

## LAS CAUSAS DE LAS GLACIACIONES

### *The origin of glaciations*

Francisco Anguita (\*)

#### RESUMEN

Los intentos de explicar los climas fríos comenzaron a finales del siglo XVIII, y aún prosiguen. Una importante y variada cantidad de hipótesis (astronómicas, geológicas, biológicas) atestiguan que el problema es complejo, y que podría ser multicausal. El tema del clima adquiere además un perfil dramático, dado que sabemos que sus alteraciones pueden ser rápidas, y que el hombre moderno ha surgido hacia el final de un periodo glacial que sospechamos que puede estar a punto de terminar.

#### ABSTRACT

Efforts to understand cold climates began toward the end of 18<sup>th</sup> century, and they are still alive. During this time, a varied quantity of hypotheses from the astronomical, geological and biological fields have been put forward, which attest to a high-complexity, perhaps multi-causal topic. A topic with a dramatic profile, since we have learnt that climate can change very quickly, and modern man has appeared near the end of a glacial period which could well be very near its end.

**Palabras clave:** Ciencias de la Tierra, Paleoclimatología, Historia de la Geología

**Keywords:** Earth Sciences, Palaeoclimatology, History of Geology

#### INTRODUCCIÓN

El hecho de que el 10% de los continentes estén cubiertos por hielo nos parece hoy un dato geográfico sin mayor relevancia. Es sorprendente, sin embargo, lo mucho que ha tardado el hombre en adquirir este conocimiento: hasta 1852 no se averiguó que Groenlandia estaba sepultada bajo un casquete glacial, y el *inlandsis* antártico no fue descubierto hasta finales del siglo XIX. Las causas del surgimiento y evolución temporal del hielo terrestre figuraron entre las grandes batallas intelectuales de esa centuria, sólo por detrás de la referida a la edad del planeta. Y produce un cierto sonrojo que no fuese un científico (un naturalista, según la hermosa palabra en uso en la época) sino un literato, Johann Wolfgang Goethe, quien primero propuso (en 1821, en su novela *Los años de viaje de Wilhelm Meister*) la actual idea de un enfriamiento global reciente de la Tierra. También es cierto que Goethe vivió en un tiempo en el que artes y ciencias no estaban, como hoy, en manos de especialistas, una época en la que no era insólito que alguien escribiese *Fausto* y también describiese nuevos minerales.

Hasta entonces, el debate había estado, como todas las discusiones sobre la Tierra en el tránsito del siglo XVIII al XIX, contaminado por la influencia del magisterio bíblico en los países protestantes, que por cierto eran también los más adelantados científicamente. De entrada, cualquier descubrimiento se

interpretaba a la luz del Génesis, y los grandes bloques erráticos de las llanuras suizas, alemanas y escocesas no fueron una excepción. Donde los montañeros suizos interpretaban avances y retrocesos de los glaciares, los académicos leían huellas del diluvio genesiaco. Sin embargo, la primera mitad del siglo XIX contempló la gradual conversión al glaciario de los naturalistas británicos (Hutton, en 1795; Lyell, en 1833; Buckland, en 1838) y centro-europeos (Venetz, en 1829; Agassiz, en 1837<sup>1</sup>, y sobre todo con su *Études sur les glaciers*, en 1840). Hacia 1860, el triunfo de la teoría glacial era absoluto; tanto, que sobrevivió a excesos como el del propio Agassiz, quien con el furor del converso buscó (e, inevitablemente, *encontró*) pruebas del paso reciente de glaciares en lugares tan improbables como el Mediterráneo y la cuenca amazónica. Al hacer así, seguía las huellas intelectuales de Goethe, el primero en pensar, más allá de los glaciares europeos, en el clima de la Tierra en su conjunto. En este sentido, el genio de Frankfurt puede ser considerado el padre de la moderna idea del Cambio Global.

#### LAS HIPÓTESIS MODERNAS

Al mismo tiempo que arraigaba la idea de una Edad de Hielo reciente, los primeros geólogos empleaban este conocimiento recién ad-

(\*) Departamento de Petrología. Facultad de ciencias Geológicas. Universidad Complutense, 28040 Madrid. E-mail: anguita@geo.ucm.es

(1) La de Agassiz no fue gradual sino brusca: como es sabido, la víspera del 24 de julio de 1837 cambió el discurso que debía pronunciar ante la *Société Helvétique des Sciences Naturelles* por una apasionada defensa de la hipótesis glaciaria.

quirido para comenzar a bucear en el registro geológico en busca de huellas de otros climas glaciales. En 1855 se propuso que unas brechas de edad pérmica (~275 millones de años, Ma) halladas en Gran Bretaña eran restos de una glaciación antigua. Esta interpretación se reveló errónea, pero poco después se confirmó una glaciación de esta edad en Australia y la India, y en 1870 en Suráfrica. Entre esta última fecha y los primeros años del siglo XX se confirmaron, en Escocia y en Noruega, glaciaciones de edad precámbrica (>570 Ma).

