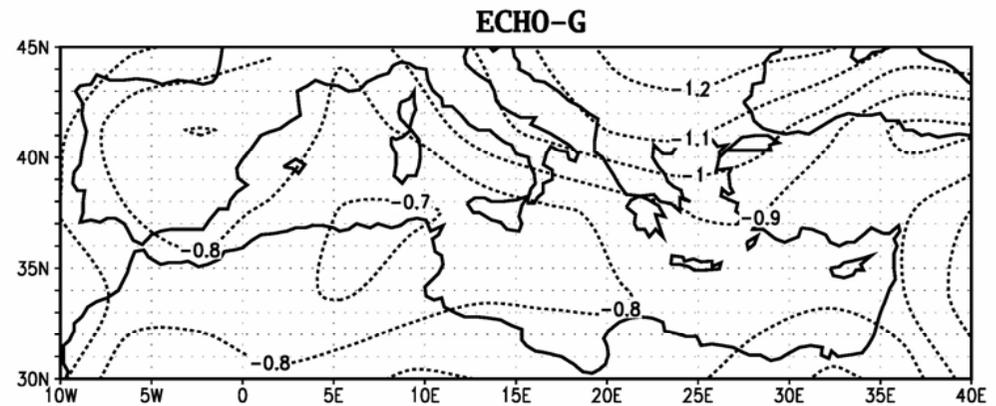
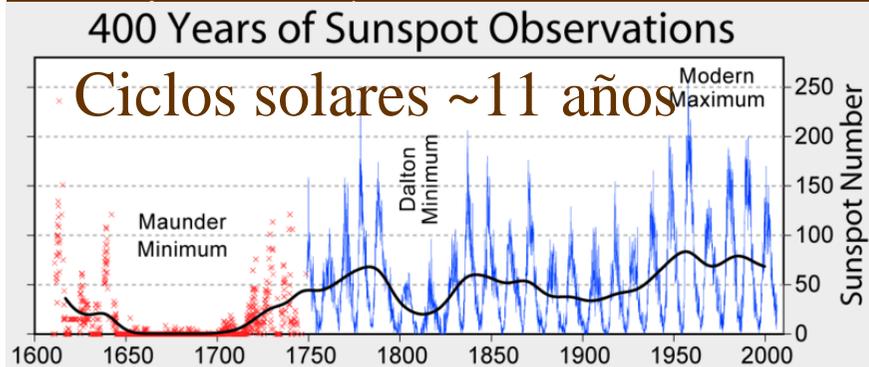


