

1.3. El entorno natural

INTRODUCCIÓN

Resulta imposible entender la evolución de las especies sin tener en cuenta la relación entre evolución y cambio climático. Por lo tanto, continuamos este libro introduciendo brevemente los elementos y características que nos pueden explicar el marco general en que se producen los procesos zoológicos.

EL CLIMA Y SU FUNCIONAMIENTO

El clima de un lugar nos viene indicado por el promedio del tiempo meteorológico de un territorio a lo largo del año, así como su variación a lo largo de un año. Se puede describir como el promedio y la variabilidad que han sufrido durante varios años la temperatura, la precipitación, el viento y demás fenómenos meteorológicos, así como su variación a lo largo de un año. El clima influye en los procesos físicos y químicos así como en la tasa y el tipo de meteorización, erosión y sedimentación. También condiciona —y en muchas ocasiones determina— la ecología y, por lo tanto, la biogeografía de la vegetación y de la fauna incluyendo, por supuesto, la evolución biológica y cultural de los homínidos y como consecuencia su distribución geográfica durante el Plio-Pleistoceno y el Pleistoceno.

Por su gran importancia, parece útil explicar ciertos aspectos del clima de una forma simple (quizás demasiado simple). El lector interesado en el clima puede consultar la literatura abundante sobre el clima (Foucault, 1993; Vázquez Abeledo, 1998), sobre los métodos del estudio del paleoclima —el clima del pasado— (Cronin, 1999; Lowe & Walker, 1997; Zubakov & Borzenkova, 1990) y su impacto sobre el ambiente y la fauna (Roberts, 1989; Vrba *et al.*, 1995; Wilson *et al.*, 1999).

El sol calienta la atmósfera de forma diferencial; en zonas próximas al Ecuador, los rayos de luz llegan perpendicularmente a la superficie terrestre; en latitudes más septentrionales el ángulo disminuye, y a su vez, se atenúa la intensidad de luz (energía, o calor) que llega a la Tierra por unidad de superficie. Existen otros factores que influyen en la cantidad de energía que impacta en la superficie: las grandes extensiones de hielo o las nubes que reflejan la luz en vez de absorber dicha energía. El calentamiento diferencial provoca que en la atmósfera y en los océanos existan movimientos de circulación. Las circulaciones son un factor determinante en el clima global del planeta, las responsables del transporte de energía y materia. Mientras que la circulación oceánica está modificada por la distribución de los continentes, o en términos generales, las isóbatas, la circulación atmosférica es más regular.

La circulación atmosférica ocurre en grandes celdas, que se nota como viento donde el aire se desplaza horizontalmente y como presiones altas y bajas donde se des-

plaza verticalmente. Como ejemplo, consideramos una celda en el hemisferio norte en África (fig. 1.3). Cerca del ecuador (por ejemplo en Congo) el sol calienta el aire que está próximo a la superficie de la tierra. El aire se expande y, por esto, disminuye en densidad (o peso por volumen), y como es más ligero se mueve hacia arriba. A grandes alturas se enfría y pierde capacidad de contener vapor, provocando precipitación. Después, el aire seco se desplaza hacia latitudes más altas, donde baja (por ejemplo en el Sahara). Cuando baja este aire seco, y se calienta próximo a la superficie de la tierra, aumenta su capacidad de contener vapor. Por esto el aire absorbe agua, provocando evaporización y sequía. Completando el ciclo, este aire se mueve hacia el ecuador, recogiendo agua. Este sistema es como una cinta transportadora que lleva agua desde latitudes altas hacia el ecuador, provocando aridez en latitudes más altas y humedad en latitudes bajas. Una celda semejante existe en el hemisferio sur, y otras celdas en latitudes más altas, en la actualidad hay un total de seis celdas desde el polo norte hasta el polo sur (fig. 1.3).

Otro componente de la circulación atmosférica es el provocado por la «Fuerza de Coriolis», que resulta de la rotación de la Tierra alrededor de su eje (la misma rotación, que provoca la alternancia día/noche). La Tierra gira hacia oriente, y como la atmósfera no gira tan deprisa como la esfera terrestre, se genera un viento dominante hacia el oeste. Existen más causas para reconocer la presencia del viento, pero ésta es la que explica la dirección dominante del mismo. Los dos componentes (circulación y movimiento hacia el oeste) hacen que el aire se desplace en espiral.

