

Francisco Anguita

Biografía de la Tierra

Historia de un
planeta singular



Biografía de la Tierra

**Historia de un
planeta singular**

Francisco Anguita

Biografía de la Tierra

El montaje del autor

Cuando en el año 2001 la Editorial Aguilar me propuso escribir un libro sobre la historia de nuestro planeta, mi idea inicial fue hacer una versión actualizada y resumida de *Origen e historia de la Tierra*, que había escrito para Editorial Rueda en 1988. Sin embargo, el capítulo de prueba recibió un suspenso. Los editores no querían un manual universitario, sino –recuerdo muy bien sus palabras– un libro *que se pudiese leer en el metro*. Así que nada de recuadros aclaratorios, y muy pocas figuras.

Con la perspectiva de estos diez años, veo que los editores tenían mucha razón. La obligación de escribir un relato continuado dejó la historia a salvo de las roturas que suponen los *boxes*, y la escasez de figuras me obligó a ingeniarme para transformar los datos (también los datos gráficos) en palabras. Con las dos cosas ganó mucho el libro, y sobre todo gané yo, porque tuve que reinventar mi forma de escribir, demasiado marcada por la costumbre de hacerlo para estudiantes universitarios. Empecé a redactar más suelto, y descubrí con alivio que escribir así era divertido.

La peripecia comercial de *Biografía de la Tierra* no fue muy airosa. El libro se vendió mucho menos de lo que la editorial había calculado, y al cabo de un tiempo Aguilar me contactó para ofrecirme los ejemplares sobrantes antes de destruirlos. Salvé los que pude, pero me quedó claro que la primera edición sería también la última. El libro se ha seguido difundiendo lentamente, y en estos momentos, cuando ya está definitivamente agotado, existe una cierta demanda. Así que, siguiendo la sugerencia de mi colega Gabriel Castilla, me he puesto a actualizarlo y corregir sus errores, mientras que Gabriel se ha encargado muy desinteresadamente de digitalizarlo.

Aprovecharé para, diez años después, llevar un poco la contraria a los editores de Aguilar, e ilustrar esta revisión con **figuras** adicionales. Añado también las **referencias**, muy abreviadas, de las fuentes de los nuevos datos; supongo que casi nadie las va a usar, pero tampoco estorban demasiado. Y he reservado el color **rojo** para los errores más garrafales.

Al acabar esta revisión, me queda un cierto pánico al ver la cantidad de cosas que ignoraba hace diez años, y la cantidad de ellas que sigo ignorando. Me consuelo con lo que decía aquel tipo, sin duda inventado, que citaba Juan de Mairena (éste, inventado seguro): uno que no se iba a la cama contento si no había ignorado alguna cosa nueva a lo largo del día. Por otra parte, me he vuelto a maravillar del ingenio de los científicos que reconstruyen el pasado de este planeta, que igual encuentran las huellas de asteroides que cayeron al principio de su historia, que confirman una superglaciación o desentrañan la temperatura precisa de los dinosaurios gigantes.

Pero es de verdad triste que esta maravillosa época científica (algunos la han calificado de prolongación del Renacimiento) se produzca en un tiempo en el que las esperanzas de una sociedad viable se difuminan un poco más cada día.

Madrid, 1 de agosto de 2011

Índice

<i>Introducción: Un viaje en el tiempo</i>	11
Capítulo I. En el principio...	13
Los cometas gigantes.....	13
En la pista	18
Nace un satélite	20
Los océanos de fuego.....	25
Años de miles de días.....	26
Arqueólogos de la atmósfera	29
Con termostato incorporado.....	35
Tiempos difíciles	38
La Tierra comienza a escribir su diario de viaje.....	42
Un profeta rechazado	48
Y, sin embargo, se mueven	51
La nueva Tierra	54
Las pruebas a favor de la nueva Tierra.....	59
De vuelta al Arcaico.....	62
A pesar de todo, la vida asoma.....	68
¿En la playa, o en el fondo del mar?.....	74
Una simple hélice	79
Invasores del espacio	81
Alimentarse de luz	87

