

TEMA DEL DÍA

¿CALENTAMIENTO GLOBAL O GLACIACIÓN?

Global warming or glaciation?

Juan de Dios Centeno (*) y M^a Eugenia Moya-Palomares (**)

RESUMEN

El cambio climático global, esencialmente el calentamiento, es el primer problema ambiental que suscita la atención conjunto de los científicos, los políticos y los ciudadanos. Sin embargo, se olvida que aún estamos en medio de una glaciación y que la posibilidad de una nueva fase de avance de los glaciares (de la criosfera) es un riesgo natural tan considerable como el calentamiento. La revisión de la historia de las glaciaciones y sus fases de avance y retroceso, de las causas de ambas y de la situación actual, nos dejan aún muchos interrogantes por resolver antes de estar seguros de que no podamos volver a un clima más frío.

ABSTRACT

Global warming is the first environmental problem that catches the attention of scientists, politicians and citizens. However, we often forget that we still live into a glaciation and the possibility of a new advance of the cryosphere is a natural hazard, as important as warming. A revision of the history of glaciations and glacial phases, and their causes, shows many questions still unanswered. A colder climate is still possible.

Palabras clave: Glaciación, cambio climático, fases glaciares.

Keywords: Glaciation, climate change, glacial phases.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, y en particular el calentamiento global, es el primer problema científico en la historia que ha provocado una cumbre mundial de estados y ha convocado alrededor a toda la opinión pública. Pero ¿qué pasa con la glaciación?

Pocas veces he pensado tanto alrededor del título de un trabajo. Todo el mundo se pregunta qué pasará si el sistema climático se calienta y muy pocos se preguntan si puede enfriarse, si puede volver la glaciación. La realidad es que la pregunta, planteada así, no tiene sentido porque estamos en plena glaciación (aunque tal vez en una etapa final) y el clima podría evolucionar hacia una fase glacial o estadio frío; pero la opinión pública raramente puede entrar en estos detalles. Por eso he tenido que jugar con la ambigüedad.

Una glaciación es cualquier periodo de la historia terrestre en la que hay glaciares a nivel del mar, como ahora ocurre en la Antártica, Groenlandia, Alaska o la Tierra del Fuego. En realidad vivimos en una glaciación que podemos llamar glacia-

ción Cenozoica porque comenzó hace unos 25 m.a., en el tránsito Oligoceno-Eoceno, cuando la Antártida empezó a producir icebergs –y desde entonces no ha dejado de hacerlo. Sin embargo, el hemisferio norte, y en particular el casquete glacial ártico ha sufrido grandes oscilaciones que han llegado hasta la destrucción del casquete Ártico al final del Pleistoceno. La perspectiva de los países ricos, y de sus científicos, nos ha hecho ver la retirada del hielo de Europa y Norteamérica como el final de la glaciación, con una perspectiva nada moderna mientras otras ciencias, como la tectónica, se hacían globales.

Nada en el registro geológico apunta a que la última fase glacial fuera la última de las de la glaciación Cenozoica; es decir, que deberíamos esperar un nuevo avance de los hielos y que tenemos conocimiento suficiente, incluso, para hacer algunas predicciones.

Otro asunto es saber si el cambio climático a escala secular (o humana si se prefiere) puede llevarnos a una glaciación de escala geológica. El problema del cambio climático es, a priori, mucho más

(*) Dpto. de Geodinámica, Facultad de Geología, Universidad Complutense de Madrid, Av. Séneca s/n, E-28040 Madrid. E-mail: juande@geo.ucm.es

(**) Departamento de Geología. Universidad de Alcalá. 28871 Madrid.

amplio que el de las glaciaciones. Pero la existencia de casquetes glaciares y su evolución es un factor determinante del clima terrestre y condiciona la comprensión de alguno de los aspectos más importantes de los cambios del nivel del clima: el papel de la criosfera como regulador climático, los cambios del nivel del mar, los efectos de cambios de temperatura sobre la dinámica de los casquetes climáticos.

Por eso me ha parecido mejor, repasar la evolución de la glaciación Cenozoica y de sus oscilaciones para acabar jugando a la especulación –más que a la predicción– respecto a si es posible, o probable, un nuevo avance de los hielos.

FACTORES DEL SISTEMA CLIMÁTICO TERRESTRE

El sistema climático está compuesto de muchos subsistemas: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la biosfera y la litosfera (figura 1). Cada componente del sistema tiene sus propias características físicas y escalas temporales de respuesta. Los modelos numéricos de la criosfera y litosfera son distintos de los demás subsistemas y sus tiempos de respuestas son, en general, mucho mayores (entre miles y millones de años frente a los días o siglos de la atmósfera y las aguas oceánicas superficiales). Esta característica es de extrema importancia porque criosfera y litosfera actúan como reguladores climáticos frente a oscilaciones de los parámetros de frecuencia alta.

Sin embargo, un tiempo de respuesta largo no implica necesariamente una velocidad de cambio lenta, ya que la falta de respuesta puede dar paso a reajustes muy rápidos cuando se superan determinadas condiciones de umbral. Tanto la criosfera como la litosfera pueden parecer insensibles a un cambio acumulado de una variable del sistema (por ejemplo CO_2 atmosférico), pero cuando se supera alguna situación de umbral, su respuesta puede ser muy rápida.

La importancia de los subsistemas climáticos en la variabilidad del clima puede ser representada en un análisis espectral, como el de la figura 2. La curva representa la varianza de la temperatura media en la superficie, cuando se estudia en intervalos de tiempo de duración variable. Las mesetas de dicha curva representan el papel regulador de los subsistemas con mayores tiempos de respuesta, aunque sobre la tendencia general hay una serie de picos. Los picos situados sobre los 0,01 años corresponden a variaciones diurnas y sus armónicos y los picos de 1 año señalan las variaciones estacionales. Vuelven a detectarse máximos en la varianza cuando se contemplan períodos de 100.000, 41.000 y 25.000 años aproximadamente, que han sido reconocidos como respuestas a los ciclos orbitales de excentricidad, inclinación del eje y precesión de los equinoccios respectivamente.

Mientras la atmósfera y las capas superficiales del océano son los subsistemas responsables de los cambios diurnos y estacionales, la criosfera será el subsistema que ofrece la mayor respuesta a los ciclos orbitales.

