

# Introducción a la Paleoclimatología

Juan José Gómez Navarro  
10 de marzo de 2011

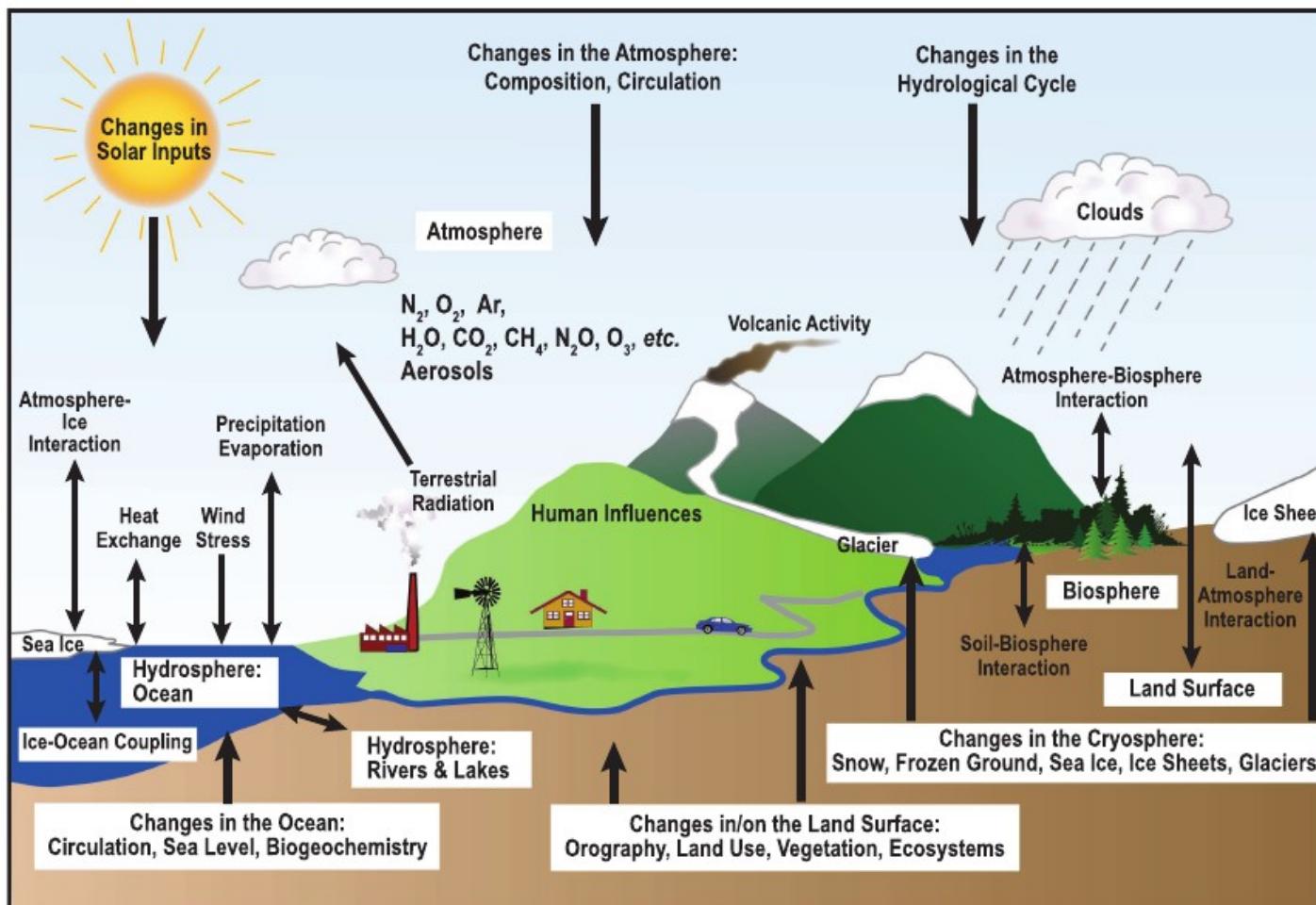


# Esquema

- Introducción
- El clima y los factores que lo modifican
- Una breve historia del clima de la Tierra
- Modelos climáticos
- El futuro
- Conclusiones

# El sistema climático

- La climatología estudia la interacción de los diferentes agentes del sistema climático

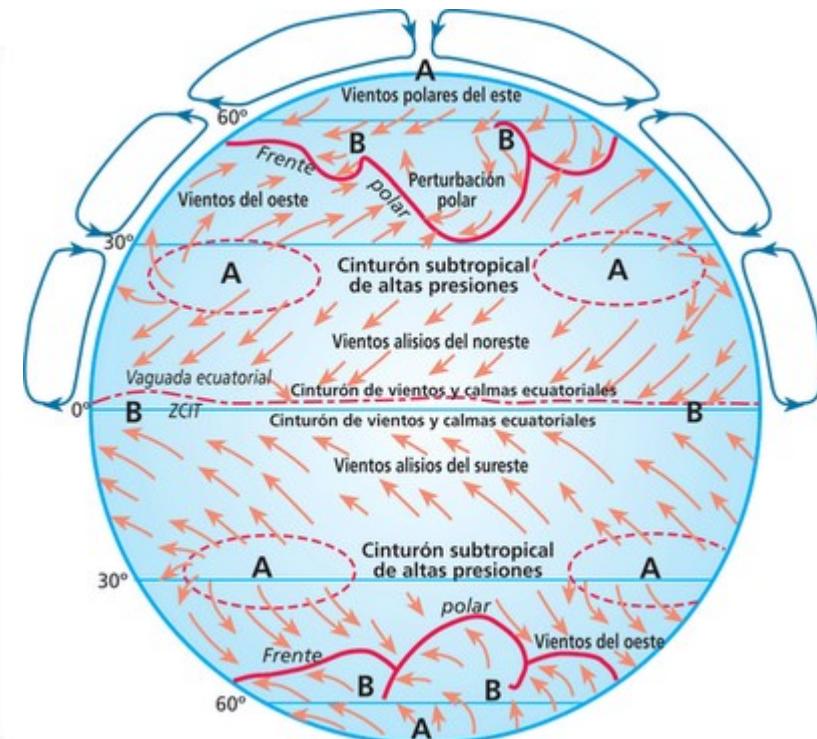
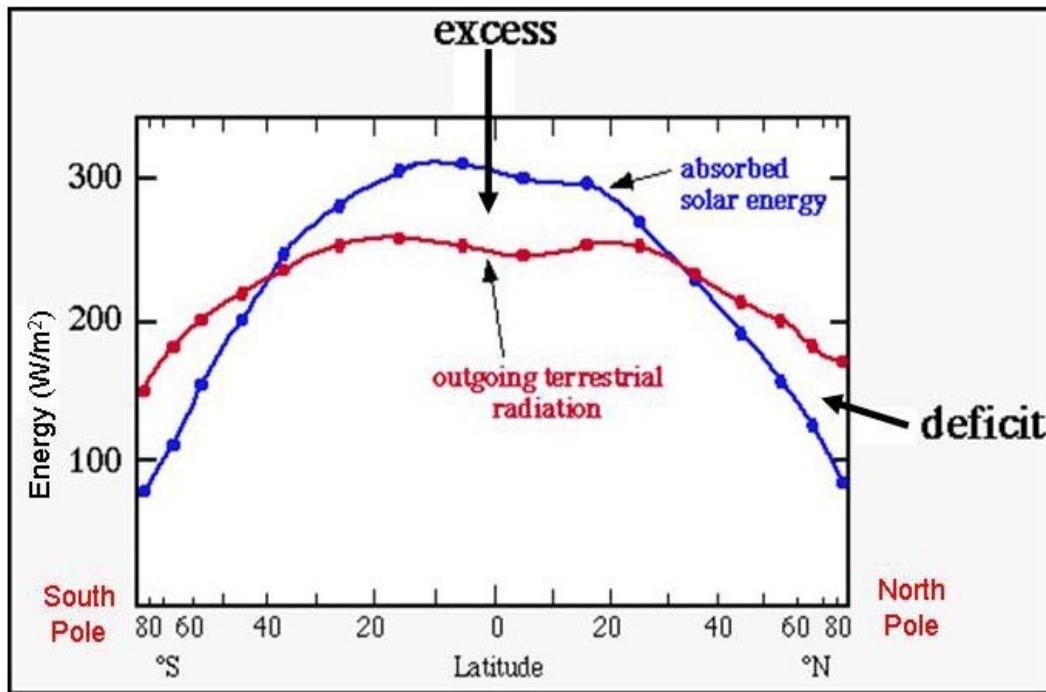


# La ciencia de la Climatología

- Como toda ciencia, necesita de un soporte experimental contra el que testear hipótesis.
- El “experimento” empezó hace 4500 millones de años, y no tenemos control sobre él.
- Esto hace que los **modelos climáticos** sean tan importantes.
- Por otro lado, para entender el sistema climático hay que saber cómo ha evolucionado (para poder establecer teorías sobre su evolución futura).
- Pero el **registro instrumental** sólo va unos 150 años atrás, y la escala de tiempo de las variaciones climáticas va desde décadas a millones de años.
- Necesitamos **reconstruir** la evolución pasada del clima.
- Para entender el sistema climático, y poder predecir su evolución futura, hay que mirar al pasado.

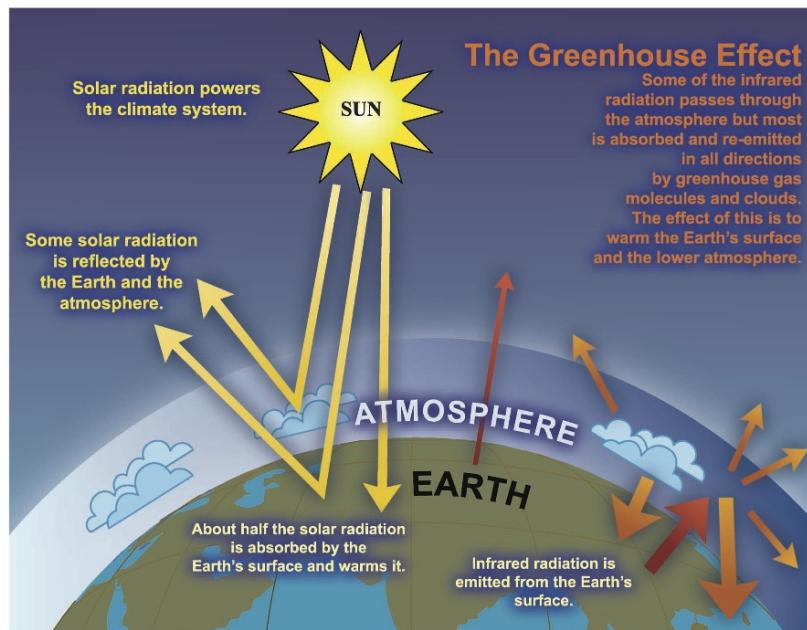
# La máquina térmica

- El clima es una máquina térmica: transforma el gradiente meridional de radiación incidente en el movimiento de la atmósfera
- El **balance radiativo es 0**: la energía incidente ha de igualar la irradiada



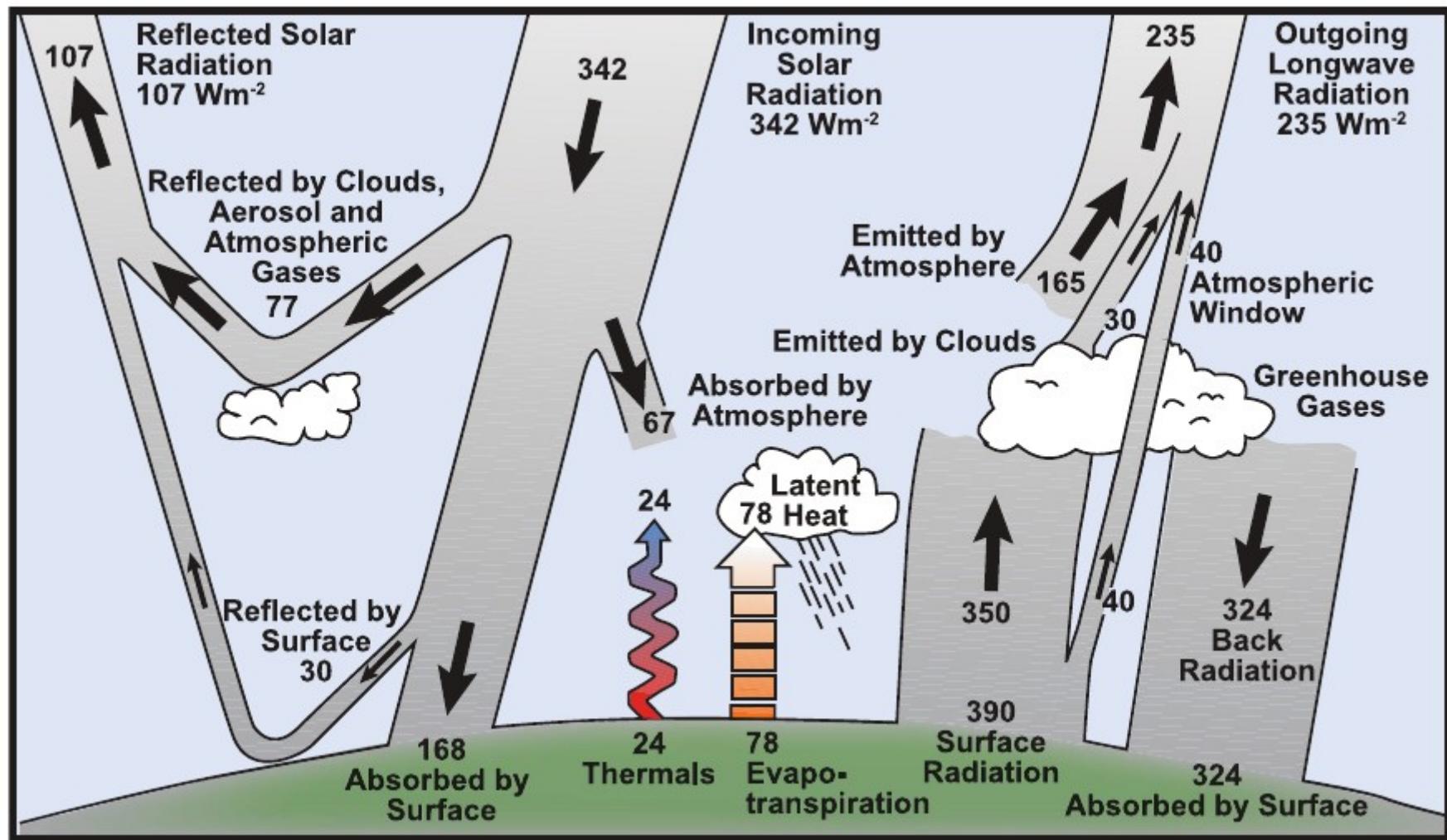
# Modificación del balance radiativo

- El clima global se puede ver alterado por una modificación en este balance.
- Hay tres maneras en que esto pueda ocurrir:
  - Cambios en la **radiación** incidente
  - Cambios en la fracción de energía que se refleja (**albedo**)
  - Cambios en la composición de **gases de efecto invernadero**