El <i>volkswagen</i> de la biosfera, y otros modelos	90
El fin de la infancia	92
Capítulo II. La edad adulta.....	95
La atmósfera petrificada	95
Estrategias para un planeta distinto	97
Un irresistible magnetismo	99
El oro que cayó del cielo	101
Mitología y geología: la extraña conexión	105
Los muchos <i>pulsos de la Tierra</i>	111
Rodinia.....	117
El Gran Frío	121
Un poco de ciencia teórica	130
Planetas como peonzas	133
La Tierra Blanca	135
El árbol, o más bien arbusto, de la vida	138
El registro de la vida proterozoica: de los biomarcadores a las colinas de Ediacara	142
La biosfera en el Proterozoico y la discutida marcha hacia el progreso.....	147
El fin de una larga eternidad	151
Capítulo III. La Tierra moderna.....	153
El <i>big bang</i> de la vida	153
El baile de los continentes.....	159
Las crisis de la vida	165
La evolución se toma vacaciones.....	172
Muerte de un antiguo océano.....	175
La disputada herencia de Rodinia	178
En el Gran Pantano.....	182
El continente de un detective aficionado	187

El tiempo de los desiertos.....	191
La esposa de Océanos y el Dr. Strangelove	193
La madre de todas las extinciones	196
Pangea no aguanta más.....	201
Capítulo IV. El pasado reciente.....	207
Paz en la tierra, guerra en el mar.....	207
Fin de la tregua en Pangea	210
¿Eran tan terribles los dinosaurios?	213
Los secretos de un éxito.....	217
La segunda conquista del aire	220
El árbol del pan en Groenlandia	226
Inundación.....	235
¡Catástrofe!	238
Las huellas	241
Una de detectives.....	249
Después de la revolución.....	256
La venganza de los mamíferos.....	258
Nacen las grandes montañas	260
La Tierra se congela	266
Niágara en el Mediterráneo	274
La conquista del Este.....	282
Humanos	287
Viajes.....	289
Los motores de la evolución homínida	295
Marte en el Oeste	297
El Dryas Reciente y la Pequeña Edad de Hielo: mensajes del pasado cercano	300
Capítulo V. Un presente global.....	307
A bordo de un mundo inquieto	307
La huella del hombre.....	315
Los límites de la Tierra	322

Capítulo VI. El futuro	329
El enigma del clima	329
Cuando los mundos chocan.....	334
Los extraños continentes.....	337
El fin de la Tierra	339
 <i>Apuntes biográficos de algunos de los investigadores citados.....</i>	 343
 <i>Bibliografía</i>	 349

Un viaje en el tiempo

Vivimos sobre un viejo planeta, y ésta es su historia. No es una historia hecha a la medida del hombre, un invitado de última hora que, incluso cuando rastrea sus propios orígenes, se limita a arañar la superficie del pasado. El planeta ha vivido largo tiempo —miles de millones de años— sin nosotros, y seguirá viviendo sin nosotros cuando el hombre ya no exista. Los científicos de la Tierra buscan pistas como detectives del pasado y diagnostican dolencias como médicos del futuro. Armados con herramientas de alta tecnología, pero sobre todo con la altísima tecnología de un cerebro superdesarrollado por la evolución —el famoso sentido común—, han logrado increíbles reconstrucciones de hechos que literalmente se pierden en la noche de los tiempos —cuando el Sol apenas alumbraba—; y se atreven, aun admitiendo sus limitaciones, a predecir el porvenir del planeta.

Este relato tiene por tanto la estructura de un viaje al pasado, con una tímida incursión final en el futuro. Pero este viaje no sería realista si no incluyese las peripecias de los historiadores. El libro será por ello un entretejido de las búsquedas, peleas, éxitos y fracasos de los científicos que investigan la Tierra junto con los

hechos, a veces prosaicos y maravillosos muchas otras, que han descubierto. En este viaje usaremos —con moderación: es una promesa— la vieja añagaza de tomar al lector por un viajero en el tiempo. El tiempo de la Tierra.

En el principio...

LOS COMETAS GIGANTES

«Quizá no es un disco protoplanetario, sino posplanetario», dice Alfred Vidal, del Instituto Astrofísico de París. «¿Qué significa eso?». «Que ya hay planetas formados alrededor de la estrella». Debemos viajar largo tiempo hacia el sur para ver esa estrella. Es una luz insignificante, vecina de la bellísima Canopus y también cercana a la Cruz del Sur. Un atlas astronómico nos dirá que la superficie de la estrella Beta de la constelación del Pintor goza de una cálida temperatura, 10.000 °C, y que la luz que surge de ella tarda 53 años en alcanzarnos. Pero ese pequeño punto luminoso es además el escenario de una historia fabulosa, que ha sido reconstruida por los astrónomos que se dedican a detectar planetas lejanos. Hace unos cien millones de años, la gravedad contrajo las moléculas de gas y las motas de hielo, roca y metal de una fría nube interestelar. Sus choques elevaron la temperatura hasta que la nube se volvió incandescente: un millón de años más tarde, su centro era un furioso torbellino de rayos ultravioleta y vientos estelares huracanados que fueron limpiando los residuos de la nube. No todos: algunas de las briznas de gas, roca y metal se habían

fundido en cuerpos mayores, que el viento de la estrella ya no podía arrastrar.