Ciclos de la actividad solar

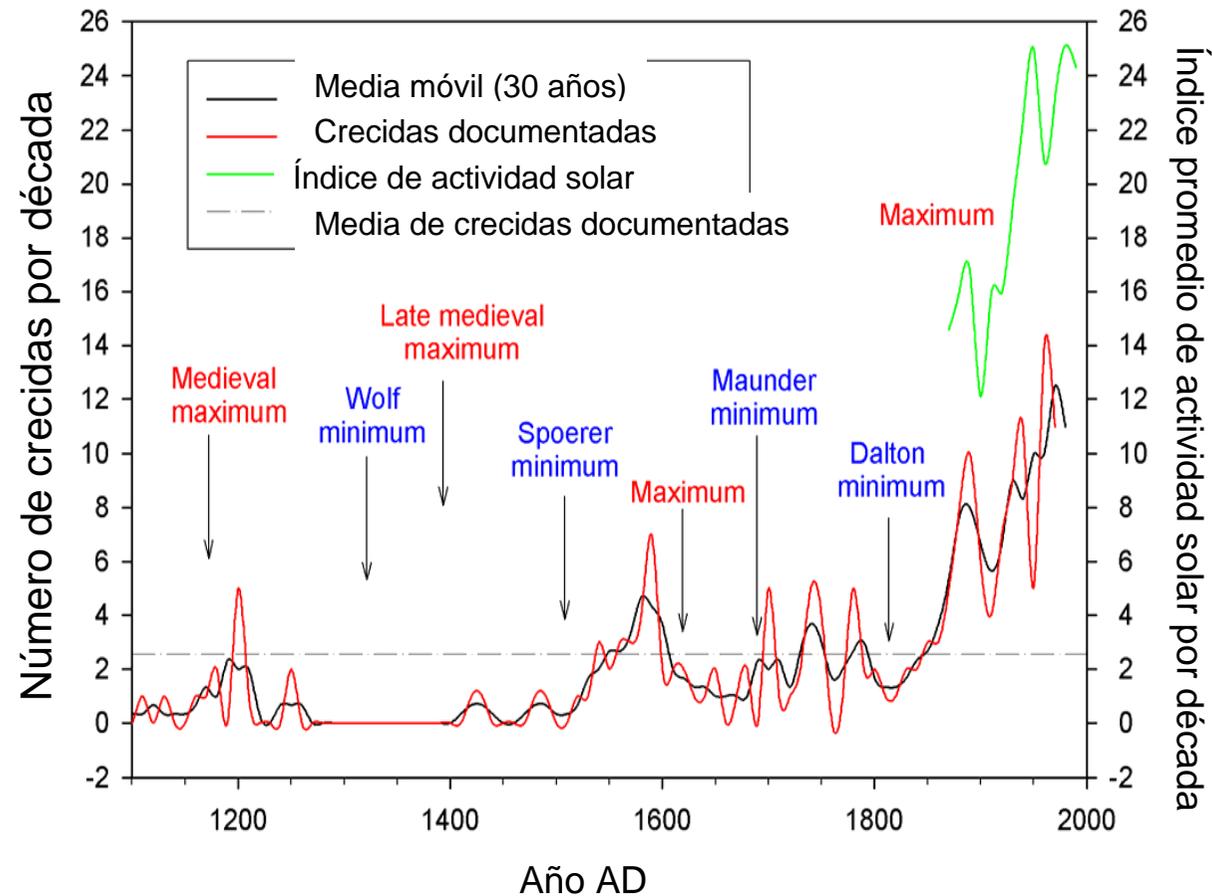


Late Maunder Minimum

Durante el Mínimo Maunder (1645-1715) apenas se observaron manchas solares. Este periodo coincide con la mitad de la PEH y el momento más frío de este periodo. Las temperaturas medias simuladas para este periodo con diferentes modelos muestran descensos de entre -1.2 y -0.2 en el Mediterráneo (Luterbacher