Evidentemente, esta descripción de circulación atmosférica es una situación simplificada y no toma en cuenta las frecuentes irregularidades que influyen en la circulación. Una de ellas es la distribución de los continentes. Esta distribución es responsable del monzón, otro fenómeno clásico de circulación atmosférica. Cuando en primavera la luz solar calienta la Tierra, lo hace más deprisa en el continente que en los mares y océanos. El aire más caliente se expande y provoca una circulación atmosférica. En la superficie, el aire se desplaza hacia el continente, una vez allí sube en altura, desplazándose hacia los océanos, donde baja. En primavera esta dinámica provoca precipitación sobre los continentes; en invierno el monzón es seco y más intenso en latitudes medias y altas. Se supone que la elevación tectónica del Himalaya ha causado el monzón en Asia (An *et al.*, 2001).

Las cadenas montañosas muy altas pueden influir en el patrón de la circulación atmosférica así como en la cantidad de precipitación. Si el aire se desplaza hacia una cadena montañosa, sube, se enfría y puede provocar precipitación a cierta altitud en una zona que, en general, es árida. En una zona predominantemente húmeda, una montaña puede tener una «sombra» árida.

En el Viejo Mundo, los sistemas montañosos influyen relativamente poco en la circulación atmosférica, dando lugar a una zona árida que se extiende del oeste hacia el este y que incluye el Sahara, el Medio Oriente y el desierto de Gobi en el hemisferio norte, y el Kalahari en el hemisferio sur. Sin embargo, en América, las cadenas montañosas se dirigen de norte a sur, modificando el patrón de zonación climática. Estos patrones pueden ser modificados a lo largo del tiempo. La aridez del este de África se ha desarrollado como resultado del levantamiento de una parte de la zona del sistema del Rift. La posición de la banda árida y su grado de aridez en la zona Sahara-Medio Oriente-Gobi ha variado a lo largo del tiempo.

