

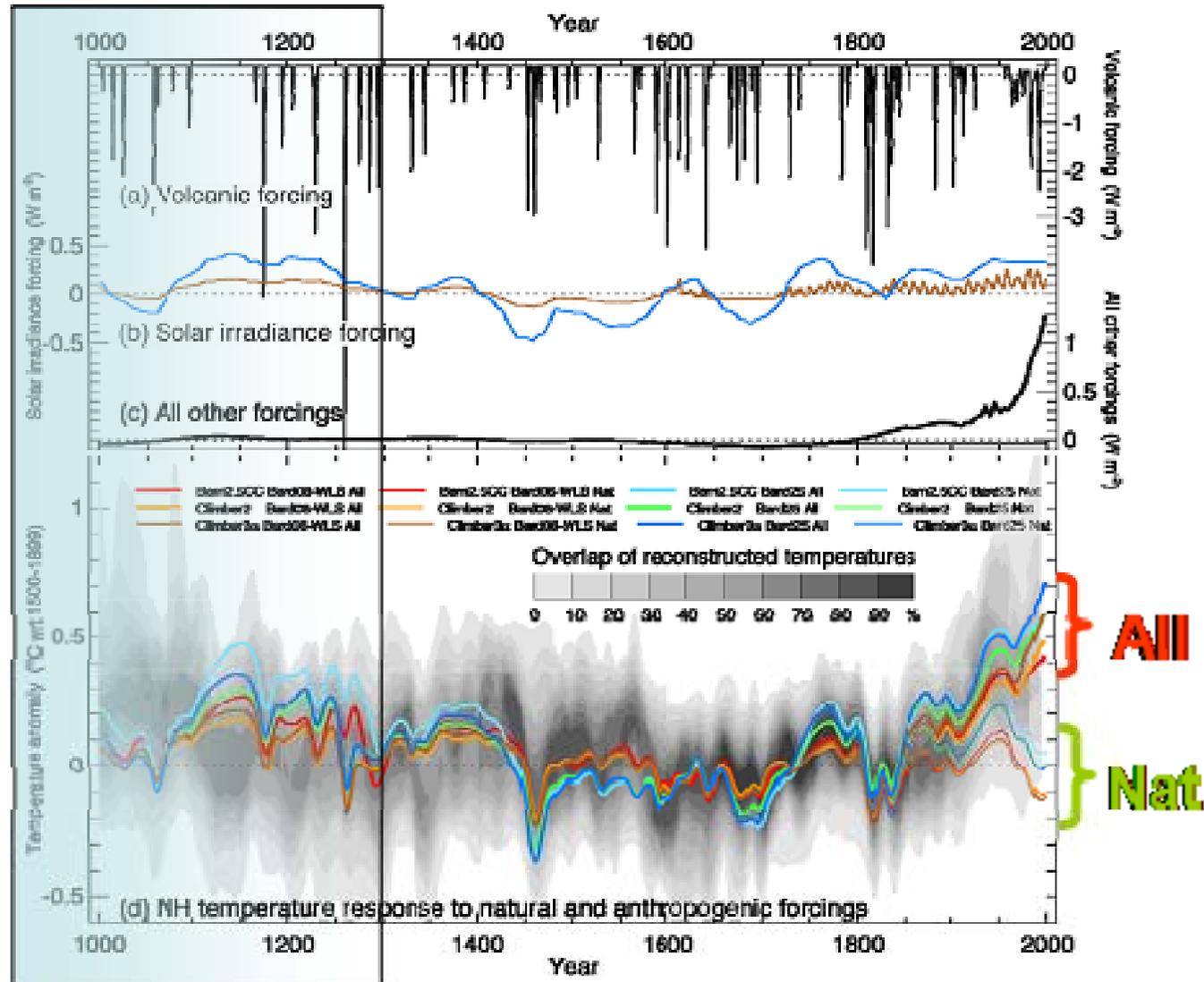
Archivos climáticos y paleohidrológicos. Introducción a datos proxy y su análisis



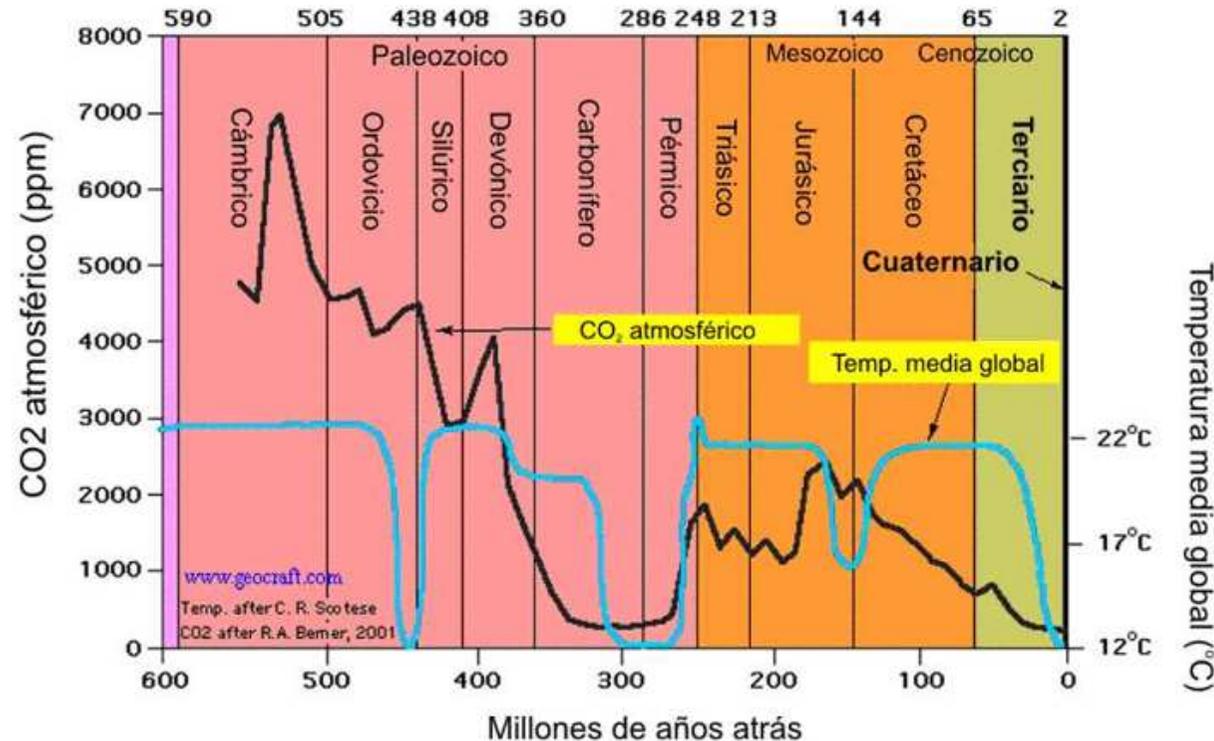
Gerardo Benito Ferrández

CSIC-Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid

Identificación de la influencia antropogénica en el Calentamiento Global



Clima actual, una mínima fracción en la historia de la Tierra



El registro instrumental cubre una diminuta fracción de la historia climática de la Tierra (<10⁻⁷) y, por tanto, proporciona una inadecuada perspectiva de la variación climática y la evolución del clima actual y del futuro.

Estudio del Cambio Climático

El estudio del Cambio Climático requiere la construcción (o reconstrucción) de **series temporales de datos climáticos**

- ◆ Entre los tipos de **datos climáticos** tenemos: **temperatura, precipitación, viento y humedad, evapotranspiración, presión e irradiancia solar**
- ◆ La **variación de estos datos climáticos** a lo largo del tiempo proporcionan una medida (cualitativa o cuantitativa) de Cambio Climático

Subsistema hidrológico

El **sistema hidrológico** tiene una relación directa con el clima y por tanto puede usarse como indicador de Cambio Climático

- ◆ Entre los tipos de **datos hidrológicos** tenemos aquellos que componen el ciclo hidrológico terrestre: **Escorrentía** (caudal medio, caudal punta), **aguas subterráneas** (incluye recorrido y recarga), **evaporación y transpiración** (vegetación)

Registros instrumentales

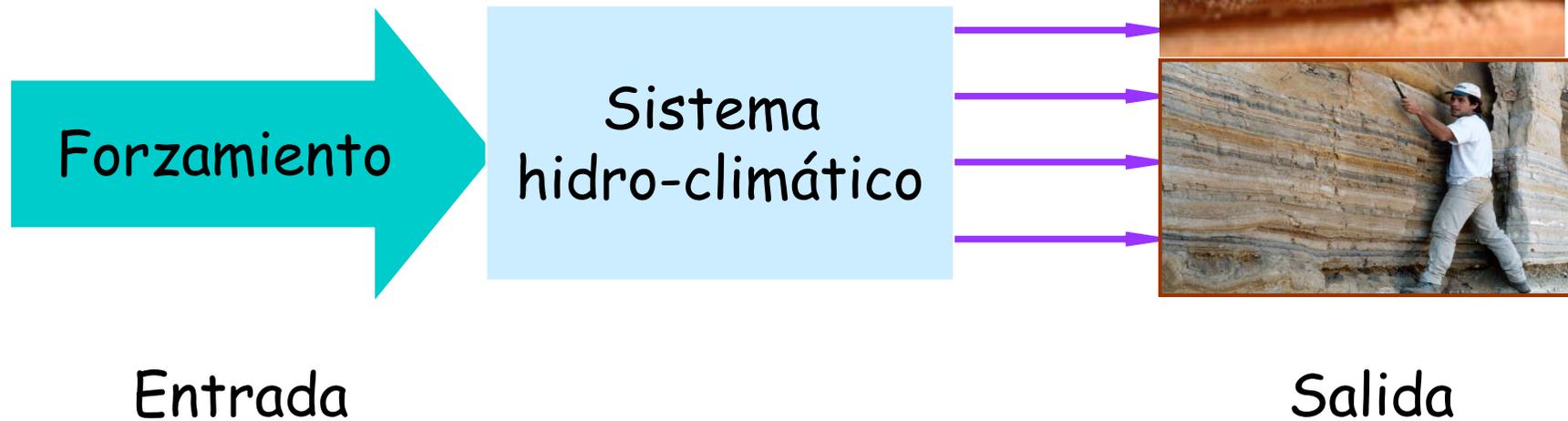
- Los estudios de clima e hidrología tradicionales se basan en el uso de datos observados y medidos instrumentalmente
 - ◆ Existen registros de temperatura disponibles desde comienzos del siglo XVII en Reino Unido (e.g. Edimburgo)
 - ◆ Los registros se extienden de forma más generalizada desde la mitad del siglo XIX
- En el caso de la hidrología, existen registros anecdóticos desde hace varios milenios (e.g. Nilometro)
 - ◆ Los registros hidrológicos se inician en la segunda mitad del siglo XIX, y en España se generalizan desde 1911

Hidro-climatología del Pasado

- Los registros anteriores al periodo instrumental se reconstruyen de forma indirecta a partir registros geológicos y biológicos

Hidro-climatología del Pasado

Retrodicción



Registros "Proxies"

- Los "proxy" son indicadores naturales dependientes del clima
- Estos indicadores naturales actúan de filtro, transformando las condiciones climáticas del pasado en un registro relativamente permanente.



Registros "Proxies"

Aunque por definición todos los indicadores "proxy" permiten derivar información paleoclimática, la señal climática puede ser débil o contener ruido de fondo que varía en el tiempo.

En definitiva, descifrar la señal climática de un "proxy" se convierte en ocasiones en un trabajo complejo.



Archivos climáticos y paleohidrológicos

- Cinco tipo de archivos de registros climáticos y paleohidrológicos
 - ◆ Sedimentos y suelos
 - ◆ Hielo
 - ◆ Corales
 - ◆ Árboles (Dendro)
 - ◆ Documentales
- Cada tipo de archivo tiene diferente duración en el tiempo, resolución y facilidad para su datación o geocronología

Archivos sedimentarios

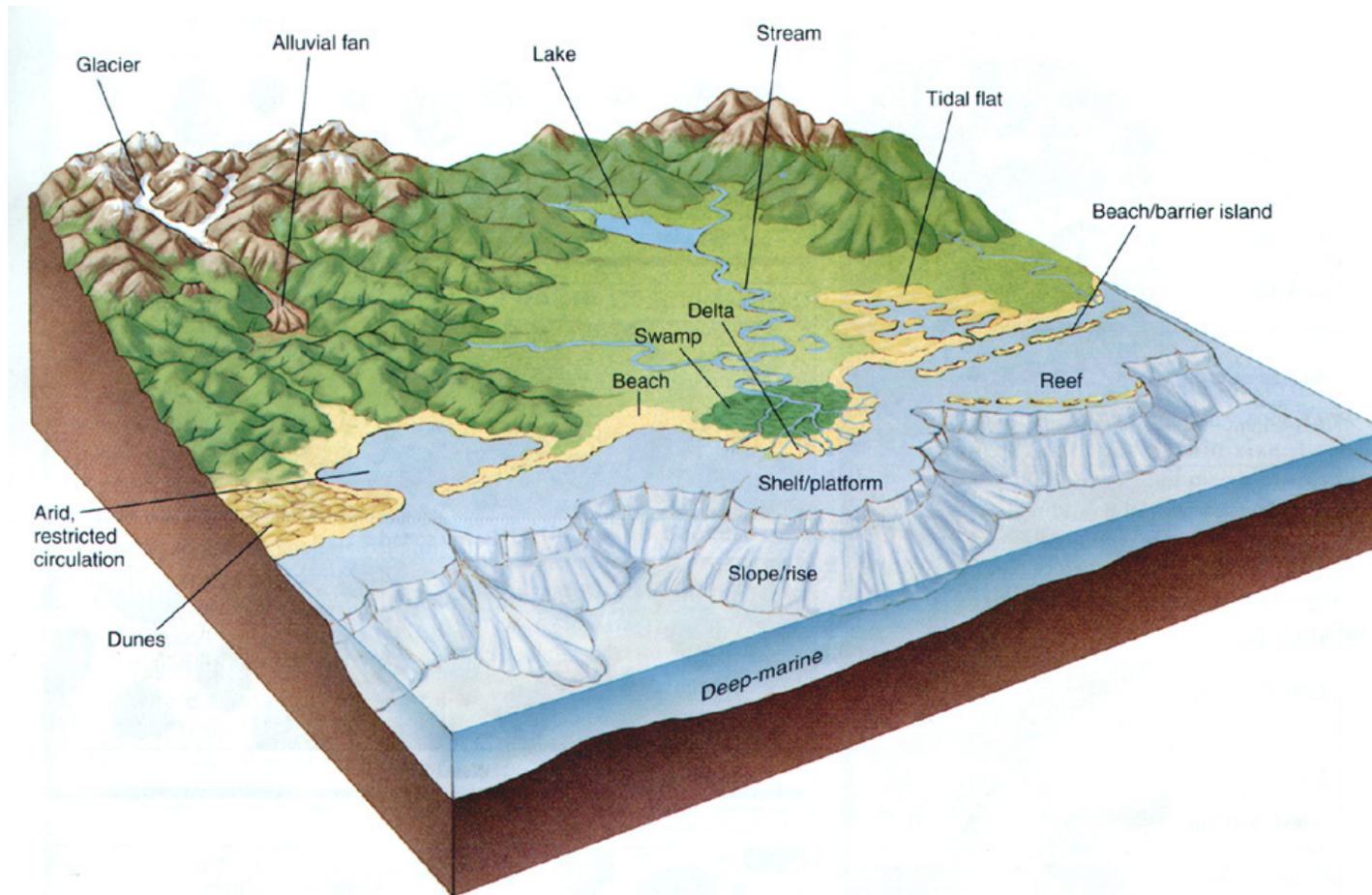


FIGURE 4.2

Typical sedimentary depositional environments.

(Adapted from Jones, 2001: Laboratory Manual for Physical Geology, 3rd edition.)

| Proxy data source | Some of the variables measured | Possible climatic inferences | Potential study period | Typical sampling interval |
|-------------------------------|---|---|-------------------------------|----------------------------------|
| Ice cores | $\delta^{18}\text{O}$, δD , CO_2 , CH_4 , dust ice chemistry | Temperature Atmospheric circulation | 40 ky 100–500 ky | 1–10 y 10–100 y |
| Tree rings | Ring width $\delta^{18}\text{O}$, δD $\delta^{13}\text{C}$, $\Delta^{14}\text{C}$ | Temperature Precipitation (drought) Solar variability | 10 ky | 1 ky |
| Coral | $\delta^{18}\text{O}$, Sr/Ca | SST, precip-evap, sea level | 100–1000 y | 1 month 1 y |
| Pollen | Percent, influx | Temperature Precipitation | 10–100 ky | 10–100 y |
| Soils | $\delta^{13}\text{C}$ Loess | CO_2 , wind | 1–10 My | Snapshots |
| Closed-basin lakes | Lake level | Precipitation-evaporation | 10–100 ky | Snapshots |
| Lake sediments | $\delta^{18}\text{O}$ Diatoms | Temperature Salinity | 10–100 ky | 10–100 y |
| Ice sheets | Former extent, glacial rebound | Area, thickness, bedrock depression | 1 My | Snapshots |
| Mountain glaciers | Former extent | Snowline, air temperature | 10 ky | Snapshots |
| Marine sediments | $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ Foraminiferal assemblages | Global ice mass, ocean circulation, SST | 10 My 500 ky 50 ky | 1 ky 100 y 1–10 y |
| Raised shorelines | Evaluation | Sea level Bedrock depression | 1 My | Snapshots |
| Laminated or varved sediments | Reflectance, magnetic properties | Precipitation Wind | 10 ky | 1 y |

Datos Proxy

- Tipo de material proxy a utilizar depende de:
 - ◆ Cobertura espacial y geográfica
 - ◆ Periodo de tiempo de interés para el estudio
 - ◆ Capacidad para definir los eventos o hitos en el tiempo
- Por ejemplo
 - ◆ Sedimentos en fondos oceánicos, revelan información para periodos largos de evolución del clima (10^7 años), con bajas frecuencias de resolución (10^3 years)
 - ◆ Los anillos de los árboles revelan información hidroclimática para los últimos 10.000 años, pero ofrecen una elevada resolución (annual)
- La elección de los registros proxy depende del objetivo del estudio, y de tipo de forzamientos y mecanismos analizados

Consideraciones generales

- En uso del material proxy debemos de considerar:
 - ◆ La precisión con la que puede ser datado
 - ◆ Los sedimentos marinos pueden tener continuidades de 1 millón de años pero su datación puede resultar difícil
 - ◆ Los registros de hielo resultan fáciles de datar pero pueden tener hiatos debido a deshielo o a erosión eólica
 - ◆ Los depósitos glaciares son muy episódicos, y proporcionan solo evidencia de eventos discretos del pasado
- Diferentes sistemas proxy tiene diferentes niveles de inercia con respecto al clima
 - ◆ Algunos sistemas varían en fase con los forzamientos climáticos
 - ◆ Algunos sistemas presentan un tiempo de demora de varios siglos

Pasos en la Reconstrucción Paleoclimática

- La reconstrucción paleoclimática consta de 3 pasos básicos
 - ◆ Recogida de datos, seguida de análisis inicial y su medida
 - ◆ Son los datos primarios
 - ◆ Calibración de los datos primarios con registros climáticos modernos
 - ◆ Son datos secundarios que proporcionan un registro de la variación climática pasado
 - ◆ Análisis estadístico de los datos secundarios
 - ◆ El registro paleoclimático se analiza estadísticamente y finalmente se interpreta

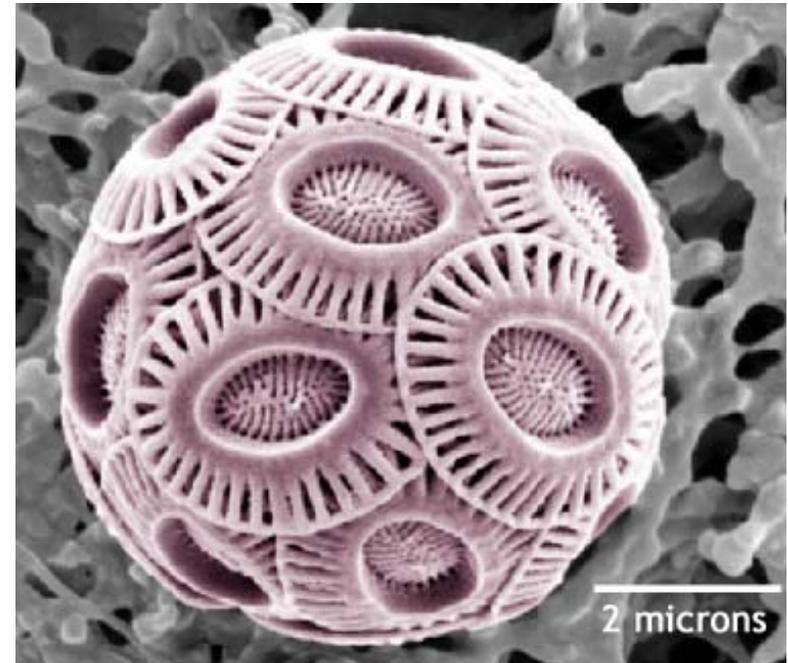
Calibración de los Proxy

- Se asume el principio de uniformitarismo
 - ◆ Variaciones en el clima contemporáneo sirve de análogo moderno de los cambios en paleoclima. Cuidado!: puede que no existan análogos modernos de determinadas condiciones paleoambientales
 - ◆ La calibración puede ser sólomente cualitativa, lo que conlleva una valoración subjetiva, o pueden ser altamente cuantitativa

Un ejemplo proxy: Emiliana huxleyi

Es un componente del fitoplancton cubierto con discos de calcita ornamentados, los cocolitos y presenta en grandes afloramientos (100,000 km²) suponiendo el 80 o 90% del total de fitoplankton

- ✓ Se puede encontrar en sedimentos no solo la cubierta, sino también partes blandas. Después de descomponer las partes blandas reduce componentes orgánicos únicos C₃₇-C₃₉ di-, tri- y tetra insaturado metil alquenonas.
- ✓ Las alquenonas son indicadores proxy de temperatura y salinidad del agua marina.