Ahora, millones de años después, estos cuerpos se han convertido en planetas, que atraen a los cuerpos menores y los lanzan sobre los otros como un hondero lanza sus proyectiles. Beta Pictoris sigue viviendo tiempos revueltos: grandes masas de hielo y roca son proyectadas desde la periferia del sistema hacia su congestionado centro. Las colisiones generan nuevas nubes de residuos, que el viento de la estrella sigue barriendo...

«Vemos grandes masas de gas que caen por centenares y a gran velocidad hacia la estrella. Esto no tiene lógica: el viento estelar debería impulsarlas hacia el exterior. Creemos que este gas proviene del núcleo de grandes cometas que están bombardeando el interior del sistema. Y sólo los planetas gigantes pueden atraer cometas a esta velocidad».

Buscamos las huellas de nuestro pasado en la luz que nos llega de un mundo lejano. No podemos hacerlo de otra manera: nadie puede ser testigo de su propio nacimiento, pero esperamos aprender viendo otros partos planetarios. Beta Pictoris nos ha contado la historia que queríamos oír: una historia que, para la Tierra, empezó hace algo más de 4.500 millones de años. En la Vía Láctea, nuestra galaxia, hay una población importante de estrellas de esta edad: un acontecimiento desconocido provocó en ese momento el nacimiento sincronizado de miríadas de estrellas. Nuestro Sol, hijo de este alumbramiento múltiple, fue sin embargo, en otro sentido, hijo único, cuando lo normal es que las estrellas pertenezcan a grupos dobles o triples. Esto depende de la velocidad de giro de la nube: igual que una batidora a toda velocidad tiende a salpicar salsa, una nube protoestelar que gire

rápida­mente tiende a fragmentarse en varios centros de nucleación, cada uno de los cuales dará lugar a una estrella. El panorama de nuestros cielos, que podrían estar ocupados por varios soles (quizá impidiendo la noche) dependió, en último término, de una simple propiedad física de la nube primigenia.

Pero éste es sólo el marco general: en cuanto al Sol mismo, tenemos pruebas de que el nacimiento de nuestro mundo fue desencadenado por una defunción cercana. Una estrella anónima explotó en una bola de fuego colosal, y la onda expansiva de esta supernova viajó por el espacio, comprimiendo y contaminando las nebulosas cercanas. Hemos encontrado las cenizas de esta cortina de fuego escondidas en el interior de algunos meteoritos: las reconocemos porque sus especies químicas (isótopos) no se parecen al resto de los materiales del sistema. Por ejemplo, casi la mitad del meteorito de Allende, caído en México en 1969, está formada por minerales hidratados y compuestos de carbono. Si el asteroide del que procede este meteorito hubiese sido calentado tras su formación (mediante choques, por ejemplo), no habría retenido agua: esto prueba su carácter primitivo. El meteorito contiene fragmentos en los que abundan los isótopos producidos en la explosión de supernovas.

Los científicos planetarios creen que los acontecimientos que se desencadenaron tras esta contracción forzosa se parecieron a los que adivinamos en Beta Pictoris: el centro de la nube, donde la densidad de partículas era máxima, se convirtió en la estrella que tantos pueblos antiguos divinizaron. En los espacios próximos, a altas temperaturas, sólo pudieron estabilizarse las rocas y el hierro, que dieron origen a la Tierra y sus

vecinos. Más lejos, los gases generaron planetas gigantes; y en los arrabales, los restos de la nube expulsados por el viento solar constituyeron un enorme cementerio helado de cientos de miles de millones de cometas. En la actualidad, tras 4.570 millones de años de evolución, todo parece tranquilo en esta parte del Cosmos; pero los planetas terrestres llevan consigo las cicatrices de tiempos revueltos parecidos a los que se desarrollan ahora en torno a Beta Pictoris. Las manchas oscuras que la Luna muestra tan claramente en el plenilunio fueron causadas por un bombardeo de asteroides y cometas, quizá impulsados por Júpiter; Mercurio y Marte presentan similares heridas de guerra; por pura lógica —no había dónde esconderse—, los científicos piensan que Venus y la Tierra las ostentaban también, pero su continuada actividad interna ha cubierto estos cráteres gigantes.