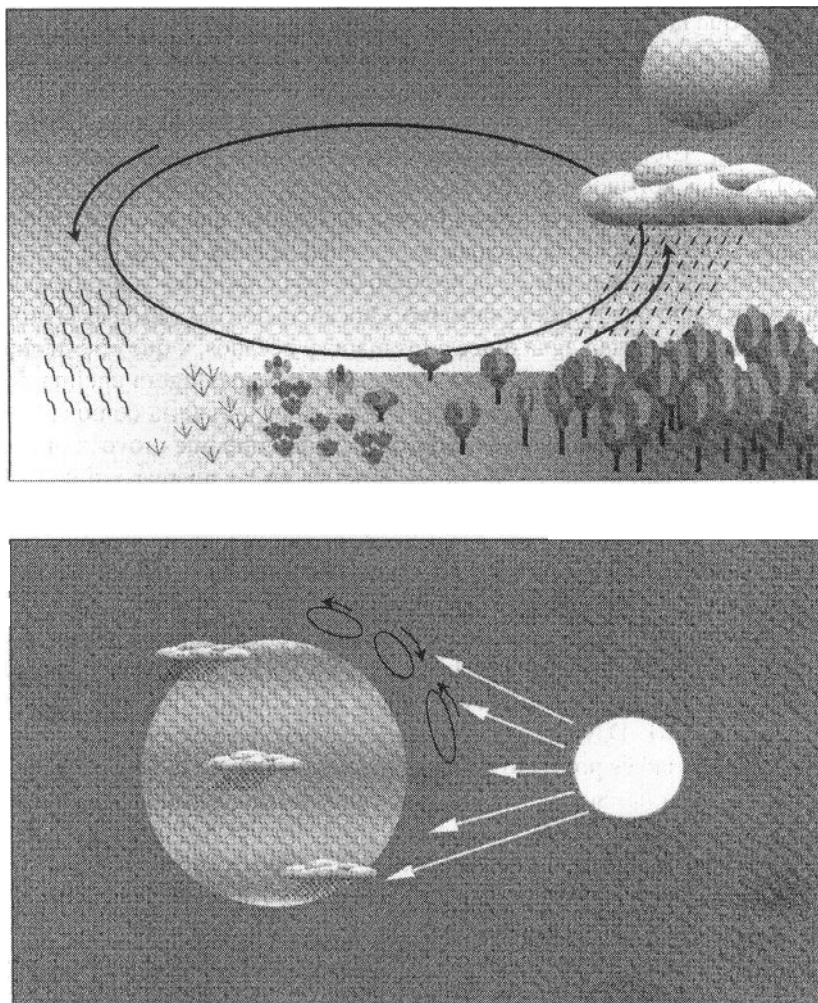
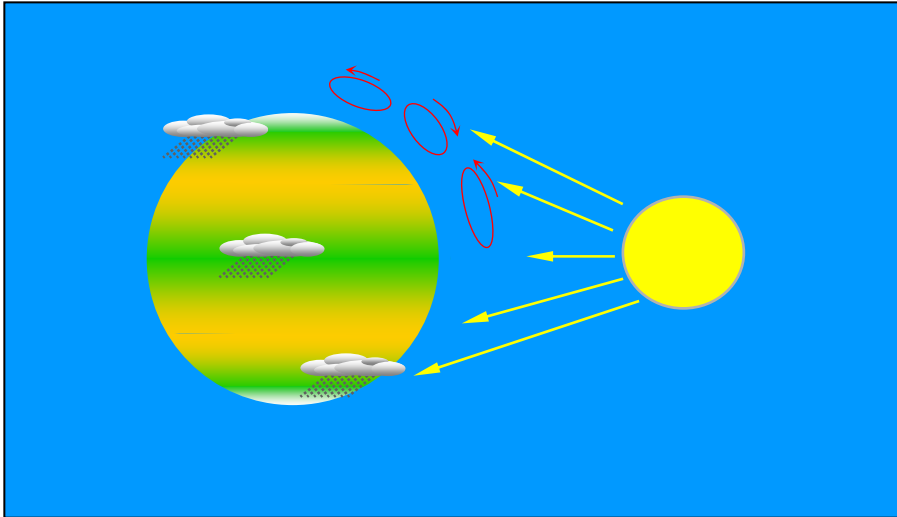
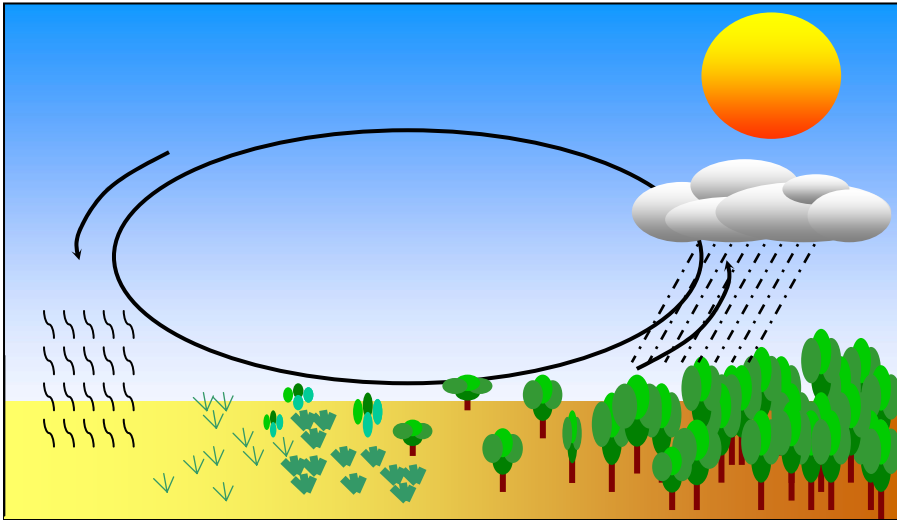


FIG. 1.3. La circulación atmosférica ocurre en grandes celdas. La figura arriba demuestra un ejemplo de una celda. La derecha de la figura se sitúa en el Congo, próximo al ecuador, y la izquierda más al norte en el Sahara. Próximo al ecuador, el sol calienta el aire. El aire se expande y se mueve hacia arriba. A grandes alturas, se enfría y provoca precipitación. En latitudes más altas, este aire ya seco se baja y vuelve a absorber agua. Hay tres celdas en el hemisferio norte y tres en el hemisferio sur (figura de abajo). Estas celdas provocan zonas con más y con menos precipitación (sus posiciones están indicadas en la figura de abajo por tonos diferentes y nubes).

La distribución geográfica, y la precipitación y temperatura a lo largo del año, influyen en la meteorización, en el tipo de suelos que se desarrollan y en la vegetación, como ya hemos planteado con anterioridad. El patrón que se observa en los mapas de vegetación o suelos recuerda inmediatamente los mapas de precipitación y aridez (que tienen en cuenta el balance entre precipitación y evaporación).



Al igual que la circulación atmosférica, existe una circulación oceánica. Aunque no es nuestra intención profundizar ahora en este tema, pensamos que es importante señalar la existencia del fenómeno e indicar algunas de sus consecuencias.