Con estos hallazgos nace la Paleoclimatología. Ya no se trata de resolver el enigma de *La Edad de Hielo* del Cuaternario, sino de averiguar por qué el planeta se congela de tiempo en tiempo. ¿Cuántas de estas crisis climáticas había padecido? ¿Se trataba de un fenómeno cíclico? Estas preguntas eran aún prematuras, porque hasta mitad del siglo XX no existirán medios de datar rocas, ni por tanto de definir la duración y extensión geográfica de las glaciaciones. Peor aún, el conocimiento geológico de buena parte de los continentes era todavía rudimentario. Algunas glaciaciones precámbricas se han documentado en lugares como Namibia, un desierto no sólo en el sentido geográfico hasta hace pocos años.

Un ejemplo típico de esta *edad oscura* de las glaciaciones es el tratado de divulgación *Biografía de la Tierra*, escrito en 1942 por el físico norteamericano de origen soviético George Gamow. Esta curiosa incursión de un físico nuclear en Geología nos da una exacta medida de lo mucho que ignorábamos sobre nuestro planeta a mediados del siglo XX. Para explicar las glaciaciones, Gamow se adhiere a la hipótesis orogénica, que Thomas Chamberlin había puesto en circulación medio siglo antes, y según la cual cada *revolución* (orogenia) lleva aparejada, a causa de la elevación topográfica con su corolario de nevadas e incremento del albedo, una glaciación. La correlación que en aquella época se podía establecer entre orogenias y glaciaciones era muy tosca, pero suficiente para advertir que al menos en dos de los cuatro ejemplos aducidos, las glaciaciones comenzaban decenas de millones de años antes de que se produjese el levantamiento orogénico (Fig. 1), por lo que mal podían achacarse a éste, al menos como causa principal.

Esta indefinición se ha prolongado a lo largo de casi todo el siglo XX. En 1985 una autoridad en Paleoclimatología afirmaba que “el estado normal del mundo parece... uno en el que los polos estén libres de hielo”. En 1987, otra autoridad de parecido calibre expresaba un punto de vista algo distinto: “Las síntesis más recientes sugieren que las glaciaciones podrían haber durado la mayor parte del tiempo geológico”. Estas dudas de fondo se han disipado sólo muy paulatinamente (a favor de la primera opinión, ver la Figura 6), a medida que se han obtenido mejores dataciones y un mayor control de los paleoambientes glaciares. Mucho antes, un astrónomo consiguió desentrañar el misterio que había intrigado a los naturalistas del siglo XIX: por qué los glaciares avanzaban y retrocedían periódicamente.

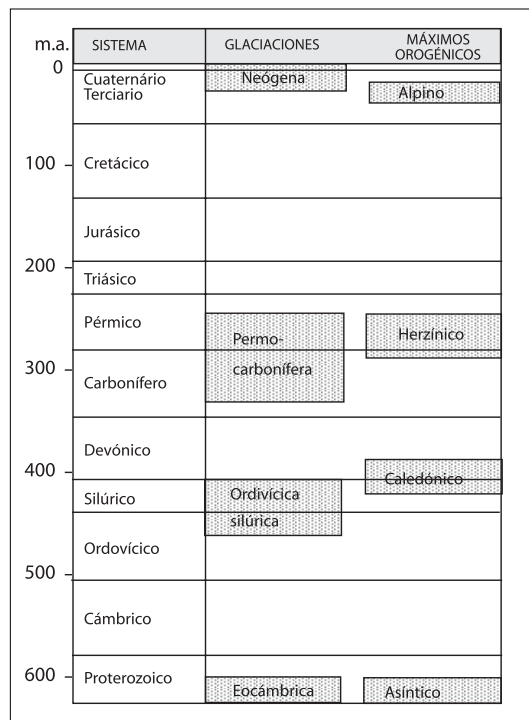


Fig. 1. Glaciaciones y orogenias. En Águeda et al. (1977).