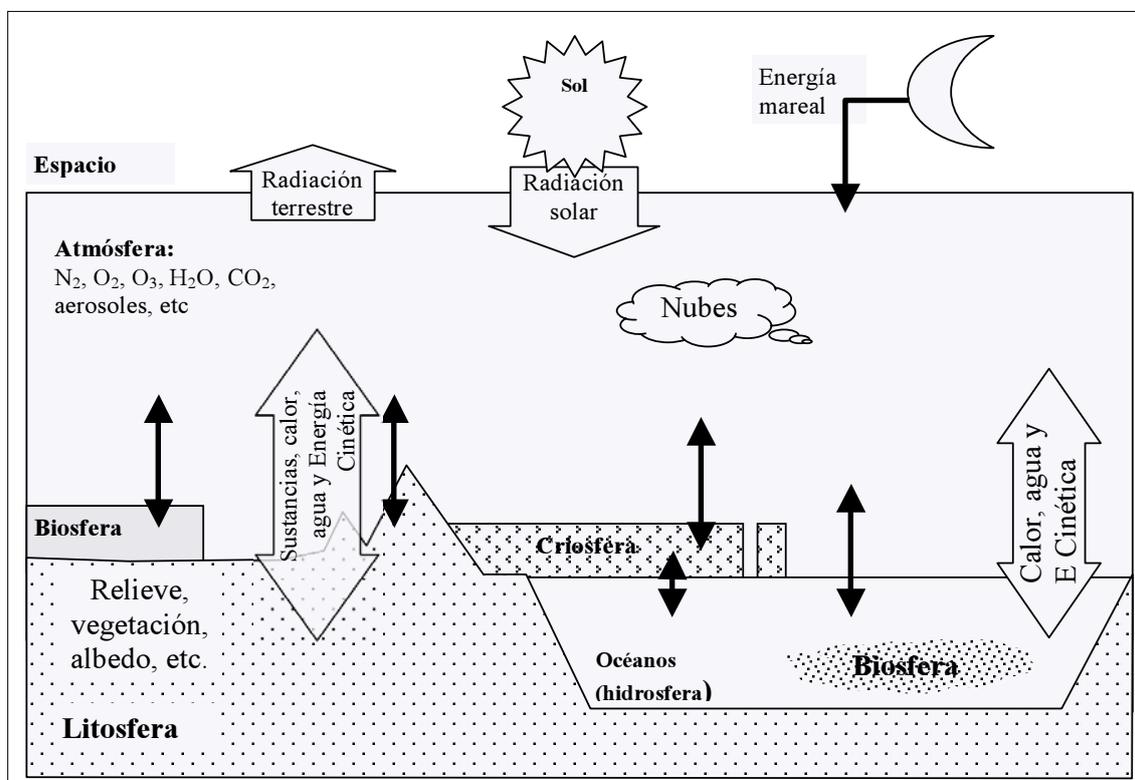


Fig. 1. Representación simplificada de los almacenes y flujos principales del sistema climático. Modificado de Crowley & North (1991)

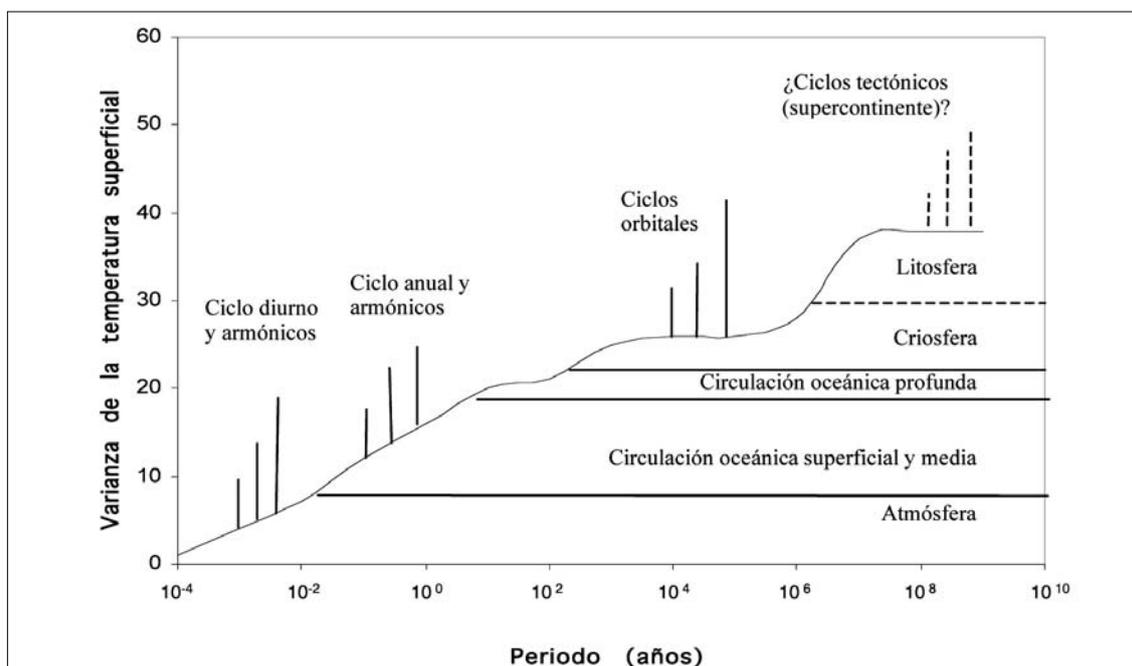


Fig. 2. Análisis espectral de la varianza de la temperatura de la superficie terrestre. Modificado de Mitchell (1968).

No se dispone de análisis espectrales para períodos mayores del millón de años (y en este sentido se ha modificado el gráfico original de Mitchell, 1968) pero, si aceptamos la influencia de la actividad tectónica en el clima, hay dos posibilidades: la existencia de periodicidad en la tectónica global, como en el modelo de supercontinente, o un carácter más aleatorio. En el primer caso volveríamos a tener un máximo de varianza bien definido, y en el segundo la varianza sería difícil de predecir para períodos de tiempo mayores.

En la figura 2, los picos de varianza de 100.0000, 41.000 y 25.000 años indican que algunos de los cambios más importantes del clima terrestre –por su amplitud y duración– están controlados por la criosfera. Si añadimos a esto que el desarrollo y la evolución de las glaciaciones puede, según algunos modelos, depender de los ciclos orogénicos, el estudio de las glaciaciones es una clave importante para la comprensión de los cambios climáticos.