Existen corrientes superficiales y profundas, con direcciones distintas. Generalmente las corrientes superficiales van del Ecuador hacia las zonas polares, donde el agua se enfría y baja, y las corrientes profundas suelen ir desde los polos hacia el Ecuador. Esta circulación está sujeta a la misma Fuerza de Coriolis que la circulación atmosférica. Como ya se ha dicho, la circulación oceánica se halla más sujeta a la geografía que la atmosférica y depende de la posición de los continentes y el relieve submarino, aún más acusado que el relieve subaéreo. Otra alteración del patrón es la provocada por los ríos, que transportan agua dulce a los mares y océanos, y que en estaciones de lluvia pueden formar una capa de agua menos salada y más ligera encima del mar.

Las corrientes transportan, además del agua, calor y materia como sales y materia orgánica. Existe una corriente superficial hacia el norte que provoca que Europa tenga un clima más cálido que el que posee América en las mismas latitudes. En los puntos en que una corriente profunda llega a la superficie, suele haber temperaturas más bajas. Los organismos que mueren en el mar producen materia orgánica que sirve de nutriente para otros organismos y, en las zonas en que una corriente profunda rica en nutrientes llega a la superficie, se mantiene una gran densidad de peces y otros organismos marinos, generando una compleja cadena trófica. Las corrientes oceánicas tienen gran importancia en el clima global. Los procesos tectónicos pueden modificar el patrón de las corrientes oceánicas y provocar así cambios climáticos importantes (Cane & Molnar, 2001; Davis *et al.*, 2001).

La estacionalidad es producto de la inclinación del eje de la Tierra. Cada año, el planeta gira alrededor del Sol y, cada día, gira asimismo alrededor de su eje. El ángulo entre el eje de la Tierra y el plano del curso alrededor del Sol no es perpendicular sino que posee una inclinación de algo más de 20 grados con respecto a la perpendicular; ello ocasiona que, durante parte del año, el hemisferio norte se halle más expuesto al Sol y, durante el resto del año, lo mismo ocurra con el hemisferio sur. En verano, es el hemisferio más expuesto al Sol y, en invierno, el que recibe menos luz y energía. La estacionalidad influye en la circulación atmosférica y en la oceánica. En latitudes altas, la variación de la temperatura es muy marcada y puede haber diferencias bastante superiores a los 50 grados entre las temperaturas extremas mientras que, en latitudes bajas, la variación es de pocos grados. En el centro de los continentes, la diferencia tiende a ser más acusada (clima continental), pero en los bordes continentales, los mares provocan que la diferencia entre invierno y verano sea menor (clima marino).

La estacionalidad tiene una influencia muy importante sobre la vegetación y sobre la fauna. Las zonas que durante parte del año tienen poca luz y temperaturas bajas, cuentan con un tiempo limitado para el crecimiento de la vegetación puesto que las plantas necesitan luz para realizar la fotosíntesis y las raíces encuentran dificultades para penetrar en un suelo congelado. Las plantas perennes se adaptan a la estacionalidad perdiendo las hojas o la parte de la planta que no se halla en el interior del suelo. La concentración de la producción de fruta durante cierto período del año es otra adaptación a la estacionalidad. Dichas adaptaciones de la vegetación significan variaciones a lo largo del año en la cantidad y en calidad de comida que pueden obtener los animales herbívoros.

Como resultado de estos procesos, los herbívoros se adaptan y procrean de forma estacional para que las crías puedan aprovechar al máximo los períodos de abundancia de vegetación de alta calidad nutritiva y de fácil digestión. En la actualidad, los frugívoros se hallan limitados a los trópicos. Los herbívoros pueden estar adaptados para comer gran cantidad de material vegetal de bajo contenido nutritivo (pastadores) o para seleccionar las partes más nutritivas de las plantas (ramoneadores). Los pastadores suelen tener morros anchos, dientes con coronas altas y molares posteriores de grandes dimensiones. Los climas estacionales son más difíciles para los ramoneadores. Otros animales acumulan muchas reservas y de ellas viven durante el invierno: los renos lo hacen en forma de grasa y algunos roedores almacenan semillas.

Al igual que en latitudes altas, en las montañas y altiplanos existe también una variación elevada si nos referimos a la temperatura. Dicha variación se produce a lo largo del año pero también a lo largo del día, y lo que varía es fundamentalmente la temperatura inferior con el consiguiente efecto sobre la flora y la fauna. Hay un límite en la distribución de los taxones arbóreos en latitudes altas, pero también lo hay en zonas muy elevadas; algunos animales, adaptados al frío, se distribuyen ampliamente por el territorio durante los glaciales, mientras que se refugian en las zonas montañosas durante los episodios interglaciares.