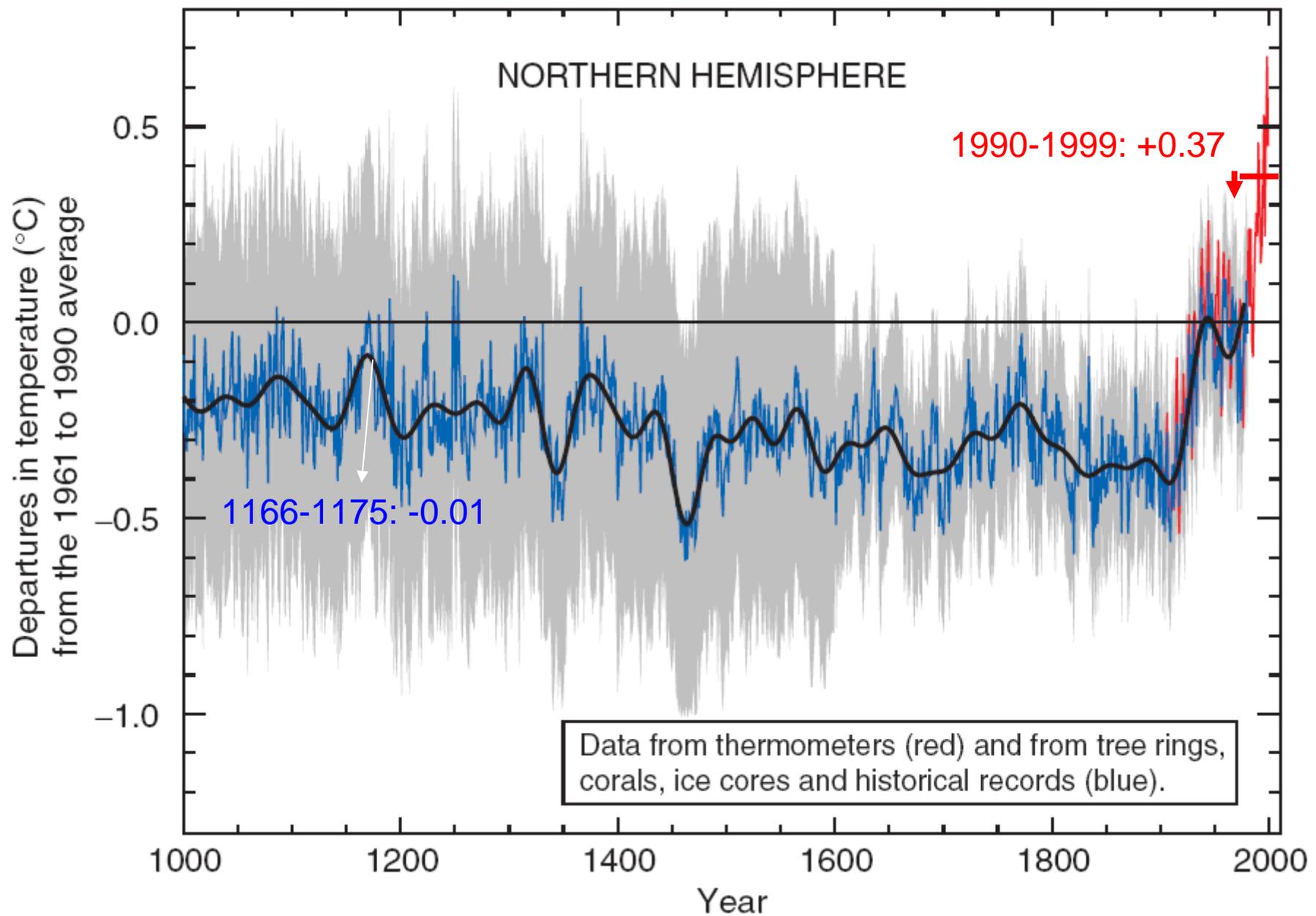
Patrones de crecidas y actividad solar en la cuenca del río Tajo