CAUSAS DE LAS GLACIACIONES

Todos los modelos sobre el origen de las glaciaciones tratan de explicar los dos posibles mecanismos de enfriamiento climático:

El enfriamiento global, es decir, cambios en el balance climático global. Los modelos de balance energético, como el de la figura 3, pueden predecir el resultado de cualquier cambio en los parámetros que regulan la entrada y salida de energía en el Sistema climático.

La redistribución energética con enfriamiento localizado en las áreas polares. Los modelos de redistribución de energía, casi siempre modelos bidi-

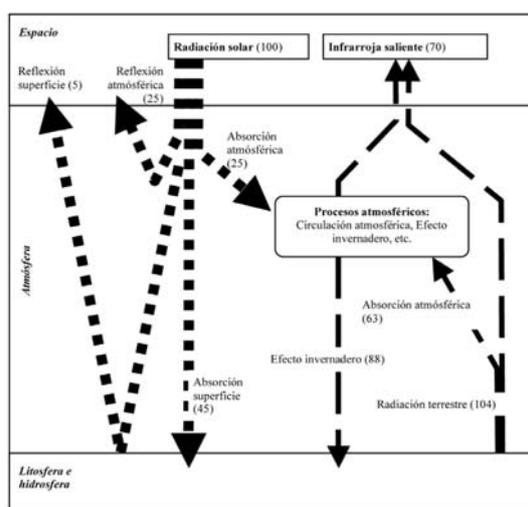


Fig. 3. Esquema de los elementos del balance global de radiación. Modificado de Scheider, 1990.

dimensionales (figura 4), predicen el efecto en la distribución geográfica de la temperatura según cambien las posibilidades de transporte de energía.

A su vez cualquiera de estos dos mecanismos puede responder a cambios en el planeta (causas terrestres) o cambios de tipo astronómico (causas externas). En la tabla 1 se han incluido algunas de las posibles causas de cambio en el balance o cambios en la redistribución.

Para discutir la validez de estos modelos conviene conocer la historia de las glaciaciones terrestres, sobre todo la historia de la glaciación Cenozoica y, especialmente, la de sus oscilaciones

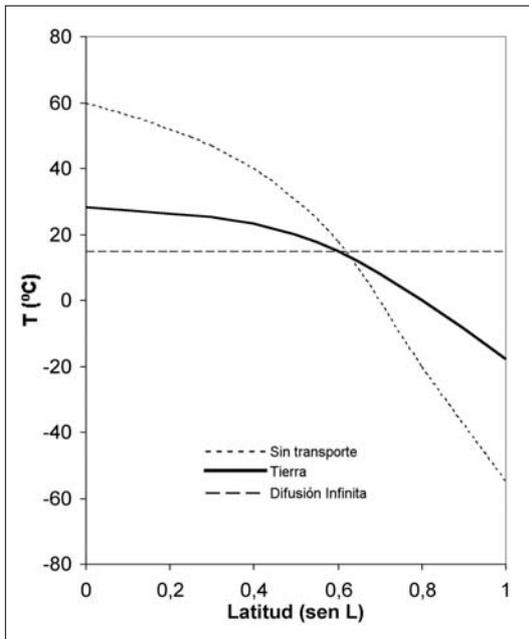


Fig. 4. Distribución latitudinal de la temperatura, a partir de la distribución actual de la radiación solar incidente, en tres escenarios de transporte de energía (según Hooke, 2005).

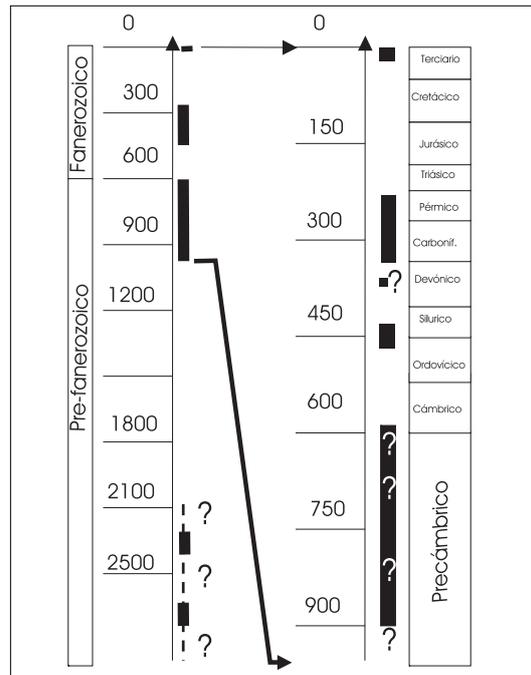


Fig. 5. Distribución de las glaciaciones en la historia geológica. Modificado de Crowell & North, 1991.

cuaternarias, ya que son las que tienen más importancia en la evaluación de los cambios climáticos actuales y en la respuesta de los casquetes glaciares.

Glaciaciones pre-cenozoicas

A lo largo de la historia geológica hay numerosas huellas de la existencia de casquetes glaciares a nivel del mar, que es el criterio que define convencionalmente una glaciación. La duración de estos períodos depende de los criterios para su identifica-

ción, pero poco a poco se va comprendiendo que las glaciaciones son una configuración del sistema climático tan normal como la de la ausencia de casquetes (figura 5).

Una apreciación muy limitada permitió pensar en la existencia de un clima "normal" interrumpido puntualmente por glaciaciones o "edades de hielo". Poco a poco se pasó a entender que las oscilaciones del sistema climático han llevado de los períodos de glaciación a los de no glaciación. Pero se ha mantenido la

Tabla 1. Causas de glaciación o de crecimiento de los glaciares a escala global.

	Cambios del balance global	Cambios en la distribución de energía
Causas extraterrestres	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cambios en la actividad solar. ▪ Posición del Sistema Solar en la galaxia. ▪ Impactos de asteroides. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ciclos de la órbita terrestre: precesión, inclinación y excentricidad.
Causas terrestres	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cambios de composición atmosférica: biosfera y tectónica. ▪ Cambios de intensidad del campo magnético. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cambios en la distribución de los continentes. ▪ Orogenia y creación de áreas de gran altitud

idea de dos configuraciones básicas del sistema climático porque su funcionamiento, con o sin casquetes, es enormemente diferente y, además, los cambios de una a otra configuración parecen ser muy rápidos.