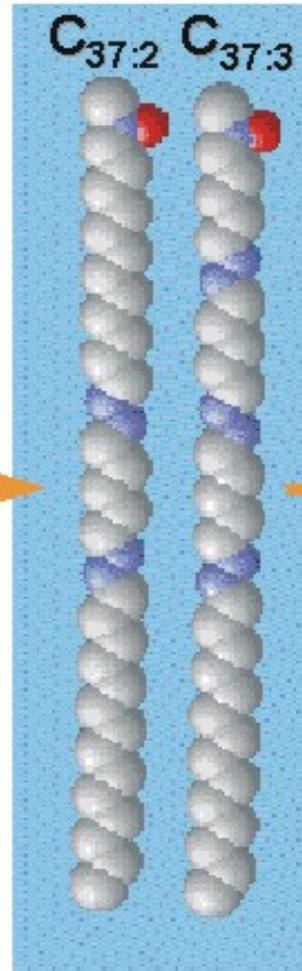


Relación proxy de las Alquenonas

Phytoplankton
Coccolithophorids
(e.g. *Emiliania huxleyi*)



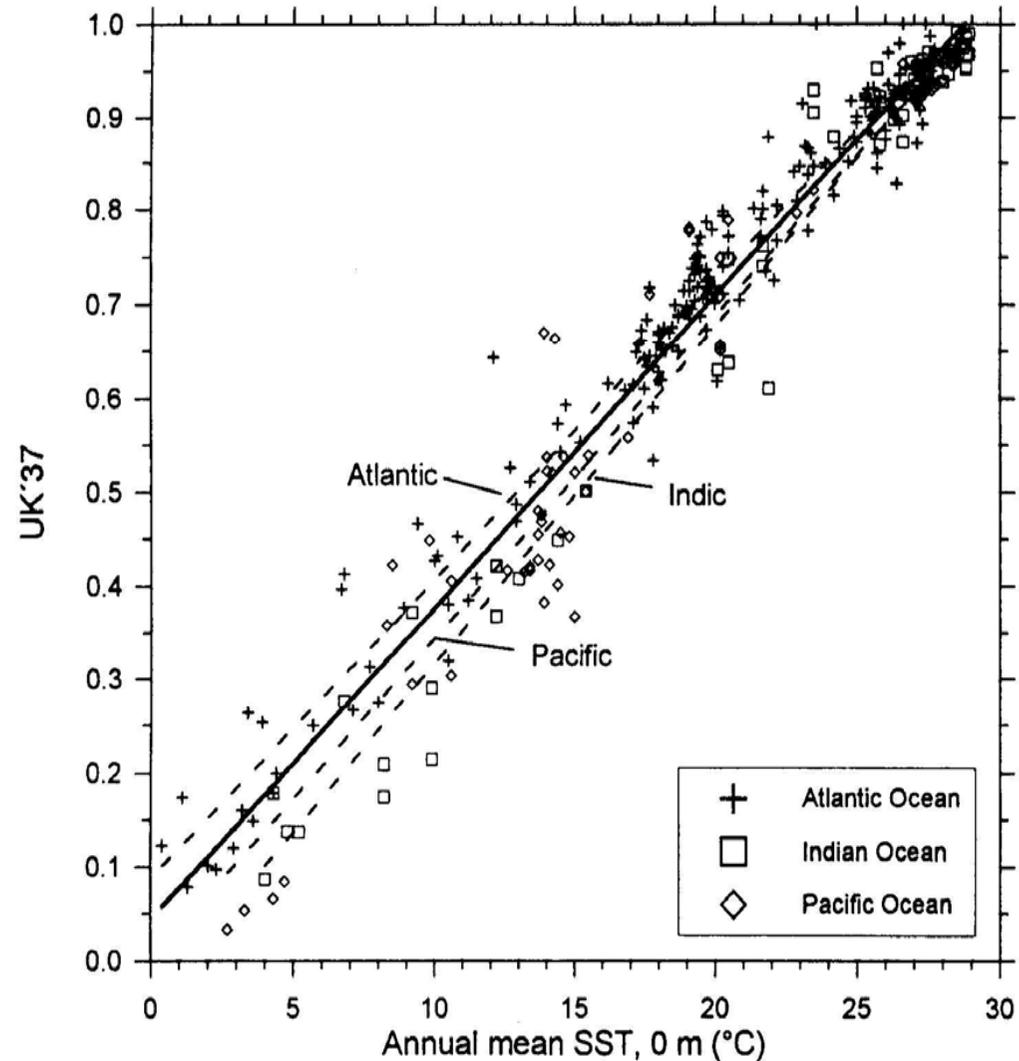
alkenones
chemical fossils



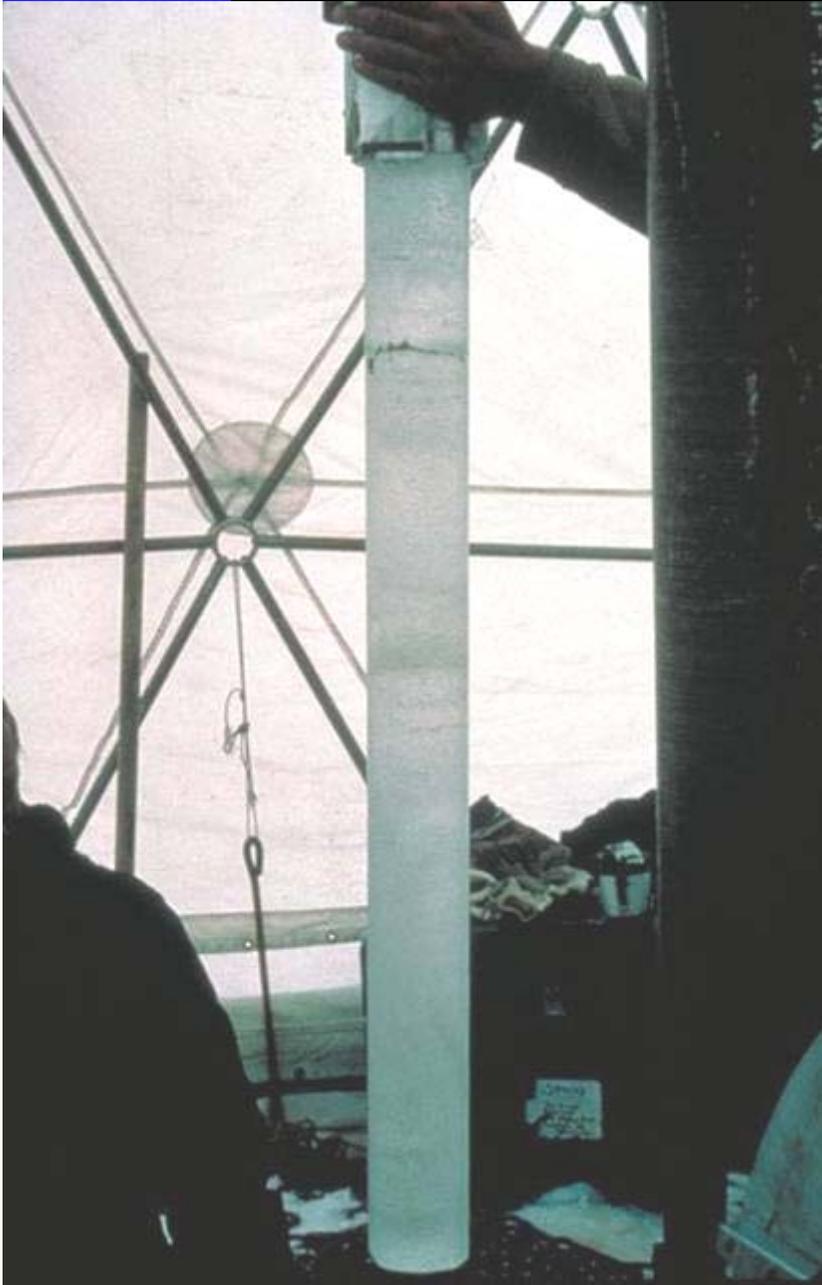
$$U_{37}^K = \frac{C_{37:2}}{C_{37:2} + C_{37:3}}$$

$U^{K'}_{37}$ Varía con la temperatura

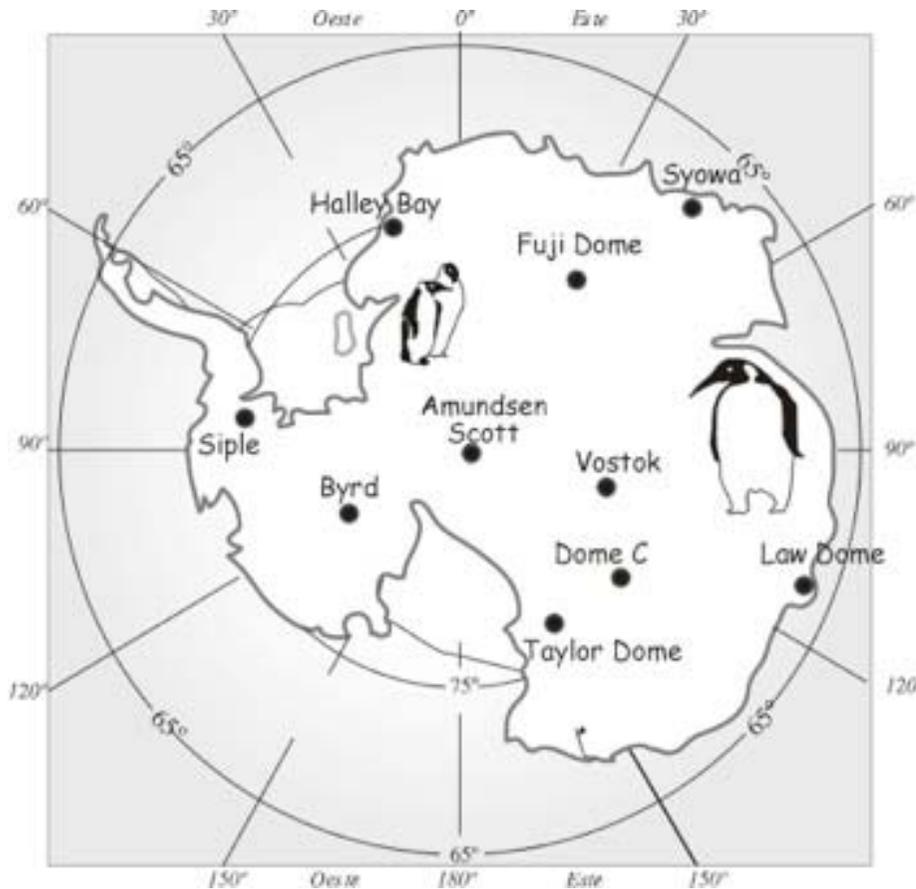
- Calibración global de Alquenona insaturada
 - ◆ $U^{K'}_{37}$ determinado en sedimentos superiores de sondeos
 - ◆ SST a partir de Atlas oceano de Levitus
 - ◆ Figura de Muller *et al.* (1998)



Registros en Testigos de Hielo



Sondeos de Hielo en Antártida



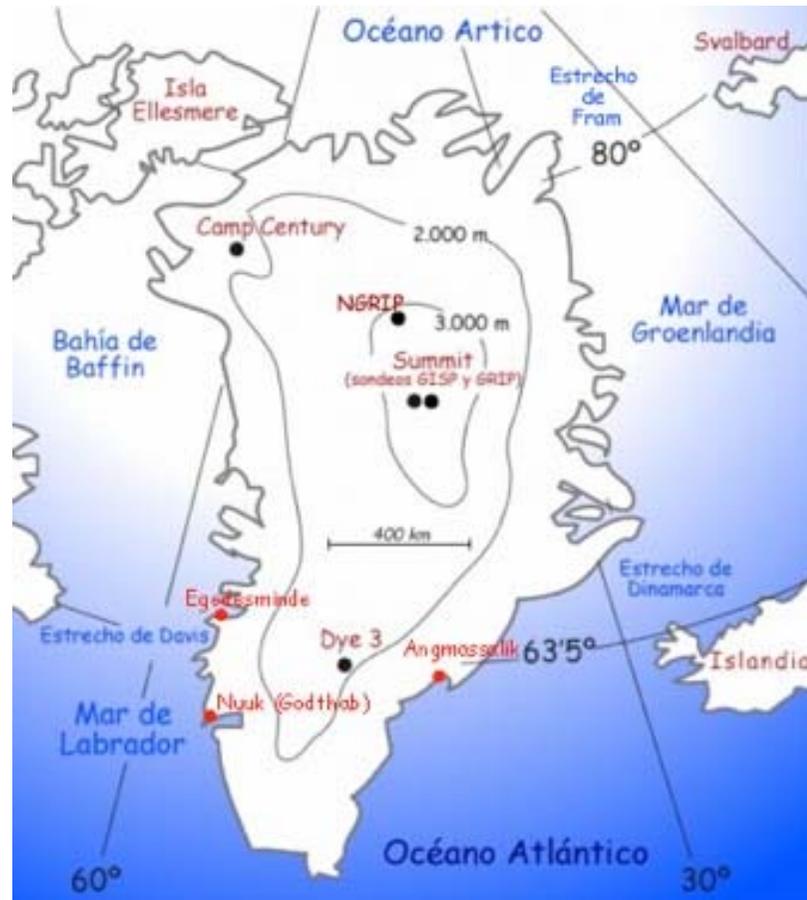
-Vostok (Rusia) 3.623 m profundidad y 420.000 años BP

-Dome C (o Domo Concordia), Proyecto EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*): 3.000 m de profundidad y 740.000 años BP

- Fuji Dome (Japón) 3.029 m de profundidad, 760.000 años

Figura de Uriarte, 2003

Sondeos de Hielo en Groelandia



- Los Programas americano GISP 1 y 2 (Greenland Ice Sheet Project) y el Programa europeo GRIP (Greenland Ice-core Project), alcanzan profundidades de hielo de unos 3.000 metros, y edades de unos 150.000 años.

-Recientemente se han comenzado a publicar los resultados de otro sondeo en Groenlandia (NGRIP), situado 350 km al norte de Summit, >3000 m de profundida hasta una capa límite de hace 123.000 años, en pleno interglacial Eemiense (North Greenland Ice Core Project Members, 2004).

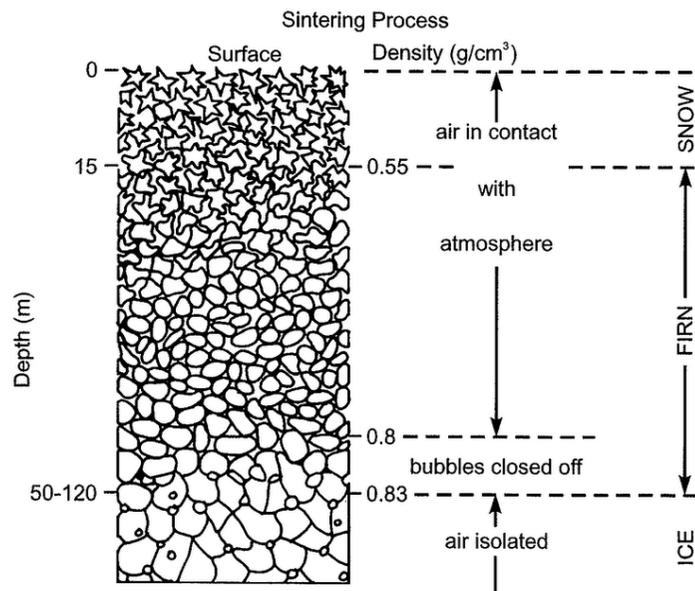
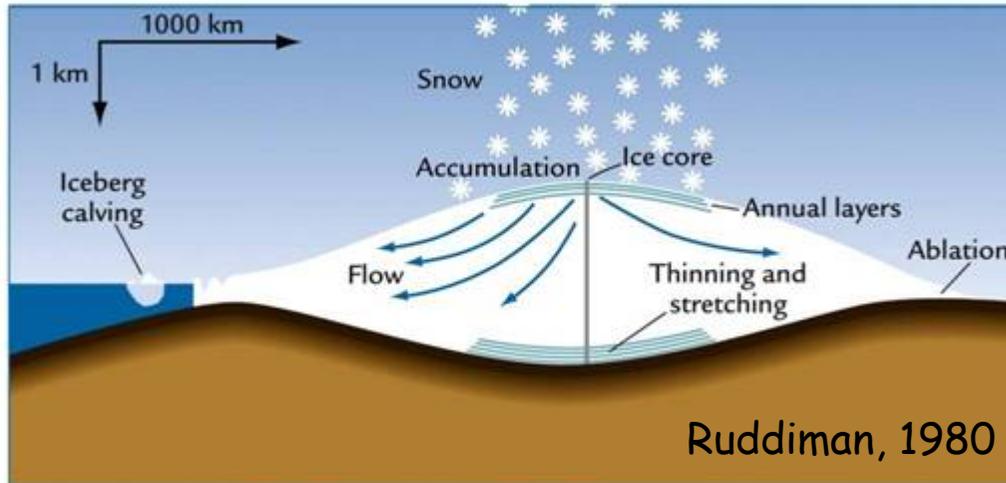
Figura de Uriarte, 2003



Testigo de hielo EPICA

- Temperatura y tasa de precipitación
- Composición de aerosoles atmosféricos
- Actividad solar
- Flujo de polvo extraterrestre hacia la Tierra (incl. hierro)
- Concentración de gases con efecto invernadero (CO₂, metano y óxido nitroso)

Casquetes de hielo



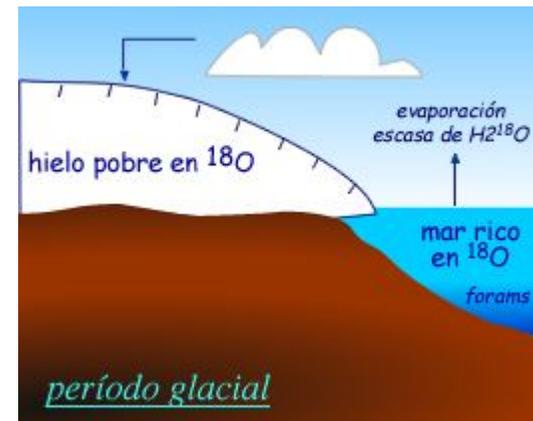
La edad del hielo se calcula asumiendo que las burbujas de gas sólo pueden ser atrapadas efectivamente en capas de hielo compacto, más antiguas, a una profundidad suficiente debajo de la superficie para que los poros del hielo se hayan sellado. Este proceso se llama de sinterización (sintering).

Información climática en los testigos de hielo

- Tiempo de renovación largo => residencia larga
- Acumulación seca de la nieve => niveles se preservan
 - ◆ Isótopos estables de agua $\delta^{18}\text{O}$ & δD
 - ◆ Constituyentes traza solubles
 - ◆ Fuentes marina (Na, MSA, SO_4 , ...)
 - ◆ Fuentes terrestres (Ca, nss SO_4 , ...)
 - ◆ Polvo, ceniza volcánica, otros
 - ◆ Gases atrapados (CO_2 , CH_4 , $\delta^{18}\text{O}$, ..., N, A)
 - ◆ Isótopos cosmogénicos (^{10}Be , ...)
 - ◆ Espesor de niveles

Análisis de Isótopos Estables

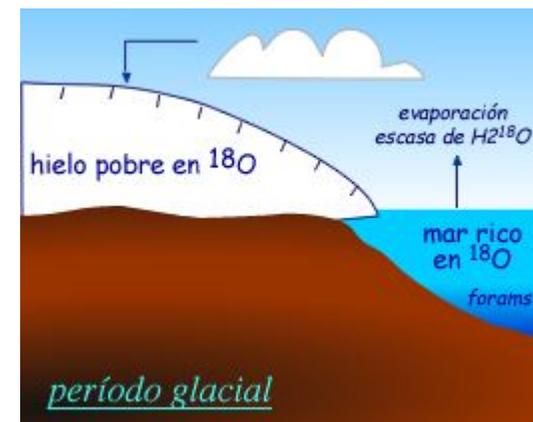
- La presión de vapor de $H_2^{16}O > H_2^{18}O$
- La evaporación se produce de forma preferencial sobre el ^{16}O . En periodos fríos el agua marina se enriquece en ^{18}O
- Durante condensación, la menor presión de vapor del $H_2^{18}O$ enriquece el agua de lluvia en ^{18}O
- Durante el transporte del vapor del agua hacia el polo, el fraccionamiento del isótopo se traduce en la disminución del ^{18}O . A mayor descenso de la temperatura, menor la concentración del isótopo pesado.
- La concentración de isótopo en estado condensado (agua, nieve, hielo) es por tanto función de la temperatura de condensación.



Análisis de Isótopos Estables

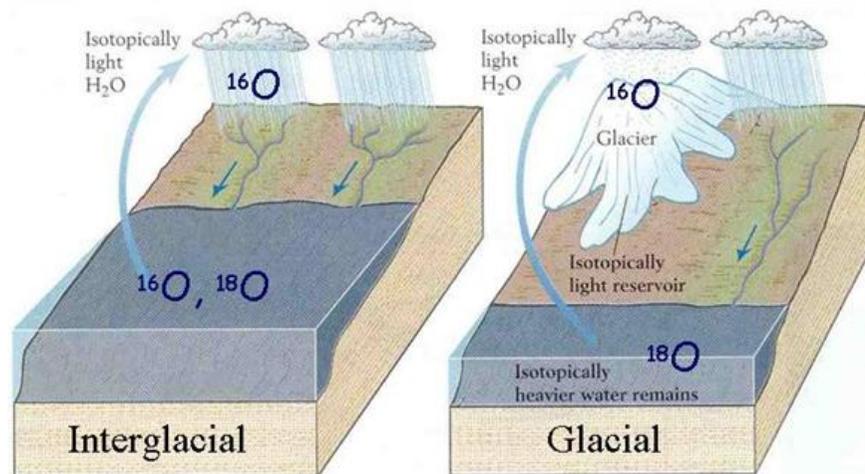
- El análisis isotópico del oxígeno contenido en foraminíferos fósiles depositados en el fondo del mar y en los testigos de hielo, permite determinar la evolución pasada de la concentración de ^{18}O y deducir la evolución térmica marina y atmosférica. Para ello se utiliza el índice $\delta^{18}\text{O}$ or delta-O-18 o relación de isótopos estables $^{18}\text{O}: ^{16}\text{O}$. El estandar tiene una composición isotópica conocida.