## EL TURNO DE LOS ASTRÓNOMOS: EL AVANCE DE MILANKOVITCH

Casi al mismo tiempo que George Gamow jugueaba en un campo que le era claramente ajeno, un astrónomo serbio, Milutin Milankovitch, realizaba un descubrimiento fundamental para entender el clima reciente de la Tierra. Lo hizo, además, en un continente destruido por la misma guerra de la que Gamow había huido, en un país ocupado, un lugar (1941) y un momento en el que no es fácil imaginar el trabajo de un científico. A mediados del siglo XX se sabía que los grandes avances del hielo en la última glaciación se habían producido a intervalos de aproximadamente 100.000 años. Milankovitch reparó en que cada 93.000 años, y debido al conjunto de las atracciones planetarias, la Tierra experimenta fluctuaciones en su excentricidad, y atribuyó correctamente las variaciones en la cantidad de hielo a las variaciones en la distribución de la insolación o energía solar recibida: cuanto mayor es la excentricidad, mayor también la diferencia de insolación entre afelio y perihelio (máxima y mínima distancia al Sol). Esto significa mayor estacionalidad y por ello retroceso del hielo, ya que éste tiende a fundirse en los cálidos veranos.

Animado por este primer éxito, Milankovitch profundizó en las anomalías orbitales del planeta, descubriendo otras dos periodicidades de importancia climática: la inclinación y el cabeceo del eje de rotación. La insolación total recibida por la Tierra en cada momento será una función de la suma de las tres periodicidades, una gráfica compleja que se ajusta notablemente bien a la curva de variación de la temperatura (Fig. 2).

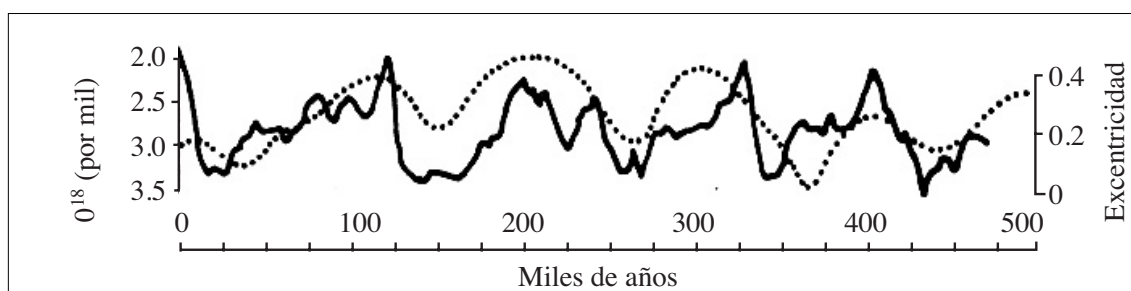


Fig. 2. El éxito de Milankovitch: la variación de temperatura en los mares antárticos (curva llena) comparada con las variaciones teóricas de insolación (curva de puntos). En Hays et al. (1976).

¿Significa esto que el problema de las glaciaciones quedó resuelto a mitad del siglo pasado? Evidentemente no, puesto que la órbita terrestre ha debido mantener una geometría semejante a la actual a lo largo de toda su historia. Esto incluye, por supuesto, las épocas sin glaciaciones, lo que demuestra que la forma de la órbita puede modular el clima, pero no lo decide. Cuando la Mecánica Celeste mostró sus limitaciones, hubo que estudiar con mayor detalle el comportamiento del planeta durante las crisis climáticas.

### EL TURNO DE LOS GEÓLOGOS: GLACIACIONES, VOLCANES Y DERIVA CONTINENTAL

Uno de los avances decisivos a la hora de encarar el problema de las glaciaciones surgió de la Geología Marina. Mientras que la cronología de la actual glaciación dependió de la datación de las morrenas centroeuropeas o norteamericanas, se siguió hablando de una glaciación cuaternaria (o sea, de una duración de poco más de un millón de años) con cuatro periodos glaciales<sup>2</sup>; pero los programas de sondeos profundos emprendidos en los años 70 revolucionaron este panorama. Las técnicas de análisis isotópicos aplicadas a los caparazones de los foraminíferos planctónicos permitieron construir precisas tablas de paleotemperaturas, al mismo tiempo que el estudio de microficies llevó a identificar, en los océanos meridionales, niveles increíblemente antiguos (hasta 36 millones de años) de paratillitas, las huellas de las descargas del material transportado por los icebergs. El adverbio no está usado a la ligera: de entrada, los glaciólogos decidieron no dar crédito a los datos de los oceanógrafos. Sólo cuando estos datos fueron abrumadores tuvieron que aceptar la evidencia de que la glaciación cuaternaria no era más que el final de una larguísima historia que había empezado en la Antártida decenas de millones de años antes de transmitirse hacia los mares y continentes septentrionales.