Las conexiones entre las glaciaciones y los acontecimientos paleogeográficos son muchas y bastante complejas, pero se manejan varias hipótesis sobre las principales causas de las glaciaciones. Comentaremos las tres hipótesis más factibles (figura 6): efecto anti-invernadero biológico, la distribución de los continentes y el efecto de las orogenias.

El efecto anti-invernadero (figura 6a) se refiere a la fijación de CO₂ atmosférico por fotosíntesis (u otro mecanismo). Es un proceso de cambio en el balance global por causas terrestres. Esta podría ser la causa, sobre todo, de las glaciaciones precámbricas, que son contemporáneas del la gran explosión de la vida. Lo cierto es que la hipótesis está poco con-

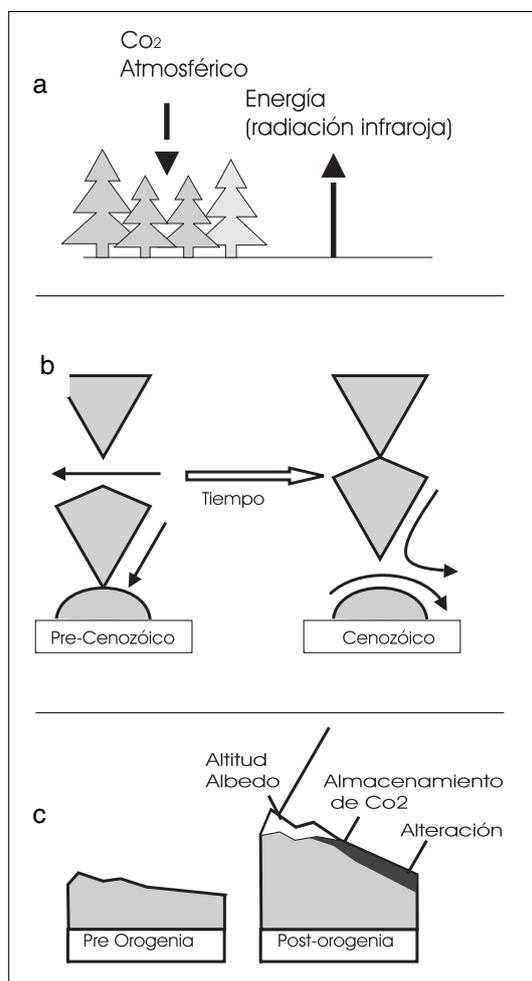


Fig. 6. Las tres hipótesis más aceptadas sobre el origen de las glaciaciones. A. Un incremento de la vegetación favorece la fijación del CO₂ atmosférico dando lugar a un efecto "antiinvernadero". B. Las corrientes circumpolares favorecen episodios glaciares (Cenozoico) y las corrientes ecuatoriales favorecen los episodios no glaciares (Pre-cenozoico). C. la formación de orogenias da lugar a la formación de extensos campos de nieve que hacen aumentar el Albedo.

trastada pero, especialmente cuando el efecto invernadero nos preocupa tanto, los mismos modelos que sirven para simular un calentamiento podrían servir para simular el enfriamiento.

La distribución de los continentes (figura 6b) tiene dos papeles esenciales. Primero, que la presencia de una zona continental en los polos facilitaría, en cualquier momento de la historia geológica, la acumulación de hielo y la formación de casquetes (lo que tiene un efecto de realimentación positiva ya que el hielo acumulado aumenta el albedo global). En este sentido, en todas las glaciaciones de las que queda registro, uno de los polos está situado sobre una región continental. Segundo, que algunas distribuciones de los continentes dificultan la redistribución de la energía desde las zonas tropicales hacia las polares; por ejemplo, en los tiempos de Pangea, un único océano debía tener una gran eficacia como distribuidor de energía. En ambos casos, se trataría de un cambio importante en la distribución de la energía en la atmósfera y los océanos controlado por causas terrestres.

Las orogenias (figura 6c), por último, tienen también tres efectos. Primero, elevan la altitud media de las zonas continentales y, con ello, reducen la temperatura media y facilitan la acumulación de nieve y la formación de glaciares de montaña (con el mismo efecto sobre el albedo). Segundo, ponen una gran cantidad de silicatos a disposición de los agentes de meteorización que, en este proceso, fijan gran cantidad de CO₂ atmosférico en sedimentos transportados por los ríos hacia los océanos. Tercero, modifican la circulación atmosférica y con ello la redistribución de energía. Aquí, se trataría de una causa terrestre que provoca a la vez un cambio en el balance global y en la distribución de energía.

En algún momento se ha querido encontrar cierto carácter cíclico en la tectónica de placas y en la formación de cordilleras, como en el modelo del ciclo del supercontinente. Si hay un ritmo en la fragmentación y agrupación de los continentes, y por ello en la formación de cordilleras, también deberíamos encontrar ese ritmo en las glaciaciones. Resulta fácil "intuir" ese ritmo cuando se compara la historia tectónica y la glacial, pero encontrar una conexión científica es más difícil porque un número de variables del sistema climático, y sobre todo alta frecuencia de algunos cambios climáticos (como los indicados en la figura 1) enmascara la posible relación entre la tectónica y clima.

La especulación sobre la causa de las glaciaciones pre-cenozoicas es bastante interesante, pero todas las causas mencionadas parecen haber contribuido a la historia glacial

EL ESTABLECIMIENTO DE LA GLACIACIÓN CENOZOICA

La glaciación Cenozoica comenzó a desarrollarse durante el Eoceno, momento en que se inicia un enfriamiento a escala global, y hace aproximadamente 26 m.a. se detectan los primeros glaciares antárticos a

nivel del mar (Ehrmann & Mackensen, 1992). Cuesta trabajo aceptar que lo que siempre se conoció como la glaciación cuaternaria se remonte a Oligoceno, pero el registro geológico así lo demuestra. La última glaciación no duró un millón de años, sino que se extiende desde hace casi 30 m.a. hasta la actualidad.

A lo largo del Terciario, los continentes y los orógenos adoptan una disposición muy parecida a la actual y parece bastante clara una conexión temporal entre la evolución paleogeográfica y el inicio y extensión de la glaciación. En este sentido, el esquema que ya en 1985 presentaba Selby ilustra bastante bien esta relación (y aparece modificado en la figura 7).