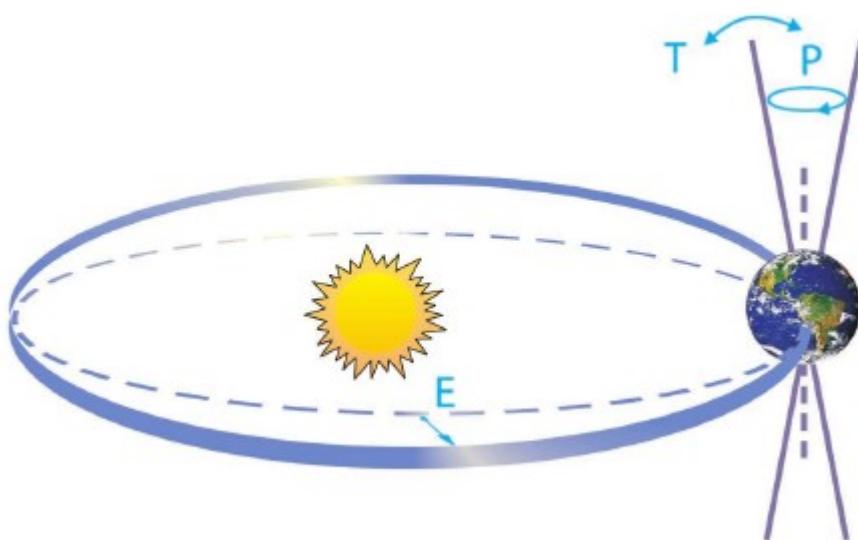
# Balance radiativo

- Antes de ser devuelta, esta energía sufre una serie de procesos



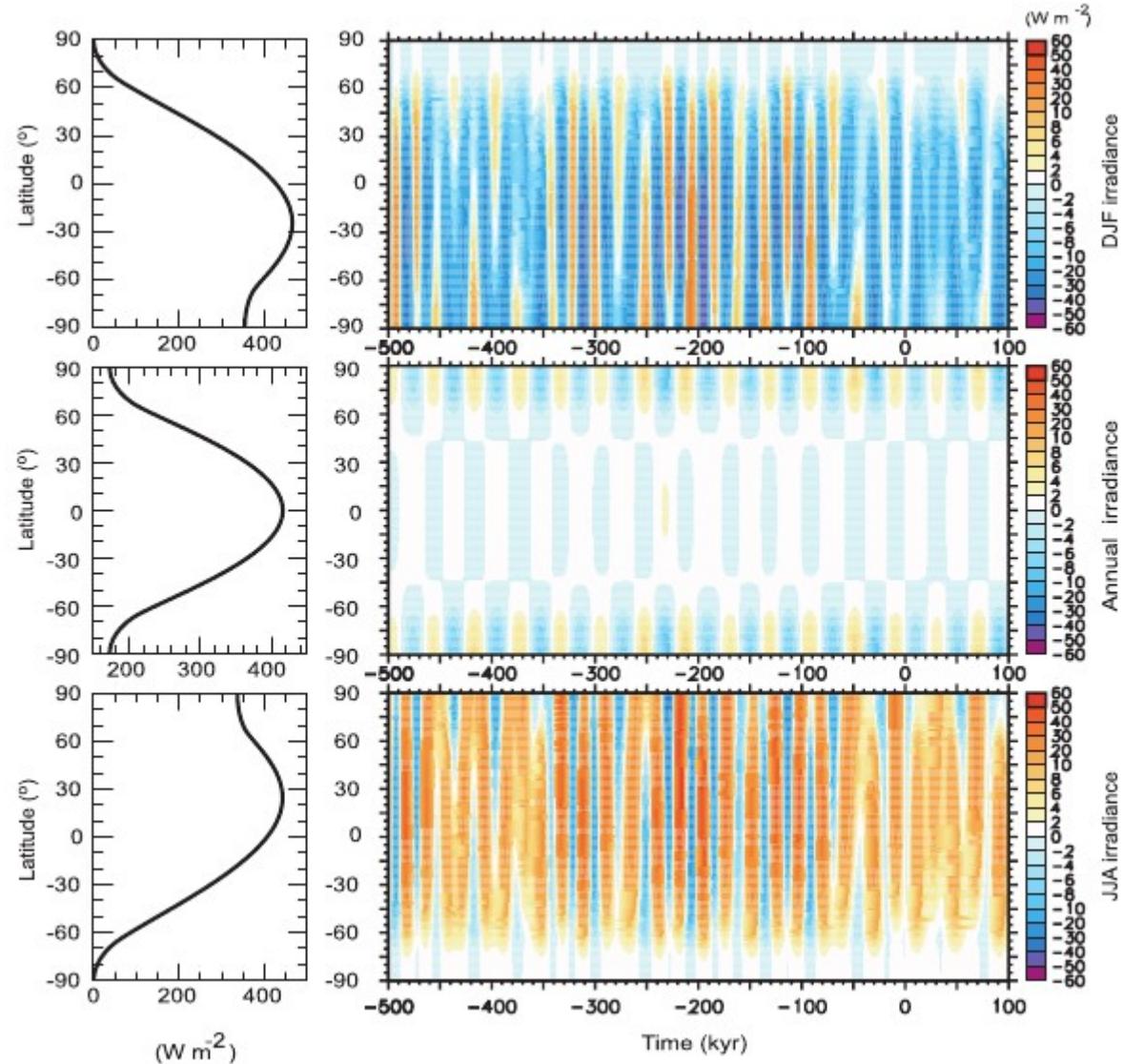
# Ciclos de Milankovitch

- Los parámetros orbitales que afecta a la radiación incidente varían:
  - ✚ Precesión de los equinoccios (~ 20000 años)
  - ✚ Cambios en la oblicuidad (~ 40000 años)
  - ✚ Cambios en la excentricidad (~ 100000 años)



# Ciclos de Milankovitch

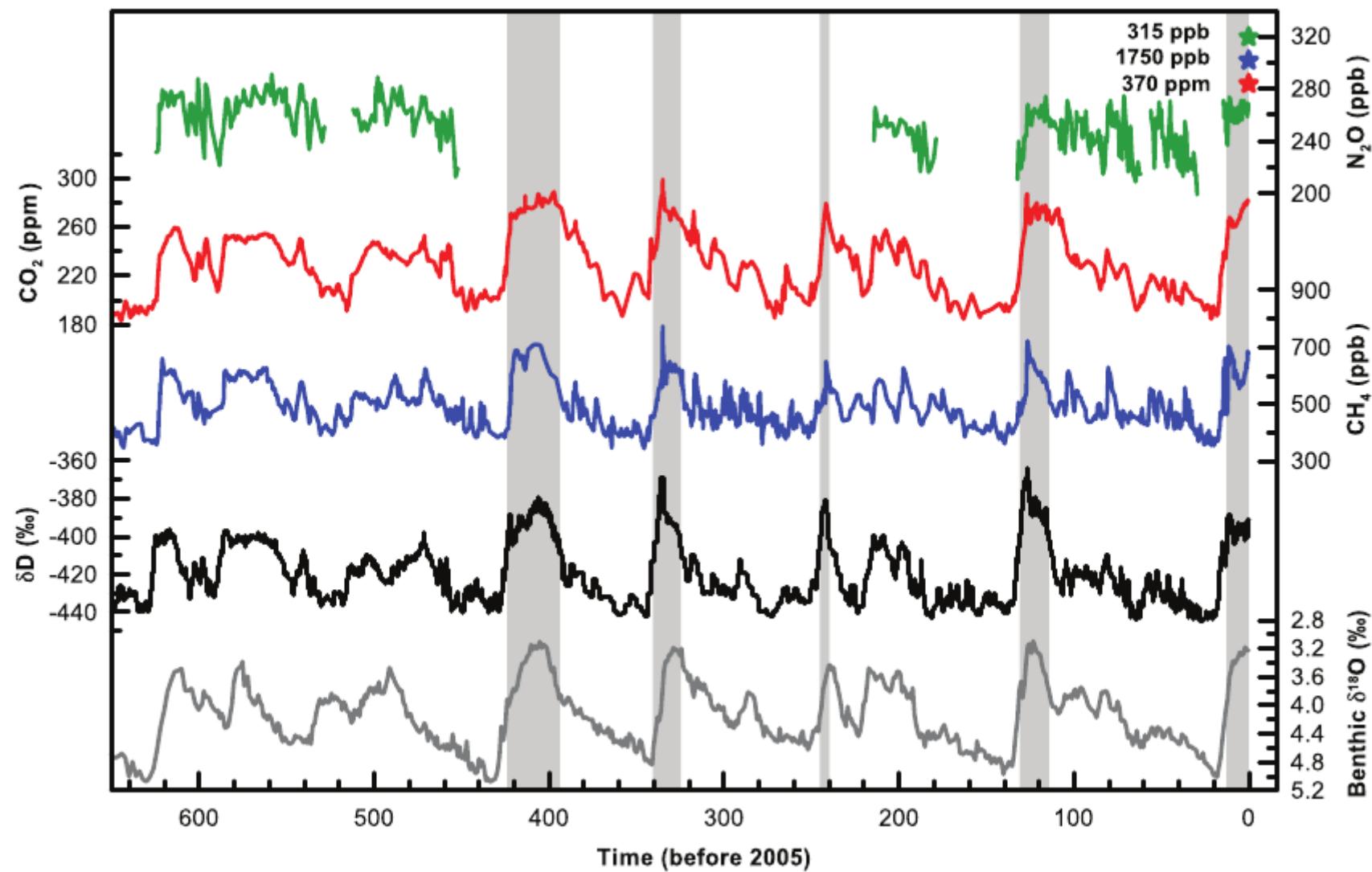
- Estos cambios se pueden calcular con precisión astronómica.
- Redistribuyen la energía incidente, pero tienen poco impacto en la energía total que incide sobre la Tierra
- Hace falta algo más...



# Feedbacks

- El clima está afectado por muchos de feedbacks (algunos no totalmente entendidos todavía) que retroalimentan positiva y negativamente el clima:
  - más temperatura → más vapor → más efecto invernadero
  - más temperatura → menos cobertura de hielo → más albedo
  - más temperatura → más radiación exterior
  - más temperatura → más nubosidad → ???
  - más temperatura → más vegetación → ???
  - ...

# Ciclos de Milankovitch



# Feedbacks vs. Milankovitch

- Los ciclos de Milankovitch disparan el comienzo y el fin de las eras glaciares, pero no explican ni la **intensidad ni la rapidez** de cambio de estos periodos.
- Un evento clave son los años “sin verano”.
- Los **feedbacks** del sistema amplifican la respuesta al forzamiento, cambiando abruptamente (en escala geológica) el clima.
- Pero hay otros muchos factores que afectan a diversas escalas temporales.

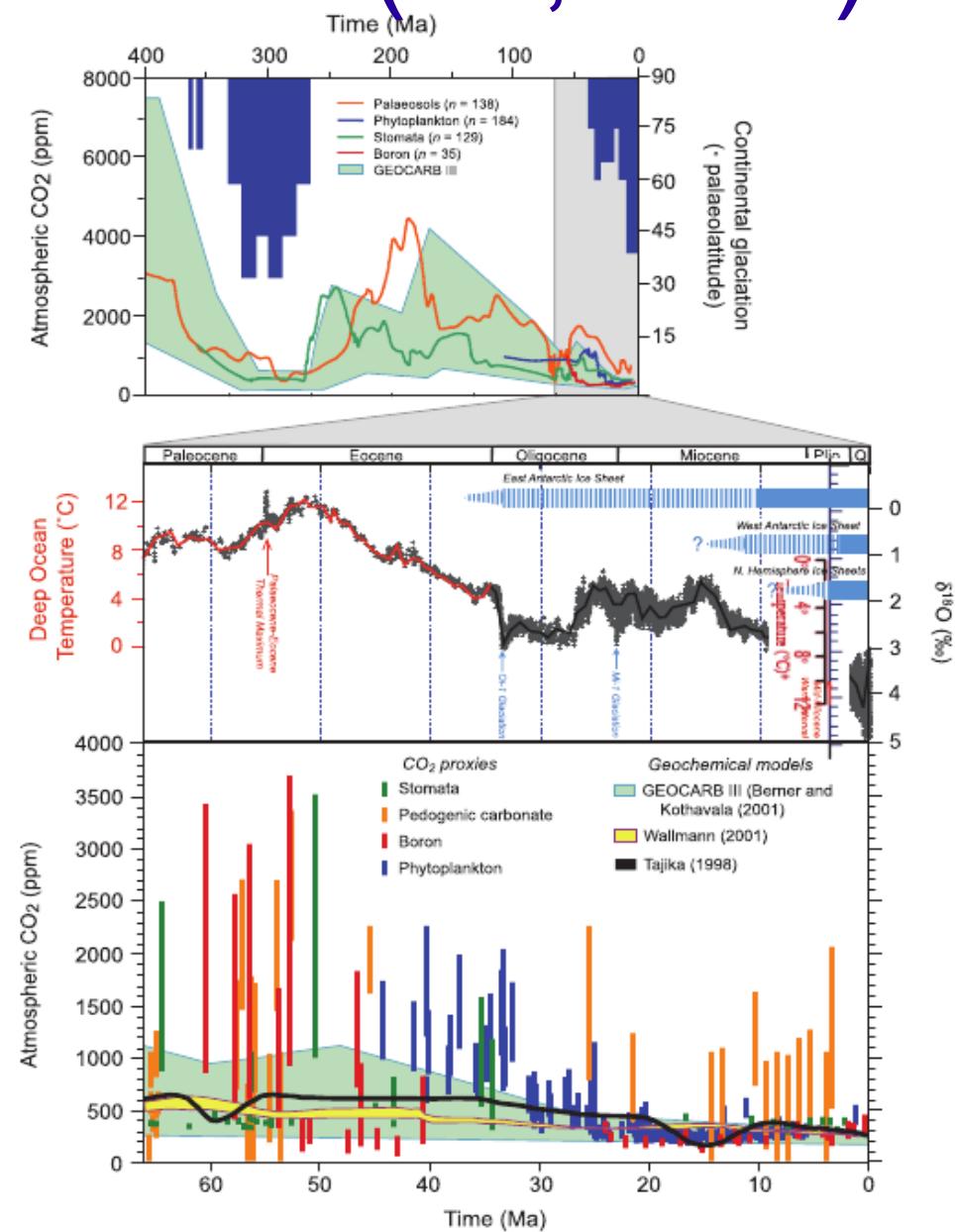
# Otros factores

- Variaciones en la radiación intrínseca del Sol debida a su propia dinámica interna.
- Erupciones volcánicas, que emiten grandes cantidades de aerosoles.
- Variaciones climáticas internas debida a su propia naturaleza (El Niño, NAO,...).
- Deriva continental.
- Cambios en la composición atmosférica (debidos tanto a factores antrópicos como naturales)
- ...