Esta ampliación del escenario temporal introdujo en el juego teórico una variable decisiva: si las glaciaciones duraban muchos millones de años, quizá había que considerar los movimientos de los continentes como un factor importante en su origen. En los 36 millones de años transcurridos desde el último enfriamiento global del clima sucedieron al me-

nos tres acontecimientos clave: la separación de la Antártida y Suramérica hace 30 millones de años, la de Groenlandia y Norteamérica hace 15, y el cierre del istmo de Panamá hace 3 Ma. El primero de estos desgarrs causó la aparición de la corriente circunantártica, que aisló térmicamente a este continente y sin duda contribuyó a su congelación. El segundo abrió la ruta de una corriente marina que bajaba desde el Ártico (que aún no era un mar helado como hoy) a través del Atlántico directamente hasta la Antártida. La evaporación de esta agua, caldeada a su paso por el ecuador, quizá proporcionó la humedad necesaria para el crecimiento del casquete glacial antártico. El tercer acontecimiento provocó (Bartoli et al., 2005) el desvío hacia el Polo norte de agua caliente y salina, a cuya evaporación seguramente debemos el casquete de hielo que corona Groenlandia.

Con respecto al casquete antártico, hay que subrayar, sin embargo, que éste comenzó su existencia varios millones de años antes del establecimiento de la corriente circunantártica: ésta acentuó quizás la crisis climática, pero no pudo ser su causa primera. Tal vez todo comenzase mucho antes, hace unos 55 millones de años, cuando el lento derivar de África hacia el norte cerró el paso a la corriente ecuatorial que desde la ruptura de Pangea (~200 Ma) había sido el gran regulador térmico del planeta (Fig. 3).

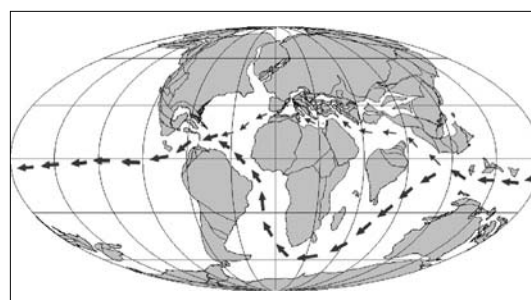


Fig. 3. Situación de los continentes hace 55 Ma. Favorecida por la corriente ecuatorial global, la temperatura media del agua oceánica profunda era de ¡12 °C!. Pero África está a punto de colisionar contra el sur de Eurasia, cerrando la corriente, que tendrá que desviarse por el sur de África. Ilustración de Pau Renard, en Anguita et al. (2006).

(2) En Europa, Günz, Mindel, Riss y Würm; en Norteamérica, Kansasiense, Illinoiense, Altoniense y Wisconsinense.

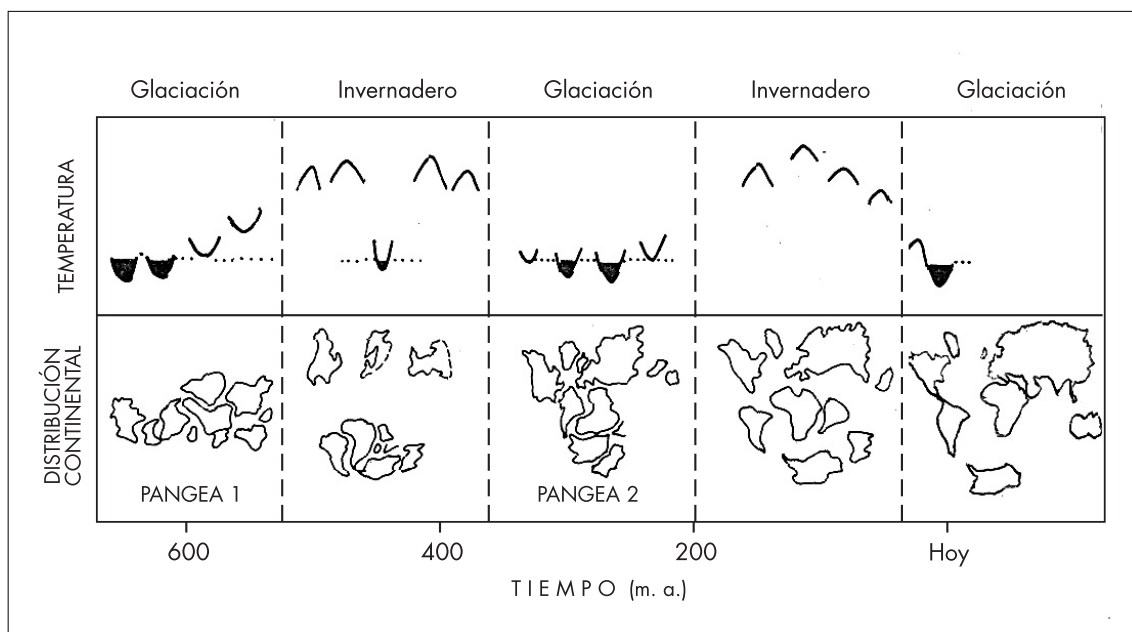


Fig. 4. Variaciones en la temperatura atmosférica y en la distribución continental durante los últimos 600 millones de años. En Anguita y Moreno (1993).