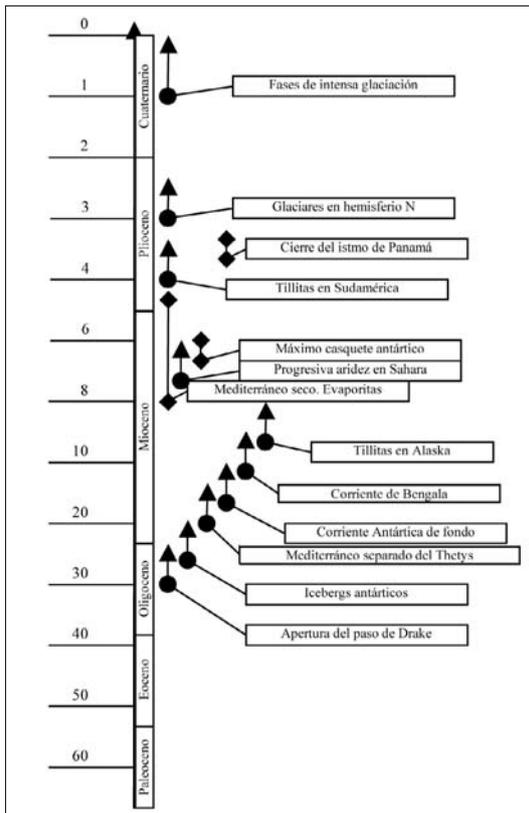


Fig. 7. Cambios paleogeográficos cenozoicos y principales acontecimientos en la historia de la glaciación y el clima cenozoicos (modificado de Selby, 1985).

Los acontecimientos paleogeográficos más relevantes que pudieron determinar el crecimiento de los casquetes antártico y ártico parecen ser los que se producen entre el Oligoceno y el Mioceno, pero quedan por resolver algunos problemas respecto a la primera acumulación de hielos en la Antártida (figura 8). Entre tales acontecimientos los más importantes son:

- Apertura del paso de Drake.
- Apertura progresiva del Atlántico.
- Cierre del Tethys en el Mediterráneo oriental.
- Apertura del estrecho de Dinamarca.
- Emersión del istmo de Panamá.
- Levantamientos alpinos, en especial la cordillera Himalaya.

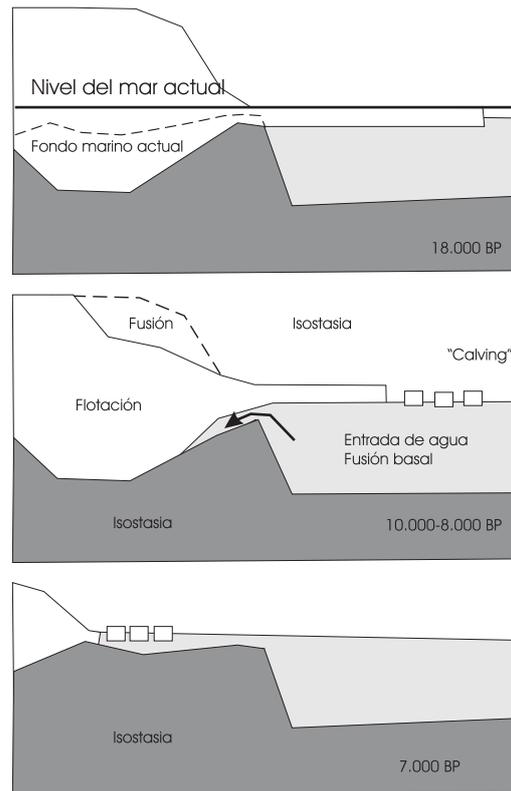


Fig. 8. Mecanismo de destrucción de domos marinos y banquisas (modificado de Hughes et al., 1977)

Además, estos acontecimientos provocaron un cambio del sistema climático global con la migración hacia latitudes bajas de los cinturones de presión, de vegetación y de las regiones morfogenéticas.

En la Antártida el máximo glaciar se ha datado entre 9 y 14 m.a. BP (Denton, 1984) basándose en la edad de los basaltos que fosilizan las morrenas del máximo avance glaciar, o 2,7-3,2 m.a. BP (Hoffe et al., 1992) mediante el estudio de la acumulación de Be a partir de rocas expuestas tras el retroceso glaciar.

En el hemisferio Norte, las primeras huellas de glaciares a nivel del mar se remontan a 9-10 m.a. BP en Alaska. Sin embargo, los primeros depósitos de "ice-rafting" (sedimentos transportados por icebergs y acumulados en depósitos marinos) no aparecen hasta 5 m.a. BP, casi simultáneamente a las primeras huellas glaciares en Sudamérica.

Con este retraso en el desarrollo de la glaciación comienzan las diferencias entre ambos hemisferios. Mientras hay pocas huellas de oscilaciones mayores en el casquete Antártico, en el hemisferio Norte la amplitud de los cambios climáticos fue tan grande que, al menos en una ocasión (el Holoceno), el casquete Ártico llegó a ser destruido.

LAS OSCILACIONES CLIMÁTICAS CUATERNARIAS

Las oscilaciones climáticas del cuaternario, principalmente en el hemisferio norte, constituyeron tradicionalmente el principal asunto de estudio en la glaciología y ahora son la base para la predicción del clima y los glaciares a escala global. Para el estudio de las oscilaciones de este período ha sido imprescindible el uso de métodos cada vez más distanciados de las áreas glaciares, pero que han permitido un modelo climático completo para todo el Cuaternario. Los métodos más usados pueden clasificarse según los materiales estudiados:

a. Estudios en depósitos continentales

- Con el estudio de materiales derivados directamente de la actividad glaciaria se generó el modelo clásico alpino de cuatro ciclos cuaternarios y todas las interpretaciones respecto a la dinámica local del hielo.
- Mediante el estudio de terrazas fluviales, depósitos de loess y paleosuelos, fuera del área de actividad glaciaria, se detectaron por primera vez los episodios estadales e interstadiales dentro de las fases glaciares.
- Para los estudios de cronoestratigrafía y oscilaciones climáticas se utiliza la palinología, el estudio de las asociaciones de formas fósiles y la industria prehistórica.
- Recientemente se está ensayando el estudio de Be acumulado para datar el tiempo de exposición a los rayos cósmicos de rocas previamente cubiertas por los hielos.

b. Estudios en depósitos oceánicos

- Las asociaciones de organismos permiten elaborar datos sobre la temperatura y salinidad del agua en el momento de su sedimentación. Además sirven para establecer una cronoestratigrafía detallada.
- Las terrazas marinas permiten reconstruir las variaciones del nivel del mar e indirectamente el espesor del hielo acumulado.
- La cantidad de carbonatos en sedimentos oceánicos da una idea indirecta de la cantidad de detritos derivados de "ice-raftings".
- Las proporciones isotópicas ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) en conchas de foraminíferos o en testigos de hielo procedentes del casquete Antártico u otros glaciares permiten reconstruir las oscilaciones en el volumen de hielo a escala global e indirectamente las de temperatura y nivel del mar.