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{standard}}} - 1 \right) \approx 1000 \text{ ‰}$$



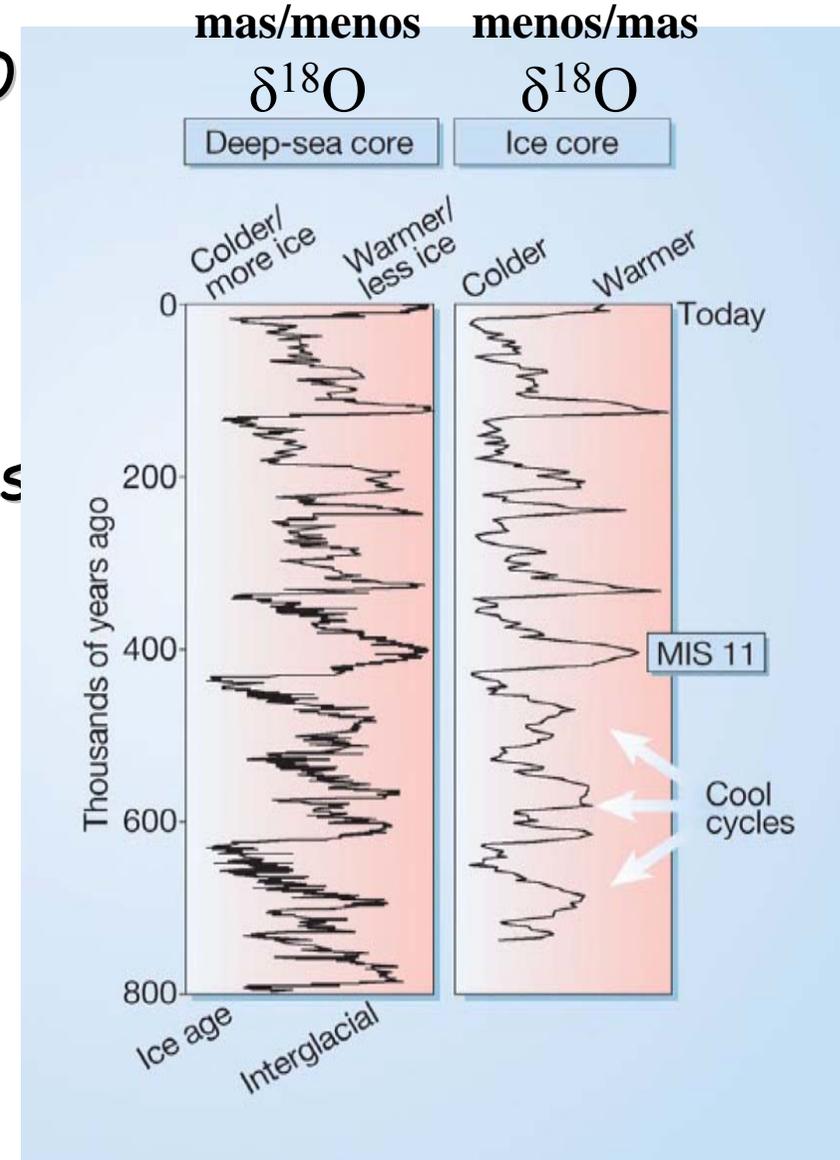
Fraccionamiento isotópico $\delta^{18}\text{O}$

- Durante periodo glacial el $\delta^{18}\text{O}$ se agota en los casquetes glaciares y consecuentemente se incrementa en aguas oceánicas
- Durante periodos interglaciares la relación es la inversa

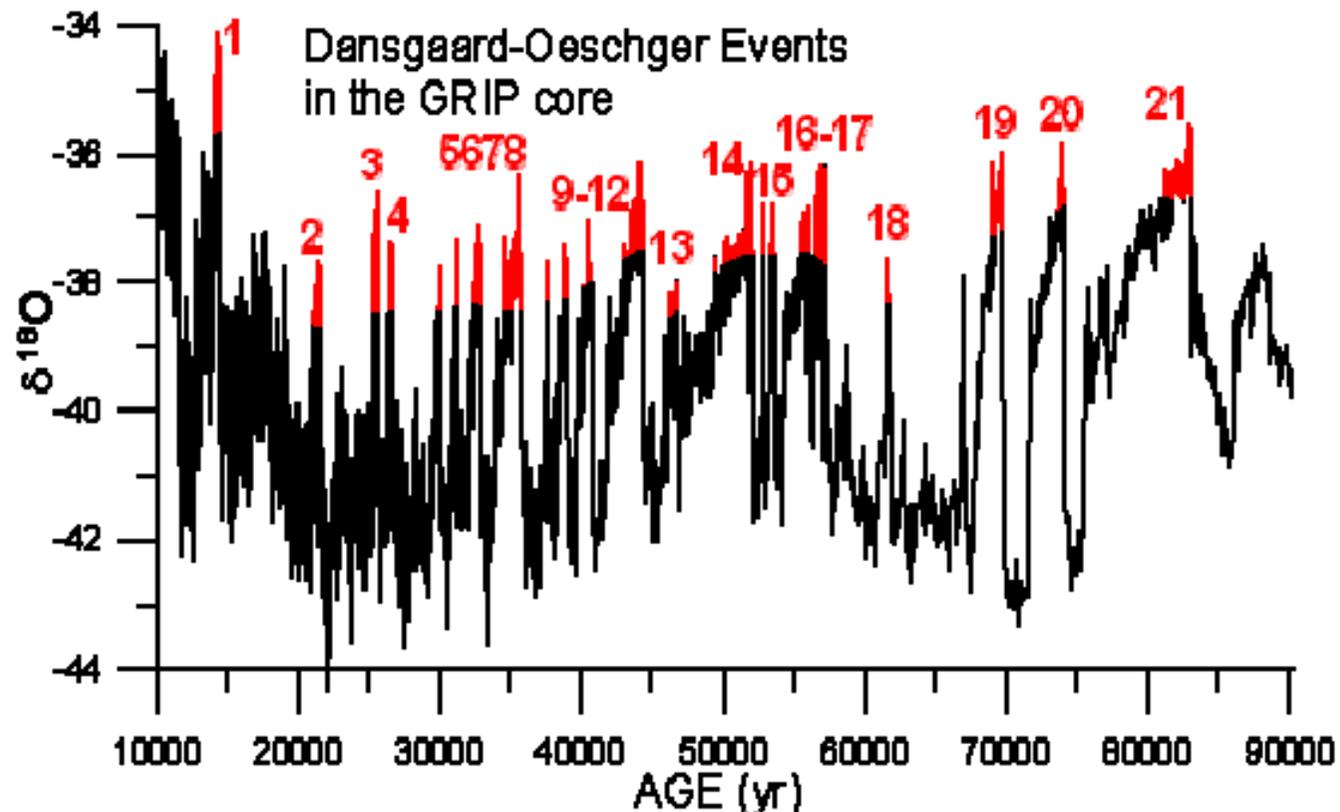


Isotopically light water evaporates from the ocean and returns via rivers: the system is in balance

Glaciers expand, forming a new reservoir of isotopically light water on the land: sea level drops and the ocean becomes isotopically heavy



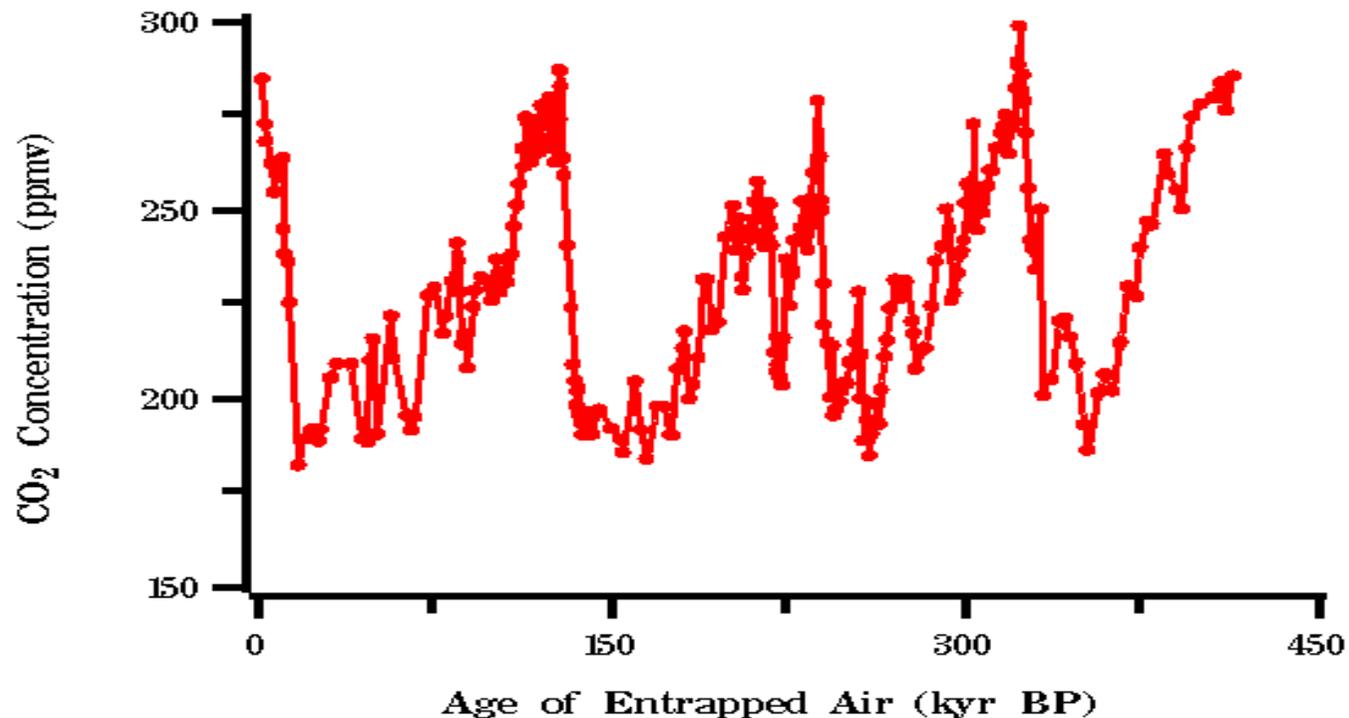
Los eventos Dansgaard-Oeschger son eventos cálidos abruptos reconstruidos a partir de los registros de $\delta^{18}\text{O}$ en testigos de hielo (Blunier & Brook, 2001). Se han producido 25 veces durante el último ciclo glacial, con una recurrencia cuasi-periodica de 1.470 años. Por ejemplo, hace 11.500 años la temperatura media anual en Groenlandia aumentó en 8°C en ~ 40 years. El registro de estos eventos en Groenlandia tienen un decalaje de 1-2 ka respecto a la Antártida. A estos les suceden eventos fríos que pueden terminar en los conocidos como eventos Heinrich (e.g., DO1 seguido de H1).



Burbujas de Aire en el Hielo

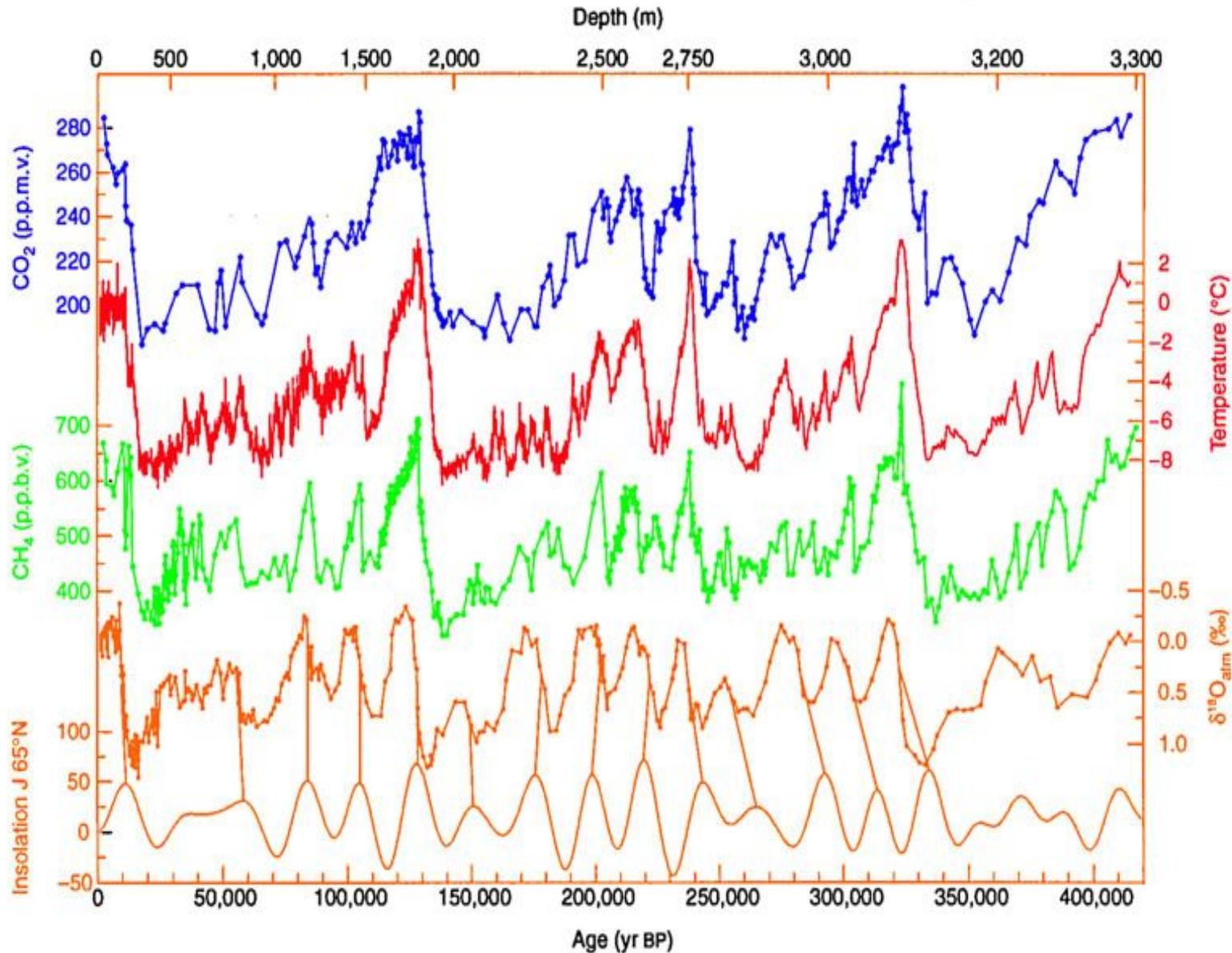
- El gas atmosférico es atrapado en burbujas a medida que los poros se cierran durante el paso de nieve firn a hielo
- El análisis de dióxido de carbono atrapado en las burbujas de testigos de hielo permiten registrar las variaciones atmosféricas de este gas, y su relación con la temperatura.

Vostok, Antarctica Ice Core Atmospheric Carbon Dioxide Record

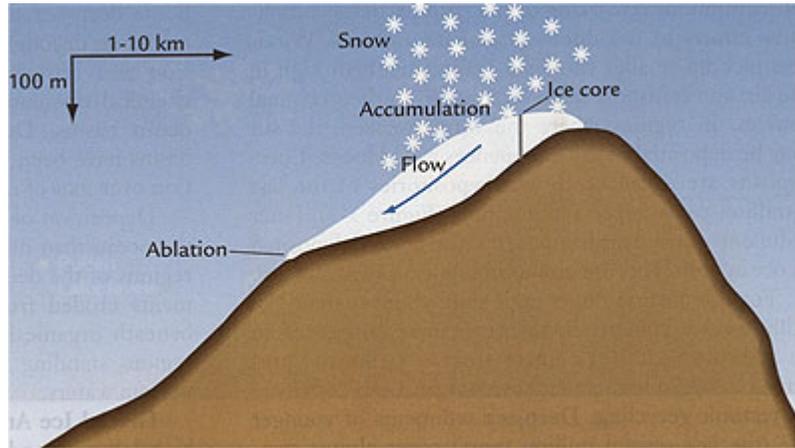


Source: Jean-Marc Barnola et al.

Testigo de hielo Vostok y forzamiento orbital (radiación solar)



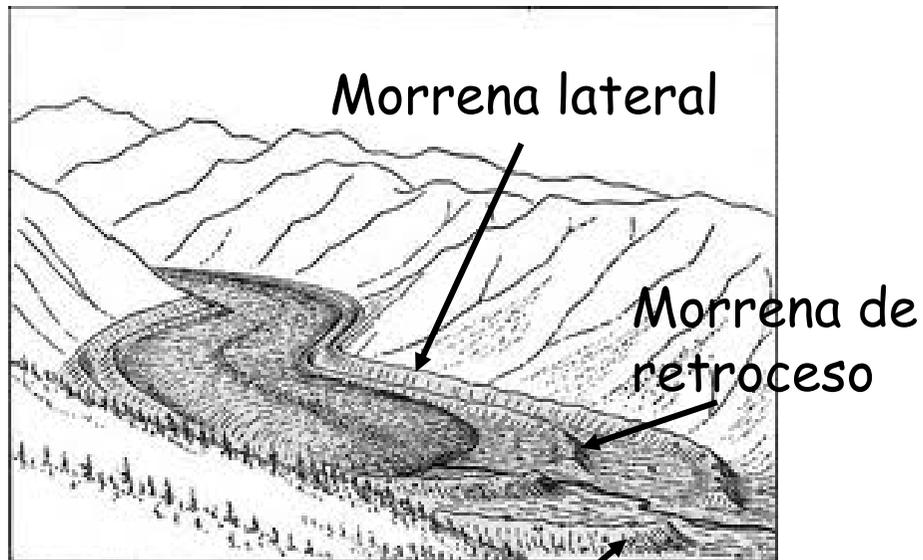
Glaciares alpinos



Source: W.F. Ruddiman, Earth's Climate



Susitna, Alaska



Morrena terminal

Registros glaciares

Bloques erráticos
depositados en Fm.
Ghaub, Namibia



Ice-rafted debris, Ghaub Fm, Namibia

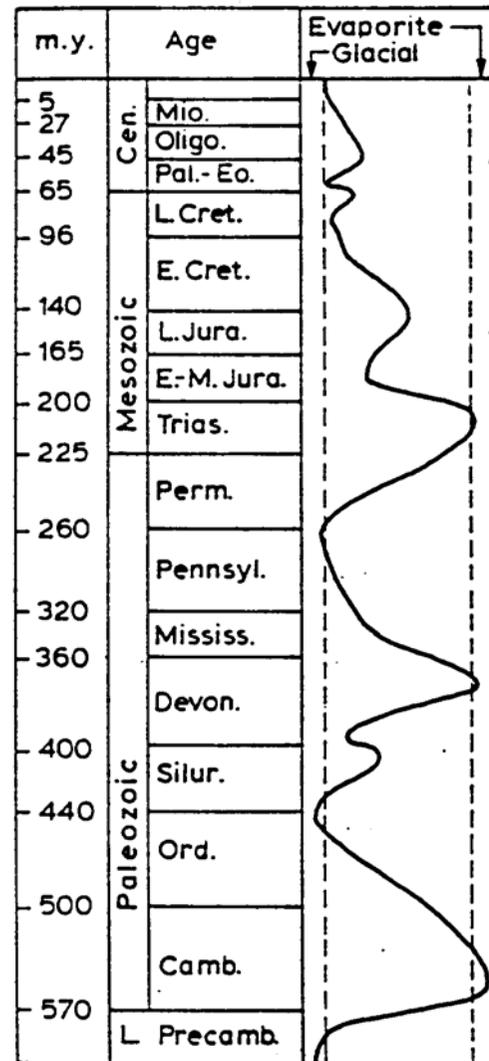


Glacial de
Upsala,
Argentina

Criosfera

Actualmente existen $24.064 \times 10^3 \text{ km}^3$ hielo, cubriendo 8% de la superficie terrestre

Frakes, 1979



“Nevera”

Invernadero

“Nevera”

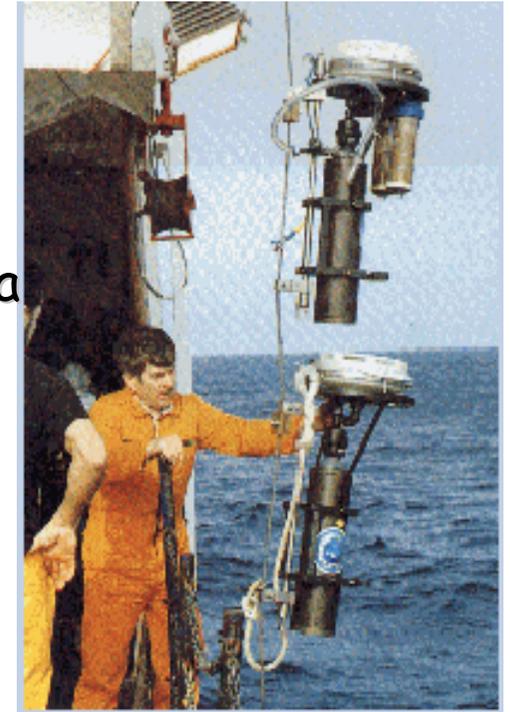
Invernadero

“Nevera”