En general, las ideas sobre la influencia climática de la distribución de tierras y mares se basan en la importancia de que haya continentes polares para que una glaciación se desencadene. El mayor albedo y la menor capacidad de distribuir calor de los continentes contribuyen a que sobre ellos se instalen con facilidad campos de nieve que serán los embriones de los futuros glaciares. Esta razonable idea parece hecha a la medida de la geografía actual, pero en cambio no explica dos de las cuatro glaciaciones bien datadas, la ordovícica y las del final del Proterozoico, en las que no había continentes sobre los polos (Fig. 4). Una modificación de esta hipótesis considera decisivo que exista una agrupación supercontinental, una Pangea; pero en este caso la glaciación que queda sin explicar es precisamente la actual, producida en una situación de gran dispersión de los continentes.

El otro proceso geológico de interés en Paleoclimatología es el vulcanismo. Erupciones cataclísmicas históricas como las del Krakatoa (Indonesia, 1883) o el Pinatubo (Filipinas, 1991) causaron, al emitir a la atmósfera gran cantidad de partículas que formaron aerosoles y bloquearon parcialmente la radiación solar, perceptibles descensos generalizados de la temperatura atmosférica, persistentes durante varios años. Paradójicamente, también se culpa a los volcanes de uno de los periodos más cálidos de la historia de la Tierra. Durante el Cretácico, el intensísimo vulcanismo submarino llevó, primero a los océanos y después a la atmósfera, cantidades masivas de  $\text{CO}_2$ , a las que se atribuye el clima de invernadero que persistió en la Tierra durante casi cien millones de años. No es impensable que otras etapas cálidas anteriores tengan igual explicación.

#### Y EL DE LOS BIÓLOGOS: LA FOTOSÍNTESIS Y LAS BACTERIAS GLACIOGÉNICAS DE LOVELOCK

Un proceso que consume  $\text{CO}_2$  como es la fotosíntesis es por definición un posible culpable de enfriar el clima. El sospechoso más citado es una hipotética “explosión planctónica”, y el escenario más popular del crimen, los mares de plataforma que se generan en las épocas transgresivas, típicamente las de dispersión continental. El gran problema de esta idea aparentemente incontrovertible es que, cuando los glaciólogos han podido datar con precisión las variaciones de temperatura y las de  $\text{CO}_2$ , han comprobado que (al menos en los últimos cientos de miles de años, Fig. 5) las primeras anteceden a las segundas, con lo que difícilmente podrían ser causadas por ellas.

La hipótesis de la intervención de los seres vivos como agentes climáticos tiene, por tanto, que ser refinada. Sin esperar a ello, un grupo creciente de científicos adjudica a la biosfera un papel esencial en el equilibrio térmico del planeta. Son los partidarios de la Teoría Gaia, cuya “versión dura” propone una auténtica dictadura de la Climatología por parte de la vida. James Lovelock, uno de los primeros impulsores de la idea, argumentó en su libro *Las edades de Gaia* que la primera glaciación registrada en la Tierra, la Huroniana, sucedida hace unos 2.300 millones de años, tuvo como causa la proliferación de organismos fotosintetizadores. Al concentrarse en la atmósfera el oxígeno que producían, el metano existente hasta ese momento se oxidó, y la desaparición de este efectivo gas de invernadero trajo como consecuencia la citada glaciación (Fig. 6).

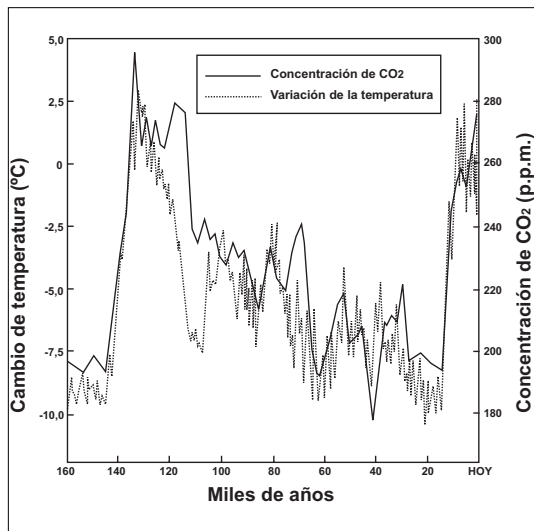


Fig. 5. Evolución de la temperatura y de la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> durante los últimos 160.000 años. En Schneider (1989).