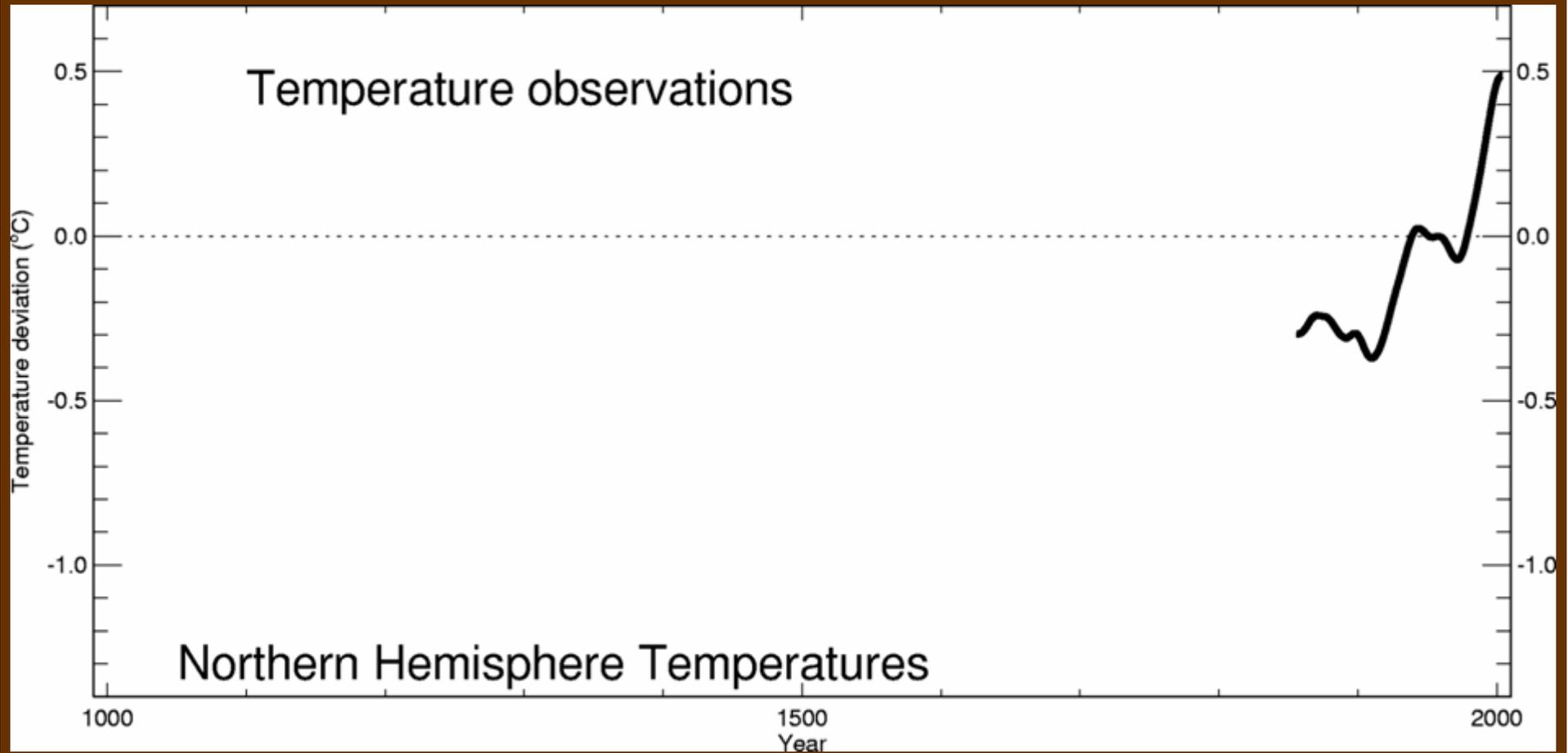
Benito et al., 2004; 2005

Algunos periodos de crecidas se pueden relacionar con periodos de máxima actividad solar, que recientemente se han asociado en diversos trabajos con valores bajos o negativos del Índice de Oscilación del Atlántico Norte (NAOI)