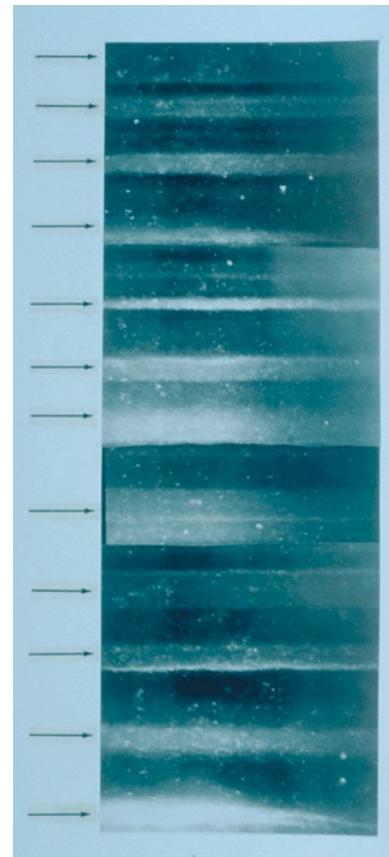
# Clima Pre-Cuaternario (>2,6 Ma)

- Los testigos de hielo sólo llegan hasta ~ 1 Ma.
- Se utilizan proxies basados en isótopos del Carbono, Oxígeno y Boro.
- Se extraen de muestras de animales fósiles, sedimentos marinos...
- También hay evidencia geológica (en la extensión de los glaciares).
- El cuadro general es el de una Tierra con **grandes niveles de CO<sub>2</sub>** y generalmente más caliente.
- Se cree que los **procesos tectónicos** jugaron un papel.

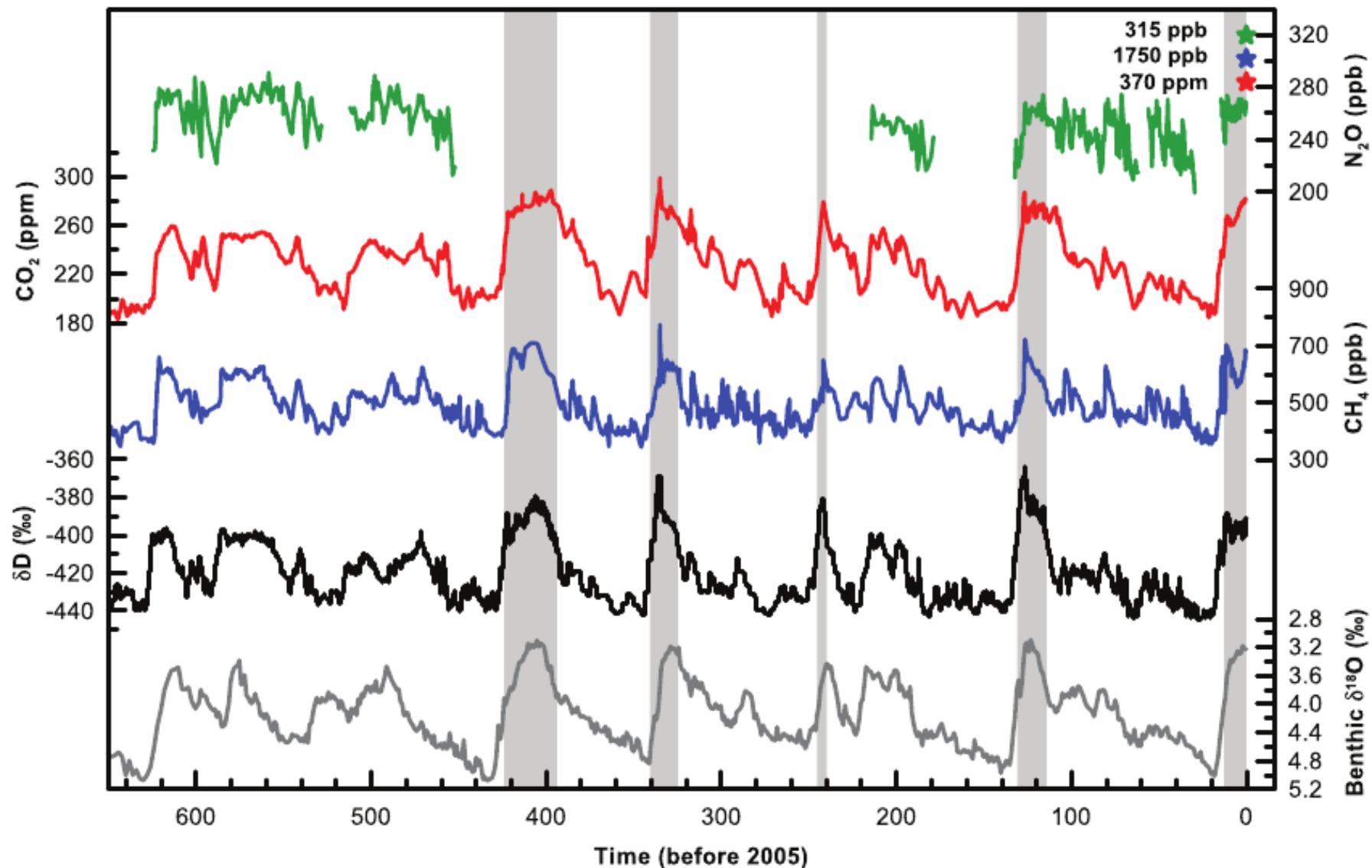


# Periodos interglaciares

- En el último millón de años la Tierra ha estado considerablemente más fría.
- ¡Tenemos **testigos de hielo!**



# Periodos interglaciares

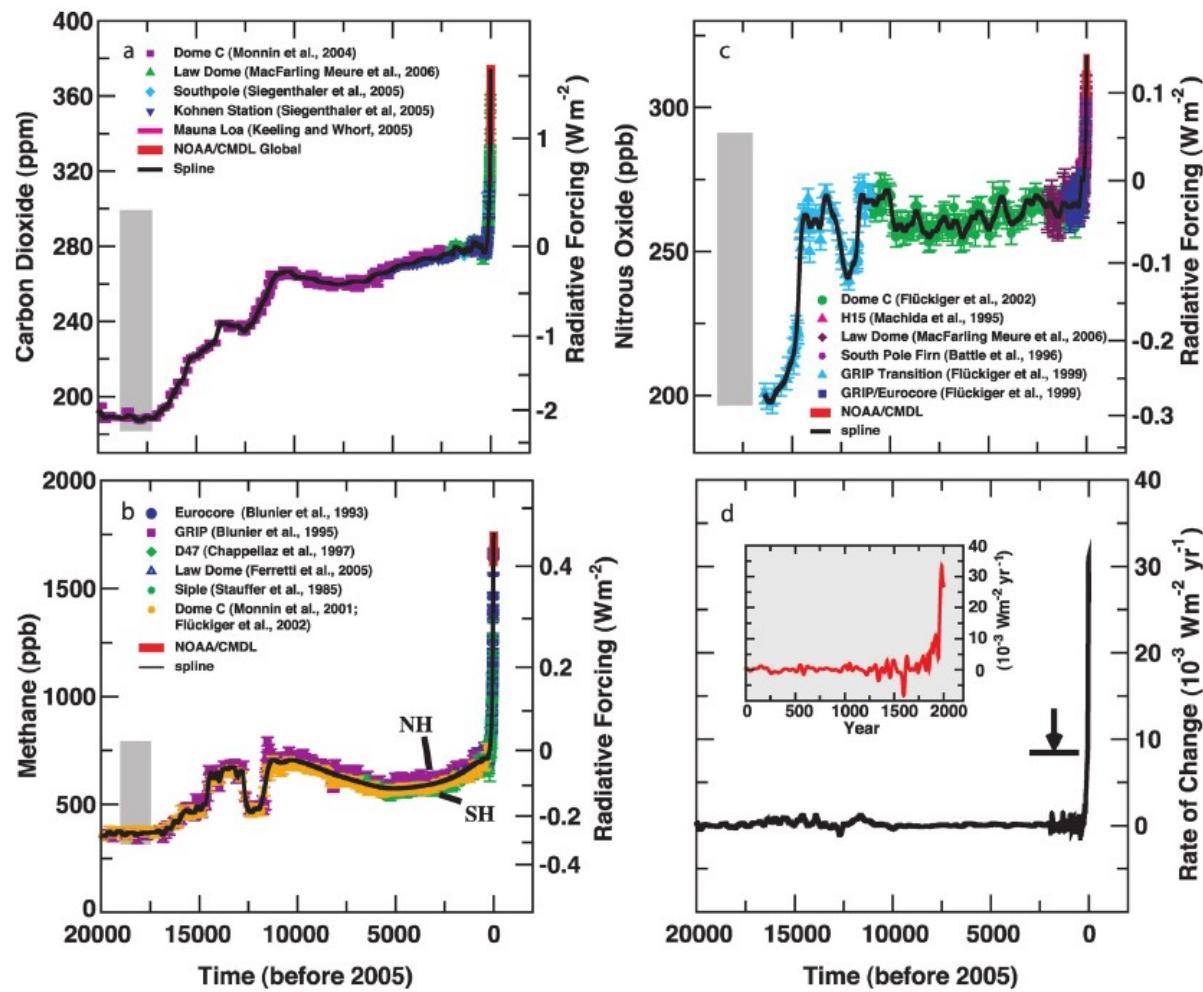


# Periodos interglaciares

- Ha habido (está habiendo) una serie de periodos glaciares e interglaciares
- Se repiten aproximadamente cada 100 Ka, y duran entre 10 y 30 Ka
- Hay un acople entre la temperatura y el CO<sub>2</sub> que no se termina de entender (el CO<sub>2</sub> NO causa el calentamiento, sino que es su consecuencia)
- Actualmente estamos en el último periodo interglaciar, que empezó hace 21 Ka: **el Holoceno**.
- No hay evidencia (de acuerdo a cálculos astronómicos) de que vaya a terminar en los próximos 30 Ka.

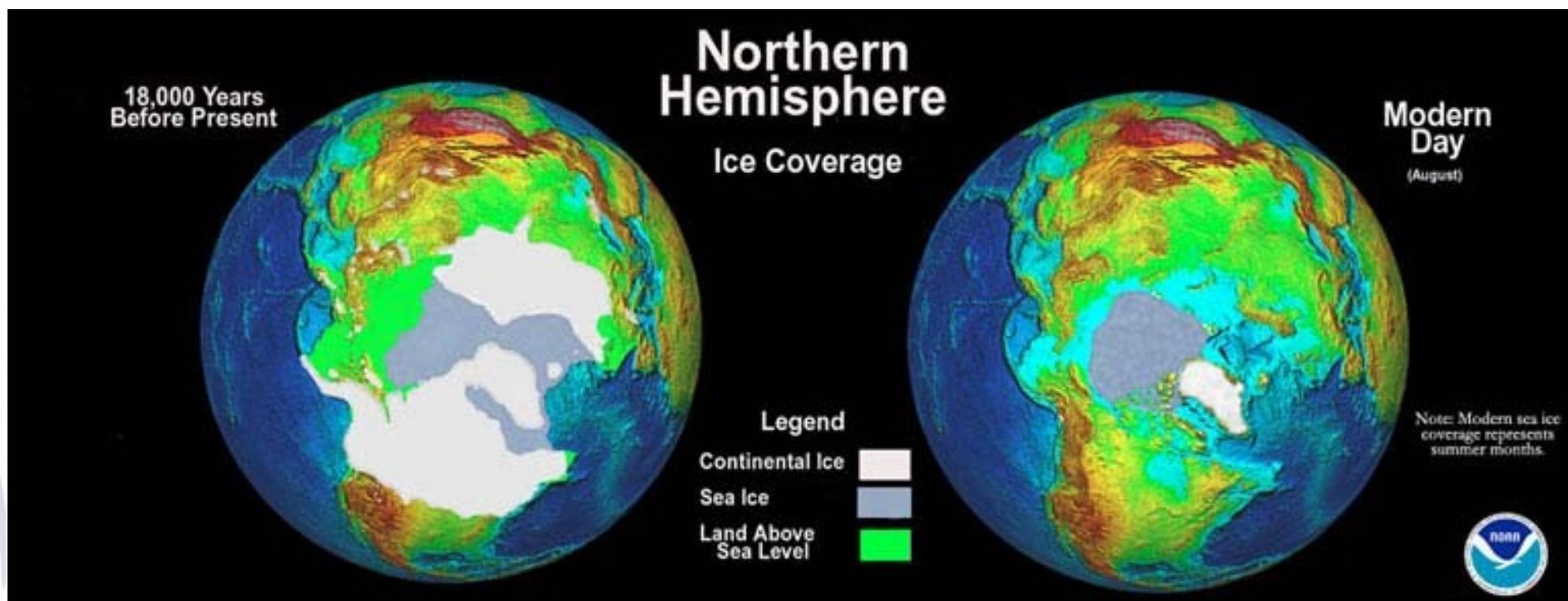
# Influencia antrópica en el Holoceno

- Los niveles actuales de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y NO<sub>2</sub>, así como su tasa de incremento, son los mayores de los últimos 650 Ka
- La barra gris denota la variabilidad natural estimada en los últimos 650 Ka