Los Ciclos de Milankovich son ciclos astronómicos generados por la manera en que la Tierra gira alrededor del Sol (Foucault, 1993; Vázquez Abeledo, 1998). Ya hemos señalado que la estacionalidad depende de la inclinación del eje de la Tierra con respecto al plano de la órbita. La inclinación del eje terráqueo, o la oblicuidad, no es constante sino que varía un poco. Cuando el ángulo es más agudo, los veranos son más calurosos y los inviernos más fríos; en otras palabras, la estacionalidad es mayor y el efecto será más notable en latitudes altas. La oblicuidad varía de forma regular en ciclos de aproximadamente 42 ka. En parte de este ciclo de 42 ka, la estacionalidad es más fuerte, y en otra parte es menos marcada.

La elipse que forma la Tierra al girar alrededor del Sol tiene dos focos y el Sol está en uno de ellos; la distancia entre ambos varía en ciclos de unos 100 ka y, cuando éstos se aproximan, la elipse se asemeja a un círculo mientras que cuando están más separados, la elipse es más alargada. Cuando la Tierra se halla más próxima al foco ocupado por el Sol, recibe más luz o energía al contrario de lo que ocurre durante la otra parte del año. Se trata de una variación anual, pero independiente de la estacionalidad. Si la Tierra está lejos del Sol cuando es verano en el hemisferio norte, los estíos son relativamente fríos y los inviernos templados; en el hemisferio sur ocurre lo contrario. Este efecto es más fuerte cuando la distancia entre los focos de la elipse es mayor o, dicho de otra forma, cuando el curso de la Tierra es más excéntrico. El ciclo de la excentricidad de la órbita terrestre coincide con los ciclos glaciales del Pleistoceno medio y superior (Rial, 1999; Rutherford & D'Hondt, 2000).

En el ejemplo que hemos mencionado anteriormente, la Tierra se halla lejos del Sol cuando es verano en el hemisferio norte, pero también puede estar próxima al Sol cuando es verano, primavera u otoño en el hemisferio norte. Esta situación varía con una periodicidad de 21 ka. Hablamos de la ciclicidad de la precisión de los equinoccios.

Los efectos de los tres Ciclos de Milankovich (y de otros menos conocidos) interfieren, pero hay momentos en que se nota más el efecto de una de las ciclicidades. El estudio de secuencias largas de sedimentos, generalmente marinos, puede revelar repeticiones de capas relacionadas con las ciclicidades de Milankovich. En los sedi-