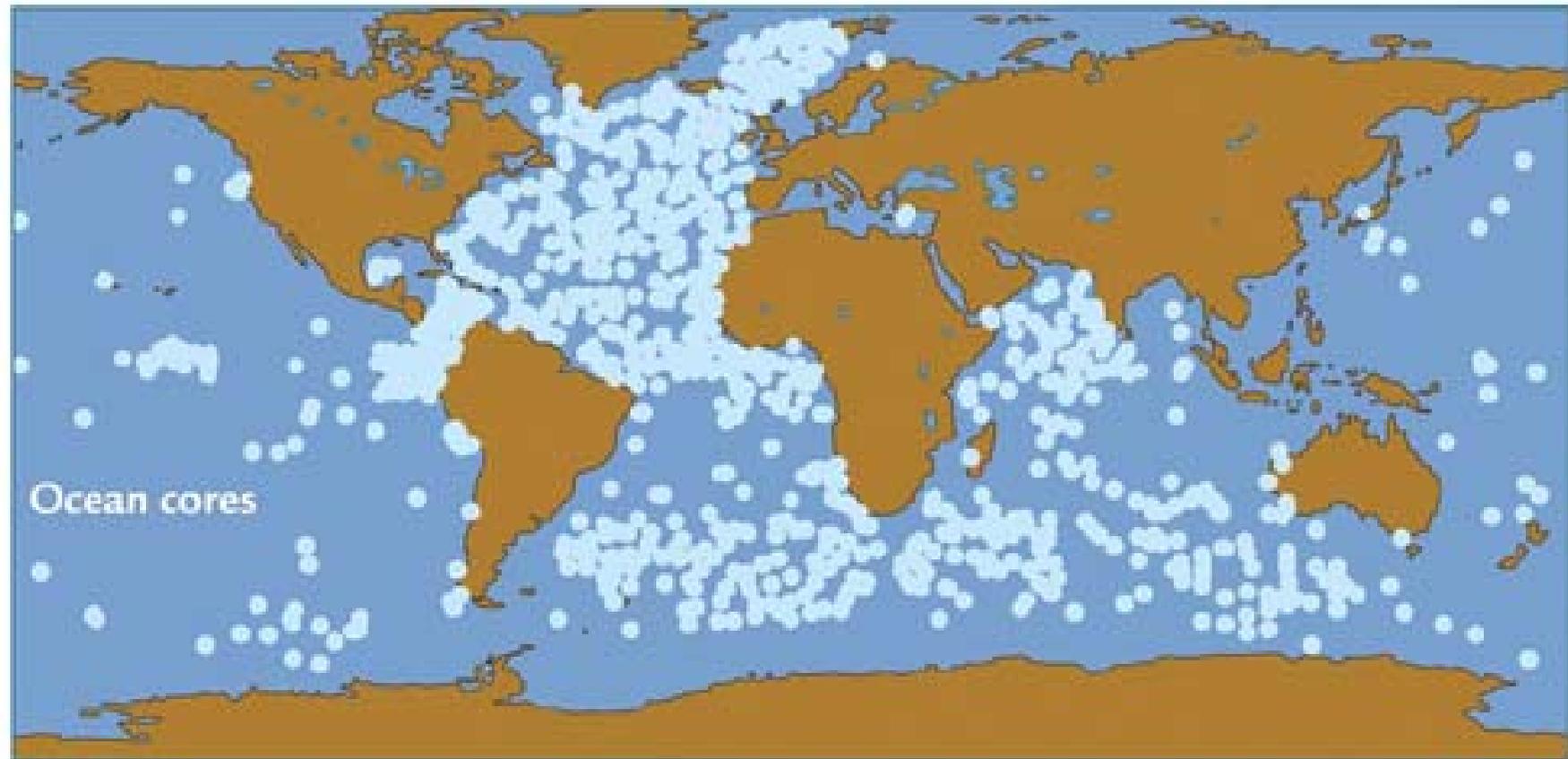
Invernadero

LOS REGISTROS OCEANICOS

- Los registros han revolucionado la paleoclimatología del Cuaternario, proporcionando una detallada cronología de cambios ambientales. Sus características incluyen:
 - SEDIMENTACION CONTINUA
 - ◆ Contienen pocos "hiatos" o saltos sedimentarios en relación con otros registros terrestres
 - ◆ La resolución de los eventos depende de la tasa de sedimentación y su mezcla
 - TASA DE SEDIMENTACIÓN
 - ◆ Las tasas de sedimentación varían de un lugar a otro y a través del tiempo. Donde la tasa de sedimentación es pequeña se obtienen registros antiguos en testigos cortos (10m).
 - ◆ Océano Pacífico Medio 0.2 cm/1000 años
 - ◆ Interglacial Atlántico 2 cm/1000 años, glacial 5 cm/1000 años
 - ◆ Constituyen registros laminados



Localización de sondeos oceánicos

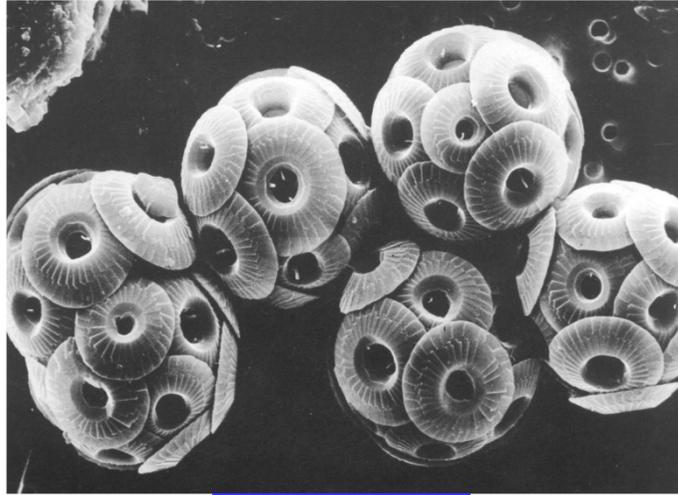


A

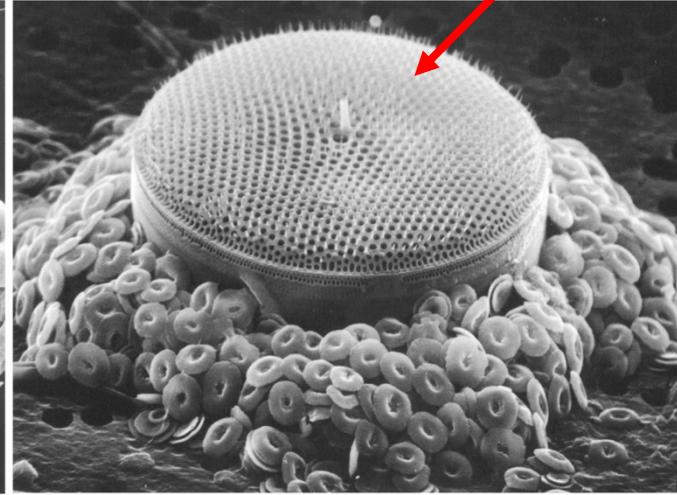
Ruddiman, 2008

Organismos calcáreos (CaCO_3)

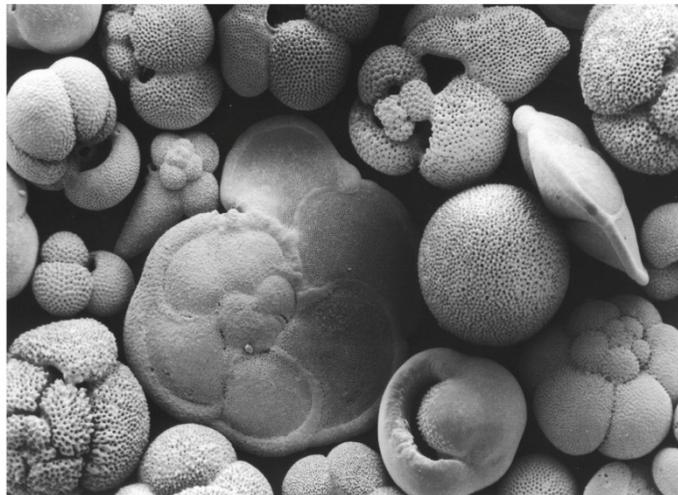
Coccolitofóridos (con diatomea)



Foraminifera



Radiolarios



REGISTROS MARINOS: ISOTOPOS DE OXÍGENO

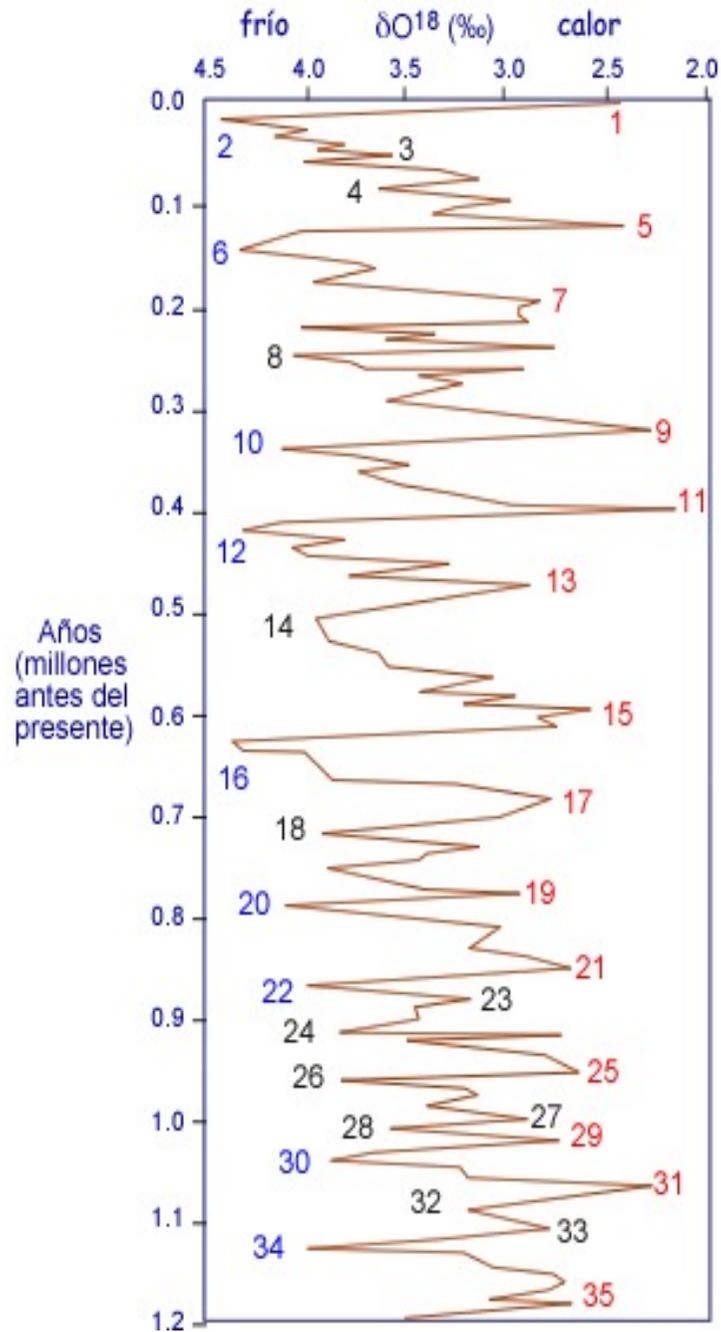
Emilina (1955): cronología para las fluctuaciones de la historia del Pleistoceno a partir de la relación de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en los testigos de foraminíferos (más ^{18}O durante los periodos glaciares), medidos a partir de un estándar arbitrario.

Positivo indica mayor que el estándar. Valores más positivos (= menos negativos) indican momentos más fríos, aunque valores positivos de delta ^{18}O únicamente se presentan durante los periodos más fríos.

Las causas propuestas para la explicación en las fluctuaciones $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de son:

- a) Fraccionamiento biológico en los tests de foraminíferos. La relación $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en foraminíferos vivos incrementa el 0.023 % C^{-1} (mas frío = mas ^{18}O).
- b) Enriquecimiento relativo del ^{18}O en los océanos dado que el ^{16}O se deposita en los glaciares continentales. Más hielo = Más ^{18}O queda en los océanos (Shackleton, 1967)

(MIS) - ESTADIOS ISOTÓPICOS MARINOS



Estadios impares,

bajo $\delta^{18}O$ = CALIENTE, comienza en el Holoceno(1)

5,7... previos interglaciares + como actual

3 = Würm-medio "interstadial"

Estadios pares,

alto $\delta^{18}O$ = FRÍO, comenzando con Würm I (2)

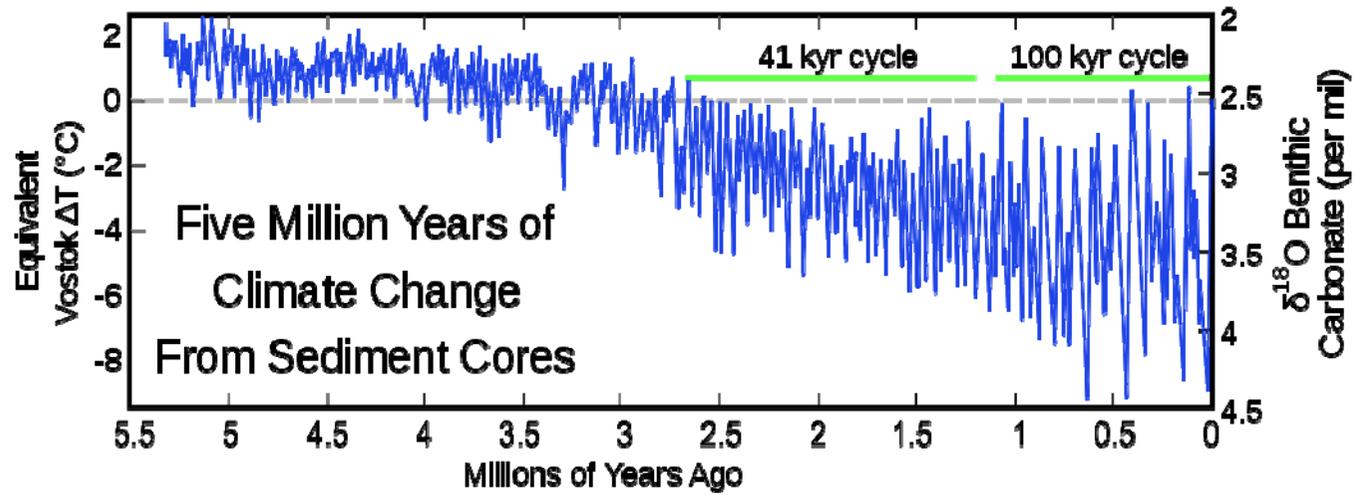
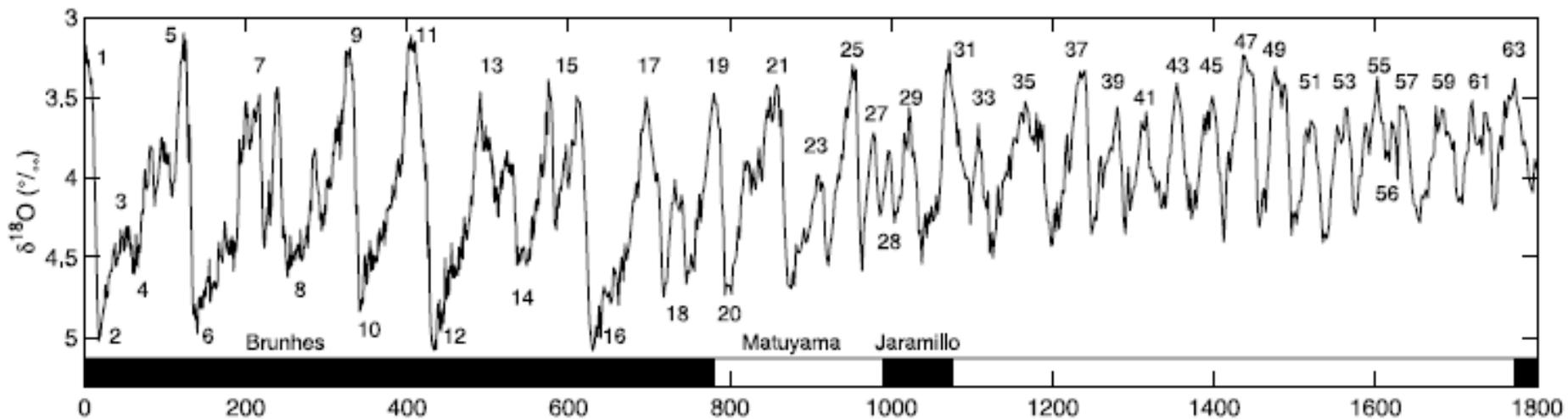
Glaciaciones mayores excepto no. 4

Menos uniforme que los interglaciares - duración, últimas 2-3 extremas,

Fluctuaciones menores, 4-6 por estadio.

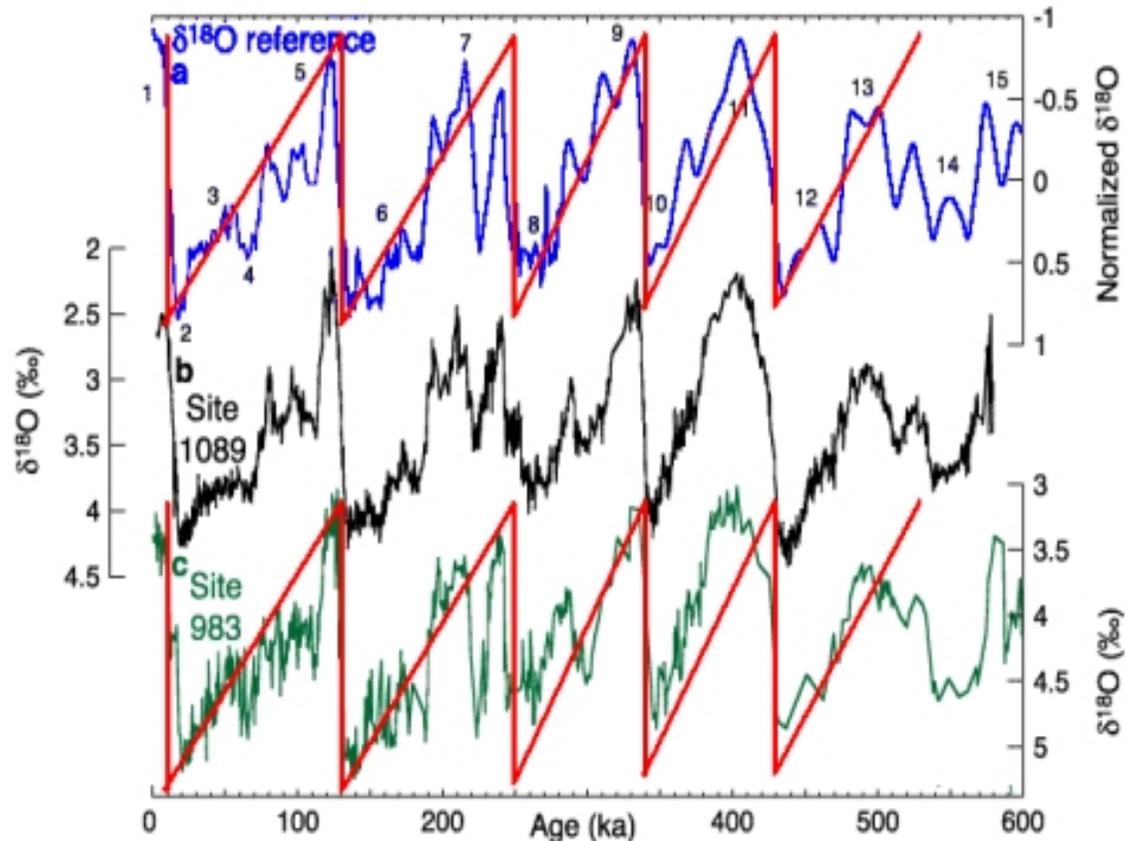
Clima durante los últimos 5 millones de años

En líneas generales se considera interglacial a los periodos con una relación $\delta^{18}\text{O}$ inferior a 3.6 partes por mil.



Lisiecki, L. E., and M. E. Raymo (2005), A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records, *Paleoceanography*, 20

Registros climáticos marinos y ciclos de Milankovitch

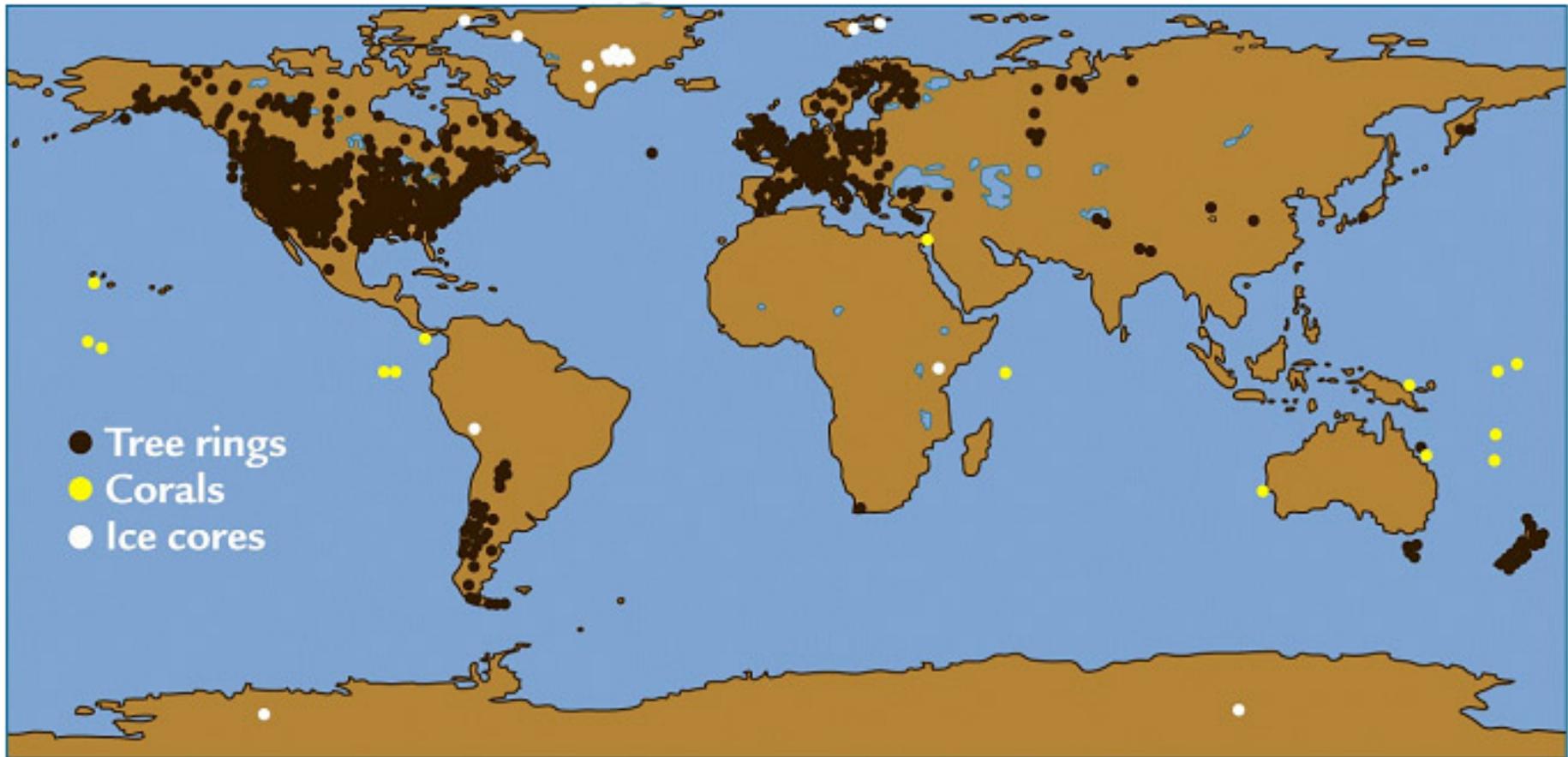


- Correlación con las ciclos de Milankovitch Curves: (Martinson et al., 1987)
- Cambios en la órbita terrestre que produce cambios en la distribución de la energía sobre la superficie de la tierra y puede causar los ciclos glacial-interglacial.
 - La frecuencia de los ciclos climáticos encontrados en los testigos marinos encajan en los ciclos orbitales de frecuencia 22,000; 41,000 y 100,000 años

Otros registros marinos

- Corales
- Fragmentos líticos transportados por icebers

Localización de los principales registros de testigos de hielo, corales y dendroclimáticos



NOAA's Paleoclimatology Program/Department of Commerce

Corales

- Los esqueletos de corales son **pequeños pólipos** de apenas unos milímetros de diámetro, con capacidad de fijar sobre sus tejidos el calcio disuelto en el mar y así formar las estructuras rígidas.
- El **coral y su estructura calcárea es blanca**, los diferentes colores que presentan se deben a unas microalgas que viven en simbiosis con los pólipos y reciben el nombre de zooxantelas. Por esta razón el coral necesita aguas transparentes para desarrollarse, para que las zooxantelas realicen así la fotosíntesis.
- Las microalgas son cruciales para la deposición de carbonato. Sin las algas los corales no pueden producir estructuras de corales.
- Los registros geoquímicos de los corales son complejos.