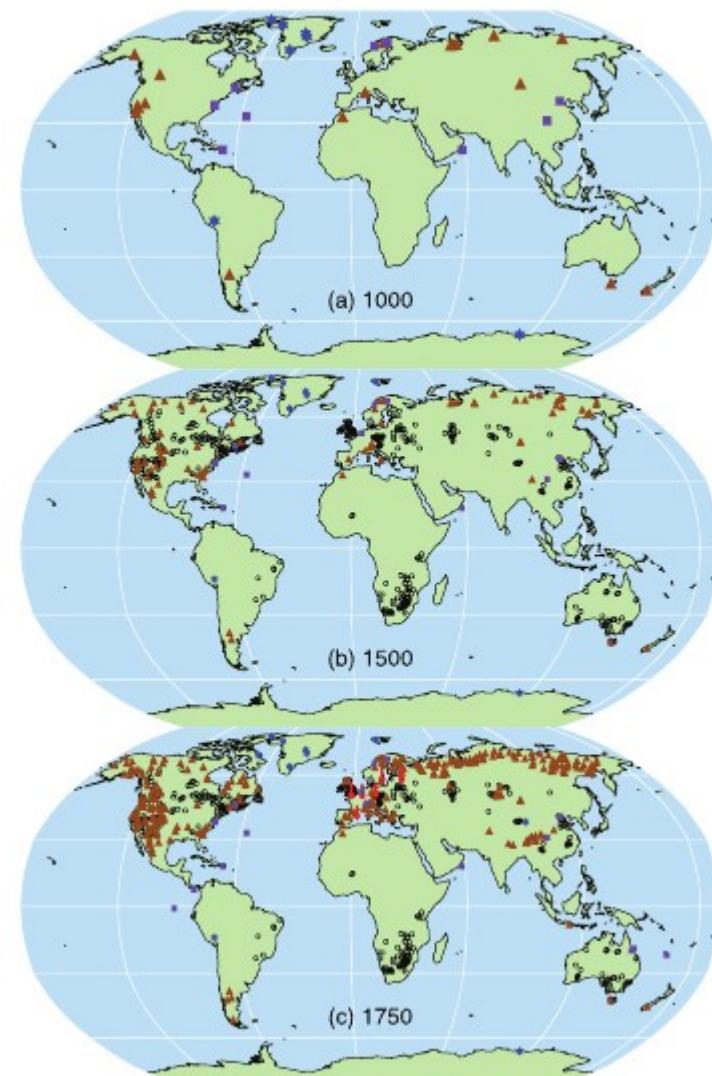
# El LGM

- El último máximo glaciar (LGM, ~ 20 Ka) marca el fin de la última era glaciar y el comienzo del Holoceno.
- Océano 5 a 6 °C más frío. Algunas zonas continentales hasta 20 °C más frías, sobre todo en latitudes altas.
- El calentamiento duró unos unos miles de años, 10 veces más lento que el actual calentamiento.

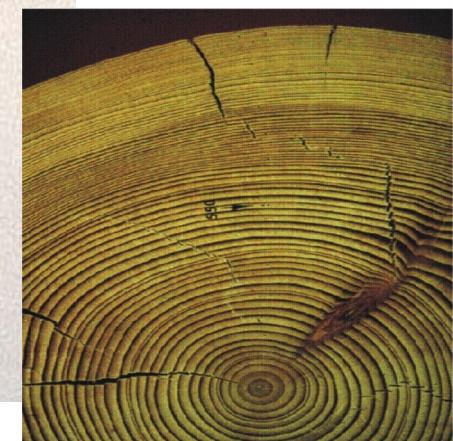
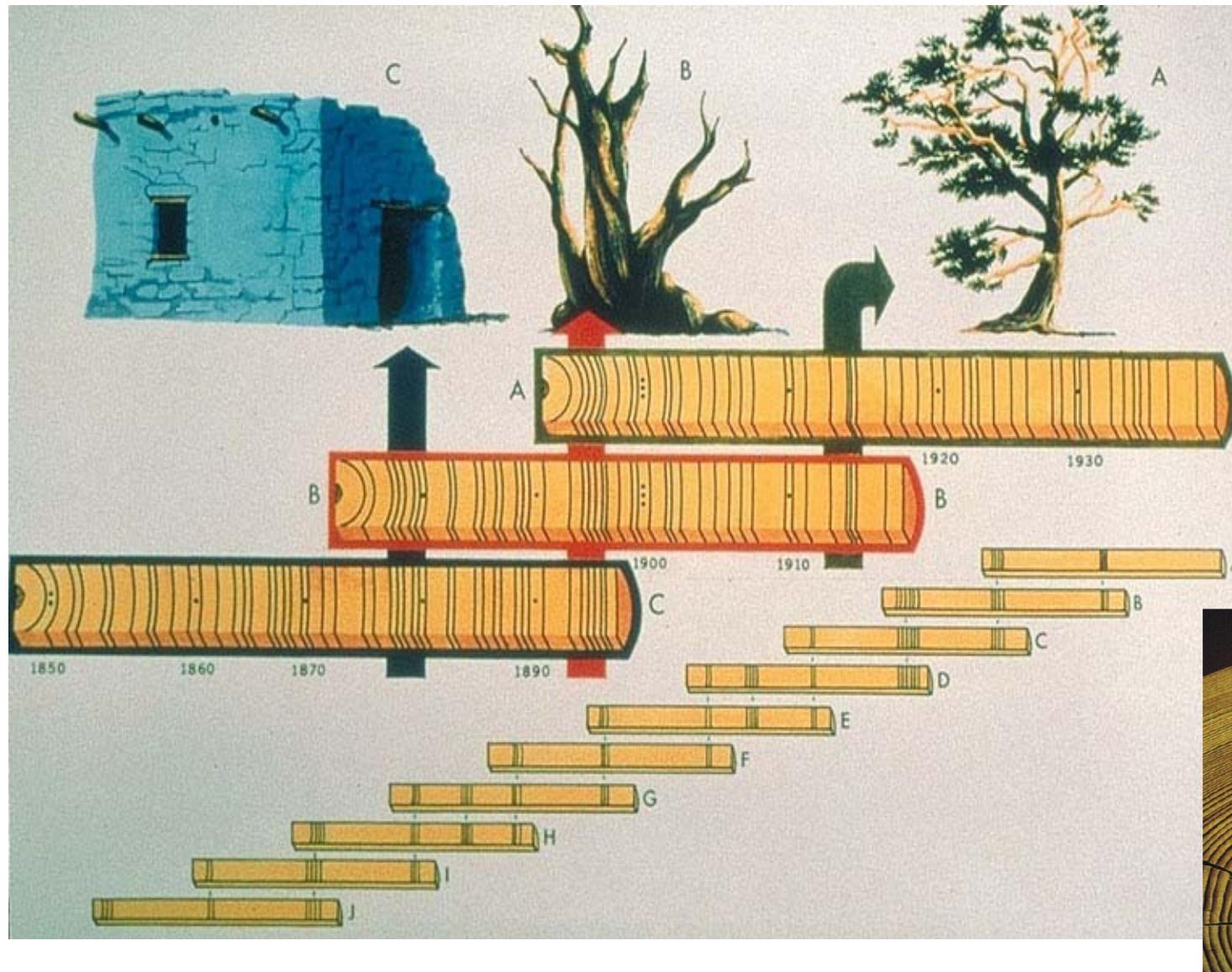


# Proxies en los últimos 2000 años

- Conforme nos vamos acercando a la actualidad, la cantidad de información disponible crece rápidamente.
- Sin embargo, un problema (con mala solución) sigue siendo su dispersión geográfica.
- En particular, el HN está mejor cubierto.
- Las conclusiones son necesariamente **regionales**, y sólo extrapolables a toda la Tierra con mucho cuidado.

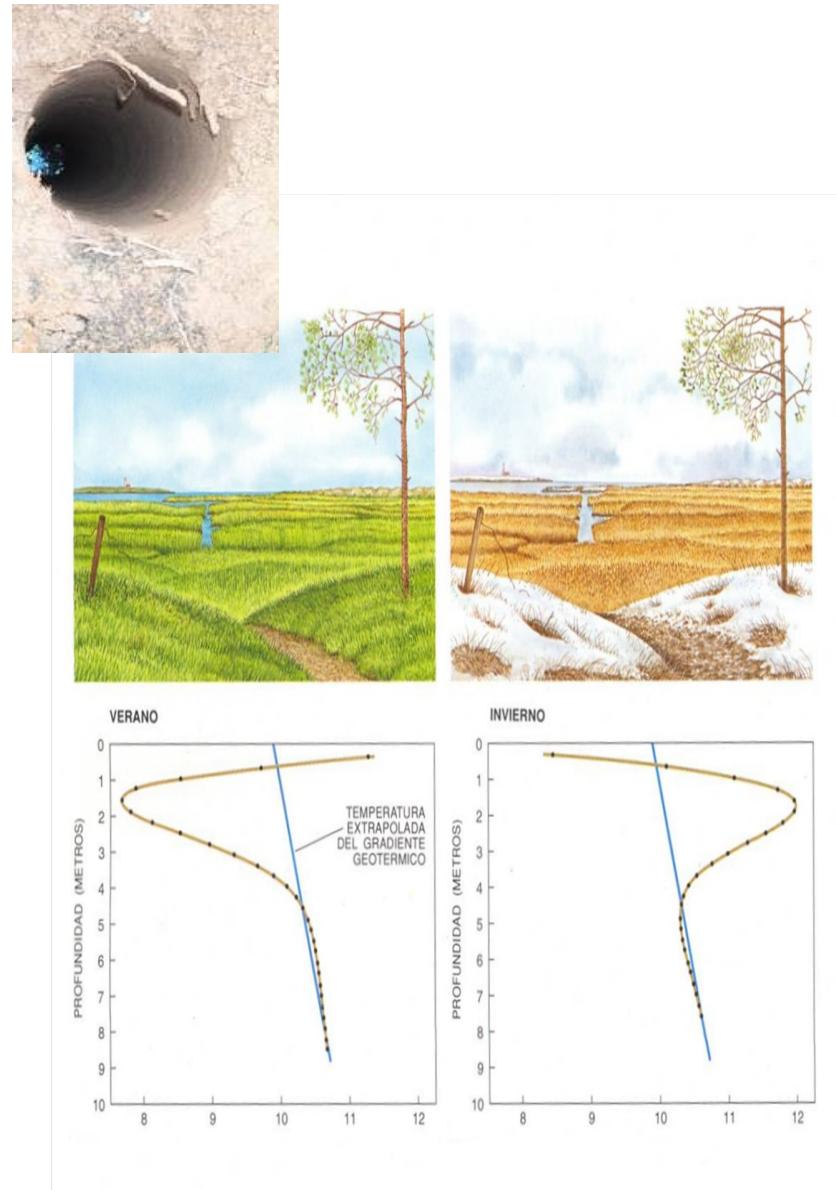


# Dendrocronologías



# Boreholes

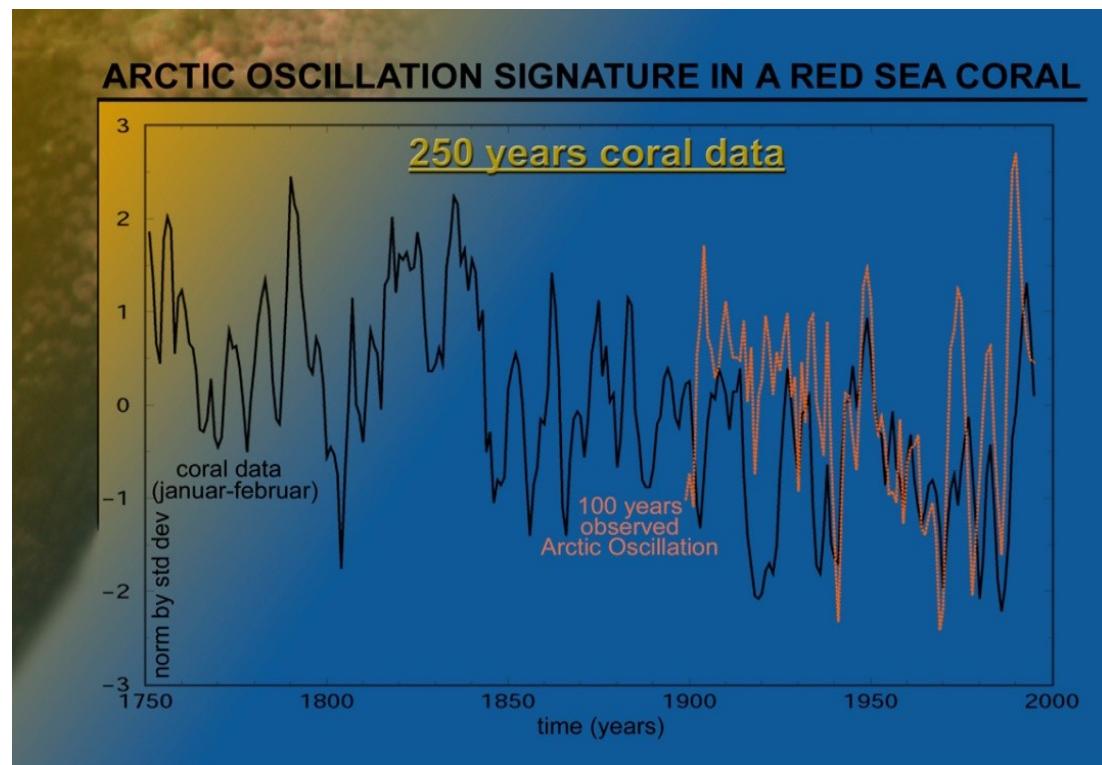
- Los boreholes son agujeros excavados a gran profundidad, normalmente para prospecciones geológicas.
- Están llenos de agua, cuya temperatura refleja la del suelo en que está en contacto (no hay conducción vertical).
- El suelo es un filtro paso-bajo de la temperatura superficial.
- Los perfiles de temperatura se pueden invertir (usando la ley de Fourier) para obtener la temperatura que dio lugar al perfil medido.
- Sólo proporcionan la evolución de baja frecuencia.