Dentro del período de tiempo ocupado por una glaciación se suele usar una jerarquía para clasificar las oscilaciones climáticas, dividiendo la glaciación en fases glaciares e interglaciares, y las fases glaciares en estadales e interstadiales. La introducción del método $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ llevó a la diferenciación de estadios isotópicos: períodos de tiempo entre un máximo isotópico de una fase glaciaria y el primer mínimo de una fase interglaciaria (figura 9).

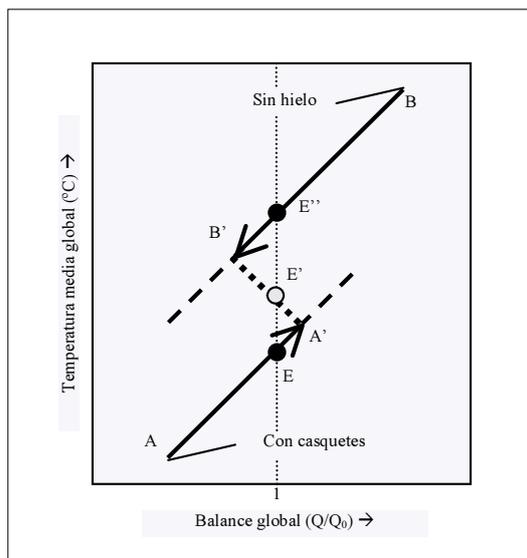


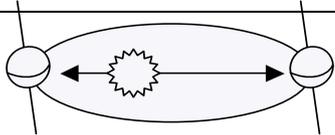
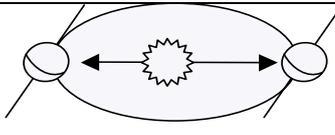
Fig. 9. Un aumento de balance global en un planeta con hielo produce un aumento casi lineal de la temperatura (A-A') hasta que se produce la fusión total del hielo. Una reducción del balance de radiación en un planeta sin hielo produce una reducción bastante lineal de la temperatura (B-B') hasta que las bajas temperaturas producen la formación de hielo. La conexión entre estas dos configuraciones es un fenómeno catastrófico ya que la línea A'-B' representa estados inestables del sistema. Con el actual balance de radiación ($Q/Q_0 = 1$) sólo los puntos E y E'' representan estados posibles, entre los que media un gran salto de temperatura.

El estudio conjunto de todos estos datos y de las dataciones precisas existentes ha permitido establecer un cuadro detallado de las oscilaciones climáticas plio-cuaternarias. Para el último millón de años, que equivaldría a lo considerado como cuaternario a principios del siglo XX, los cuatro ciclos clásicos alpinos (Günz, Mindel, Riss y Würm) corresponden en realidad, como mínimo, a unas 22 etapas isotópicas y, por tanto, a 11 ciclos glaciares.

LA CAUSA DE LAS OSCILACIONES GLACIALES CUATERNARIAS

Aunque se ha tratado de relacionar las oscilaciones glaciares cuaternarias con varias causas terrestres o extraterrestres (como los ciclos de manchas solares), actualmente se acepta como la causa principal la propuesta por Milutin Milanković (1879-1958), por cambios en la intensidad de radiación recibida como consecuencia de los ciclos de variación de la excentricidad de la órbita terrestre (93.408 años), la inclinación del eje de rotación (41.000 años) y la precesión de los equinoccios (25.920 años).

En términos generales, las oscilaciones han sido más evidentes en el hemisferio Norte. Consecuentemente, Milanković ya propuso que las fases de avance global de los glaciares correspondían con

Tabla 2. Configuraciones orbitales y oscilaciones			
Configuración orbital favorable para la acreción del hielo		Máxima excentricidad Pequeña inclinación del eje de rotación Solsticio de verano (N) en el Perihelio (máxima distancia en verano del hemisferio N)	
Hemisferio Norte	Máxima insolación en invierno (entrada de borrascas húmedas en ártico)		Mínima insolación en verano (alta fusión en verano ártico)
	Máxima insolación en verano		Mínima insolación en invierno
Configuración orbital favorable para la fusión del hielo		Mínima excentricidad Gran inclinación del eje de rotación Solsticio de verano (N) en el Afelio (mínima distancia al Sol en verano del hemisferio N)	
Hemisferio Norte	Máxima insolación en verano (altas tasas de fusión y "calving")		Mínima insolación en invierno (poca entrada de borrascas húmedas)
	Máxima insolación en invierno		Mínima insolación en verano

periodos de veranos frescos e inviernos templados en el hemisferio N. Según su idea, que ha sido luego desarrollada por autores como Redman & McIntyre (1981), la precipitación de nieve en las latitudes altas se produce todos los inviernos (al menos en el Cuaternario), pero la acumulación se ve favorecida por los inviernos cálidos, que permiten la llegada de borrascas húmedas a la región ártica, y los veranos frescos, que no favorecen la fusión y la producción de icebergs. Al contrario, los periodos de inviernos fríos impiden la llegada de precipitaciones en invierno al núcleo de los casquetes y los veranos cálidos producen altas tasas de fusión y formación de icebergs. Estas condiciones se relacionan con los tres ciclos orbitales, de forma que las condiciones orbitales que favorecen el crecimiento y retroceso de los hielos están reflejadas en la tabla 2.