Crecimiento de corales

- Los pólipos se asientan sobre aragonito segregado por la epidermis
 - ◆ CaCO_3 se deposita por debajo del tejido viviente
 - ◆ La red de polipos interconectados recubre completamente el esqueleto
- Los corales encapsulan periódicamente una porción de su esqueleto y lo sellan de su contacto con el agua marina u otros tejidos vivos
 - ◆ En el curso de los años, cada pólipo se eleva cientos de veces dejando un nuevo esqueleto por debajo.

Bandeado anual en corales

- La densidad del esqueleto depende de la tasa de crecimiento del coral. Esta se relaciona con la temperatura y la cubierta de nubes
 - ◆ En invierno el crecimiento es lento y su esqueleto es denso (oscuro)
 - ◆ En primavera y verano el crecimiento es rápido y el esqueleto es menos denso (claro)
- El bandeo estacional de los corales puede ser visible a simple vista o con rayos X
- La edad de los corales se puede determinar a partir de conteo de bandas
 - ◆ Un bandeo irregular puede significar la existencia de eventos climáticos extremos

Pavona clavus from Urvina Bay, Galapagos. Foto NOAA



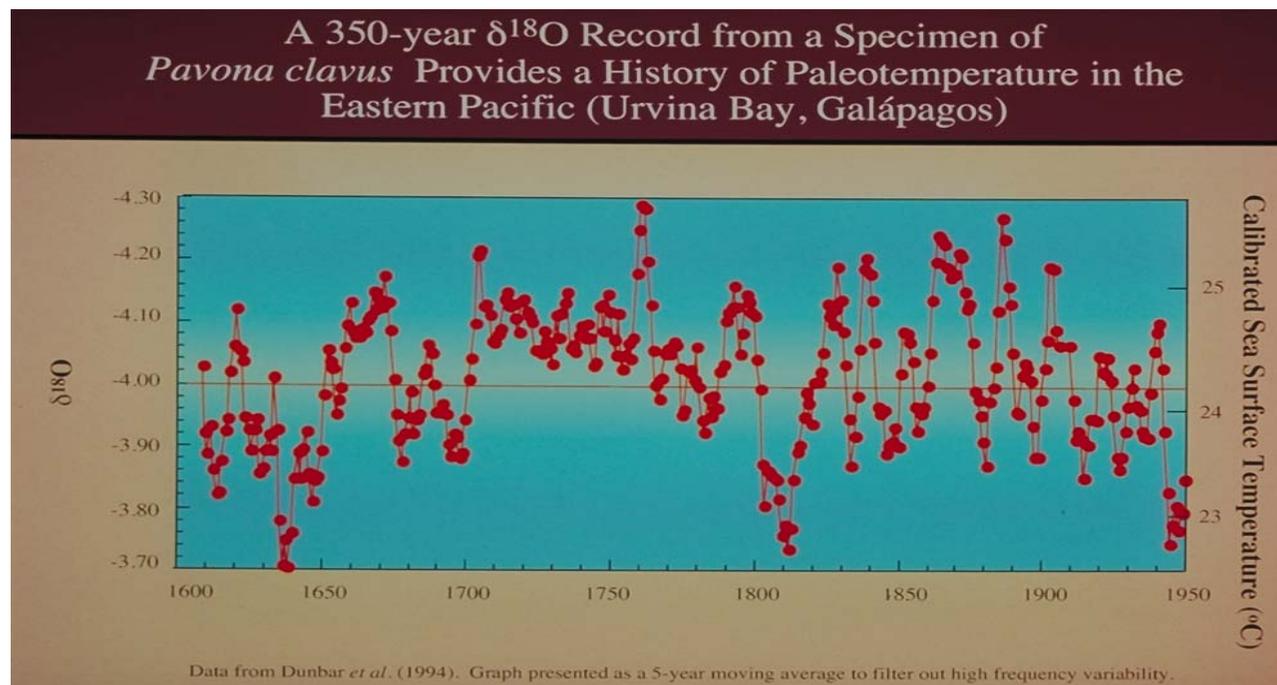
Recogida de muestras

- Se utilizan sondeadores hidráulicos, perforando en la dirección de máximo crecimiento



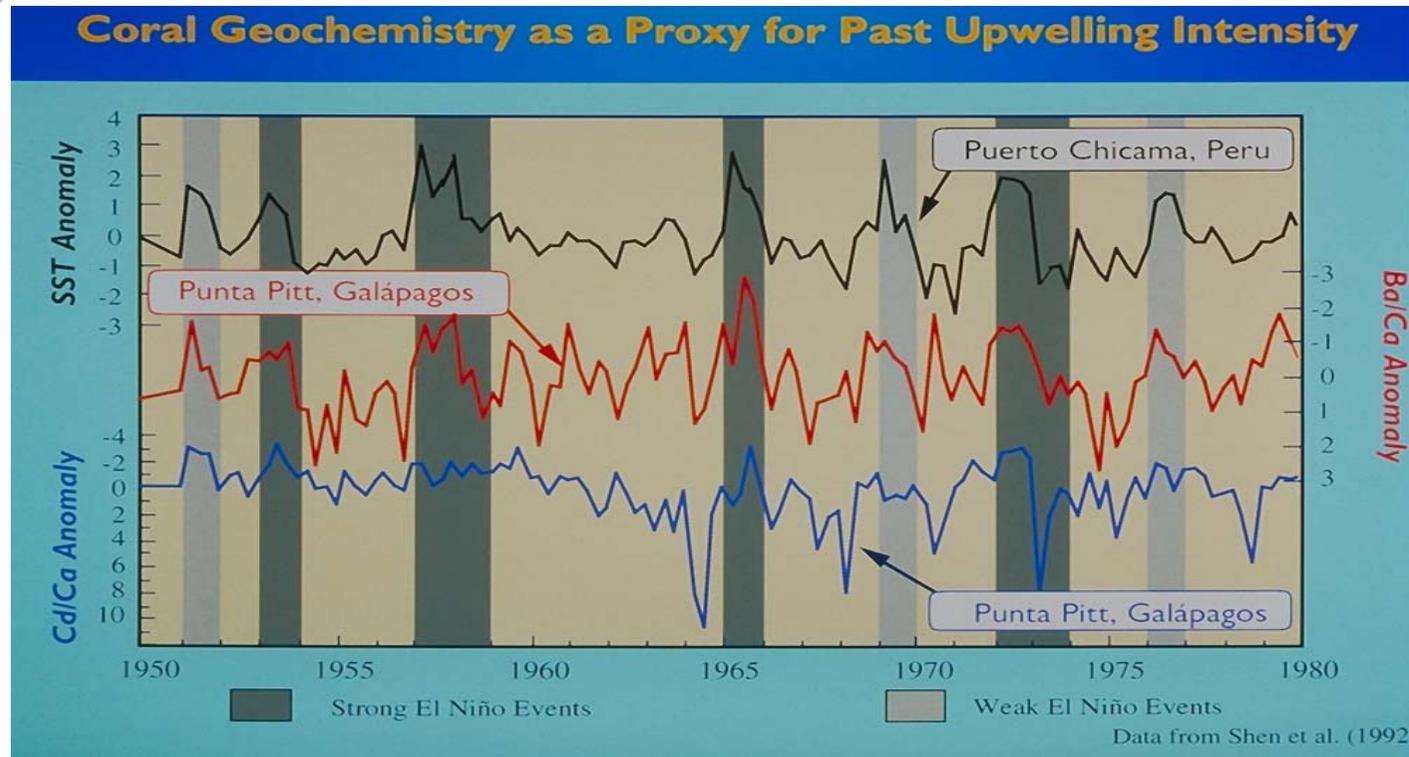
Registros de SST en corales

- Los índices de $\delta^{18}\text{O}$ son función de la temperatura y salinidad del agua marina (flujo de agua dulce y precipitación)
- Existe una buena relación entre $\delta^{18}\text{O}$ y las medidas instrumentales
- Los registros en corales pueden abarcar los últimos cientos e incluso miles de años



Proxies geoquímicos en corales

- Cd y Ba tienen distribuciones semejantes a los nutrientes y por tanto son indicadores sensibles a la mezcla vertical. Los índices de Cd/Ca y Ba/Ca se utilizan como proxy de surgencia oceánica activa



Fragmentos líticos transportados por icebers

Aparecen intercalados entre sedimentos marinos finos, y constituyen material exótico tanto por su textura (tamaño de 180 μm a 3 mm) como su litología.

Existe un cinturón con evidencia de debris transportados por icebergs (IRD) alrededor de los 50° N, alejados unos 3000 km de su area de procedencia en Norte América en su ruta hacia Europa.

| Event | Age, Kyr | | |
|-------|----------------|---------------------|----------------------------|
| | Hemming (2004) | Bond & Lotti (1995) | Vidal <i>et al.</i> (1999) |
| H0 | ~12 | | |
| H1 | 16.8 | | 14 |
| H2 | 24 | 23 | 22 |
| H3 | ~31 | 29 | |
| H4 | 38 | 37 | 35 |
| H5 | 45 | | 45 |
| H6 | ~60 | | |

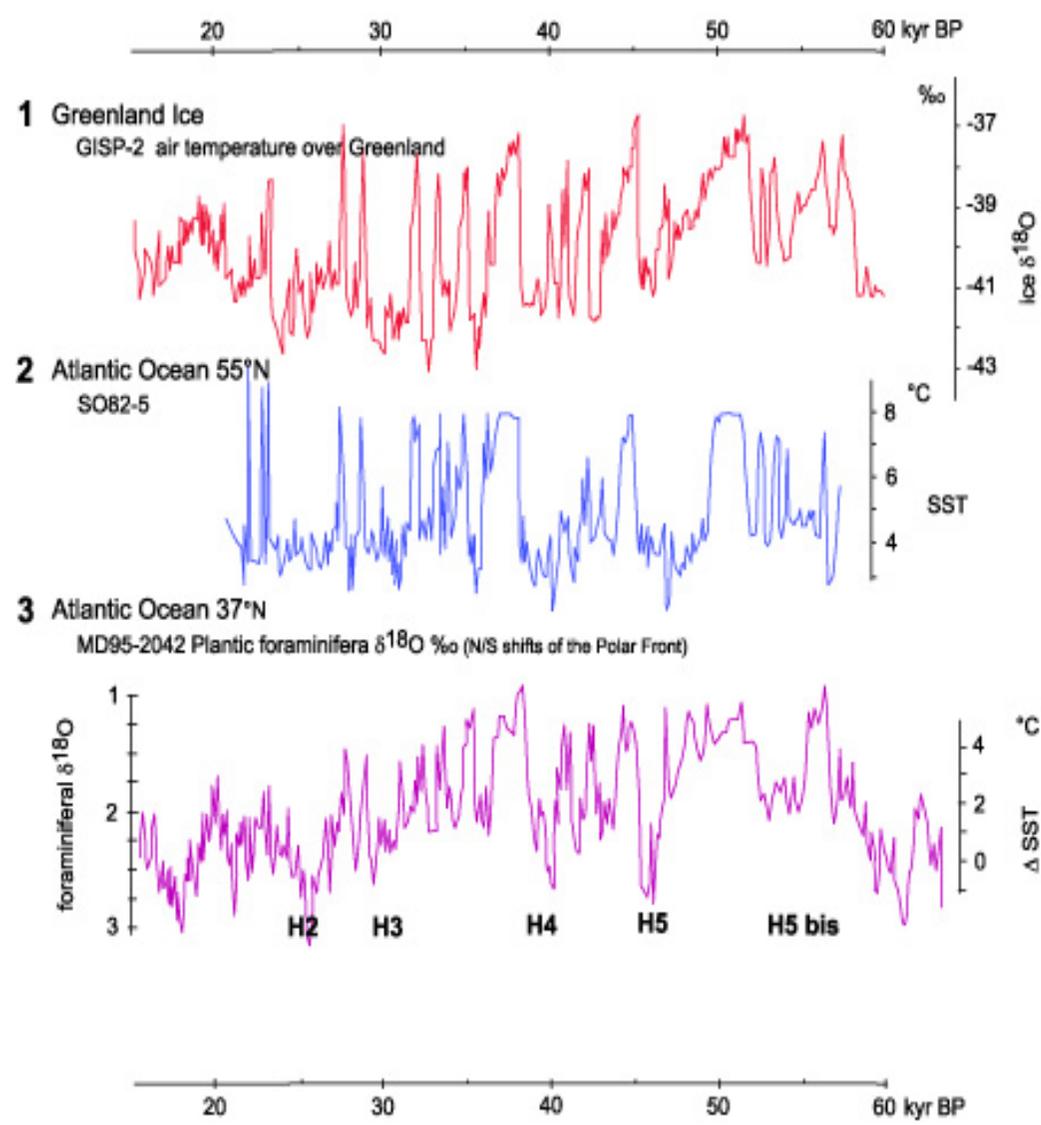
H1,2 are dated by radiocarbon; H3-6 by correlation to GISP2.

Heinrich, H., 1988; Bond et al., 1992

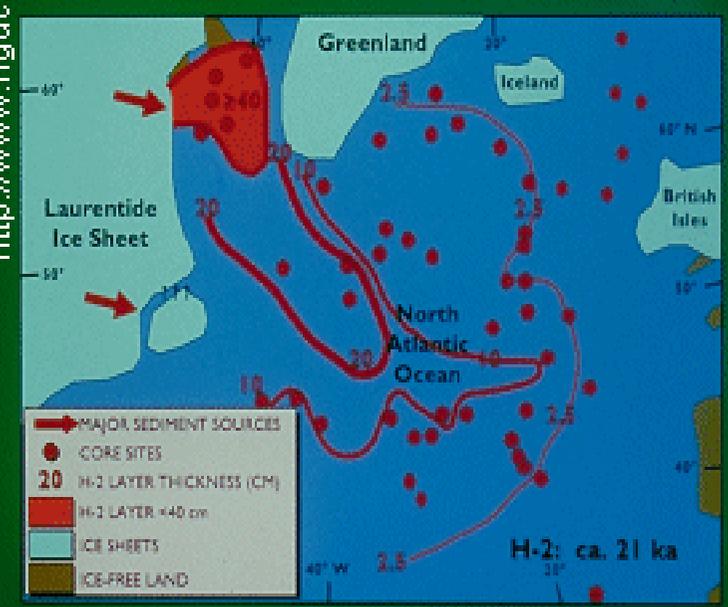
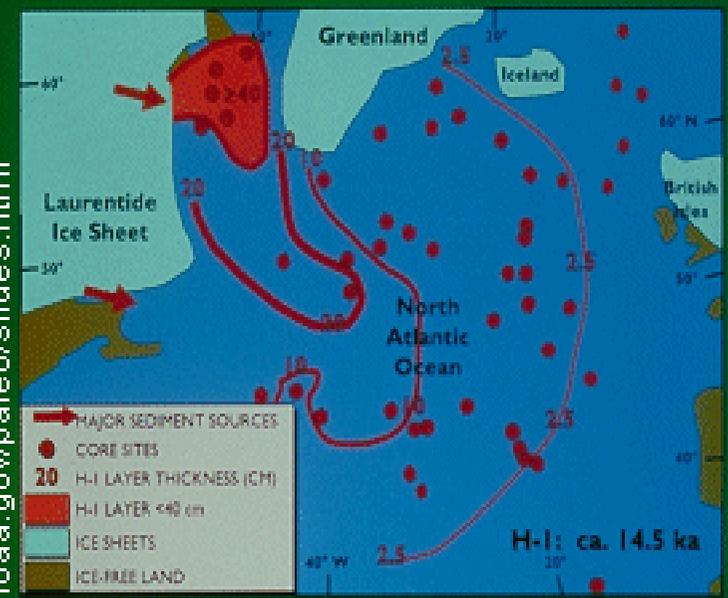


Eventos Heinrich (Heinrich, 1988) son pulsos de icebergs relacionados con periodos fríos en el Atlántico Norte y en los testigos de hielo.

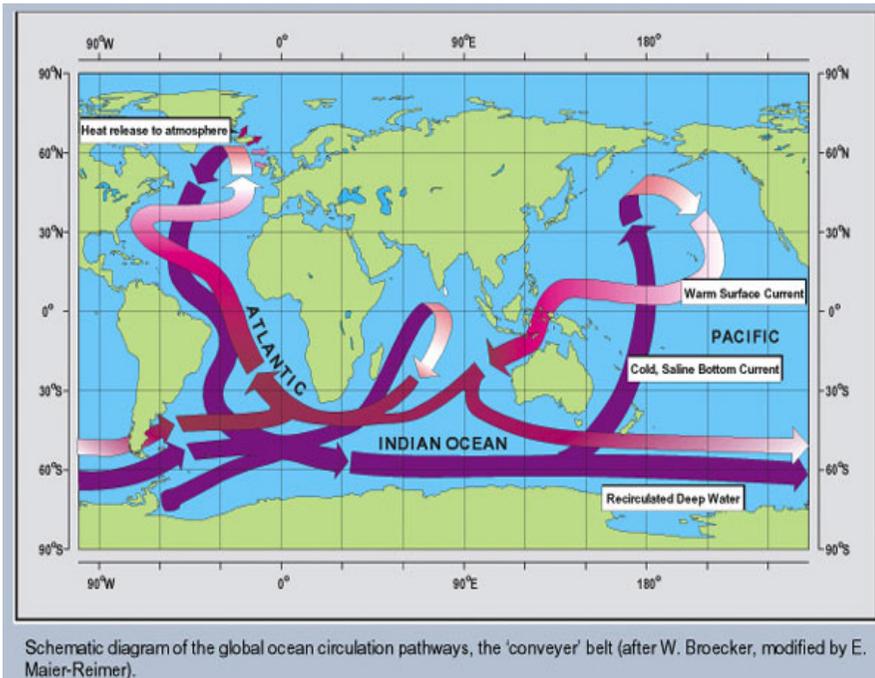
Thickness of Heinrich Layers H-1 and H-2 from North Atlantic Cores Demonstrate Source Areas and Diffusion of Ice-Rafted Debris from the Laurentide Ice Sheet



National Geophysical Data Center NOAA
<http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/slides.html>

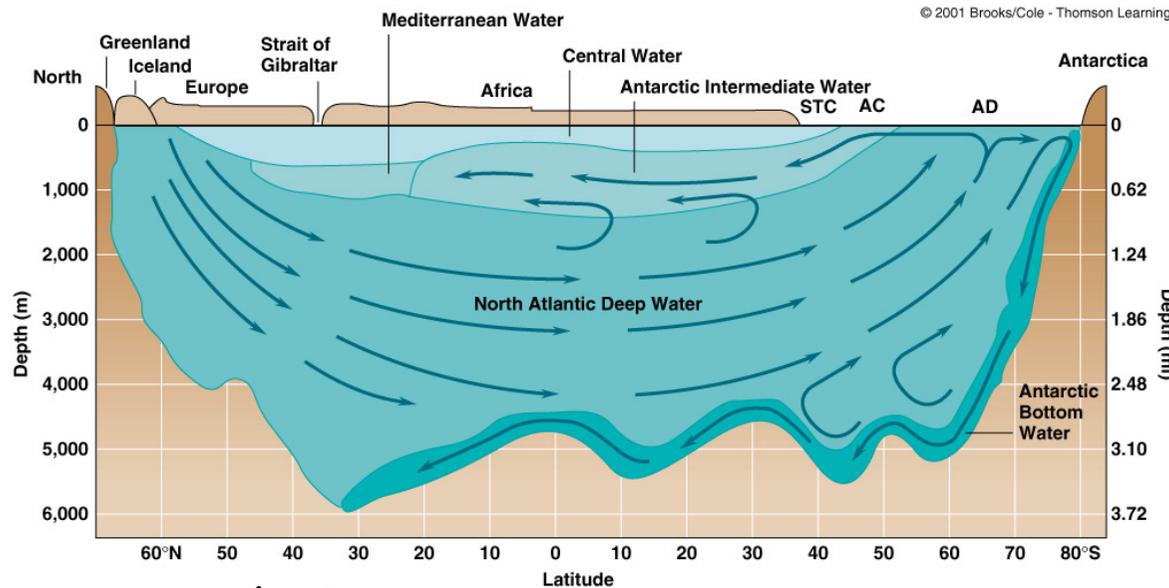


CIRCULACIÓN TERMOHALINA

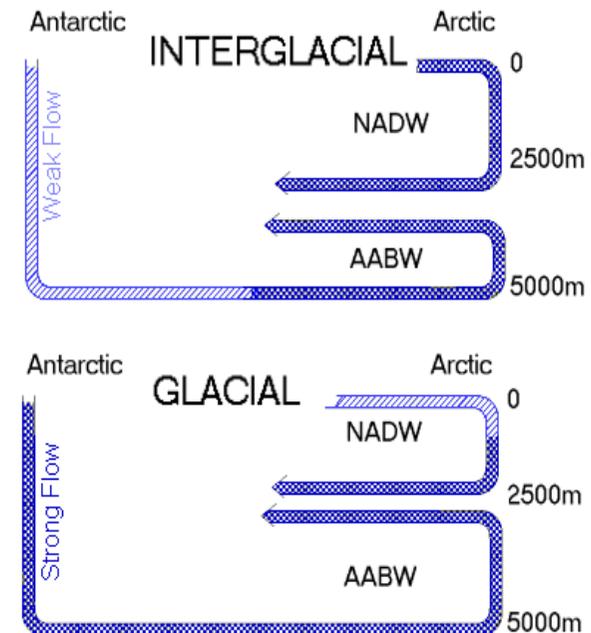


Durante Periodo Glacial:

- La llegada de agua dulce inhibe la circulación termohalina
- No existe producción de la corriente profunda del Atlántico Norte ni corriente del Golfo para calentar el Atlántico Norte
- La circulación marina lenta incrementa el CO_2 oceánico (decr. CO_2 atm.)