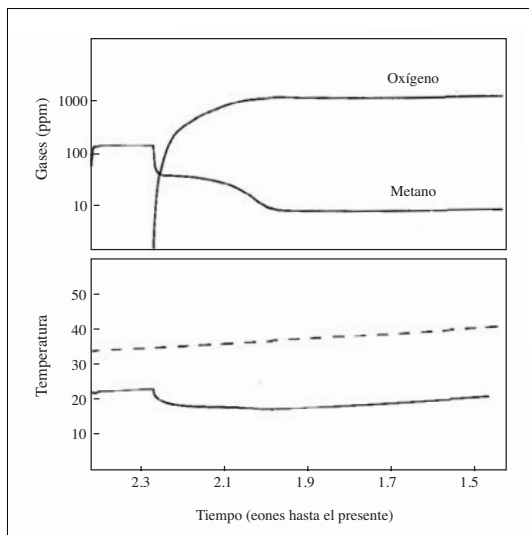


Fig. 6. Aumento del oxígeno y caída del metano al principio del Proterozoico, hace 2.300 millones de años. En la gráfica inferior, la temperatura de una hipotética Tierra estéril (línea de trazos) y la temperatura real, con el escalón marcando la glaciación Huroniana. En Lovelock (1993).

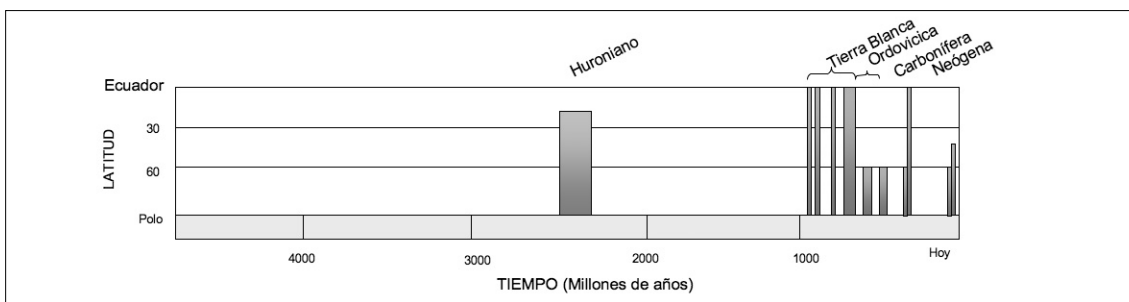


Fig. 7. Las glaciaciones en la historia de la Tierra. Salvo la Huroniana, todas se han producido durante los últimos 900 millones de años, justo cuando era mayor la energía irradiada por el Sol.

Esta idea tropieza con varios inconvenientes. En primer lugar, es hace 2.000 millones de años, y no hace 2.300, cuando el oxígeno comienza a acumularse en la atmósfera de un modo significativo. Más importante aún es que Lovelock tampoco explica por qué, al cabo de 150 millones de años, cesa esta glaciación, dado que la atmósfera oxidante causada por la fotosíntesis masiva llegó para quedarse. Un tercer problema está en la declaración de principios de la teoría: Lovelock repite que Gaia prefiere un planeta frío. El hecho de que sólo lo haya conseguido durante poco más del 10% del tiempo geológico (ver la Figura 7) hace dudar de la realidad del supuesto control climático ejercido por los seres vivos.

## LA SORPRESA DE LA TIERRA BLANCA

Tras la aislada glaciación Huroniana sucedieron nada menos que 1.300 millones de años de vida plácida en un planeta sin hielo. Sin embargo, las rocas del final de la Era Proterozoica (Periodo Véndico [Criogénico para algunos], ~730-580 Ma) empezaron a proporcionar, en los años 90, varias sorprendentes paradojas climáticas: la principal fue que en todos los continentes, situados en aquella época cerca del Ecuador, se hallaban tillitas. La segunda, que intercalados entre los sedimentos glaciares había importantes niveles de carbonatos, rocas típicamente depositadas en mares cálidos. En 1998, el climatólogo Paul Hoffman propuso que la situación tropical de los continentes implicaría un máximo en la meteorización química, un proceso en el que se consume CO<sub>2</sub>. El consiguiente descenso térmico arrastraría a la glaciación ecuatorial mediante el mecanismo clásico de precipitaciones sólidas y aumento del albedo. Cuando los continentes se hubiesen cubierto de hielo, el mecanismo causal se desactivaría, al cesar la meteorización. Los volcanes acudirían entonces al rescate (repetidamente, ya que parece que hubo hasta cuatro glaciaciones), y el CO<sub>2</sub> que expulsaron se acumuló (ya que no afloraban rocas que pudiese meteorizar) hasta precipitar en forma de calizas.