# Esclerocronología



- Exactamente como con los anillos de árboles, el crecimiento del coral se puede utilizar para reconstruir el clima.



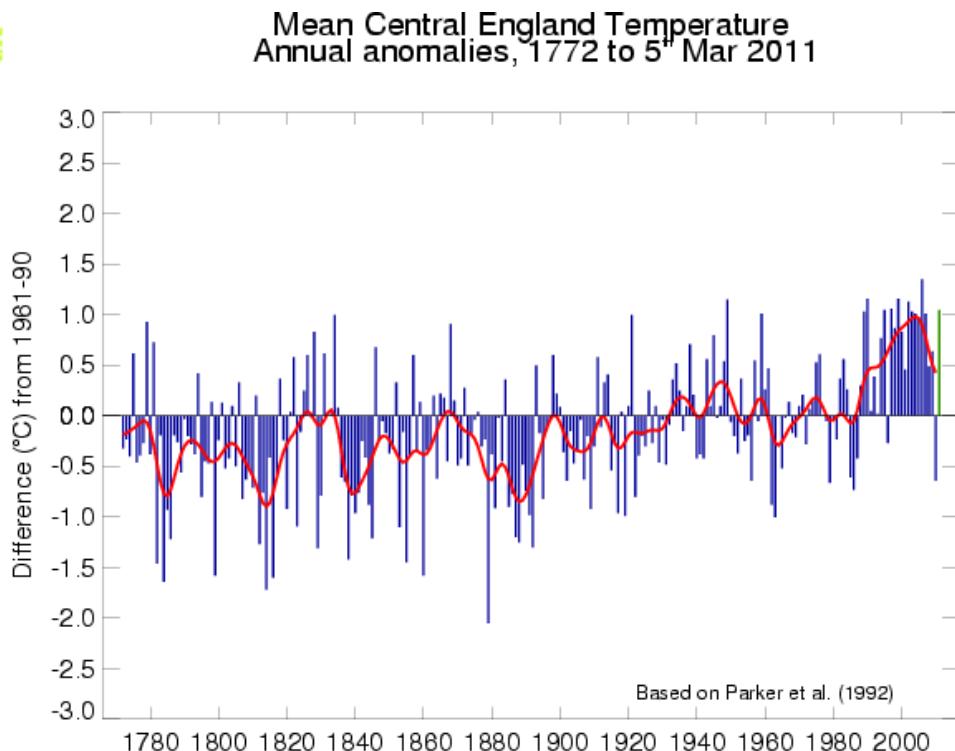
# Registros documentales

- Hay todo tipo de documentos históricos que contienen información directa o indirecta de eventos climáticos en el pasado (periódicos, notas de observadores voluntarios, registros eclesiásticos, bitácoras marinas,...).
- En particular, en España hay mucha información relacionada con rogativas

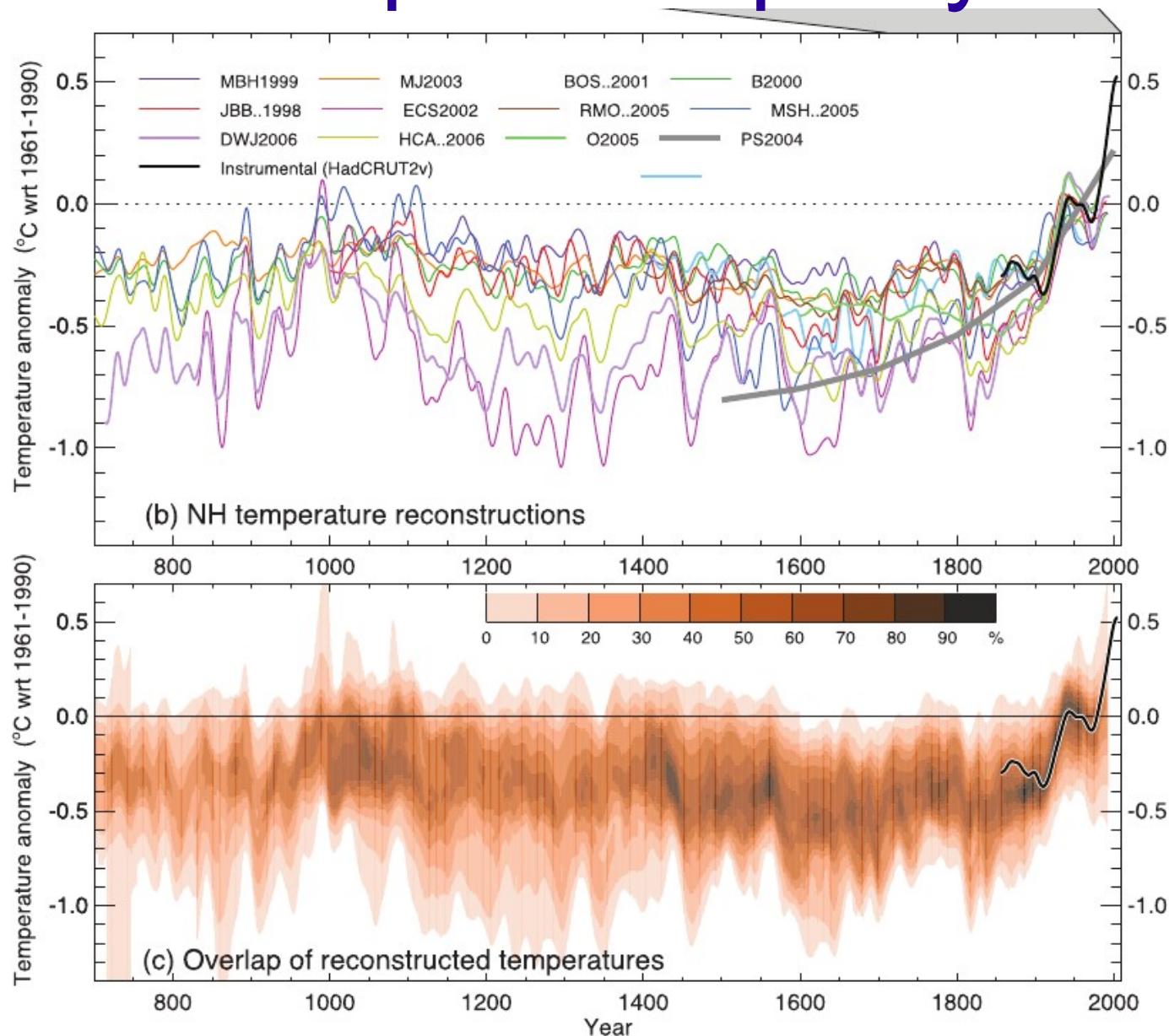


# Series instrumentales antiguas

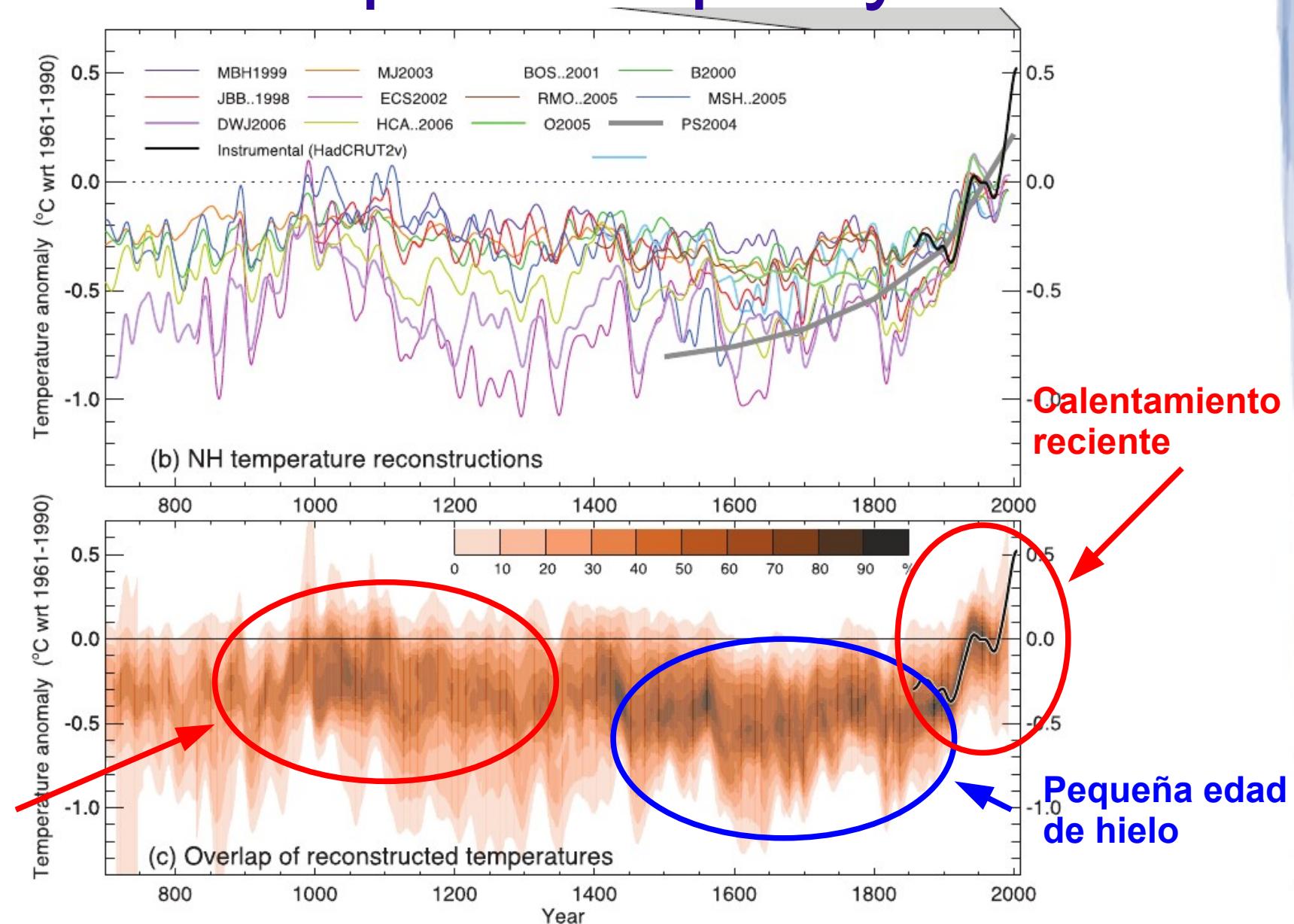
- En casos realmente excepcionales hay mediciones directas.
- Esta información es muy valiosa, si bien hay que tratarla con cuidado.
- El caso más conocido (y antiguo) es la serie Central England que llega hasta 1659 con datos estacionales.
- A partir de 1772 es diaria (antes de eso es mensual con resolución de medio grado).



# Enfoque multiproxy



# Enfoque multiproxy



# ¿Qué concluye la evidencia?

- Hay una importante variabilidad incluso en escalas de tiempo “cortas”.
- Hubo un periodo, antes de 1850, marcado por un enfriamiento importante. No está totalmente claro si fue un fenómeno global.
- En torno al año 1000 hubo un periodo de calentamiento importante. No está claro si fue tan cálido como el periodo actual.
- La evidencia indica que el siglo XX fue probablemente el más cálido en los últimos 1300 años.



# Los modelos climáticos

- Los diferentes componentes del sistema climático interactúan a diferentes escalas temporales, de maneras que todavía se están comprendiendo.
- Las reconstrucciones trazan la evolución de algunas variables, pero no permiten “entender” su interrelación.
- Entender es una condición necesaria para extraer el comportamiento hacia el futuro.
- Los modelos climáticos implementan leyes físicas bien establecidas para simular el sistema, tanto en el pasado como en el futuro.
- En climatología, donde no puede haber “experimentos controlados”, los modelos son una pieza fundamental.

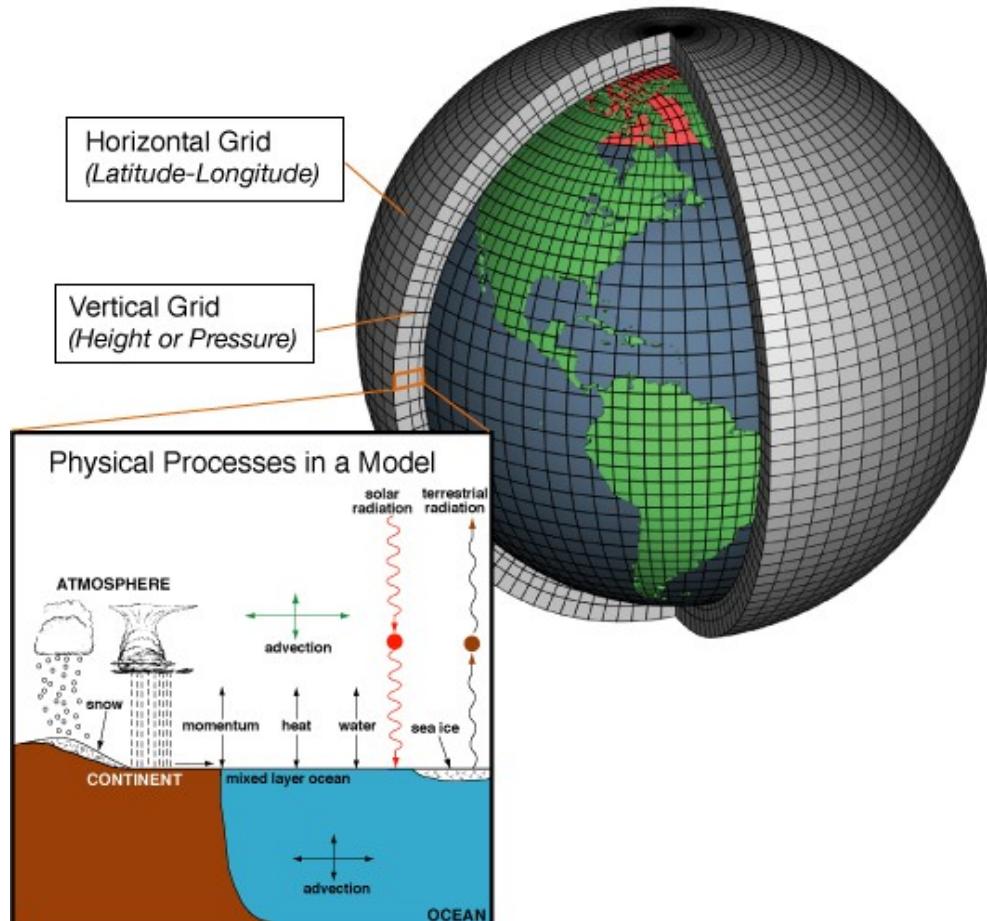
# Tipos de modelos

- Existen diferentes tipos de modelos climáticos:
  - Modelos geoquímicos del ciclo del carbono
  - Modelos de balance energético
  - Modelos de complejidad intermedia
  - **Modelos de Circulación General**
  - Modelos Regionales
- La cuestión no es si los modelos son perfectos o no (no lo son por principio), sino si son lo suficientemente complejos para tratar de responder la pregunta que nos estamos haciendo en cada momento.