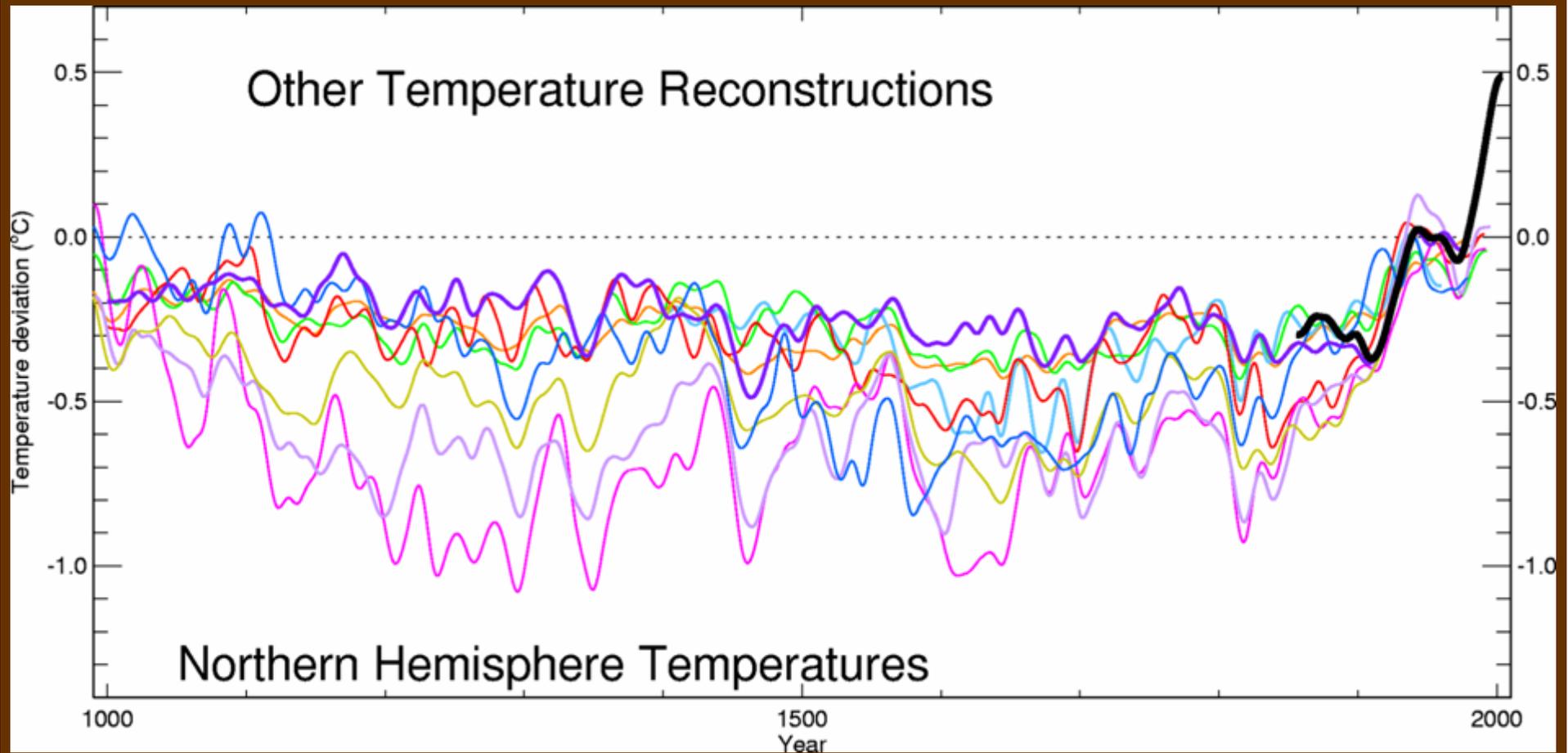
The IPCC assessment: 2001



Registros múltiples de la temperatura del Hemisferio N

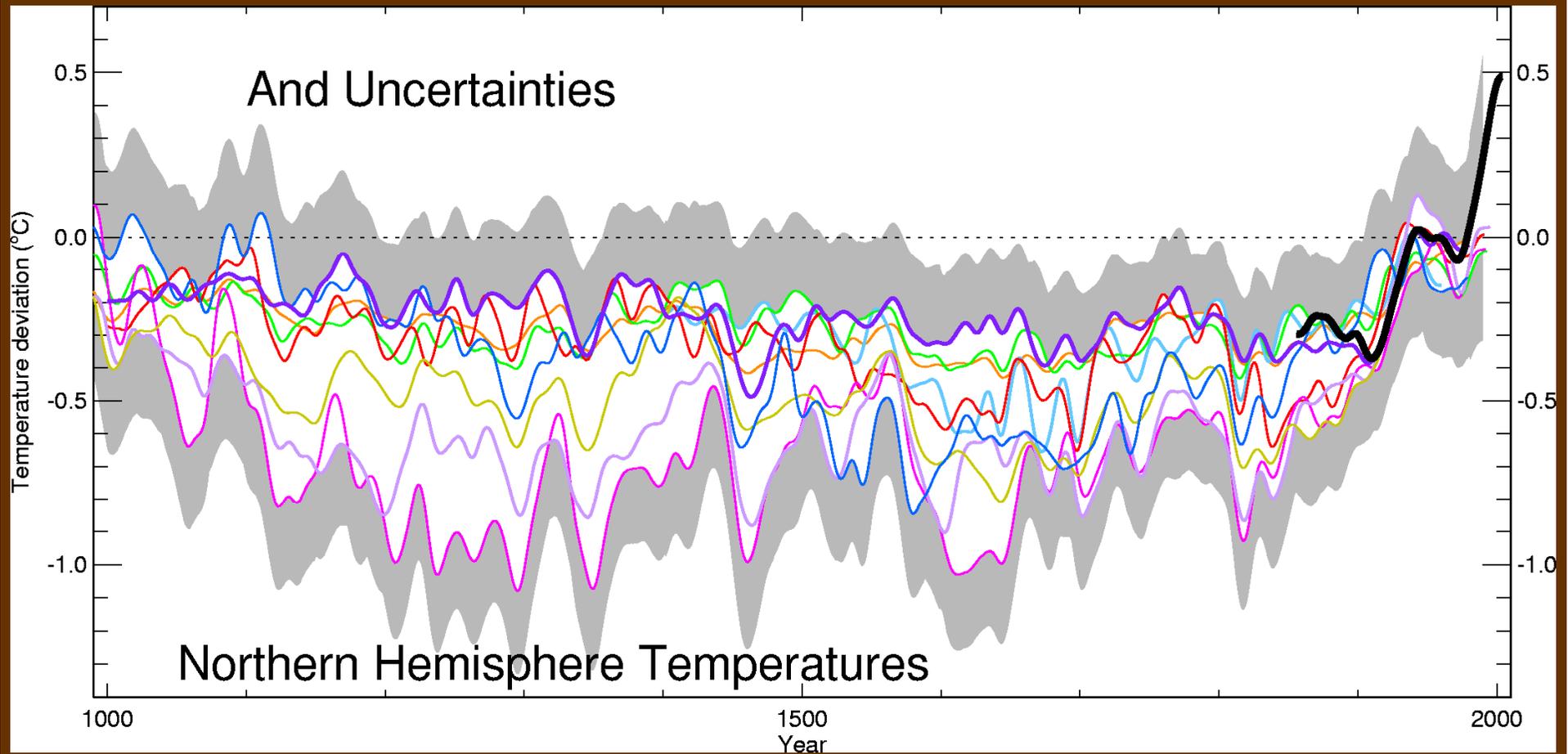


Registros múltiples de la temperatura del Hemisferio N

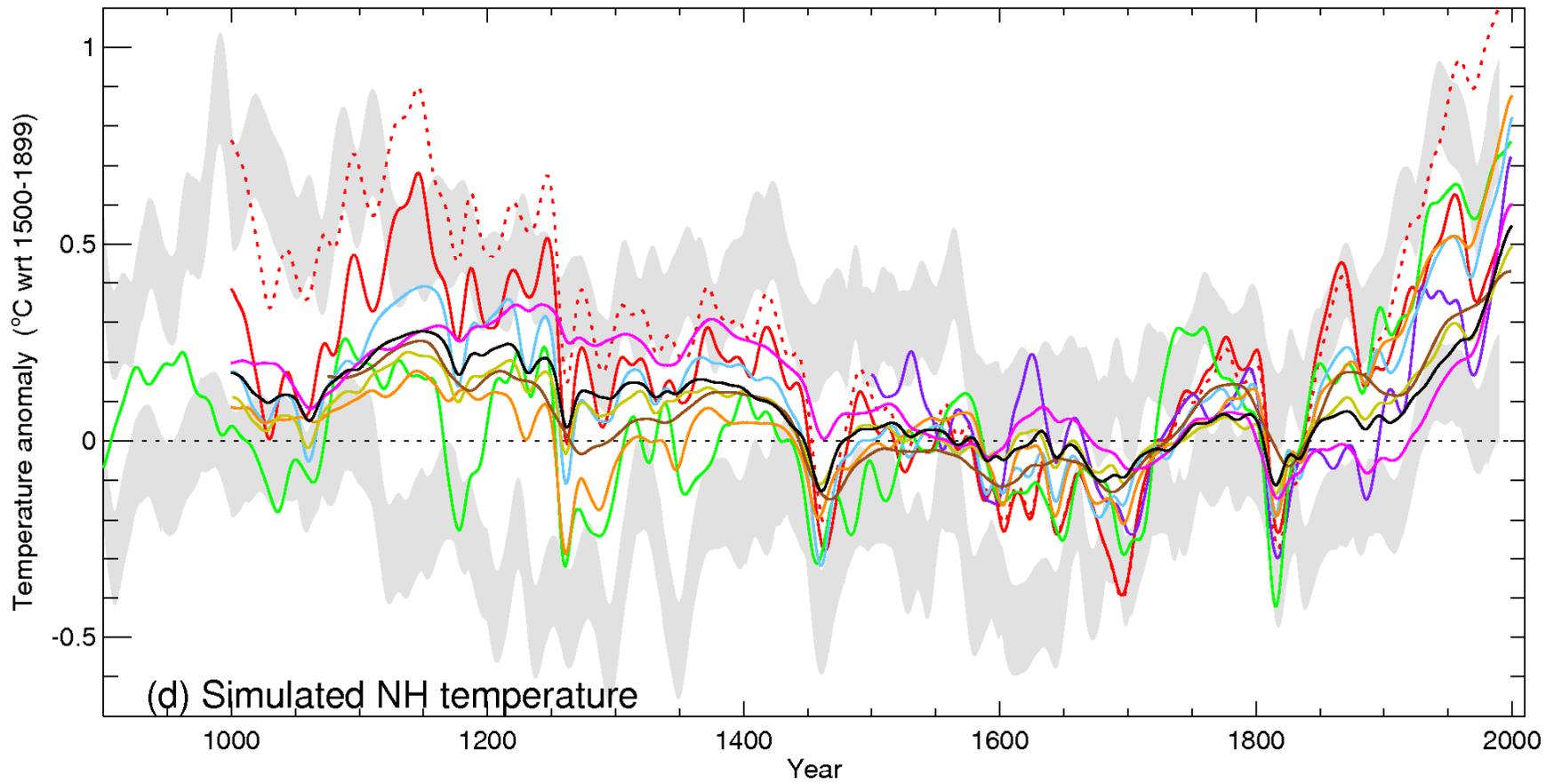


Fuente: Tim Osborn

Incertidumbre en los registros del Hemisferio N



Fuente: Tim Osborn utilizando datos publicados



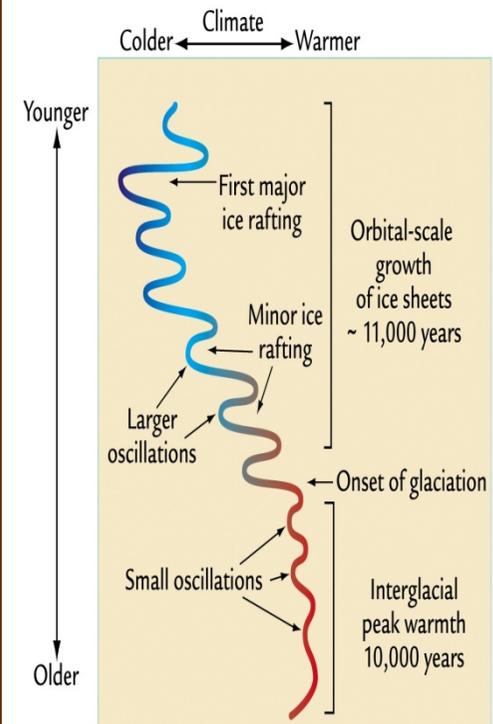
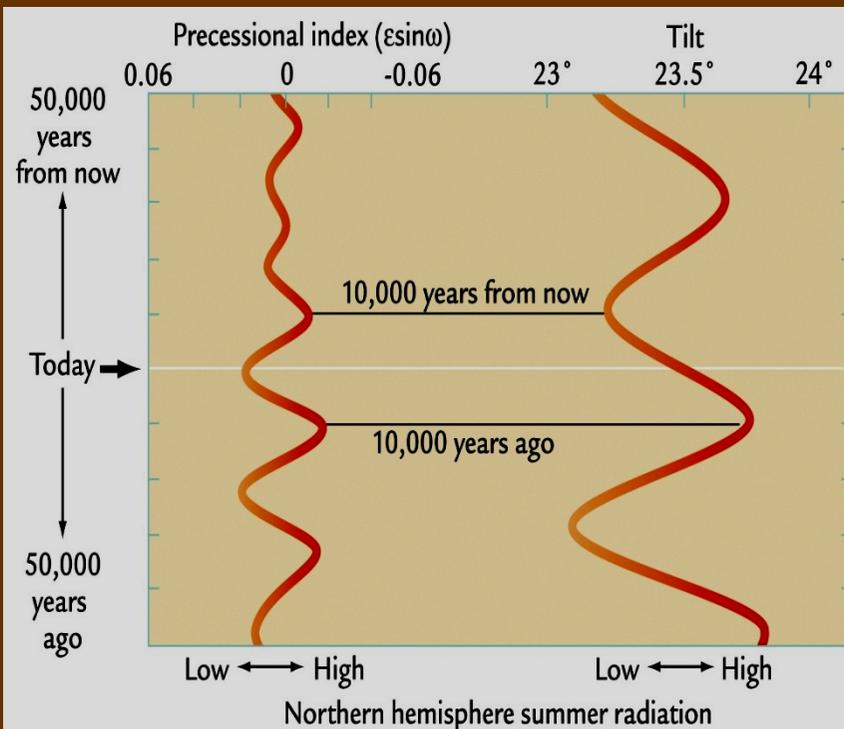
Fuente: Tim Osborn

Dificultades para interpretar las relaciones entre datos y resultados de los modelos

- Los resultados de las simulaciones no tienen porque reconstruir exactamente el clima del pasado