El ajuste temporal es bastante bueno. Las últimas tres fases de destrucción de hielo ártico (hace 249.000, 127.000 y 11.000 años) coinciden con episodios de veranos cálidos e inviernos fríos en el hemisferio Norte. Las últimas fases de crecimiento (por ejemplo las de hace 187.000 y 73.000 años) coinciden con veranos cálidos e inviernos templados en el hemisferio Norte.

A pesar de ese ajuste temporal, quedan algunos problemas por resolver antes de aceptar definitivamente el modelo de Milanković, en especial, para entender las oscilaciones del casquete Ártico. El principal problema es que cualquiera que fuera el volumen del casquete ártico, entre 84 y 98 Gm³ (Gigametros cúbicos), las variaciones orbitales no produjeron una variación energética suficiente para provocar la fusión en áreas polares, ni el suficiente

enfriamiento como para la construcción del casquete. En ambos casos, hay que buscar un mecanismo de refuerzo del efecto orbital sobre la radiación y sobre la acreción y destrucción de hielo.

En cuanto al crecimiento, el hallazgo de hielo formado por congelación basal (Oerter et al., 1992) cambia radicalmente los tiempos necesarios para el crecimiento del casquete. Según indican los cambios en el nivel del mar, el casquete ártico se construyó en un periodo de unos 9.000 a 13.000 años. Mientras que las nevadas necesitarían 20.000 a 30.000 años para acumular el hielo del casquete, la congelación de agua marina permitiría la construcción del casquete en un periodo de tiempo de incluso 1.000 años. Teniendo en cuenta que buena parte del casquete Antártico está apoyado bajo el nivel del mar, y que eso debió ocurrir con el casquete Ártico, la congelación de agua marina parece imprescindible para explicar el crecimiento del casquete.

En cuanto a la última fase glacial parece que la destrucción del casquete Ártico se produjo en un periodo de unos 10.000 años (entre 16.000 y 6.000 BP). El mecanismo orbital suministró un total de $2,5 \times 10^{24}$ J en la zona ártica y en ese periodo, pero un albedo del 75% produjo un suministro efectivo de unos $5,0 \times 10^{23}$ J. Los cálculos indican que la fusión del casquete requería un suministro energético de $7,6 \times 10^{23}$ a $8,7 \times 10^{23}$ J, es decir, que el mecanismo orbital suministró el 30% o menos de la energía necesaria. Sin embargo, la destrucción de banquisas y domos marinos (ice-calving) podría determinar el traslado de grandes volúmenes de hielo (ice-rafting) hacia las bajas latitudes donde se dispondría de la energía necesaria para su fusión (Hughes et al., 1977 y Doake & Vaughan, 1991).

El proceso se retroalimenta positivamente, ya que la fusión superficial del hielo, cuando éste se apoya sobre fondo situado bajo el nivel del mar, produce el bombeo de agua templada bajo las corrientes de hielo, por flotación de la capa de hielo adelgazada por fusión. Esto produciría primero un retroceso de tipo catastrófico y después la liberación de "icebergs" que serían fundidos en latitudes subtropicales.

EL CASQUETE ÁRTICO Y LAS LATITUDES MEDIAS

Durante los periodos de crecimiento del casquete, al igual que en la actualidad, el suministro de humedad para la precipitación en áreas árticas se encontraba en el Atlántico. Desde allí, las borrascas pasaban hacia el Ártico entre Groenlandia y Europa, contribuyendo a la acumulación de nieve sobre las banquisas o tierras emergidas. Sin embargo, conforme el casquete se fue extendiendo, el frente polar y la circulación superficial del océano atlántico se fueron modificando, desplazando la trayectoria de las borrascas hacia el sur.

Hace 18.000-16.000 años, cuando se inició el retroceso del casquete Ártico, las borrascas circulaban con una trayectoria aproximada W-E chocando con la península Ibérica. Se calcula que entonces

los icebergs llegaban al Cantábrico cuya superficie se congelaría en los fríos inviernos inducidos por la disposición orbital de ese momento. En esta situación, el suministro de nieve al ártico quedó muy reducido y la llegada de un periodo de veranos cálidos facilitó el inicio de la destrucción del casquete. Sin embargo, las aguas frías y poco salinas de fusión ocuparon la superficie del Atlántico Norte a lo largo de todo el Holoceno, manteniendo la trayectoria meridional de las borrascas.

Estos cambios en la trayectoria de las borrascas en el último ciclo glacial explican algunas observaciones en la Península Ibérica:

- La escasez de huellas glaciares correspondientes a los ciclos más antiguos puede explicarse porque sólo el último ciclo produjo un desplazamiento tan importante del frente polar.
- Las borrascas que atravesaban la península en esos momentos procederían de un océano superficialmente frío, por tanto, una mala fuente de humedad. Así se explican las enormes diferencias del glaciario cuaternario cuando nos alejamos del Atlántico.
- Las condiciones climáticas en ese momento debieron ser extremadamente frías, y en el interior secas, ya que las borrascas provenían de una superficie oceánica muy fría. De ahí la abundancia de depósitos eólicos en el interior, sobre todo en la meseta Norte.

El avance de los hielos y el enfriamiento de la superficie del Océano como consecuencia de las aguas de fusión bloquearon esta fuente de humedad mediante dos mecanismos: reduciendo la evaporación, como consecuencia de la temperatura, y desviando la trayectoria de las borrascas invernales hacia latitudes medias. Algunas pruebas de esta situación se encuentran en el estudio de la fauna de los depósitos oceánicos (Ruddiman & McIntyre, 1988). En estos momentos el mecanismo de retroceso afectaría por tanto a domos cuyas áreas de acumulación pasaban por un periodo de escasas precipitaciones y, por ello, especialmente inestables.

Además, centrándonos en la criosfera, hay contradicciones respecto a los mecanismos y velocidad de respuesta de los casquetes glaciares. El carácter continental de los casquetes actuales (aunque no debemos olvidar que buena parte del casquete Antártico tiene su base bajo el nivel del mar) puede resistir grandes cambios en el régimen energético de las latitudes polares sin respuestas importantes. En todo caso, la gran pregunta es: cuando los casquetes glaciares, en especial el Antártico, superen el umbral de respuesta ¿A qué velocidad lo harán? En este sentido, hay variables como la posición de su base respecto al nivel del mar, el espesor de los sedimentos subglaciares o los mismos mecanismos de flujo glacial que pueden ser la clave de la respuesta.