↓  
Mayor  
coste  
computacional

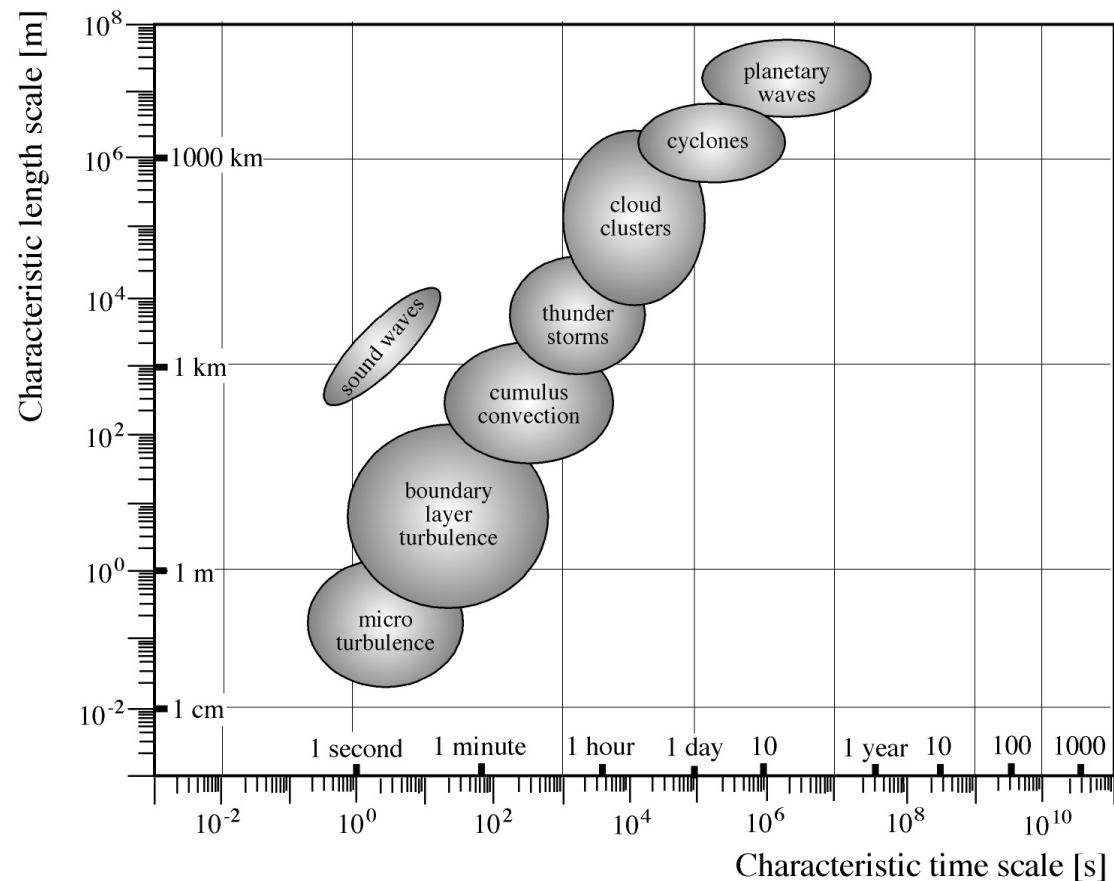
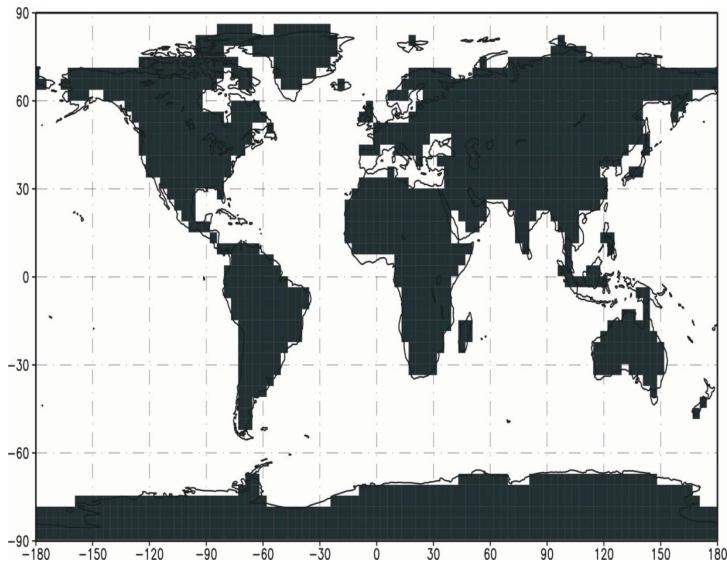
# Modelos de Circulación General

- Los modelos de circulación general simulan todos los componentes del sistema de manera exhaustiva
- Funcionan en una **rejilla tridimensional** que cubre todo el globo.
- Incluye leyes físicas y químicas bien establecidas.



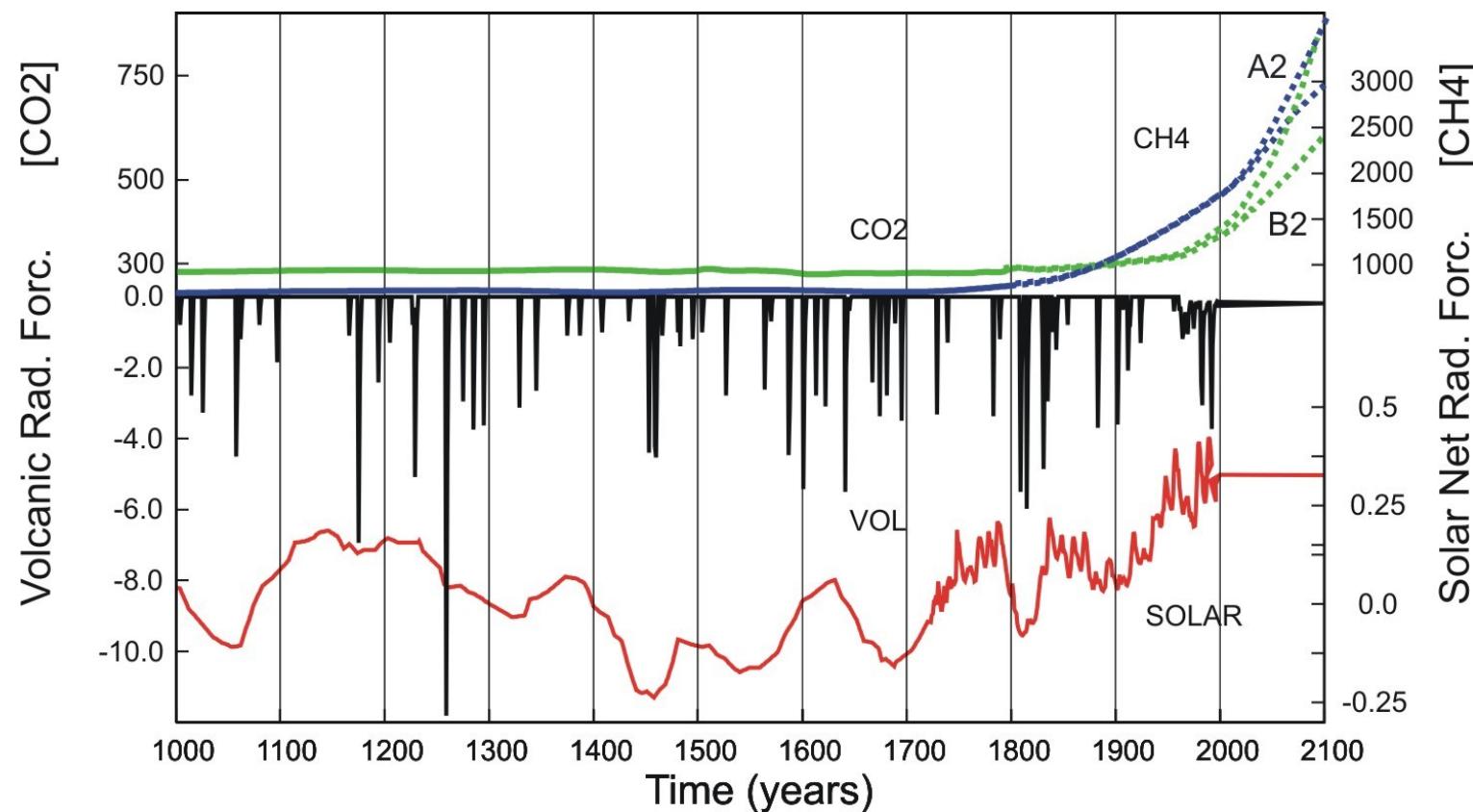
# Procesos simulados

- El **coste computacional** limita la resolución espacial.
- Los modelos tienen una parte **dinámica** y una serie de **parametrizaciones**..
- Cada vez tienen más componentes: aerosoles, ciclo del carbono, vegetación dinámica,...



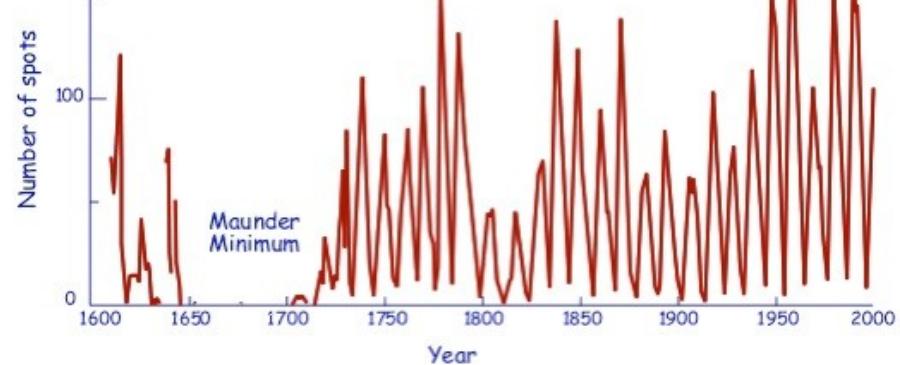
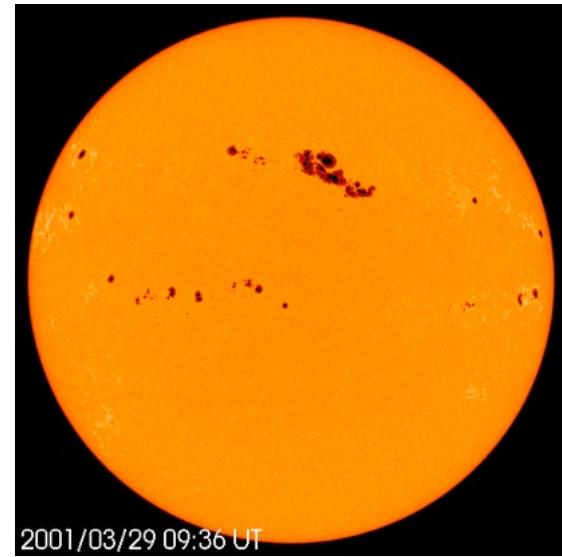
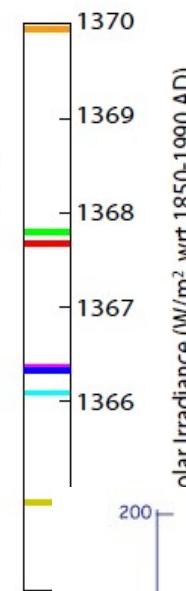
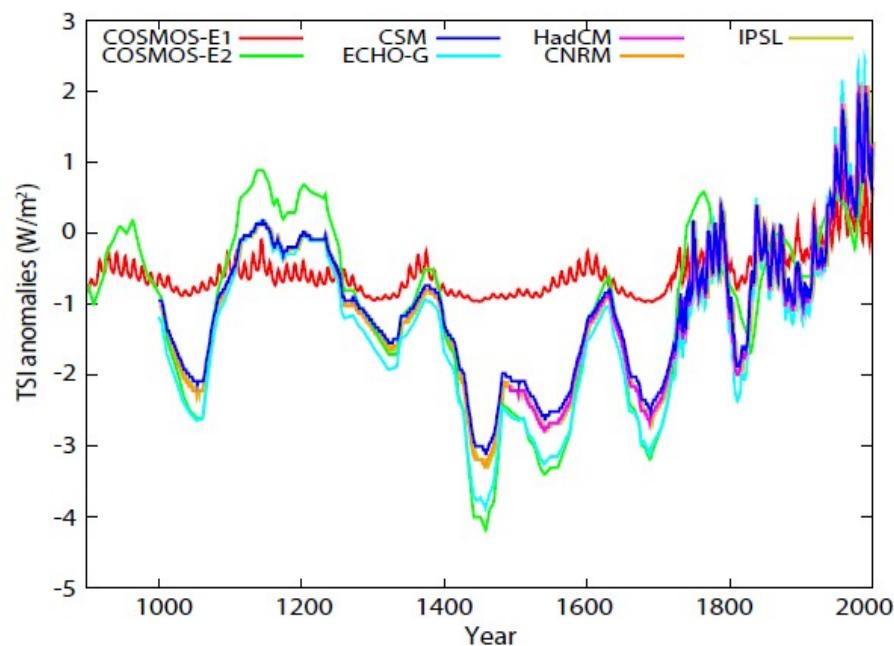
# Reconstrucción de los forzamientos

- Los modelos se alimentan por medio de reconstrucciones de diversos factores (algunos mejor conocidos que otros).