Según Garrison



GLACIACIÓN

Cambios de insolación de Milankovitch

Reducción del dióxido de carbono atmosférico

Enfriamiento en latitudes altas

Bucle de retroalimentación

Aumento de la productividad marina

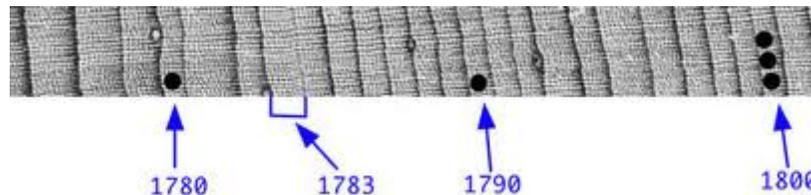
Aumento de la capa de hielo en latitudes altas

Cambios de circulación oceánica



Dendroclimatología

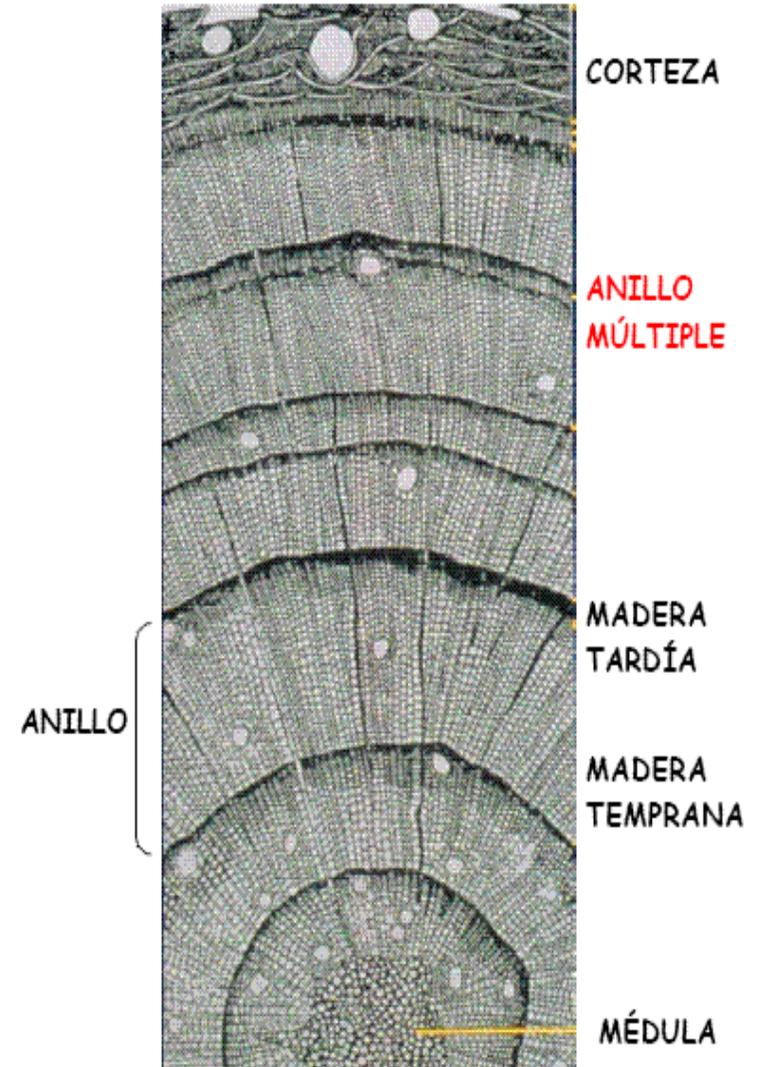
- Estudia las relaciones entre el crecimiento anual de los árboles y el clima, permitiendo extraer registros de alta resolución paleoclimática durante el Holoceno.
- Existe una conífera endémica de Tasmania (pino Huon - *Lagarostrobos franklinii*) que constituye el árbol más longevo superando los 2000 años. Un grupo de especímenes recientemente encontrados supera los 10.000 años.



Crecimiento anular

- El patrón estacional de los anillos muestra una alternancia de bandas claras y oscuras
 - ◆ El crecimiento estacional consiste en bandas de madera reciente (color claro procedente de momento inicial de la estación de crecimiento) y otras más densas de madera tardía (la banda oscura se produce hacia el final de la estación de crecimiento).
 - ◆ La anchura media de los anillos es función de la especie del árbol, su edad, disponibilidad de nutrientes y el conjunto de factores climáticos que rodean al ejemplar.
- Los dendroclimatólogos deben de separar la señal climática disponible en los datos de crecimiento del anillo del resto de ruido de fondo.

Anillos y crecimiento



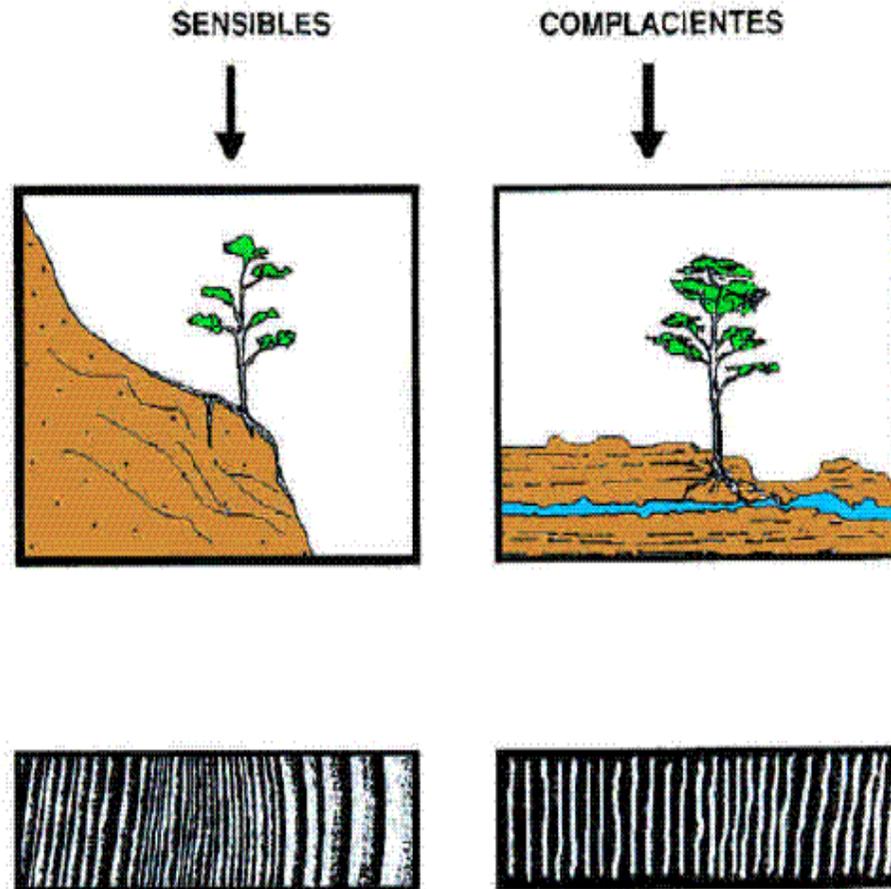
Información climática

- El crecimiento de anillos puede estar limitado de forma directa o indirecta por una variable climática. Si esta variable que controla el crecimiento se cuantifica, podemos reconstruir información de ambientes del pasado
- Los árboles creciendo cerca de extremos de su nicho ecológico están sujetos a estrés climático, típicamente la humedad y la temperatura.
 - ◆ En zonas semiáridas frecuentemente están limitados por la disponibilidad hídrica.
 - ◆ Los árboles que crecen en líneas de estrés en latitud o altitud son sensibles a la temperatura.

Pasos de un estudio "dendro"

- Muestreo: Especies y selección de ejemplares de muestreo
- Extracción de muestras
- Medición
- Análisis de secuencias de crecimiento
- Sincronización y datación
- Estandarización
- Funciones de transferencia

Selección de especies y localidades



J. Creus

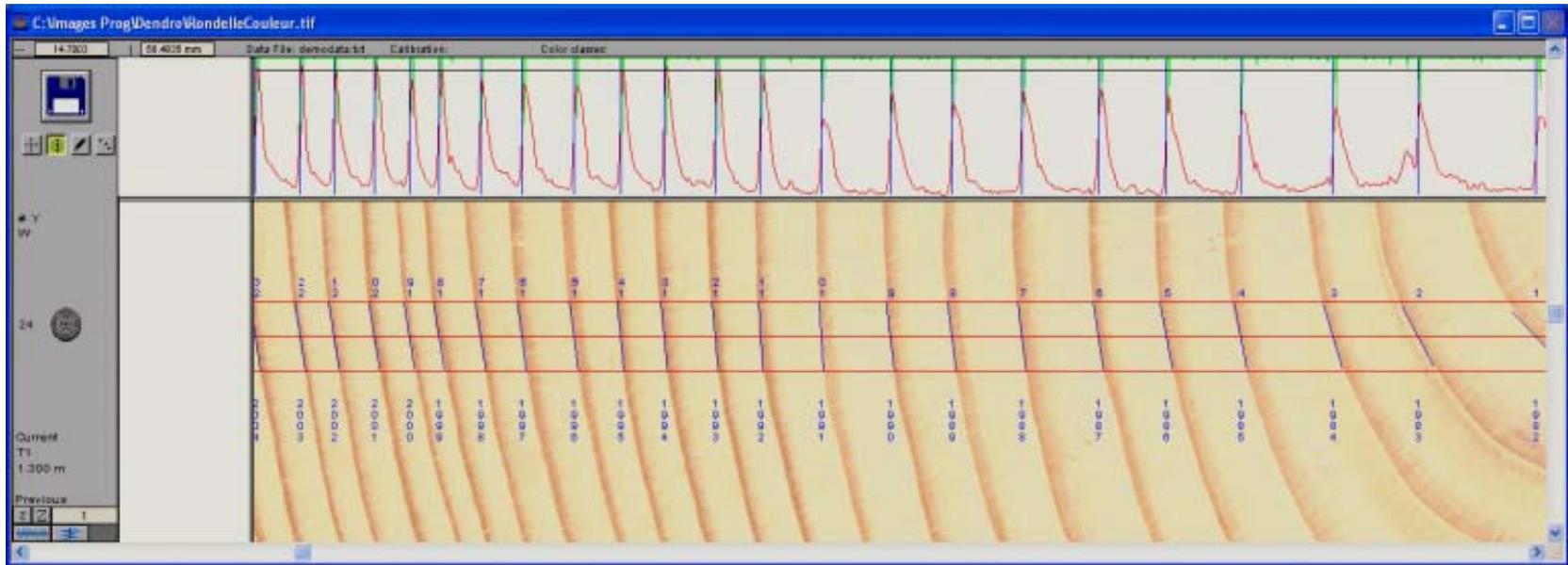
Condiciones de Nicho Extremas



Muestreo en árboles

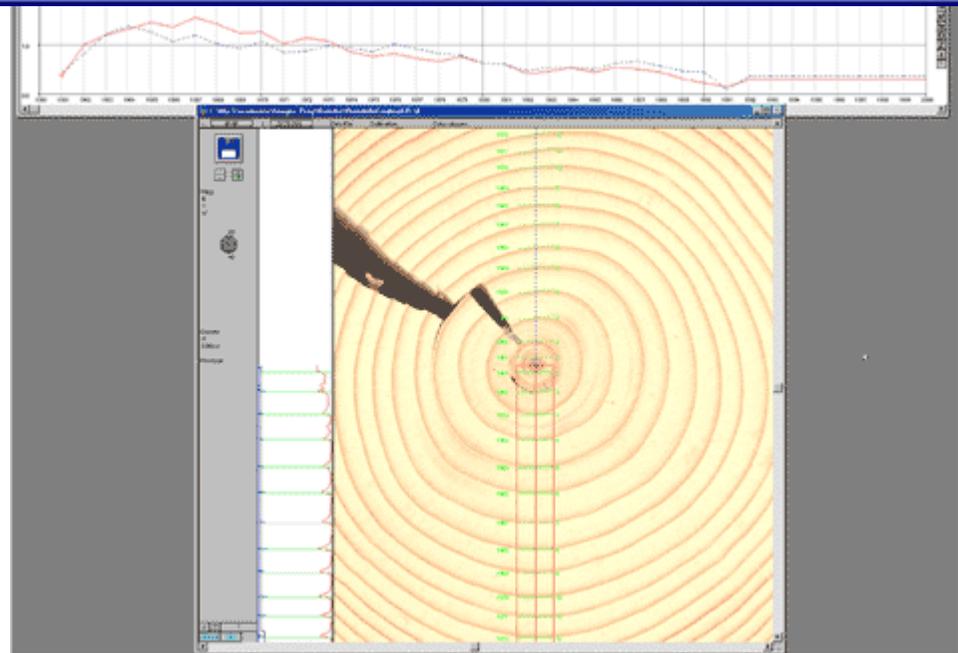


Medición



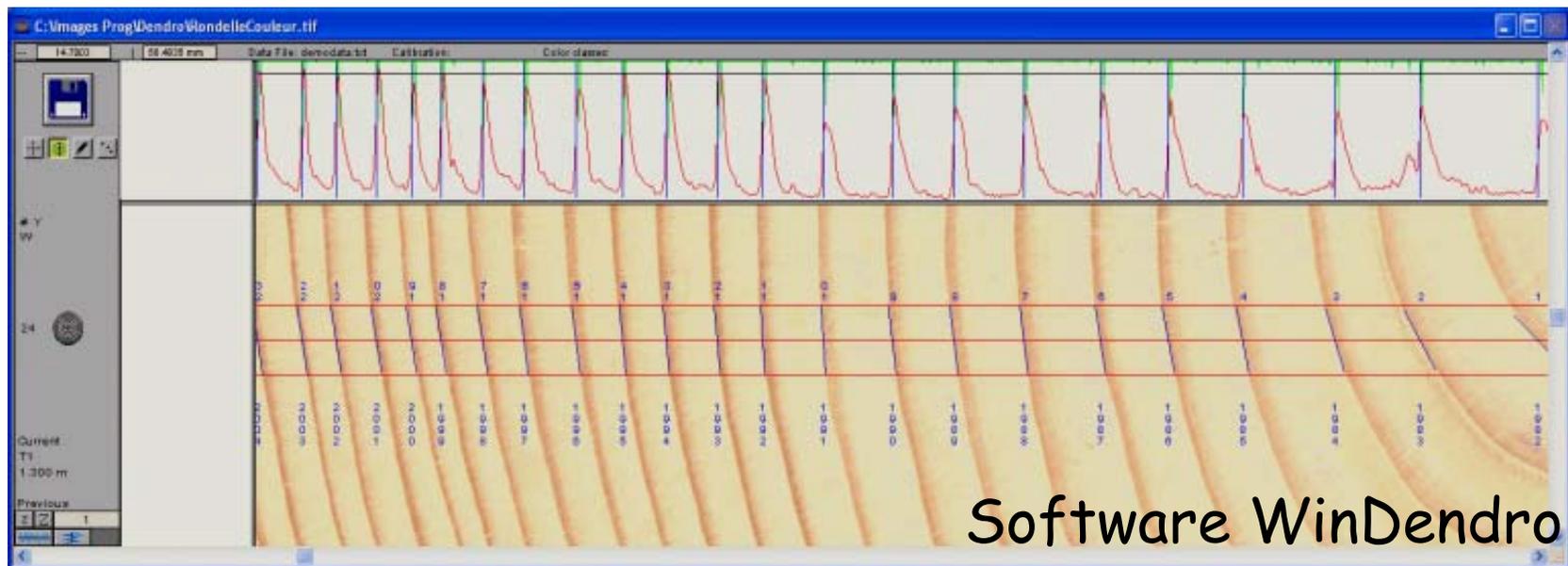
Existen diversos software para el análisis semiautomático de la medida de parámetros, anchura, densidad, etc..

Ejemplo correspondiente al software WinDendro



Sincronización y datación

- **Sincronización:** Basada en diferentes técnicas visuales, gráficas y estadísticas de comparación por solapamiento. Se localizan anillos múltiples, discontinuos o ausentes
- **Datación:** Anillo=año de crecimiento



Calibración con datos climáticos

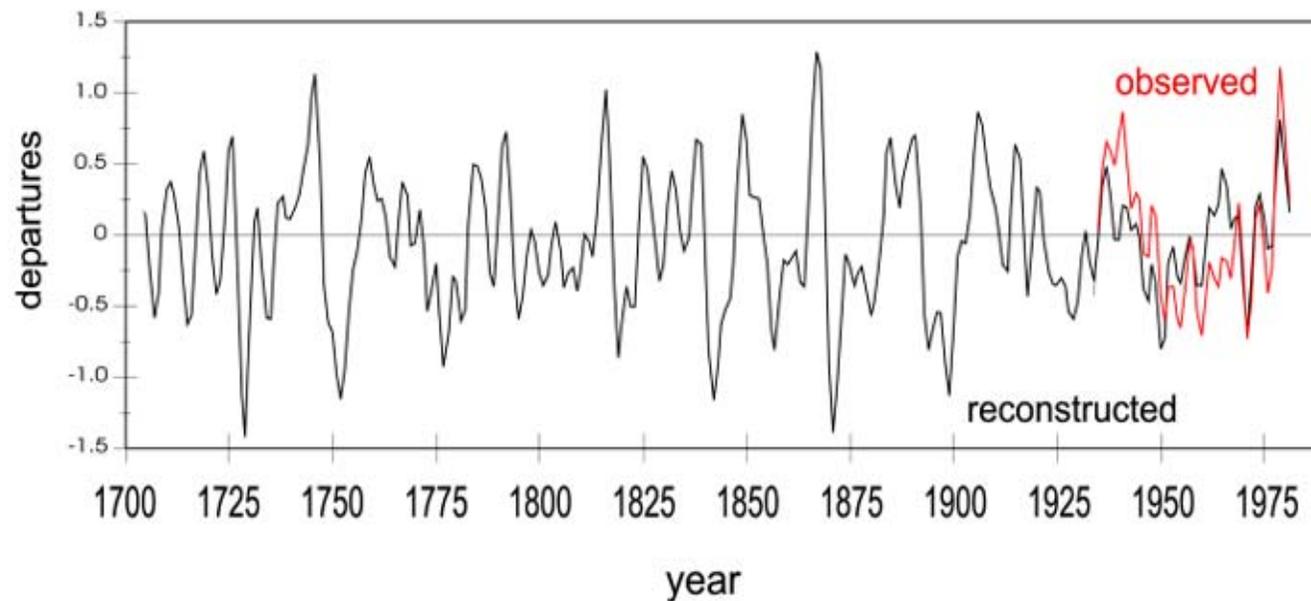
- Las muestras se datan, y se sincronizan usando múltiples ejemplares
- Las series son calibradas con una estación meteorológica próxima
- Una vez calibradas, las series se estandarizan para evitar tendencias debidas al cambios en el crecimiento con la edad de los árboles

Anchuras en secuencia de Pino



Number of Precipitation Days in Winter Reconstructed from Southwestern Tree Ring Chronologies

N. Arizona/New Mexico



from Woodhouse 1996

RECONSTRUCCIÓN DENDROCLIMÁTICA

Ventajas

- Cronologías con resolución anual
- **Función de transferencia:** se usan para reconstruir variables climáticas mensuales, estacionales, anuales e índices climáticos. Se seleccionan aquellas con mayor varianza explicada. Esta información se puede contrastar con la anchura del anillo de crecimiento temprano o contenido isotópico
- Existe un banco internacional de datos dendroclimáticos depositados en NOAA

RECONSTRUCCIÓN DENDROCLIMÁTICA

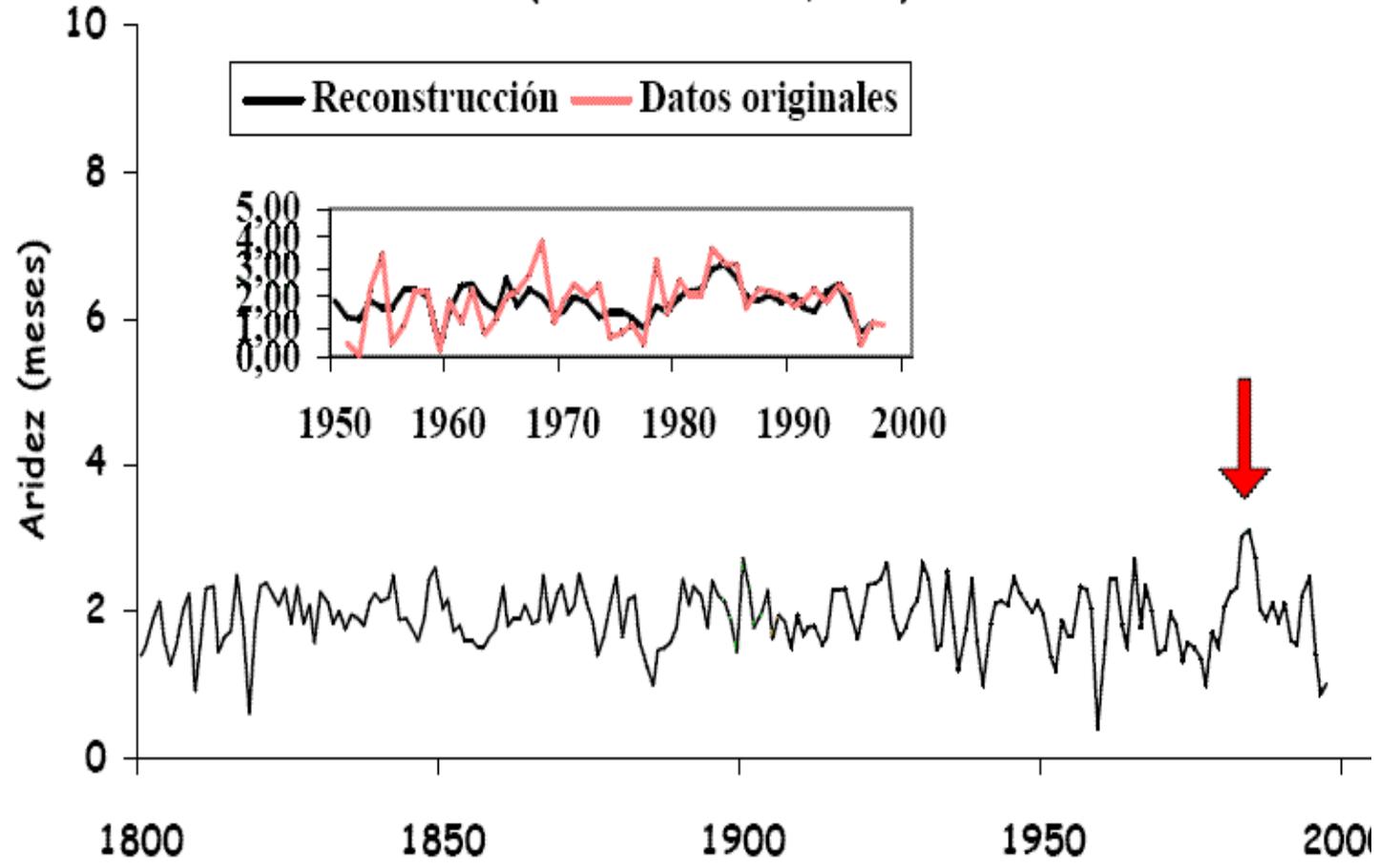
Limitaciones

- Las reconstrucciones se limitan a la edad de los árboles, siendo escasas las que superan en España el milenio.
- Se estiman con mayor fiabilidad las variables climáticas limitantes para el crecimiento.