En 1999, en la ciudad de Turín, un grupo de especialistas en impactos asteroidales creó una clasificación de los desastres que podían llegar del cielo. Las consecuencias iban desde el aniquilamiento de una ciudad a la desaparición de la biosfera. Las probabilidades de colisión, como era de esperar, decrecen con el tamaño del proyectil: podemos respirar tranquilos durante los próximos millones de años. Pero, analizado en perspectiva, lo que esto significa es que el proceso que comenzó con la explosión de aquella anónima supernova no ha concluido aún. El Sistema Solar sigue sin estar libre de intrusos, y algunos de ellos, inevitablemente, nos visitarán en el futuro.

Otras estrellas nos cuentan otras historias: por ejemplo, la número 55 de la constelación de Cáncer oscila como si un planeta casi tan masivo como Júpiter

girase en torno a ella. Pero lo hace a una distancia mucho menor que la que separa a Mercurio del Sol. ¿Por qué en este sistema los planetas gigantes no se formaron lejos de la estrella, como sucedió en el Sistema Solar? ¿O se formaron lejos y emigraron después hacia la estrella? ¿Por qué no lo han hecho Júpiter y sus compañeros? ¿Lo harán en el futuro? ¿Cuál sería entonces la suerte de la Tierra? No tenemos respuestas —sí conjeturas— para ninguna de estas preguntas. A medida que hemos ido detectando sistemas planetarios, nuestras teorías han ido revelándose como toscas aproximaciones a la verdad: frente a algunas confirmaciones nos hemos llevado grandes sorpresas. Hasta ahora, la mayor de ellas ha sido encontrar planetas que no giran en torno a ninguna estrella. ¿Expulsados de sus órbitas, o solitarios desde su nacimiento? Nuestros más queridos esquemas se rompen: algunos llaman ciencia a estos sobresaltos, normales, por otra parte, para un conjunto de ideas que se habían propuesto a partir de los datos de un solo caso. ¿Qué enfermedad podría diagnosticarse a partir de los síntomas de un único paciente? El siglo XXI será testigo del nacimiento de teorías generales sobre la formación de planetas. Al lado de ellas, quizá nuestras ideas actuales parezcan a los científicos del futuro tan ingenuas como hoy nos parecen las de los naturalistas medievales sobre el magnetismo o los terremotos.

Pero de esta maraña de preguntas ha surgido impetuosa una idea revolucionaria: al menos una de cada veinte estrellas tipo Sol tiene planetas en derredor. Después de siglos de especulaciones, *Homo sapiens* ha encontrado otros posibles hogares para su hipotética compañía cósmica.

EN LA PISTA

En sus inicios, el Sistema Solar debió de ser un gran espectáculo: una vez que el viento del Sol despejó las nubes de gas, billones de partículas sólidas, que los científicos han llamado planetesimales, giraban caóticamente en torno a la estrella. Como en las pistas de *karts*, los adelantamientos no siempre se producían de forma ordenada, y las colisiones eran frecuentes; también lo era que los accidentados quedasen enganchados, soldados por el mismo calor desprendido en el choque. Así, durante millones de años, este proceso de canibalismo dio lugar a unos pocos cuerpos de cientos de kilómetros de diámetro, los embriones de los futuros planetas. Al final, en la zona interior de la antigua nube sólo quedaron unos pocos rivales que se disputaron los embriones planetarios restantes.

¿Por qué hay en torno al Sol cuatro planetas densos, en vez de dos, o de ocho? Sencillamente porque en la zona interior del sistema sólo había espacio para que cuatro embriones planetarios creciesen sin destruirse. Pero el resultado final iba a depender esencialmente de la excentricidad de las órbitas de los últimos competidores, es decir, de su tendencia a invadir las «calles» de los otros. Una nebulosa con algo de gas residual hubiese sido una pista más peligrosa, porque los embriones planetarios pueden utilizar el gas para aumentar su excentricidad (es como si se apoyaran en el gas para cambiar de velocidad), y al hacerlo así, probablemente se hubiesen destruido hasta dejar en pista un solo vencedor. Es curioso pensar que, si tenemos objetivos accesibles para nuestros primeros viajes espaciales tripulados (Marte, por ejemplo), ello se debe en último término

a que el viento solar hizo un buen trabajo, preparando cuidadosamente la pista para la escena final del nacimiento de los planetas terrestres.

El guión de esta obra es imaginativo, pero no podemos asegurar que sea cierto. Se trata de una suma de suposiciones razonables, pero muy pocas de ellas se han podido someter a comprobación, y menos aún a cuantificación. Es decir, estamos ante lo que los científicos denominan una hipótesis de trabajo. La mejor prueba de ello es que, hace unos años, un grupo de astrónomos japoneses propuso lo que se dio en llamar el «modelo de Kioto», según el cual los planetas se habrían formado *antes* de que los gases fuesen barridos de la nebulosa solar. En esta hipótesis, los planetas terrestres contendrían al nacer una gran cantidad de compuestos volátiles (es decir, de bajo punto de fusión, como es por ejemplo el agua) y, por lo tanto, grandes cantidades de gases: la Tierra, en concreto, habría disfrutado de una tórrida atmósfera de hidrógeno (que luego perdió) 10.000 veces más densa que su atmósfera actual. Un pequeño Júpiter.