En la "versión dura" de la hipótesis, los océanos también se congelaron. Así se podría explicar la reaparición de formaciones de hierro bandeado, típicas del Arcaico y sólo posibles en mares muy poco oxigenados, como los que pudieron estar cubiertos por una capa de hielo. El dilema es resolver cómo, en estas condiciones, podrían haber sobrevivido organismos como

las algas, que requieren aguas oxigenadas. Las roturas ocasionales de la costra de hielo constituyen una solución de compromiso. Algunas variantes sobre el final de la Tierra Blanca (Shields, 2005) enlazan de nuevo con la biología: una fusión muy rápida del hielo marino generaría un nivel somero y universal de agua dulce a partir del cual precipitarían los carbonatos; y antes de mezclarse con el agua salina profunda, este nivel somero hiperoxigenado proporcionaría un medio ideal para el desarrollo de los animales y otros oxigenófilos.

Esta versión extrema de la glaciación global coincide con los modelos climáticos que los superordenadores habían previsto en la década de 1960: la llamada Tierra Blanca, completamente cubierta de hielo, reflejando el 70% de la energía solar, un mundo decididamente hostil para la vida. Lo curioso es que los climatólogos no creyeron que la Tierra hubiese atravesado nunca ese estado, hasta que los datos vinieron a afirmar lo contrario. Una moraleja importante es que no hace falta remontarse al Arcaico, a las profundidades del tiempo geológico, para encontrar *tierras incógnitas*: la más extraña de las situaciones climáticas identificadas hasta ahora en el planeta sólo terminó (en un calendario de un año) a mediados de noviembre.

#### ALGUNAS DUDAS ACTUALES: ¿QUÉ PAPEL JUEGA EL SOL?

Existen, por supuesto, explicaciones alternativas para la Tierra Blanca. Por ejemplo, la recogida por Uriarte (2003) es que en los mares transgresivos consecuentes a la desmembración de Rodinia (el supercontinente que quizás existió hace unos 1.000 millones de años) tuvo lugar una explosión de plancton que actuó como sumidero de CO<sub>2</sub>; añade además que la luminosidad solar era un 6% menor que la actual. Sin embargo, los sumideros biológicos como desencadenantes de glaciaciones tropiezan con el problema citado de la precedencia de las variaciones térmicas respecto a las del gas de invernadero. Y el cálculo de la radiación solar, sin duda correcto, no hace más que resaltar el problema de la distribución de las épocas frías, en su mayoría concentradas en los últimos mil millones de años de la evolución del planeta (Fig. 7).

Este último aspecto nos lleva de nuevo hacia el principio. Desde el triunfo de la Mecánica Celeste que supuso la hipótesis de Milankovitch, (y en la que las fluctuaciones glacial-interglacial no dependían de ninguna propiedad del Sol, y sí de la posición de la Tierra) la importancia de la radiación solar como factor decisivo en el clima terrestre no ha hecho más que reducirse, en favor de aspectos planetarios como son la situación de los continentes, el vulcanismo, la composición precisa de la atmósfera, e incluso (a través de este último rasgo) la influencia biológica. ¿Significa esto que tendremos que renunciar a nuestra querida e intuitiva idea de que el Sol es el gran regulador del ambiente terrestre? Lo cierto es que gráficos como el de la Figura 7 parecen apuntar en este sentido: la gran oportunidad para que se diese una Tierra completamente cubierta de hielo surgió al principio de la evolución del Sistema, cuan-

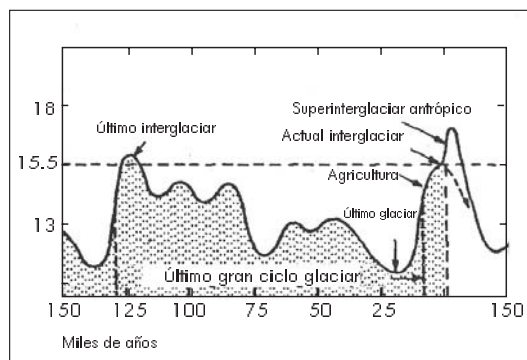


Fig. 8. Ciclos climáticos en los últimos 150.000 años, y su proyección hacia los próximos 25.000. En Martini et al. (2001).

do la estrella apenas calentaba. Todos los paleoclimatólogos concuerdan en que si se perdió fue porque una densa atmósfera rica en gases de invernadero abrigó al planeta. De igual manera, la más feroz de las glaciaciones ocurridas en la Tierra sucedió mucho después, y lo hizo muy probablemente en ausencia de cualquier alteración en el régimen térmico solar, y sí a favor de una extraña disposición de los continentes.