Estudios en España

Aridez reconstruida en la región
suroriental de Guadalajara.

(Génova & Martínez, 2003)



Grupo de la Universidad Politécnica de Madrid

Sequías obtenidas con datos dendro

Relación de los periodos más secos registrados en diversas reconstrucciones dendroclimáticas

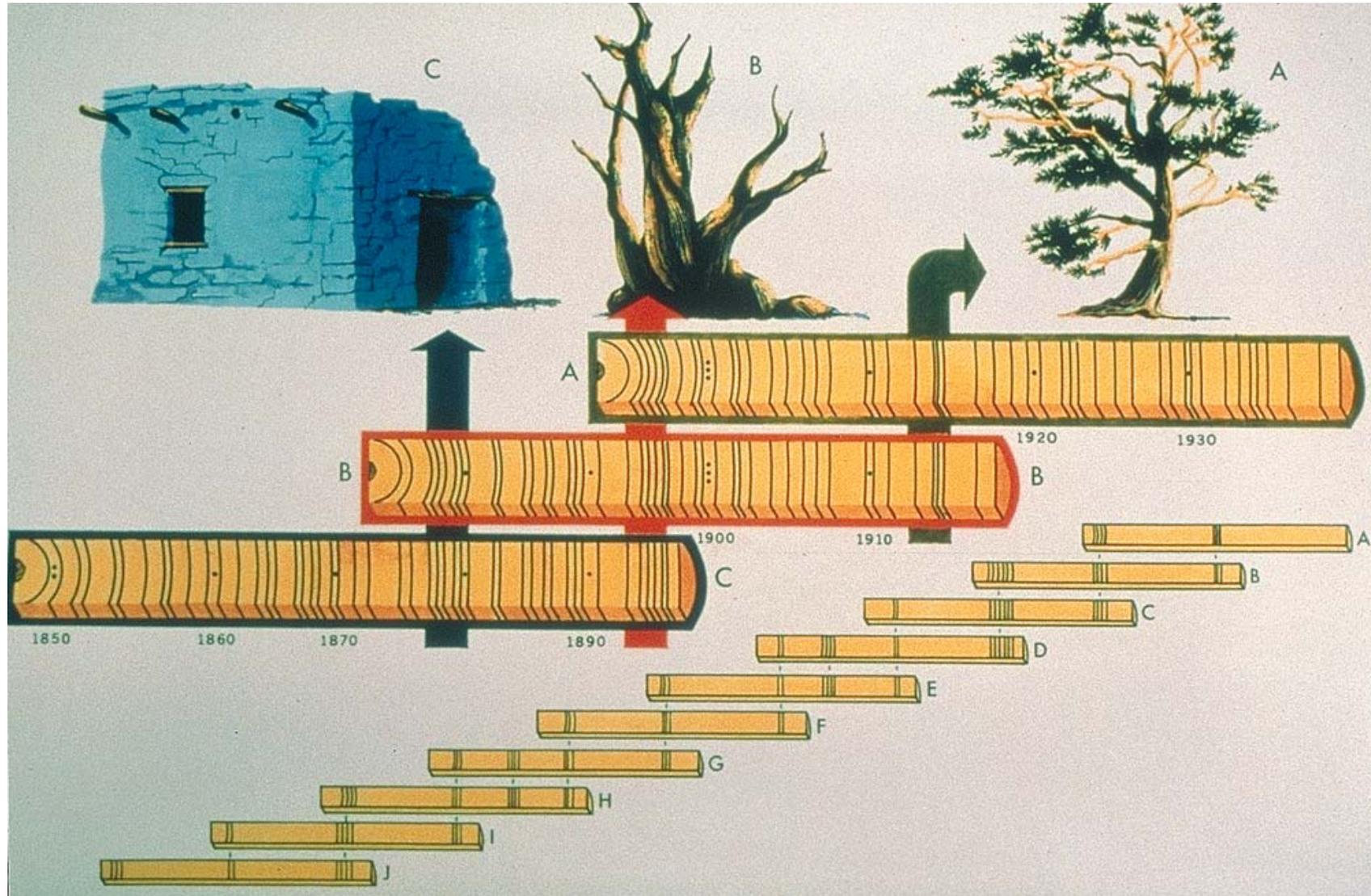
| | Autor | XVIII | XIX | XX |
|----------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------|------------------|
| Ps (SC) | Génova 1994 | 1717-37 1752-58 1766-72 | 1870-76 | 1889-1901 |
| P (SCu) | Génova 1994 | 1700-10 1750-60 | 1811-17 1866-73 | 1899-1906 |
| Ps (SCu) | Génova 1994 | 1704-10 1725-38 1751-58 | 1802-23 | |
| Ps (SE) | Richter 1988 | 1710-16 1748-58 | 1798-1812 | |
| P (C,S) | Candela 1999 | 1750-53 | | |
| Ps (Gu) | Génova & Martínez 2002 | | | 1979-1986 |

"Este periodo seco, de casi cinco años de duración (1749-1753), constituye un auténtico acontecimiento no siendo hasta muy recientemente en nuestros días, entre 1981-1984, cuando ha vuelto a presentarse otro de características similares,..."
(Font Tullot, 1988)

P: precipitación anual
Ps: precipitación estival
SC: Sistema Central
SCu: Serranía de Cuenca
SE: sureste español
C,S: centro y sur de España
Gu: Guadalajara

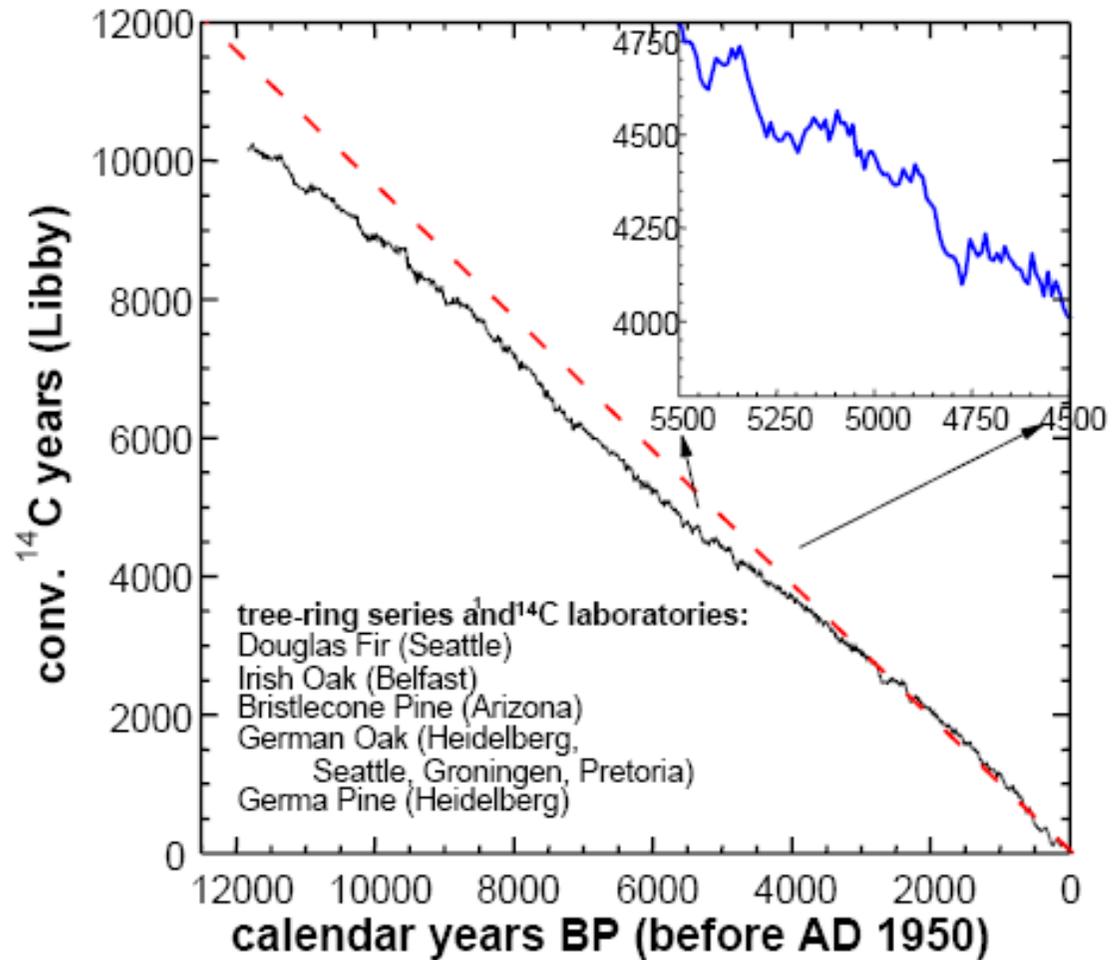
Imagen tomada de Mar Génova

Componiendo el registros de los anillos

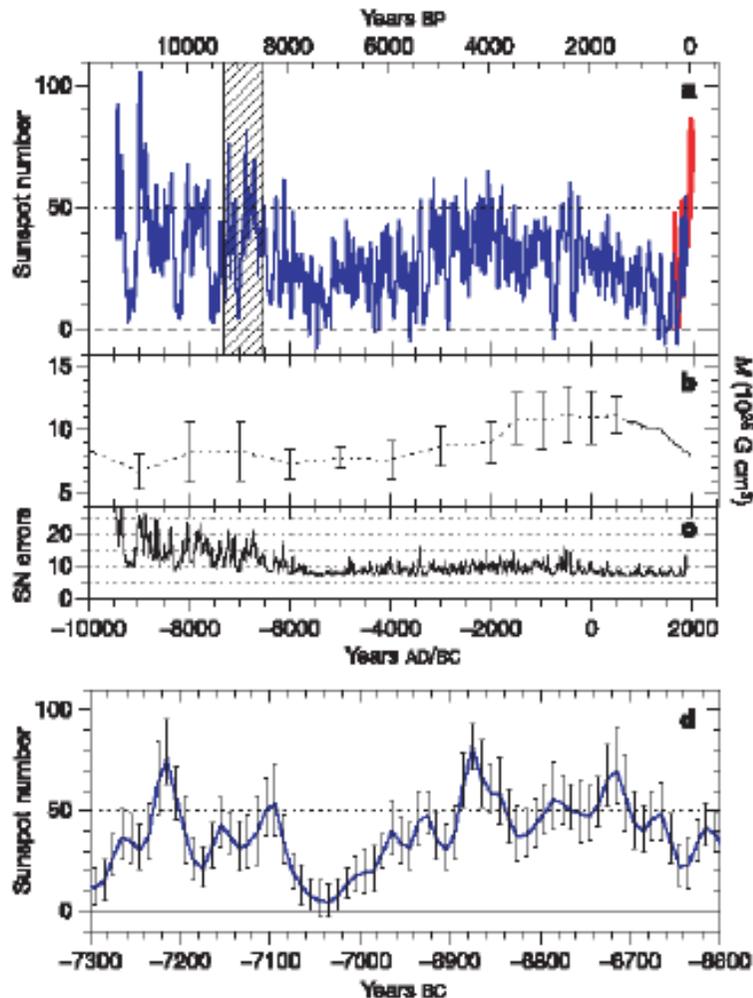


Calibración del ^{14}C con anillos de árboles

- Las edades de ^{14}C son generalmente más modernas que las edades correctas (calibradas)
- Edades en partes planas de la curva y edades invertidas (curva en zig-zag)



Actividad solar en el pasado a partir de ^{14}C en anillos de árboles



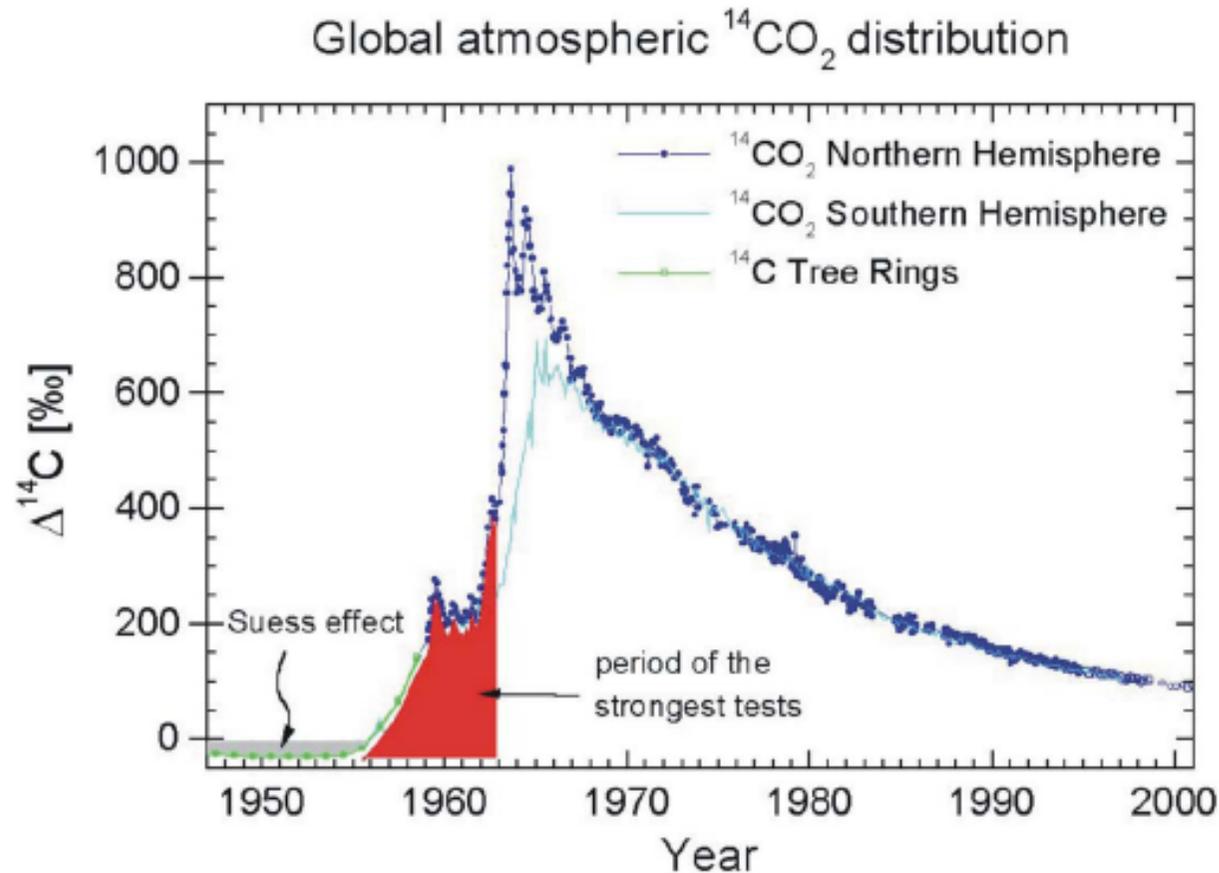
(a) 10-year averaged sunspot number SN reconstructed from $\Delta^{14}\text{C}$ data since 9500 BC (blue curve) and 10-year averaged group sunspot number (GSN) obtained from telescopic observations since 1610 (red curve).

(b) Evolution of the virtual geomagnetic dipole moment with error bars that take into account the scatter between different palaeomagnetic reconstructions.

(d) Uncertainty in the reconstructed SN.

Solanki et al., Nature, 431, 2004

Distribución Global de CO₂ post-bomba

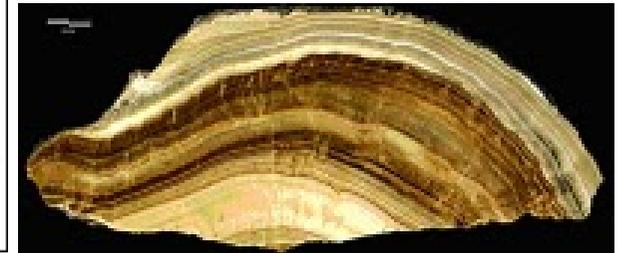


Modificación atmosférica de ¹⁴CO₂ como consecuencia de ensayos nucleares

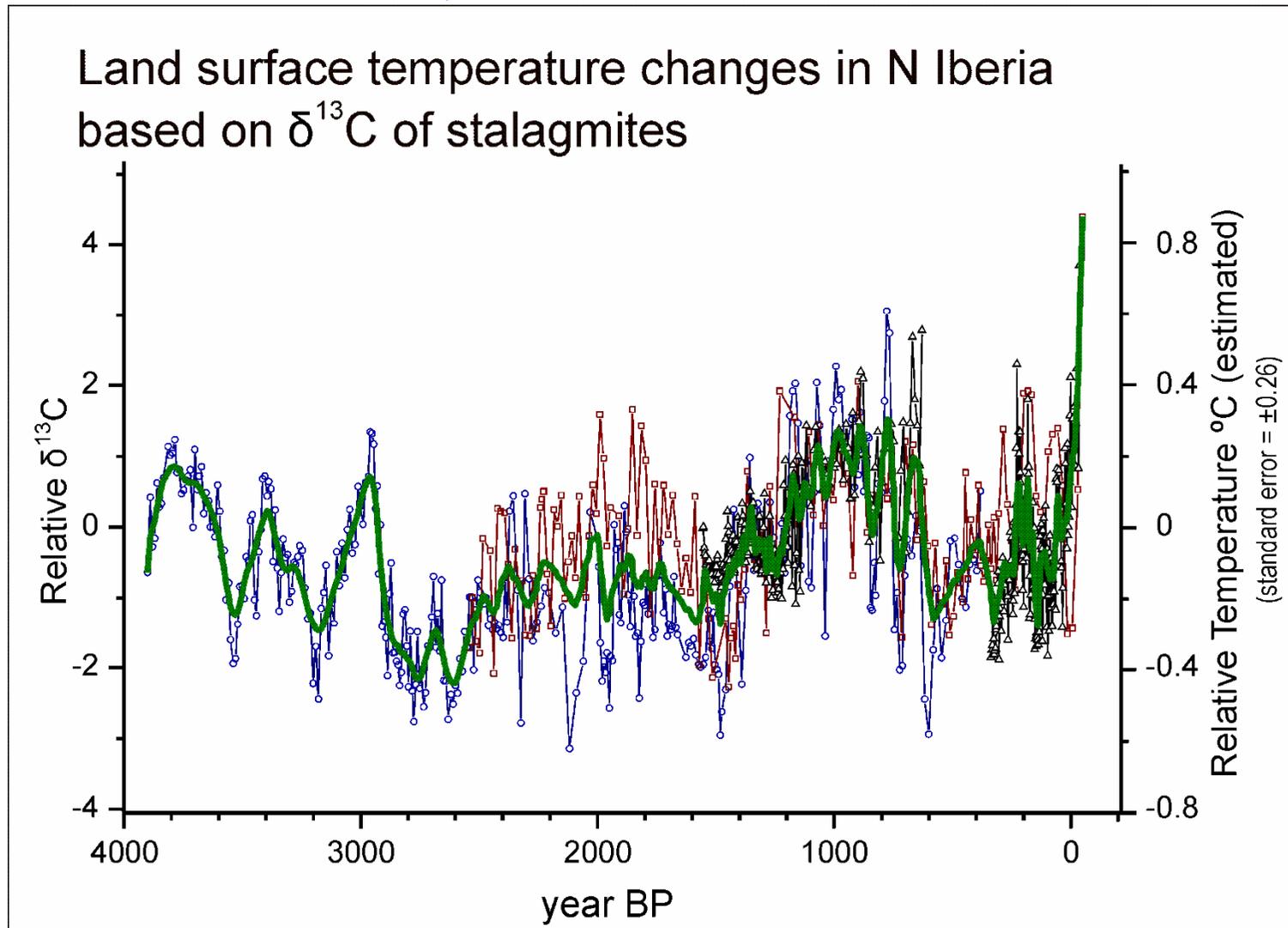
I. Levin

Espeleotemas

- Los espeleotemas son depósitos minerales formados a partir de los precipitados de las aguas subterráneas en cuevas.
- Su interpretación como proxy paleoclimático se basa en la integración de:
 - ◆ Dataciones radiométricas mediante series de U-Th y métodos estratigráficos
 - ◆ Obtención de series multi-proxy: isótopos estables y otros indicadores,
 - ◆ Funciones de transferencia proxy/clima basadas en la monitorización ambiental de largo plazo en el interior y exterior de las



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

Sedimentos terrígenos continentales

- Depósitos fluviales, glaciares, eólicos y lacustres
 - ◆ Se acumulan por la acción de procesos controlados por variables climáticas
 - ◆ En ocasiones puede ser difícil determinar las causas específicas de cambio climático, pero si señalan la existencia de dicho cambio
- Algunos rasgos erosivos como líneas de costa lacustres o estrias glaciares también revelan información climática

Fuentes documentales



- La climatología histórica es la especialidad paleoclimática que obtiene la información para sus interpretaciones climáticas exclusivamente de fuentes documentales históricas.
- Comporta la búsqueda en los patrimonios documentales conservados de aquellas fuentes y series documentales de instituciones de ámbito local generados con unos criterios administrativos comunes para facilitar la aplicación de métodos desarrollados y experimentados en ámbitos geográficos diferentes.
- Ello favorece el análisis de comportamientos climáticos de alcance temporal y espacial muy amplios. Por ejemplo, fenómenos como El Niño (ENSO) o la Oscilación del Atlántico Norte (NAO).