Por diferentes que sus predicciones sean respecto a los de la hipótesis estándar, no se ha podido demostrar que el modelo de Kioto sea incorrecto; sin embargo, no explica cómo los planetesimales, con su pequeña masa, pudieron captar tantos gases de la nebulosa protosolar, ni tampoco cómo los perdieron. En cambio, esta alternativa explica un aspecto oscuro del modelo mayoritario: Júpiter y Saturno contienen núcleos de roca y metal mucho mayores que la Tierra. Al menos estos embriones planetarios sí se formaron antes de la expulsión de los gases, ya que fueron cubiertos por cantidades gigantescas de hidrógeno y helio. En resumen, parece evidente que no tendremos hipótesis más sólidas sobre el origen preciso

de los planetas hasta que no podamos estudiar en detalle la estructura de otros sistemas planetarios.

Volvamos a la pista de choques. Incluso si las velocidades relativas a las que colisionaban los embriones eran pequeñas («alcances», en la jerga de la Dirección General de Tráfico), la atracción gravitacional aceleraría a los protoplanetas justo antes de los impactos, que terminarían produciéndose a velocidades respetables, unos diez kilómetros por segundo. En los cuerpos grandes estos choques no son elásticos (no hay rebote), lo que significa que toda la energía de la colisión se transforma en calor. Los cálculos sobre energía acumulada indican que, a lo largo de su proceso de crecimiento, los embriones planetarios pudieron acumular suficiente calor como para fundirse: durante su formación, los planetas fueron masas semisólidas de roca y metal, auténticos *carros de fuego* en los que los metales, más densos, se habrían ido hundiendo hasta el centro. Las huellas de este espectacular episodio quedaron borradas por la frenética actividad interna de nuestro planeta; pero se conservaron en el museo del Sistema Solar que es la Luna. Antes de explicar cómo pudo rastrearse esta historia hay que presentar a uno de los satélites más extraños de todo el sistema.

NACE UN SATÉLITE

La mayor recompensa científica del programa Apolo fueron, sin duda, los 377 kilos de muestras de rocas lunares, tan antiguas que pueden considerarse un testimonio *escrito* del origen del Sistema Solar. Aunque, por motivos de seguridad, la mayoría de los alunizajes se

realizaron en las zonas más planas, las llanuras de lava conocidas como *maria* (los «mares» de los antiguos astrónomos), los astronautas fueron adiestrados para reconocer y recoger los fragmentos procedentes de las tierras altas, las partes más antiguas de la Luna. El análisis de estas muestras ha sido una de las empresas más cuidadosamente planificadas de la ciencia moderna. En laboratorios tan impolutos que (se decía) al lado de ellos muchos quirófanos resultaban sospechosos, equipos selectos de geoquímicos se dispusieron a desvelar los misterios del origen de los planetas. En general, la química de las rocas lunares recordaba mucho a la del manto terrestre, la capa rocosa situada bajo la corteza; pero un detalle llamó la atención desde los primeros análisis: la Luna estaba absolutamente deshidratada (en general, desprovista de volátiles), y también empobrecida en hierro respecto a la Tierra. ¿Dónde estaban el hierro y el agua lunares?

En marzo de 1974, menos de cinco años después de la vuelta del Apolo 11, todos los grandes nombres de las ciencias planetarias reunidos en Houston (Texas, EE UU) oyeron cómo un joven científico desconocido, William Hartmann, exponía una nueva hipótesis sobre el origen de la Luna: nuestro satélite era, según él, el producto de la colisión contra la Tierra del último embrión planetario. Este choque habría despedido una nube de partículas que quedó en la órbita terrestre hasta que se unió para originar la Luna. No habría apenas hierro porque el núcleo del planetario que chocó contra la Tierra se hundió, debido a su mayor densidad, en el interior terrestre¹; y no habría quedado agua porque la alta temperatura

¹ Y sin embargo, la corteza terrestre contiene cantidades relativamente elevadas de metales: es muy probable que parte de ellos provenga del impactor.

del choque hizo que todos los volátiles se vaporizaran y se perdiesen en el espacio. El parecido químico general sugería que el intruso se había formado en la misma zona de la nube solar; probablemente era el embrión planetario de la pista vecina.