- El clima responde a forzamientos (usados en los modelos) pero tiene también una serie de ajustes y variaciones internas
 - ◆ Si un modelo es realístico, debemos de esperar cierta variabilidad climática (patrones, amplitudes) pero la evolución específica de la variabilidad puede diferir del mundo real
- Las reconstrucciones climáticas tienen errores, en algunos casos más de lo indicado en las publicaciones
- Las simulaciones tienen además errores debidos a la estimación de los forzamientos del pasado y al propio error de los modelos climáticos

Clima Futuro (1)

- En los próximos 10K años la precesión se maximiza en latitudes bajas: Intensificación de los monzones de verano
- La inclinación debe minimizarse en latitudes altas: Patrón consistente con glaciaciones en los próximos miles de años
- Cambios suficientemente rápidos como para afectar al hombre (YD)
- Predicciones complicadas por las oscilaciones a escala milenaria y gases con efecto invernadero de origen antropogénico



Clima Futuro (2)

- El clima Holoceno se caracteriza por su estabilidad perturbada por cambios bruscos, resultado de la influencia de varios mecanismos encadenados y retroalimentados
- Incluso sin el efecto de los gases invernaderos se podría producir uno de estos cambios, pero con el papel modificador del hombre se incrementa su probabilidad. Concentración de CO_2 actual no se había rebasado durante los últimos 650 ka.
- Todas las evidencias y modelos apuntan al incremento de las temperaturas debidas al efecto de los gases invernadero y que podrían impedir el cambio hacia condiciones glaciares en los próximos 500 ka
- Sin embargo, se ha apuntado a la hipótesis de que un aumento de los flujos de agua fría y dulce proveniente del deshielo de los glaciares podría resultar en el debilitamiento de la corriente del Golfo, generando en condiciones más frías (especialmente invierno) en Europa. Broecker (1992) indica que duplicando la cantidad de dióxido de carbono produciría este tipo de cambio.