Fuentes documentales

- La información documental debe tratarse de documentación original directa. El escribano o persona que redacta el documento debe ser contemporáneo a los hechos que está relatando (Alexandre, 1977; Alexandre, 1987).
- Las informaciones deben aparecer claramente datadas, deben generarse de forma homogénea durante el periodo estudiado, deben aparecer de forma continua, sin interrupciones por pérdida de los documentos, por ejemplo. Finalmente, debe ser una información mínimamente cuantificable (Le Roy Ladurie, 1967)

Tratamiento de los datos documentales

- Consiste en objetivizar y cuantificar cada información según su tipo, intensidad y duración, introduciéndola en una tabla numérica según la resolución temporal (anual, estacional o mensual).
- Se obtienen listados de frecuencia de aparición de fenómenos específicos, y el desarrollo de sistemas de índices térmicos e hídricos
- E.g., índice hídrico a resolución mensual con valores entre +3 y -3.
- +3 : Lluvias muy intensas que producen daños por inundaciones catastróficas
- +2 : Lluvias intensas que producen algún tipo de molestia
- +1 : Presencia de lluvias
- 0 : Situación de normalidad o ausencia de información
- -1 : Ausencia de lluvias
- -2 : Sequía meteorológica que produce algún tipo de alteración a los cultivos
- -3 : Sequía climática prolongada con pérdida de cosechas y otros daños
- El sistema de índices puede adaptarse a la mayor riqueza o grado de sensibilidad de la información disponible. Si escasa información se reduce el sistema de índice (+1, 0, -1).
- Las series numéricas se tratan estadísticamente, se suavizan o filtran.
- Se pueden combinar series de datos de diferentes regiones para caracterizar e interpretar comportamientos generales del clima a escalas espacio-temporales muy amplias.

Fuentes documentales

- **Los libros de contabilidad de explotaciones agrarias,** tanto señoriales, como privadas o eclesiásticas (monasterios). Línea de investigación no abierta pero con fondos documentales bien localizados y de indudable interés.
- **Crónicas, dietarios, libros de memorias.** Se trata de una fuente documental de gran densidad de información de tipo ambiental, pero desafortunadamente no se encuentran tantos documentos de este tipo.
- **Actas municipales y documentación administrativa.** Los libros de actas con los acuerdos o resoluciones de los órganos de gobierno municipales (consejos) y eclesiásticos (capítulos catedralicios).

Tipos de información

■ Según su procedencia

Aspectos físicos: descripción directa de fenómenos meteorológicos de cualquier tipo, con frecuencia episodios meteorológicos extremos.

Aspectos biológicos: la descripción pormenorizada de todo tipo de epidemias, plagas fitosanitarias y epizootias relacionadas con el clima (e.g. sequías).

Aspectos humanos: las actividades humanas afectadas por problemas ambientales. Por ejemplo, transporte fluvial (crecidas, heladas) o los pasos de montaña (grandes nevadas).

■ Según su carácter

- **Información directa:** la constituyen las descripciones de fenómenos meteorológicos en actas municipales o eclesiásticas.

- **Información indirecta:** Estos datos tienen la peculiaridad de contener información meteorológica o climática pero que debe deducirse como causa o efecto del hecho o circunstancia que se está describiendo. Un *proxy-data* frecuente serían las ceremonias de rogativas por motivaciones ambientales.

Fenómenos meteorológicos identificables

- **Información térmica:** En España esta información es escasa e inhomogénea o discontinua. Cuando hay alguna referencia se centra principalmente en la presencia de olas de frío. La gravedad de sus efectos en la vida ciudadana y en las actividades agrarias no tenía parangón con las olas de calor, cuyo registro documental es casi anecdótico.
- **Información hídrica:** referidas al comportamiento del régimen pluviométrico son abundantes, continuas y homogéneas. Es el material base para cualquier investigación en climatología histórica que se quiera iniciar en este ámbito geográfico. Pero si bien la calidad de esta información es óptima, sólo hace referencia a los comportamientos hídricos extremos.
- **Los déficits hídricos, las sequías, se expresan con gran nivel de detalle, tanto en su duración como en su intensidad, pero a través de un *proxy-data* cultural: las ceremonias de rogativas *pro pluvia*.**
- **Los excesos hídricos, episodios de precipitaciones prolongadas o intensas, tienen también su reflejo documental. Las primeras a través de las rogativas *pro serenitate*. Las segundas a través de la descripción directa de las inundaciones producidas así como las relaciones de daños y destrucciones ocasionadas. A partir de esta información se puede identificar el episodio meteorológico propiciador e incluso el comportamiento del sistema fluvial estudiado.**
- Otros fenómenos meteorológicos aparecen también en la documentación histórica, como son los **episodios de viento intenso** (quizás tornados), temporales de mar o tormentas, aunque con frecuencia presentan una escasa homogeneidad y representación espacial.

INDICE DE SEQUIA A PARTIR DE ROGATIVAS PRO PLUVIA

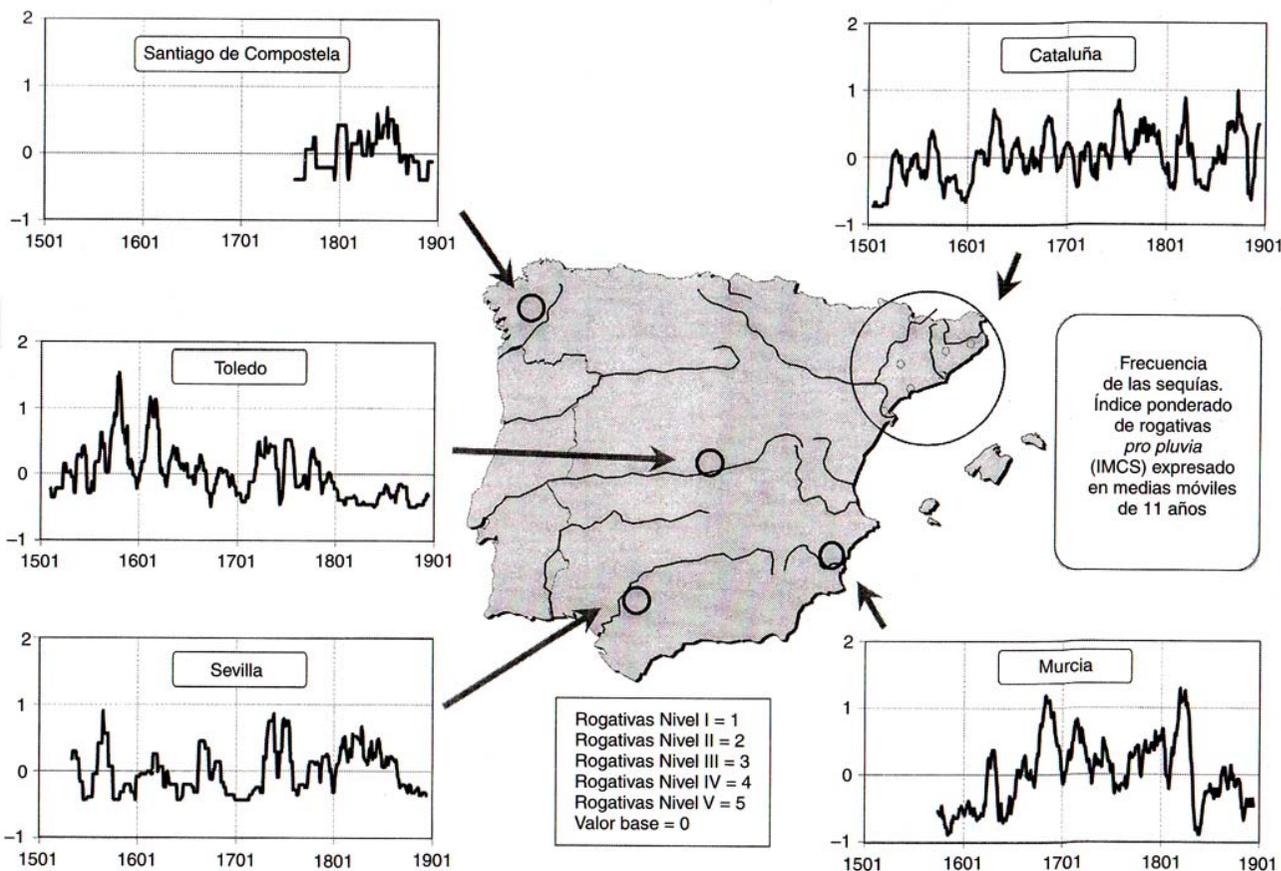


FIG. 31.4. Índices de sequía generados a partir de los diferentes niveles de rogativas pro lluvia. Valores expresados en medias móviles de 11 años.

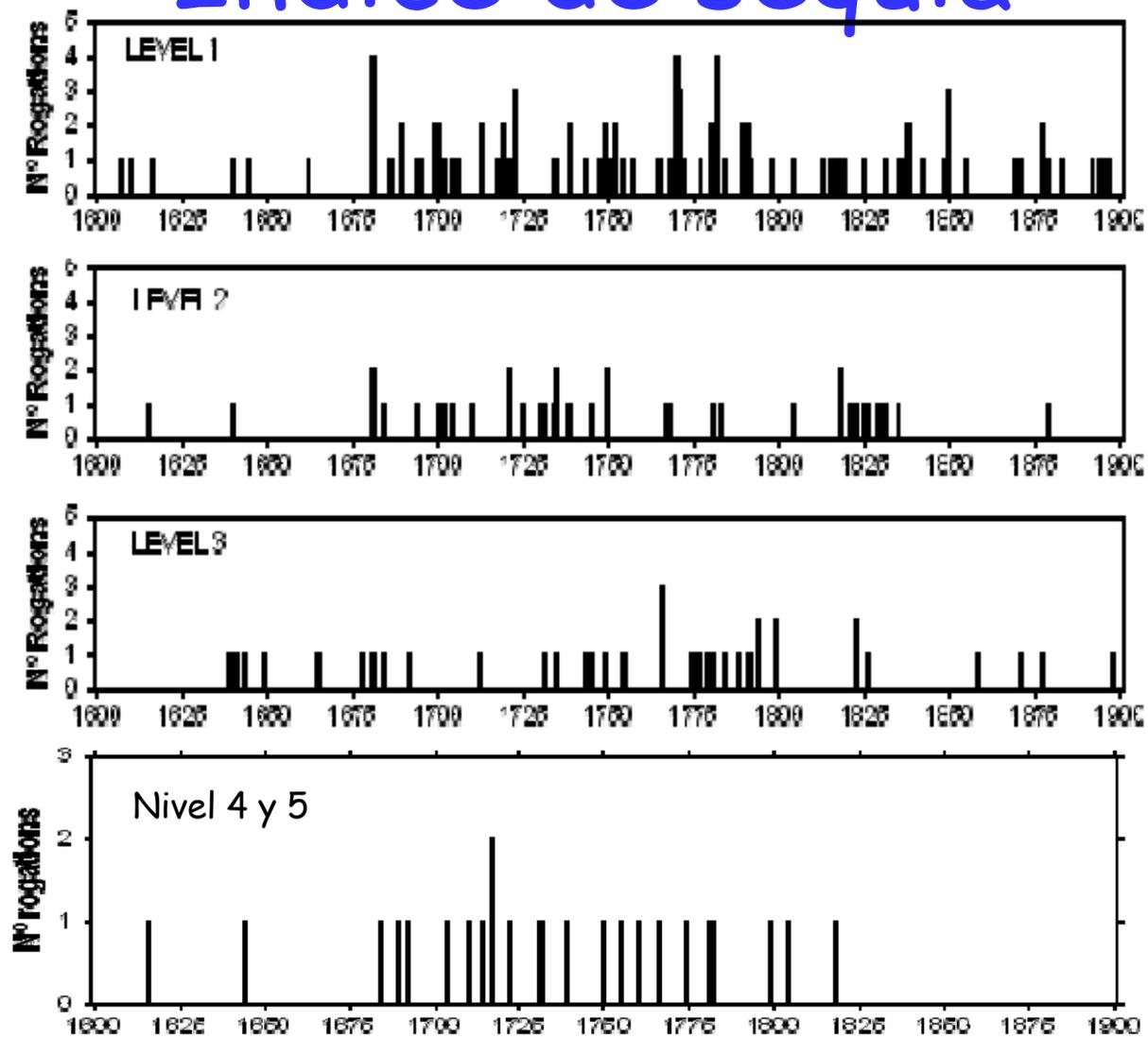
Fuente: Barriendos, 2004

Organización de las rogativas en niveles de gravedad

En el caso de las sequías, se contemplan hasta cinco niveles, (Martín Vide y Barriendos, 1995):

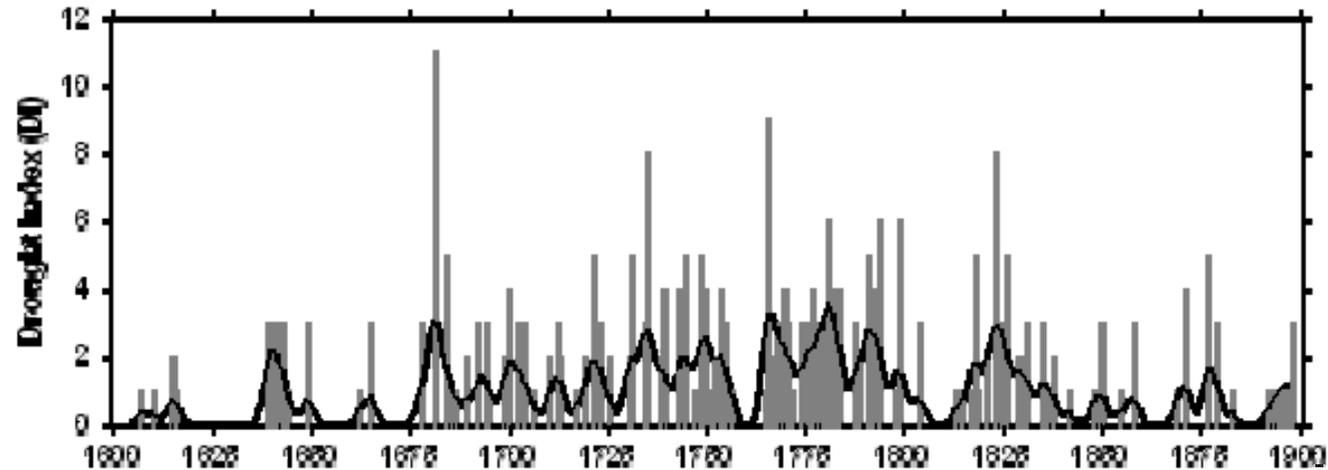
- Nivel I: Nivel simplemente preventivo.** Era un acto dentro de las iglesias, consistente en simples rezos u oraciones al terminar las misas.
- Nivel II: Nivel medio.** Era un acto también dentro de las iglesias, consistente en la exposición de reliquias o imágenes en un lugar prominente, como altares o mediante un recorrido por la iglesia o un claustro.
- Nivel III: Nivel severo.** Era ya un acto público fuera de la iglesia aunque dentro de la población. Consistía en procesiones públicas por las principales calles de la población, con reliquias e imágenes de santos. Podía realizarse una sola procesión o una tanda preestablecida de varias de ellas a diferentes iglesias y conventos.
- Nivel IV: Nivel grave.** Era un acto público aún dentro de la población. Consistía en inmersiones en agua de reliquias o imágenes de advocaciones de especial veneración. Las inmersiones se prohibieron en 1619 por el deterioro que provocaban en las reliquias y fue sustituido por actos de similar solemnidad, como misas generales de difuntos o exposiciones del Santísimo Sacramento.
- Nivel V: Nivel crítico.** Consistía en peregrinaciones que se realizaban fuera de la población. Se enviaban peregrinos a santuarios de especial veneración. En estos santuarios, solían agruparse para las rogativas peregrinos de aquellas procedencias en las que el problema ambiental estuviera incidiendo negativamente. En los correspondientes registros documentales de entrada de peregrinos, en consecuencia, además de la duración e intensidad de un episodio climático anómalo se podría caracterizar su incidencia geográfica.

Indice de sequía



Según Vicente Serrano y Cuadrat, 2011

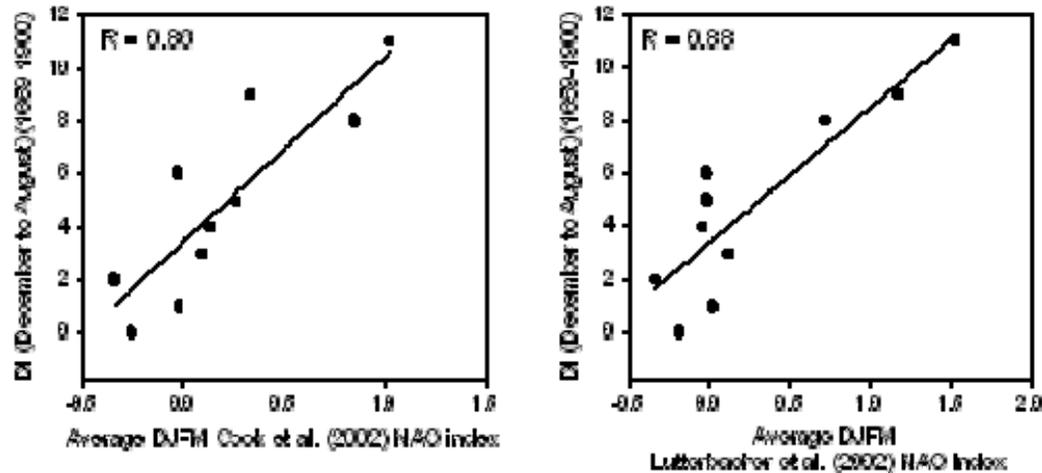
Indice de sequía



Evolución del índice de sequía entre Diciembre y Agosto a partir de documentos de rogativas en el sector central de la Cuenca del Ebro para el periodo 1600-1900. Barras en gris: Índice de sequía (DI). Línea negra: filtro gaussiano de la serie original (10 años). Según Vicente Serrano y Cuadrat, 2011

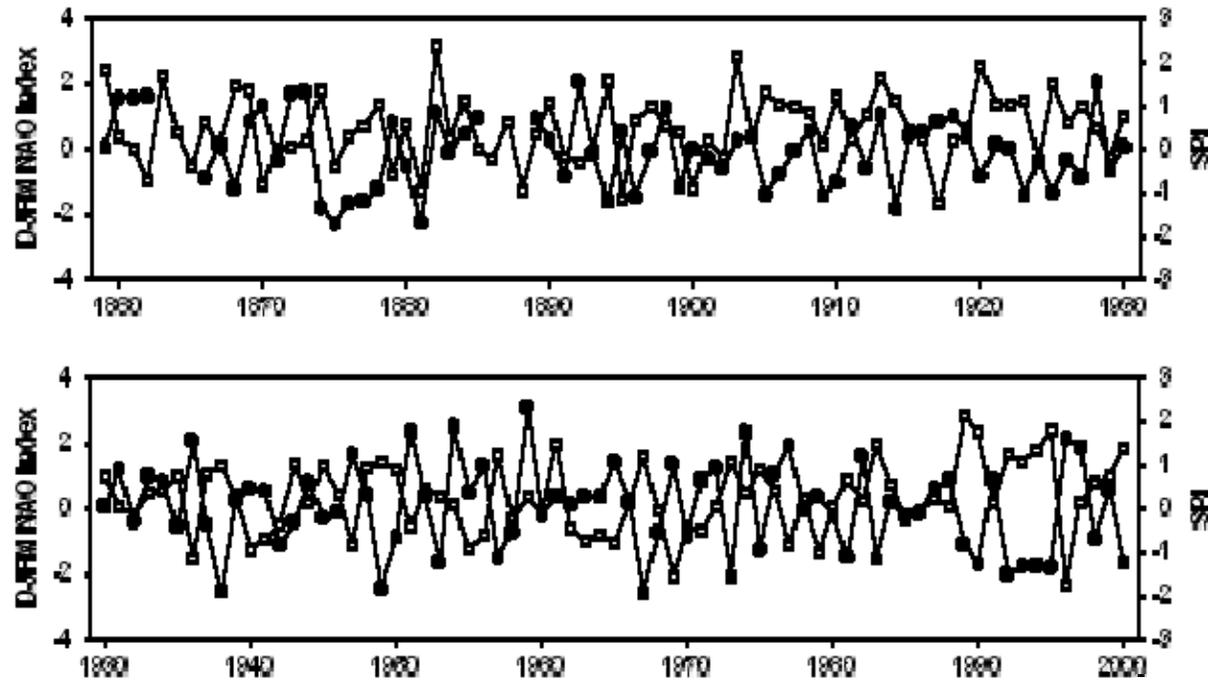
<http://docs.exdat.com/docs/index-284073.html>

Indice de sequía



Comparison of the average values of the DJFM NAO indices obtained from Cook et al. (2002) and Luterbacher et al. (2002) as a function of the December-August DI (1659-1900). Según Vicente Serrano y Cuadrat, 2011

Indice de sequía



Evolution of the DJFM NAO (white squares) index and the SPI (black circles) in Zaragoza (time scale of four months in March). Según Vicente Serrano y Cuadrat, 2011

<http://docs.exdat.com/docs/index-284073.html>

Bibliografía

- Alverson, K. D., R. S. Bradley, and T.F. Peterson, *Paleoclimate, global change, and the future*, Springer Verlag 2003
- Barriendos, M. 1999. *La Climatología Histórica En El Marco Geográfico De La Antigua Monarquía Hispana*. <http://www.ub.edu/geocrit/sn-53.htm>
- Bradley, R. 1999. *Paleoclimatology. Reconstructing Climates of the Quaternay. Second Edition. International Geophysics Series, vol. 68. Elsevier Academic Press.614p*
- Ruddiman, W.F. 2008. *Earth's Climate. Past and Future. Second Edition, W.H. Freeman and Company. Chapter 2-3.*
- Saltzman, B., *Dynamical Paleoclimatology, Generalised Theory of Global Climate Change, Academic Press, 2002*
- NOAA Paleoclimatology Program Homepage
- <http://homepage.mac.com/uriarte/index.html>
- Vicente-Serrano, S. y Cuadrat, J.M. 2011. *North Atlantic Oscillation Control Of Droughts In North-east Spain: Evaluation Since 1600 A.D. Climatic Change 85, 357-379.*