La idea era atrevida, y Hartmann ha confesado después que se sentía inseguro, especialmente cuando Alan Cameron, un prestigioso geoquímico, levantó la mano para interpellarle; para su sorpresa, esta intervención supuso un inesperado apoyo. Las simulaciones por ordenador habían llevado a Cameron a una conclusión semejante, pero aún más arriesgada: la masa del impactor debió de ser al menos la décima parte de la terrestre. Un invasor de tamaño marciano, un auténtico planeta ya formado. La variante de Cameron sobre el origen de la Luna es la que se ha hecho más popular, a pesar de que plantea diversos inconvenientes de detalle. Sin embargo, posee una virtud: al requerir un choque excepcional, explicaría también por qué, de entre todos los planetas interiores, tan sólo la Tierra tiene un satélite gigante.

La hipótesis del gran impacto sobre el origen de la Luna tardó diez años en imponerse entre la comunidad científica, el tiempo necesario para que se aceptaran los impactos como un proceso básico en el nacimiento y la evolución de los planetas. Lo que equivale a reconocer que, como dijo el científico planetario Carl Sagan, nuestro medio ambiente no abarca sólo los prados cercanos, sino que vivimos en un «medio ambiente cósmico», en el que las colisiones (microscópicas o colosales) son acontecimientos con los que hay que contar. Esta pirueta intelectual se ha visto confirmada por la exploración planetaria, y no sólo por la localización de decenas de miles de cráteres de impacto en las superficies de todos los

cuerpos planetarios, sino también mediante razonamientos más sutiles. Por ejemplo, todos los planetas terrestres, de Mercurio a Marte, forman una familia bien avenida en la que los cuerpos más grandes son también los más densos. Esto significa que en esencia se pueden considerar todos ellos variantes más o menos compactadas del mismo material. En el interior de un planeta como la Tierra se alcanzarán mayores presiones que en el interior de uno pequeño, como Marte, y ello hará que el material alcance mayores densidades.

Sin embargo, Mercurio, casi tan denso como la Tierra pero poco mayor que la Luna, se sale claramente de la fila. ¿Por qué este planeta es tan denso, a pesar de ser tan pequeño? Hasta la fecha, la mejor explicación es que otro gran impacto arrancó de Mercurio buena parte de su material rocoso, dejándole una proporción excesiva de metal. Como vemos, hay algo de arbitrario en los resultados de las colisiones: a veces un gran satélite, a veces un planeta superdenso, a veces un planeta *tumbado*, como Urano, cuyo eje de rotación está contenido en la eclíptica, el plano que contiene las órbitas de los planetas. Estos procesos siguen siendo, sin embargo, las mejores explicaciones para el pintoresco zoológico que es nuestro sistema de planetas, al que los impactos darían el «toque final».

El análisis de las rocas lunares no delató solamente el origen del satélite, sino que también nos contó historias de cuando el Sistema Solar era joven. Por ejemplo, casi todas las rocas lunares son brechas, es decir, han sido rotas y soldadas de nuevo por los repetidos impactos. Entre los fragmentos se ha detectado vidrio (material enfriado tan rápidamente que no pudo ordenarse y formar cristales), cuya edad delata el momento del

impacto que formó la brecha. Pues bien, aunque en la Luna se encontraron fragmentos de rocas muy antiguas (la muestra que la prensa norteamericana llamó «roca del Génesis» tiene 4.440 millones de años), no se ha hallado ningún vidrio de más de 3.920 millones de años de edad. La explicación más verosímil de esta barrera cronológica es que hace unos 3.900 millones de años la Luna sufrió un intensísimo bombardeo asteroidal, en el que se formaron las mayores cuencas de impacto, y en el cual, además, fueron destruidas buena parte de las rocas anteriores.

Este brutal acontecimiento ha recibido los nombres de cataclismo lunar o Gran Bombardeo Terminal; quizá el segundo nombre sea el más adecuado, porque difícilmente un suceso de esta envergadura pudo afectar sólo a la Luna. Se ha calculado que más de un 80% de la superficie de nuestro satélite fue destruido por los grandes cráteres y sus eyecta (fragmentos de roca expulsados en las colisiones). El periodo de bombardeo violento pudo durar tan sólo 200 millones de años, o incluso sólo 20. ¿Cuál fue su causa? ¿Quizá alguna colisión gigante en el cinturón de asteroides, que llenó de fragmentos todo el Sistema Solar? ¿O quizá una lluvia de cometas como la que sufre ahora Beta Pictoris? Contra la primera idea se puede argumentar que, tras 600 millones de años de evolución, el Sistema Solar debería haber agotado ya su ración de cataclismos; éste parece un periodo razonable para que los cuerpos adquieran órbitas «limpias», en las que no tendrían ocasión de competir entre sí. La hipótesis cometaria tiene la ventaja de que en los arrabales del Sistema Solar las influencias exteriores (el paso del Sol a través de nubes de polvo interestelar, por ejemplo) pueden ser importantes.