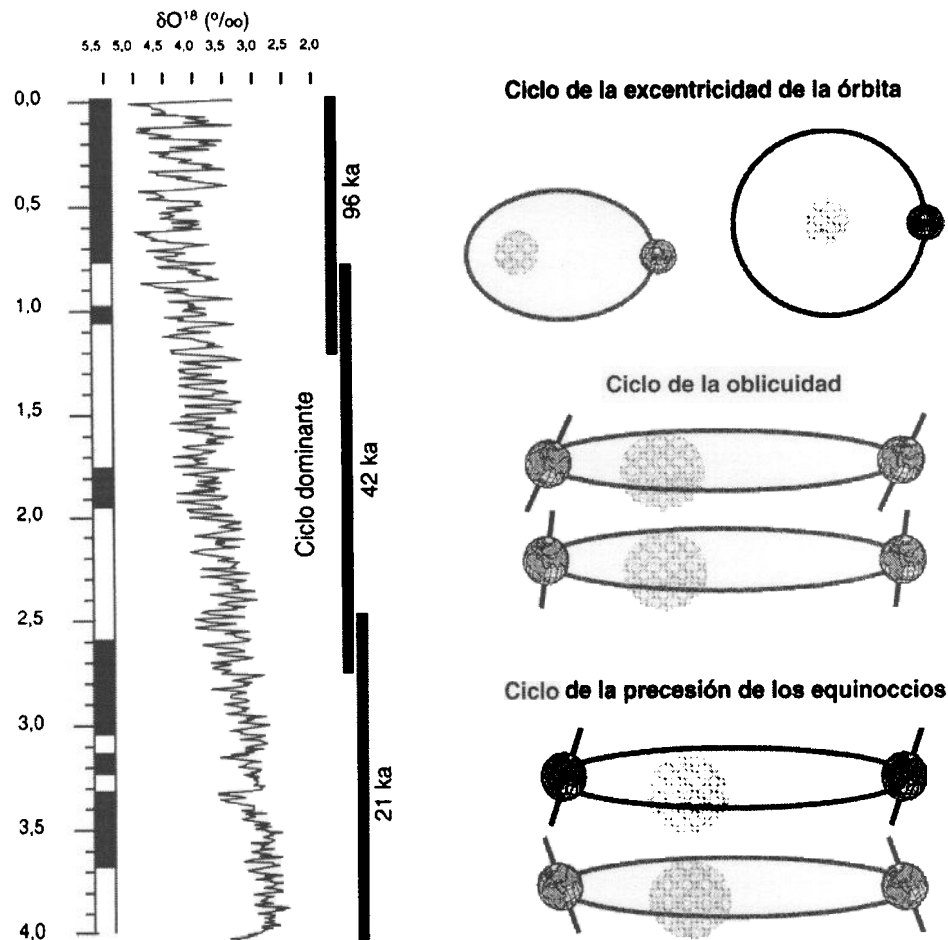
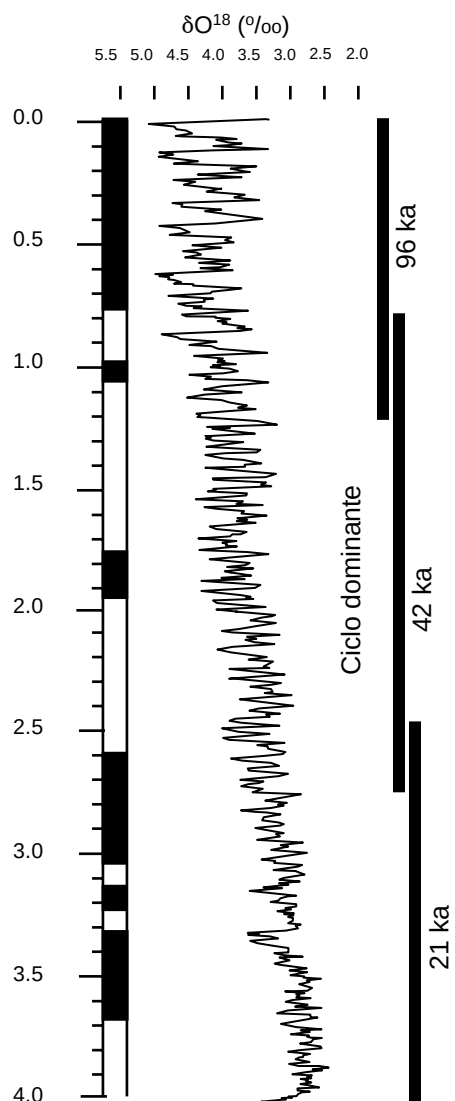
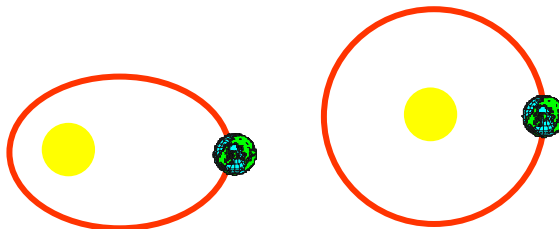


FIG. 1.4. Los Ciclos de Milankovich. A la izquierda, la escala del tiempo en millones de años, el paleomagnetismo y el registro de isótopos de oxígeno (según Shackleton, 1995). A la derecha, representación esquemática de la variación cíclica en la forma en la que la Tierra gira alrededor del Sol. En el centro está indicado la duración de los ciclos en los que cambia la excentricidad, oblicuidad y precesión de equinoccios y los períodos en los que los respectivos ciclos han tenido un efecto dominante sobre la Tierra. Se puede observar que el registro de isótopos de oxígeno refleja la ciclicidad dominante. También se puede observar que los valores cada vez son más altos, lo que corresponde a temperaturas más bajas.

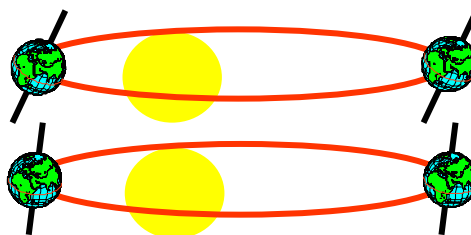
mentos marinos, la secuencia arcillas azules, arcillas oscuras con mucho material orgánico, y diatomitas se repite cada 42 ka, indicando que esta ciclicidad está relacionada con el ciclo de la oblicuidad, que influye en la estacionalidad. También el estudio de isótopos en secuencias largas de sedimento (Shackleton, 1995) —o de cantidad de sedimento— de origen eólico (deMenocal, 1995b) puede revelar ciclicidades relacionadas con las de Milankovich.