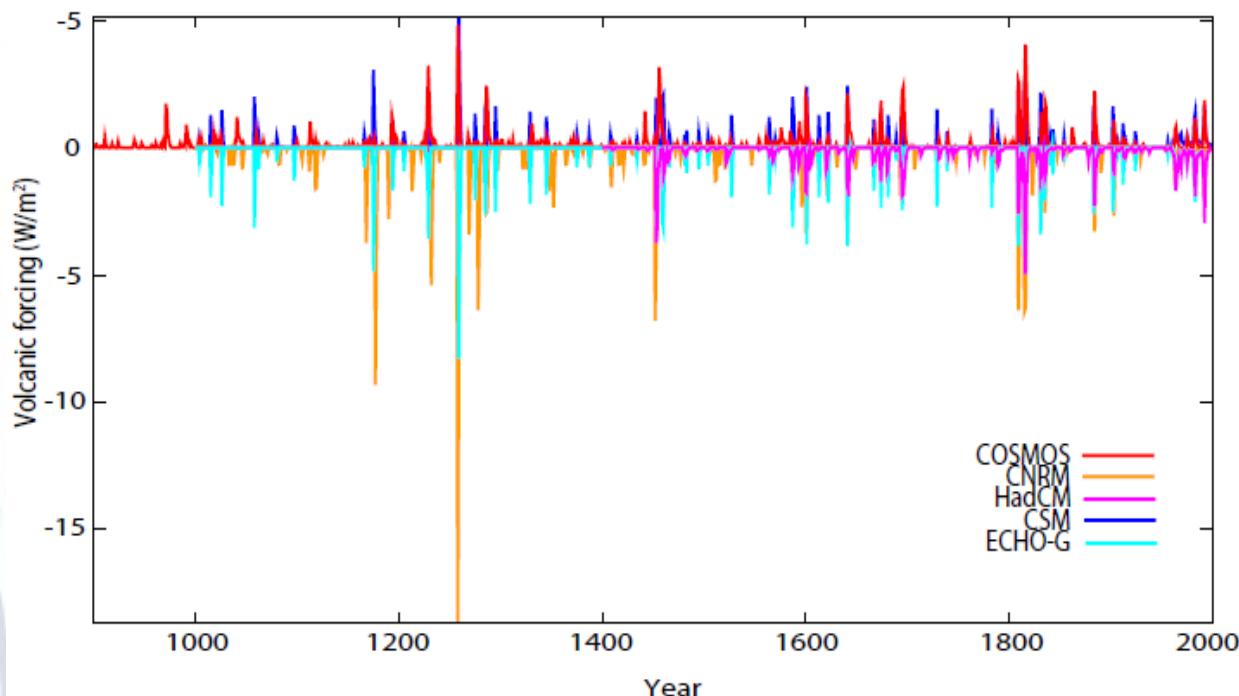
# El forzamiento solar no está claro

- Aunque hay acuerdo entre reconstrucciones independientes del forzamiento solar, la **amplitud de las oscilaciones** está en discusión.



# Los volcanes tampoco

- Las erupciones volcánicas dejan su huella en los testigos de hielo.
- Los más recientes, también en registros documentales.
- No es fácil estimar el **efecto radiativo neto** de estos eventos.



Pinatubo, 1991

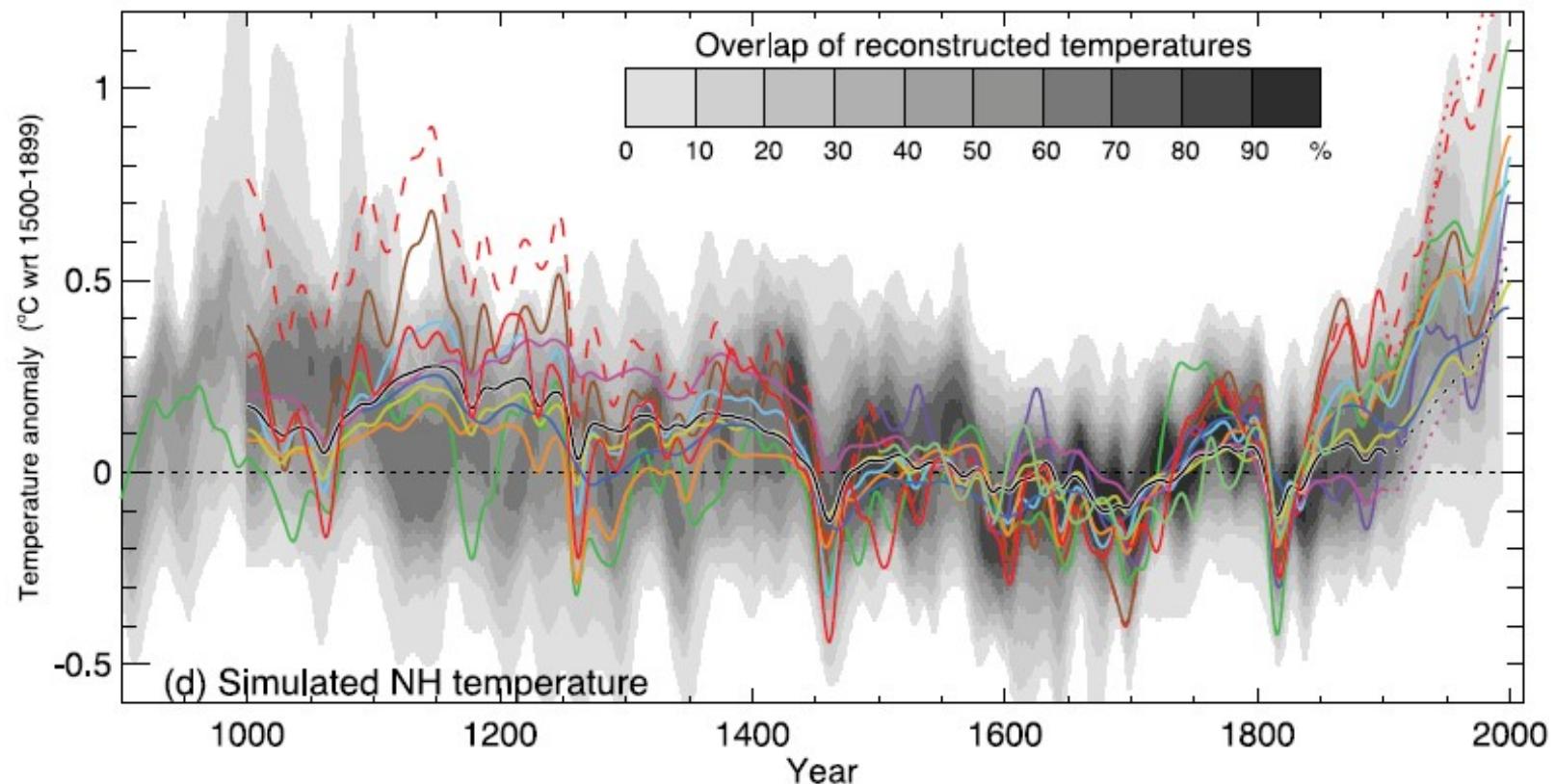
# El problema de las nubes

- Las nubes son fundamentales en el balance radiativo.
- Si efecto neto depende del tipo de nube, la altitud,...
- La resolución de los modelos impide su representación adecuada.
- Diferentes modelos (y parametrizaciones) arrojan **diferentes resultados**.



# Ensemble de simulaciones

- Diferentes simulaciones **difieren entre sí**.
- No es fácil decir cuál es mejor.
- Se realizan **conjuntos de simulaciones** y se extraen conclusiones de conjunto.



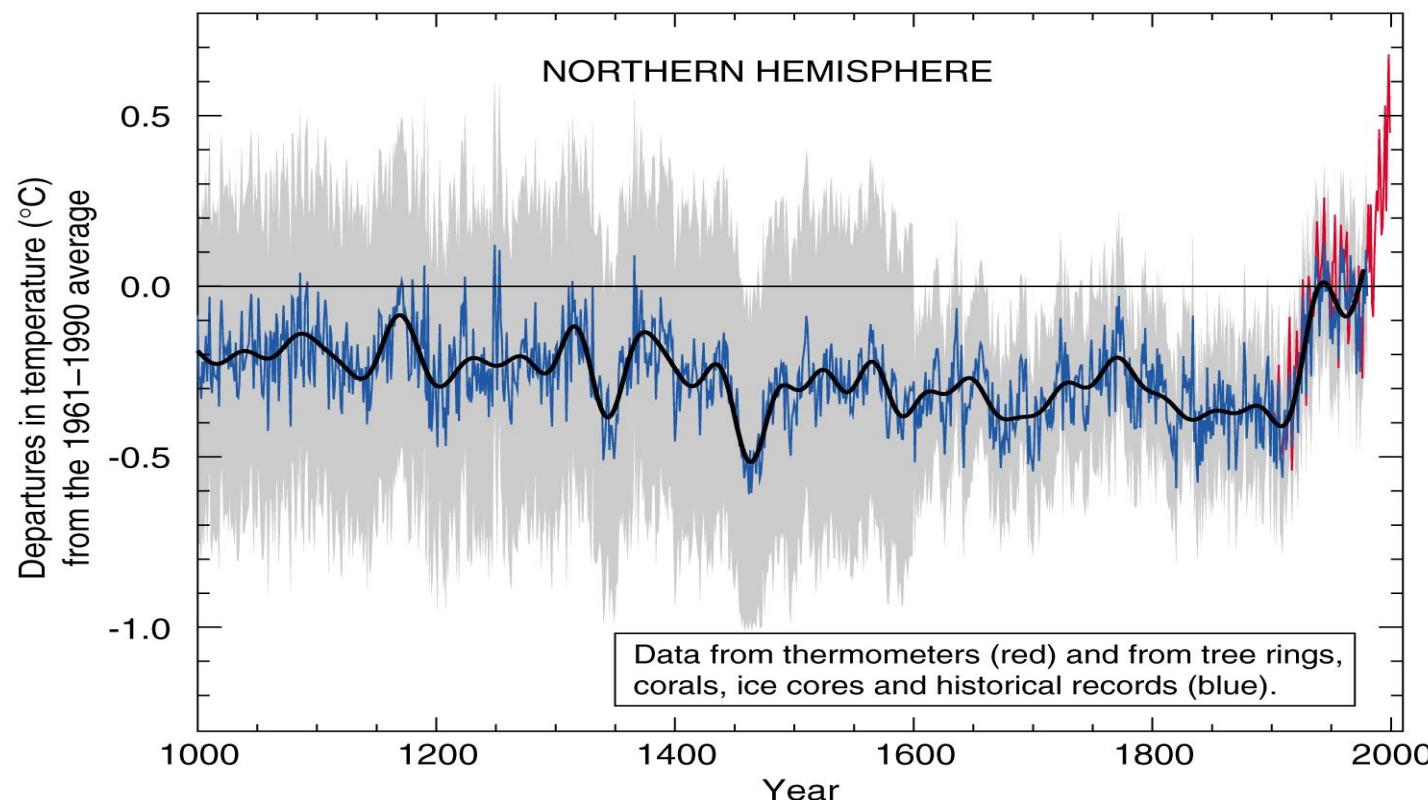
# Modelos como pseudorealidad

- Los modelos NO son la realidad. No se les puede pedir que repitan el pasado al detalle.
- La **variabilidad interna** impide que se repita la historia.
- Sin embargo, son **físicamente consistentes**.
- El modelo desarrolla un clima simplificado, pero consistente con las leyes físicas bien establecidas.
- Dentro del ordenador, tenemos control total sobre el clima, y podemos plantear experimentos hacia el pasado... y el futuro.



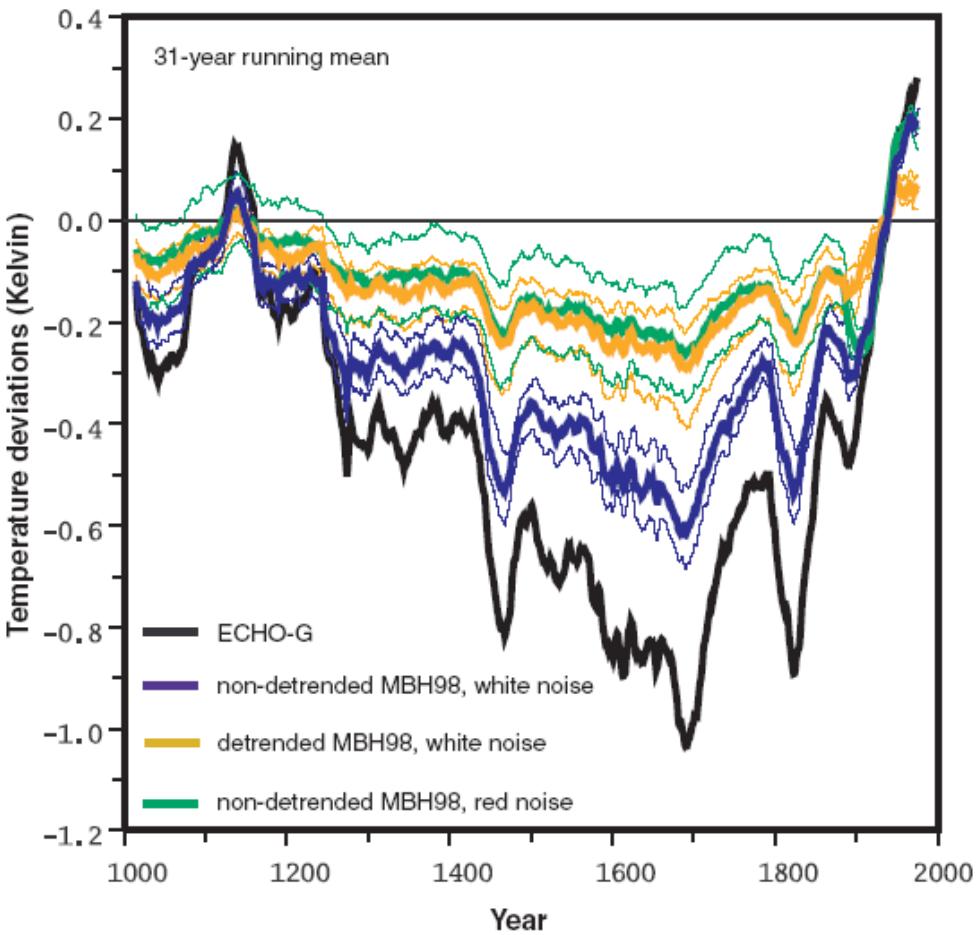
# Hockey stick theory

- En el año 2000, Mann propuso la teoría del stick de hockey basándose en un método de reconstrucción de **anillos de árboles**.
- Sus conclusiones sobre la evolución de la temperatura en el último milenio eran bastante llamativas... y polémicas.