Volveremos sobre este punto en el apartado «Tiempos difíciles».

LOS OCÉANOS DE FUEGO

El análisis de las rocas de las blancas tierras altas lunares reveló otro dato interesante. La corteza lunar era muy homogénea en su composición: procedía en su totalidad de la cristalización de un magma, y en ella predominaban los minerales ligeros, como los feldespatos, que le dan su color claro. La conclusión más razonable fue que la corteza lunar primitiva era como una enorme escoria de fundición natural: había flotado sobre un mar de magma hasta enfriarse y solidificar. Quizá la Luna nunca estuvo fundida en su totalidad, pero al menos su exterior sí lo había estado². Al final del viaje más arriesgado de la historia del hombre, los astronautas habían vuelto con un vellocino de oro científico: la prueba tangible de que los *carros de fuego* habían existido en realidad.

¿Era el océano de magma lunar una excepción, o podrían encontrarse huellas de otros mares fundidos en los planetas terrestres? La extrapolación parecía razonable, pero, por desgracia, no había pruebas. Mientras que la Luna no ha sufrido ningún proceso que pueda borrar de su rostro la huella del fuego, la historia de la Tierra, por ejemplo, ha sido mucho más tormentosa, de forma que las evidencias han desaparecido. Sin embargo, y

² Lo que se explica por la mayor presión del interior, que dificulta el aumento de volumen, sin el cual no puede haber fusión. Por el razonamiento inverso, la descompresión (por rotura de la corteza, por ejemplo) favorecerá la producción de magmas.

basándose en la presencia de núcleos metálicos en los planetas, la mayoría de los geoquímicos tiende a admitir que, durante su formación, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte atravesaron, igual que la Luna, por una fase de fusión generalizada que incluyó un océano de magma.

En la Tierra, el mar de lava pudo tener hasta 1.000 kilómetros de profundidad. Datos recientes indican que el equivalente terrestre de la «roca del Génesis» lunar, la primera escoria de nuestro planeta, fue un vulgar granito. Mientras tanto, como ya se ha mencionado, los metales (sobre todo el hierro, que es con diferencia el más abundante en el Universo) cayeron hasta el centro del planeta como enormes gotas fundidas; a partir de entonces la Tierra tuvo un núcleo, que fue solidificando tan lentamente que aún hoy el 95% de él sigue estando fundido. Esta zona es la que origina el campo magnético del planeta, y probablemente la que explica también una parte importante del calor que llega a la superficie. Es curioso pensar que, tanto al manejar una brújula de bolsillo como cuando vemos rugir un volcán, estamos contemplando restos de la energía acumulada en el principio de la Tierra, hace más de 4.500 millones de años.

AÑOS DE MILES DE DÍAS

El vaivén de las mareas y su relación con la posición de la Luna fueron seguramente algunas de las primeras observaciones científicas realizadas por el hombre. Un hecho bastante menos evidente es que la Luna frena la rotación de la Tierra. El mecanismo es en el fondo igual al de los frenos de los vehículos, que hacen presión con un

disco rugoso contra la rueda; la diferencia es que entre la Tierra y la Luna no hay contacto físico. La atracción de la Luna crea en la Tierra una protuberancia, que es atraída con más fuerza que el resto del planeta por estar más cerca del satélite. Al girar la Tierra gira también la elevación, pero la Luna tira de ella (igual que el viento arrastra una cuerda suspendida de un globo) y al hacerlo dificulta la rotación terrestre como el disco del freno impide el giro de la rueda. El principal efecto de este juego mareal (típico de un gran satélite, como es la Luna respecto a nuestro planeta) es el alargamiento de los días a lo largo de la historia de la Tierra.