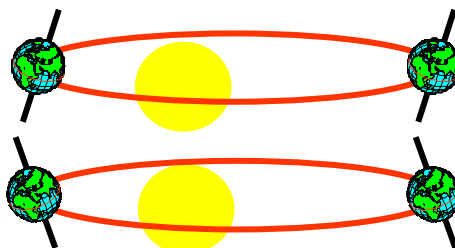
Ciclo de la excentricidad de la órbita



Ciclo de la oblicuidad



Ciclo de la precesión de los equinoccios



El estudio de los isótopos de oxígeno es una herramienta fundamental. El isótopo común de oxígeno tiene el peso molecular 16, pero existe un isótopo con dos neutrones más en el núcleo y con el peso 18 y, por lo tanto, más pesado. La proporción de estos isótopos en los esqueletos de los foraminíferos (organismos unicelulares) da información sobre la temperatura del ambiente en que vivieron. En sondeos realizados en sedimentos marinos, se puede establecer una curva que indica las variaciones de temperatura en este punto a lo largo del tiempo gracias al recuento de los dos isótopos (Shackleton, 1995; Shackleton, 2000).

Muchas de estas curvas, realizadas en distintos puntos del mundo, revelan que se trata de variaciones de temperatura a escala global (Zachos *et al.*, 2001). Estas variaciones son cíclicas y se puede reconocer en ellas los Ciclos de Milankovich. Podemos observar que los diferentes ciclos tienen una influencia dominante sobre el clima global en distintos períodos (fig. 1.4). Hace más de 2,6 Ma, la ciclicidad de la precisión de los equinoccios era dominante; después de esta fecha, lo fue la ciclicidad de la oblicuidad y, a partir de unos 0,9 Ma, la de la excentricidad de la órbita. También podemos ver que el registro de isótopos de oxígeno indica cada vez temperaturas más bajas. Aunque se considera que el registro de isótopos de oxígeno es indicativo de temperatura, también refleja la acumulación de hielo. El estudio del índice Mg/Ca en los sedimentos marinos permite separar las dos señales y conocer la temperatura y el volumen de hielo acumulado en un momento determinado (Lear *et al.*, 2000).

La existencia de varios períodos glaciales estaba ampliamente aceptada al final del siglo XIX. Tomando como base la geomorfología de los Alpes, se han denominado los siguientes episodios glaciales: Würmiense, Rissense y Mindeliense. Los interglaciales se denominan simplemente por los glaciales que los limitan, por ejemplo, uno de ellos se llama Mindel-Riss. En base a las morrenas (sedimentos formados por glaciares) encontradas en Alemania, se ha dado nombre al Weichseliense, Saaliense y Elsteriense mientras que los interglaciales son conocidos como Eemiense y Holsteiniense. El interglacial Cromeriense, definido en Inglaterra, precede a estos glaciales. Existen muchos más nombres para identificar los glaciales e interglaciales; muchos países han establecido secuencias estratigráficas con sus propias denominaciones y, además, cada vez se reconocen más variaciones. El registro de los isótopos de oxígeno ha demostrado que existen muchos más ciclos glaciales de lo que se pensaba.

La ciclicidad glacial tiene un gran impacto en las latitudes altas, pero las variaciones de temperatura son mucho menores en los trópicos. Se ha propuesto que la de las latitudes altas tenga su equivalente en una ciclicidad pluvial en los trópicos. Los detalles de esta ciclicidad son discutidos, pero el registro de arena de origen eólico en sedimentos marinos al lado de África refleja los Ciclos de Milankovich, indicando ciclos en el grado de aridez en la zona del Sahara (deMenocal, 1995).

Actualmente el efecto invernadero es muy conocido y está bien descrito, aunque la explicación del efecto es más complicada. Simplificando, ciertos gases como el anhídrido carbónico (CO_2) hacen que la atmósfera absorba mejor la radiación solar y que la temperatura global aumente. A lo largo de la historia de la Tierra, han existido grandes variaciones en la cantidad de CO_2 en la atmósfera porque el carbono puede estar almacenado en la vegetación o en las rocas. Procesos geológicos como el de la erosión pueden provocar, al igual que el uso de combustibles fósiles, un aumento de

CO₂ en la atmósfera, y el almacenamiento de carbono en sedimentos o biomasa puede provocar un descenso de éste.