En suma, si no podemos concluir nada definitivo sobre el origen de los periodos fríos, al menos estamos en condiciones de descartar alguna idea: los planetas, quizás ayudados por sus biosferas, son los administradores de su clima mientras las estrellas mantienen a un nivel regular su caudal energético.

#### ¿PARA CUÁNDO EL PRÓXIMO PERIODO GLACIAL?

Las civilizaciones que se han extendido sobre el planeta en los últimos milenios se han beneficiado de un clima interglacial anormalmente largo. Aun así, ha habido al menos un altibajo interesante: entre 1450 y 1850, la temperatura media bajó 1,5°C, un escalón nada despreciable cuando lo comparamos con los 7-10°C que caracterizan el paso a un periodo glacial. Fue suficiente para acabar con la colonia danesa en Groenlandia, y provocar una hambruna en Europa. Hoy, cuando vemos valles alpinos que parecen recién abandonados por los glaciares, estamos contemplando las huellas de la *Pequeña Edad de Hielo*, como se ha llamado a este periodo gélido dentro del interglacial. No hay ninguna explicación convincente sobre las causas de este enfriamiento, lo cual lo hace más ominoso. Si se repitiera, la actual densidad de población lo convertiría automáticamente en una catástrofe global: unos cuantos miles de inviernos rigurosos cambiarían la historia (y la política) del planeta.

A un plazo un poco más largo, nuestros herederos tendrán que encarar, dentro de un máximo de no mucho más de 4.000 años, la llegada del próximo periodo glacial (Fig. 8). No hay forma de precisar más, pero el actual interglacial de 18.000 años ha durado ya bastante más que la media de los anteriores, que es de 12.000 años. A continuación, la Tierra se sumirá en un largo invierno de 100.000 años. Una pregunta

que nos deberíamos formular con más frecuencia es si una Humanidad futura podrá hacer frente a este desafío planetario. El estudio de la Paleoclimatología no permite mucho optimismo, ya que por término medio las glaciaciones duran 50 millones de años, y no es fácil imaginar que el hombre, por poderosa que sea su tecnología, llegue alguna vez a estar en situación de controlar esta tendencia aperiódica del planeta a congelarse de tiempo en tiempo, un impulso cuyas causas aún luchamos por comprender.

## BIBLIOGRAFÍA

- Águeda J., Anguita F., Araña V., López J. y Sánchez L. 1977. *Geología*. Ed. Rueda, Madrid.
- Anguita F. (2002). *Biografía de la Tierra*. Aguilar, Madrid.
- Anguita F. y Moreno F. (1993). *Procesos geológicos externos y Geología ambiental*. Ed. Rueda, Madrid.
- Anguita, F., Renard, P., Diaz, C., Pérez de Heredia, L. y Álvarez, M. (2006) *La Península Antártica. Guía Geológica*. Brusi, D. (Editor). Monografías de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. Serie Itinerarios, nº 3. AEPECT.
- Bartoli G., Sarthein M., Weinelt M., Erlenkeuser H., Garbe D. y Lea D.W. (2005). Final closure of Panama and the onset of northern hemisphere glaciation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 237, 33-44.
- Bennett M.R. y Glasser N.F. (1997). *Glacial geology. Ice sheets and landforms*. Wiley, Chichester.
- Gamow G. (1942). *Biografía de la Tierra*. Espasa-Calpe, Buenos Aires.
- Hambrey M. (1994). *Glacial environments*. UCL Press, Londres.
- Hays J.D., Imbrie J y Shackleton N.J. (1976). Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194, 1121-1132.
- Hoffman P.E. y Schrag D.P. (2000). La Tierra, una bola de nieve. *Inv. y Ciencia*, 135, 24-33 (Marzo).
- Lovelock J. (1993). *Las edades de Gaia*. Tusquets, Barcelona.
- Martini I.P., Brookfield M.E. y Sadura S. (2001). *Glacial geomorphology and geology*. Prentice Hall, New Jersey.
- Shields G.A. (2005). Neoproterozoic cap carbonates: a critical appraisal of existing models and the *plumeworld* hypothesis. *Terra Nova*, 17, 299-310.
- Schneider, S. (1989). *The Changing Climate*, Scientific American
- Uriarte A. (2003). *Historia del clima de la Tierra*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, Vitoria. ■