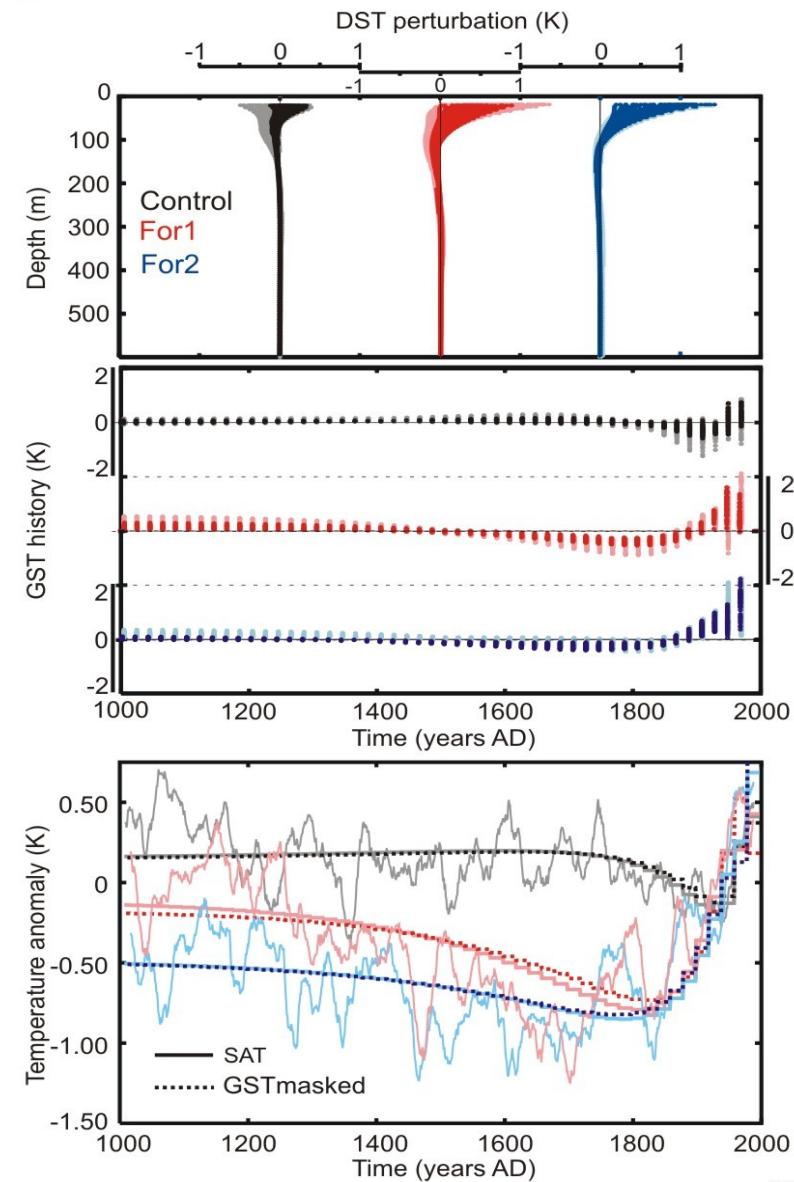
# Hockey stick theory

- Strock et al. trataron de replicar el cálculo dentro del modelo global ECHO-G.
- La ventaja es que, dentro del modelo conoce la *realidad*.
- Comparando la reconstrucción con la *realidad*, evalúas la metodología de reconstrucción.
- Su conclusión fue clara: el método de Mann infraestimaba la variabilidad.
- La tesis de Mann sigue en pie, pero **el palo de hockey es mucho más ancho**.



# ¿Los boreholes funcionan?

- Se ha argumentado que los boreholes no contienen información de la temperatura superficial debido a la **cobertura estacional de nieve**.
- Se puede simular el transporte de calor utilizando la ley de Fourier, y generar un **perfil de temperaturas sintético**.
- Se invierte, para reconstruir la temperatura, y se compara con la *real*.
- Si funciona, el método es consistente físicamente.
- Los boreholes siguen en pie...



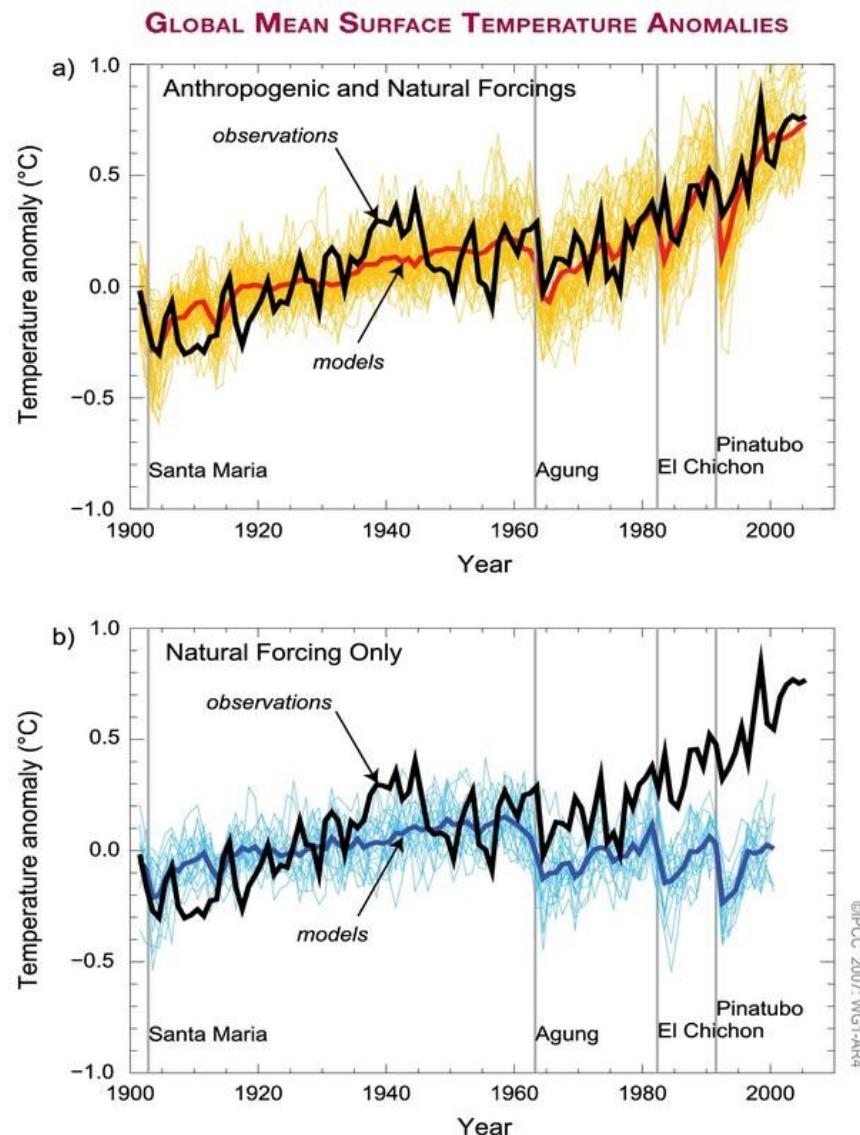
# Atribución del cambio climático

- El cambio climático, como la evolución, es un hecho observado, no una teoría conspiratoria.
- Lo que es discutible es **qué lo está causando**, (y qué puede pasar en el futuro).



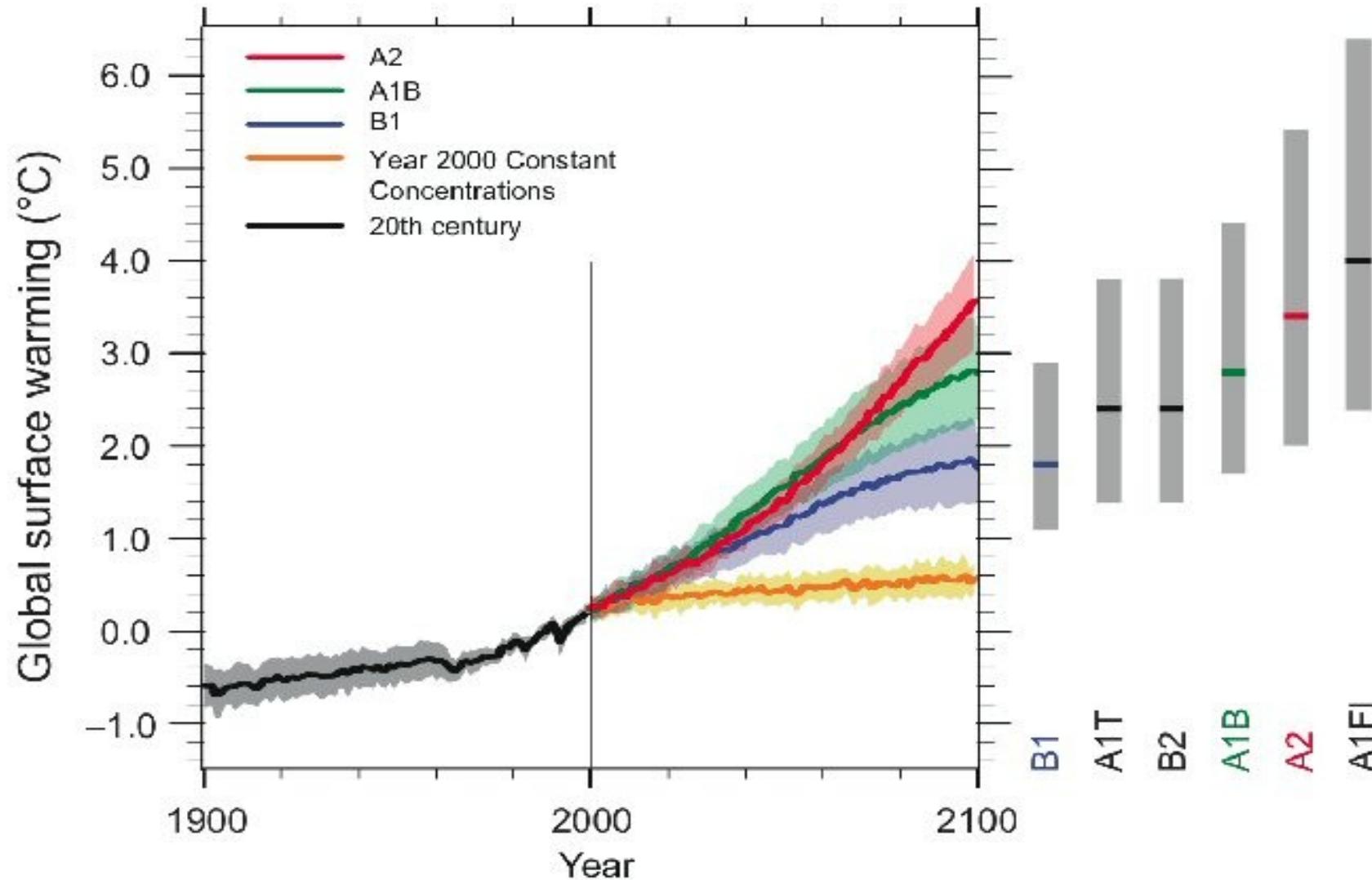
# Influencia antrópica y modelos

- En los modelos, a diferencia de la realidad, se puede “desconectar” la **influencia antrópica** y ver lo que pasa.
- Los modelos actuales son **incapaces de reproducir el calentamiento reciente** observado sin la ayuda de la influencia antrópica.
- Aunque podría ser que todos los modelos estuviesen mal simultáneamente y por diferentes razones... todavía hay espacio para la **incertidumbre**.



# El futuro

Multi-model Averages and Assessed Ranges for Surface Warming



# Conclusiones

- Hace millones de años la Tierra estaba más caliente que ahora (sin casquetes polares), y con niveles de CO<sub>2</sub> mucho mayores.
- En el último millón de años, lo normal han sido las glaciaciones.
- La última glaciación terminó hace 20 Ka, tras el LGM.
- Estamos en la última era interglaciar, el Holoceno.
- Las otras eras interglaciares no han sido ni más cálidas ni más duraderas que la actual.
- Los actuales niveles de gases de efecto invernadero sí son exclusivos del Holoceno.
- El ritmo al que la Tierra se está calentando en el último siglo no tiene precedentes en el último millón de años.
- No hay evidencias de que esta era interglaciar vaya a terminar hasta al menos 30 Ka... puede que más gracias a nosotros.

# Conclusiones

- Las reconstrucciones se basan en la combinación de muchos proxy independientes.
- Conforme nos acercamos al presente, la calidad y cantidad de proxies aumenta rápidamente.
- Los modelos climáticos son una herramienta muy potente en climatología.
- Estos modelos permiten explicar y atribuir el calentamiento observado en el último siglo.
- No se puede entender este calentamiento si no se tienen en consideración los factores antrópicos.
- Pese a las incertidumbres, todos los modelos climáticos coinciden en proyectar un clima cálido, con un mayor nivel del mar y menos cobertura de hielo continental.