El mecanismo de destrucción del casquete Ártico es un buen ejemplo del reajuste "catastrófico". Y si los modelos numéricos son ciertos el proceso es muy probable aunque fuera mediante otros mecanismos.

El modelo de la figura 9 representa la relación entre temperatura media global y balance energético cuando se considera el factor albedo. Su configuración, similar a la de una función de “catástrofe en cúspide” de la teoría de Catástrofes, demuestra que el “salto repentino” hacia una atmósfera más caliente y un planeta sin casquetes puede producirse con un pequeño cambio en el balance global. En tal caso, el cambio de temperatura sería enorme y, una vez iniciado, difícil de detener. Como consecuencia del comportamiento histerésico de dichas funciones la recuperación de un clima “cenozoico” requeriría un balance energético mucho “más frío” que el actual.

EL FUTURO. CUESTIONES POR RESOLVER.

La enorme cantidad de variables dificulta toda previsión de futuro. El resultado de las previsiones depende de los parámetros considerados como relevantes y la escala temporal de la previsión.

A la escala de milenios o intervalos mayores parece que podemos concentrarnos en las variaciones orbitales, salvo cambios imprevisibles como los accidentes tectono-climáticos del tipo del volcán Pinatubo. Los ciclos orbitales predicen que, pasada la última fase de destrucción del casquete ártico, un nuevo episodio de crecimiento estaría a punto de llegar (dentro de unos 10.000 años). De todas formas, estas predicciones son poco prácticas y no verificables, lo que reduce bastante su interés.

A la escala de decenios parece más interesante plantear la influencia de los cambios de composición atmosférica debidos a la actividad humana. Existen previsiones, pero los expertos no están de acuerdo en algunos aspectos:

- La cuantificación de los mecanismos de retroalimentación, por ejemplo fijación de CO₂ en las rocas y los organismos, que pudieran reducir la variación del efecto invernadero.
- El efecto de un calentamiento del Atlántico Norte sobre la circulación de las borrascas, hasta el punto de que el calentamiento pudiera convertirse en un mecanismo forzador del crecimiento del hielo.
- El efecto de la fusión de casquetes sobre la superficie oceánica y las corrientes profundas. Por ejemplo, las aguas de fusión pueden bloquear la evaporación en el Atlántico Norte, reduciendo así la formación de aguas de alta salinidad y acabando con la corriente termo-halina de aguas profundas, que es fundamental para entender la redistribución energética del planeta.
- La estabilidad del casquete Antártico. Un casquete continental es más estable que uno marino, pero el inicio de la fusión (con el consiguiente ascenso del nivel del mar) y el hecho de que buena parte del casquete Antártico está apoyado en suelo situado bajo el nivel del mar, podría producir una situación de inestabilidad y destrucción muy rápida de la masa de hielo.

Los modelos son muy sólidos en lo que se refiere al calentamiento global, algo menos cuando se trata de predecir el cambio de temperatura a escala regional y muy pobres a la hora de enfrentarse al comportamiento de los glaciares. La incertidumbre, no obstante, no es un consuelo: grandes masas de hielo (en glaciares de casquete y montaña) se están destruyendo a gran velocidad y cualquier mecanismo de realimentación negativa (que pudiera llevarnos de nuevo a una fase glacial) funcionaría a velocidades “geológicas”.

BIBLIOGRAFÍA

- Boulton G.S., Baldwin C.T., Paacock J.D. et al. *A glacio-isostatic facies model and aminoacids stratigraphy for late Quaternary events in Spitsbergen and the Arctic* (1982). *Nature* 298, 437-441.
- Covey C. (1990) *Orbita terrestre y períodos glaciares*. En Puicerver (Ed.) *El clima*, Libros de Investigación y Ciencia, 18-28.
- Crowley T.J. & Notth G.R. (1991) *Paleoclimatology, Oxford Monographs on Geology and Geophysics n° 16*, Oxford University Press, N.Y. 339 pp.
- Doake C.S.M & Vaughan D.G. (1991) *Rapis disintegration of the wordie ice shelf in response to atmospheric warming*, *Nature*, 350, 328-330.
- Ehrmann W.U. & Mackensen A. (1992) *Sedimentological evidence for the formation of an East Antarctic ice sheet in Eocene/Oligocene time*, *Paleogeographym, Paleoclimatology, Paleoecology*, 93, 85-112.
- Han-Sho Liu (1992) *Frequency variations of the Earth's obliquity and the 100-kyr ice age cycles*, *Nature*, 358, 397-399.
- Hooke, R.(2005) *Principles of Glacier Mechanics*. University Press. Cambridge publication. 301 pp.
- Hovan S.A., Rea D.K., Pias N.G. & Shackleton N.J. (1989) *A direct link between the China loess and marine 18 O records: aeolian flux to the north Pacific*. *Letters to Nature* vol. 340: 296-97.
- Hughes T., Denton G.H. & Grosswald M.G. (1977) *Was there a late-Würm Arctic ice sheet*. *Nature* vol 266: 596-602
- Mitchell J.M. (Ed) (1968) *Causes of Climatic change*, Met. Mono. 8, Am. Meteorol. Soc, Boston, Mass.
- National Research Council (NRC) (1975) *Understanding Climatic Change: a program for actino*, US Comité for GARP, National Academy of Sciences, Washington, D.C.
- Oerter H., Kipfstuhl J., Determann J. Et al (1992) *Evidence for basal marine ice in the Filchner-Ronne ice shelf*, *Nature*, 358, 399-401.
- Raymo M.E. & Ruddiman W.F. (1992) *Tectonoc forcing of late Cenozoic climate*, *Nature*, 359, 117-122.
- Ruddiman W.F. & McIntyre A. (1981) *Oceanic Mechanism for Amplification of the 23.000 year ice volume cycle*. *Science*, vol 212 n 4495: 617-626.
- Selby J. (1986) *Ice ages. Earth's changing surface*, Oxford: 468-512.
- Shackleton N.J. & Opdyke N.D. (1973) *18 O/16 O fractionation during Ocean atmosphere transfer*. *Quat. Res.* (N.Y.) 3, 39.
- Suggate, R.P. (1965) *The definition of “interglacial”*, *Jornal of Geology*, 73, 619-626.
- Weertman J. (1974) *On the sliding glaciers*. *J. Glaciol* 13,3. ■