El estudio de isótopos de carbono en el registro geológico indica un descenso de la concentración atmosférica de CO₂ a partir de unos 6-8 Ma. El descenso de la concentración de este gas influye en las glaciaciones y tiene también influencia sobre la vegetación. Distintos tipos de fotosíntesis son más o menos eficaces dependiendo de la concentración de CO₂ y de la temperatura; uno de ellos, llamado C3, predomina en ciertos tipos de gramíneas. El estudio de los paleosuelos sugiere que el descenso en la concentración de CO₂ a partir de 6-8 Ma causa la extensión de paisajes abiertos con un predominio de gramíneas en latitudes bajas y más tarde también en latitudes altas (Cerling *et al.*, 1997; Pagani *et al.*, 1999). Ello coincide con el aumento de herbívoros pastadores con dientes con coronas altas (las gramíneas provocan un fuerte desgaste en los dientes) y asimismo puede coincidir con el principio de bipedismo en los homínidos.

Los ciclos glaciales no solamente influyen en el clima, sino que también lo hacen en la geografía. Durante las glaciaciones, se forman grandes glaciares sobre los continentes en zonas que habitualmente tienen mucha precipitación. La acumulación de hielo sobre la superficie terrestre provoca un descenso del nivel de los océanos (el nivel eustático). Durante el Eoceno tardío ha empezado una primera acumulación sobre la Antártida y, aunque existen fluctuaciones, ésta ha ido aumentando gradualmente (Davis *et al.*, 2001; Lear *et al.*, 2000). La primera indicación de acumulación de hielo sobre Groenlandia es de hace 11 Ma, y la existente sobre el norte de Eurasia es de hace unos 2,6 Ma. A causa de ello, el nivel de los océanos, aunque con grandes fluctuaciones, ha ido bajando a lo largo de este tiempo. Alrededor de los continentes existen plataformas continentales sumergidas que, al ir descendiendo el nivel eustático, van exponiendo una mayor parte de su superficie formando islas que se van aproximando a los continentes hasta llegar, en algunos casos, a unirse a ellos. Como veremos más adelante, las islas pueden acoger faunas endémicas con características muy peculiares a consecuencia del aislamiento. El descenso general del nivel marino ha disminuido el nivel de endemismo de las faunas insulares. Durante los glaciales tuvieron lugar nuevas dispersiones hacia las islas, fenómeno que facilitó también la dispersión humana tanto hacia las islas como hacia el continente australiano.

Todos los factores que influyen en el clima pueden explicar la dinámica térmica del planeta y, por lo tanto, son básicos para entender cómo se producen los cambios de temperatura y de humedad que serán fundamentales para entender la emergencia de nuestro género en África y su posterior expansión planetaria (Vrba *et al.*, 1995; Wilson *et al.*, 1999).

HOMÍNIDOS: LAS PRIMERAS OCUPACIONES DE LOS CONTINENTES

Eudald Carbonell (coordinador)

**Xosé Pedro Rodríguez, Robert Sala, Jan van der Made,
Carlos Lorenzo, Marina Mosquera, Manuel Vaquero,
Jordi Rosell, Josep Vallverdú, Francesc Burjachs, Policarp Hortolà**



Ariel

AUTORÍA DE LOS CAPÍTULOS

Eudald Carbonell: 1.1, 1.3, 2.13, 3.1, 3.12, 4.1, 4.8, 4.20

Xosé Pedro Rodríguez: 1.5, 3.9, 3.18, 3.19, 4.8, 4.17, 5.2, 5.3, 5.6, 5.7, 5.8, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 6.7, 6.8

Robert Sala: 2.8, 2.9, 2.10, 3.8, 3.10, 4.7, 4.10

Jan Van der Made: 1.3, 2.3, 3.4, 4.4, 4.24, 5.5, 6.2

Carlos Lorenzo: 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.17, 3.7, 3.13, 4.5, 4.6, 4.14, 5.4

Marina Mosquera: 2.12, 2.15, 2.16, 3.5, 3.11, 4.8, 4.11, 4.12, 4.13, 4.15

Manuel Vaquero: 2.18, 3.15, 3.16, 3.17, 4.18, 4.21, 4.22, 4.23

Jordi Rosell: 1.6, 2.11, 2.14, 2.19, 3.6, 3.14, 4.19

Josep Vallverdú: 1.2, 2.1, 3.2, 4.2, 5.1, 6.1

Francesc Burjachs: 1.3, 2.2, 2.3, 3.3, 4.3, 4.9, 4.16, 6.1

Policarp Hortolà: 1.4