Como, por la ley de la conservación de la energía, esta «cantidad de rotación» o momento angular no puede perderse, este proceso tiene otra consecuencia: el frenado de la Tierra se convierte en aceleración de la Luna; y, al girar más deprisa, la Luna se aleja de la Tierra. Nuestro satélite, por tanto, tiende a escapar; sin embargo, nadie huye eternamente: cuanto más lejos esté, menor será la elevación producida por sus mareas, menor el frenado terrestre, y por lo tanto también más lento el alejamiento lunar. Este proceso es ya insignificante: actualmente el día sólo se alarga 20 segundos cada millón de años. Pero, ¿y en el pasado? Por el mismo razonamiento, la Luna debió de estar mucho más cerca de la Tierra, las mareas debieron de ser gigantescas, y la Tierra girar mucho más deprisa. Según cálculos de Hartmann, la Luna pudo formarse a sólo unos 25.000 kilómetros de la Tierra (como comparación, el diámetro terrestre es de 12.000), es decir, quince veces más cerca que en la actualidad. Sin duda, un buen espectáculo nocturno. Por otra parte, y debido a las grandes mareas que esta configuración provocaba, su alejamiento tuvo que ser muy

rápido: en unos cientos de millones de años ya estaría a la mitad de la distancia actual.

¿Queda alguna prueba de este proceso espectacular? Sí, y nos llega por una vía inesperada, de la mano de la paleontología. Está basada en un hecho sencillo: los corales depositan una fina capa de caliza cada día. Además, igual que sucede con los anillos de los árboles, este crecimiento es sensible a las variaciones estacionales, de forma que podemos distinguir la zona aportada entre dos estaciones cálidas. En suma, los esqueletos de los corales (cuando están muy bien conservados) incluyen un diario, pero también un calendario anual. A principios de la década de los sesenta, esta idea se aplicó a los corales actuales, los cuales permitieron averiguar que los años tienen, en general, 365 días. Indiscutible hallazgo, pensará el lector. No tan trivial como parece, se puede responder, ya que estos calendarios vivos tienen la buena costumbre de fosilizar. Y cuando hacemos el mismo contaje de días y años sobre corales antiguos, llegamos a estimaciones sorprendentes: los corales del Devónico (hace unos 380 millones de años) exhibían 400 líneas de crecimiento por año. Otros restos fósiles semejantes pero más antiguos (550 millones de años) llegan a las 420 líneas.

Como el tiempo que la Tierra emplea en su viaje anual alrededor del Sol no varía (que sepamos), más días por año significan, lógicamente, días más cortos: hace 550 millones de años los días sólo tendrían 21 horas. Más atrás en el tiempo, las extrapolaciones se vuelven arriesgadas, ya que el frenado mareal de nuestro planeta no es constante, sino que decrece progresivamente. Y es muy probable que ni siquiera lo haga de forma homogénea, ya que las variaciones en la distribución de la masa de

la Tierra (por ejemplo, la presencia de glaciares) pueden afectarlo. Se han propuesto velocidades de rotación de cuatro a cinco horas: en estas condiciones, el año tendría unos 2.000 días. Pero, sin pruebas para avalarla, esta extrapolación espectacular no pasa hoy por hoy de ser una hipótesis provisional.

ARQUEÓLOGOS DE LA ATMÓSFERA

Vivimos sumergidos en un océano de oxígeno, un peligroso elemento que descompone los tejidos animales y facilita las combustiones espontáneas. Si hubiese tan sólo un poco más del 20% actual, quizá la vida hubiera sido inviable sobre un planeta en el que se prendería una hoguera cada vez que algún material combustible entrase en contacto con el aire. El oxígeno, sin embargo, es muy poco abundante en el Universo (~0,06%), y por la misma razón debió de ser un componente minoritario de la nube protosolar. ¿Cómo ha llegado a formar una quinta parte de nuestra atmósfera? Tenemos pruebas, además, de que en la Tierra primitiva no existía oxígeno libre: las rocas sedimentarias más antiguas (entre 3.800 y 3.000 millones de años) contienen minerales (como piritita, un sulfuro de hierro) que son inestables en presencia de oxígeno (la piritita de las colecciones de minerales se forma en filones, en profundidad, aislada de la atmósfera). Así pues, sabemos que el oxígeno se acumuló después. La respuesta a la pregunta anterior es que esta atmósfera casi incendiaria es hija de la biosfera; un poco más adelante profundizaremos en este punto.

La siguiente pregunta es qué clase de aire existía antes de la vida, y en concreto durante lo que los historia-

dores de la Tierra llaman el eón Arcaico³, desde el principio hasta los 2.500 millones de años (es decir, casi la primera mitad de la historia del planeta). Un tiempo tan largo que justifica el apelativo: eón viene del griego *aión*, eternidad...

En mayo de 1968, mientras la última fiebre revolucionaria del siglo agitaba Europa, un grupo de veinticinco destacados científicos se reunía en Princeton (Estados Unidos) para discutir sobre el origen de la vida. Entre ellos se contaban personalidades tan conocidas como Carl Sagan, Lynn Margulis y James Lovelock; es decir, el mayor divulgador científico de la historia y los padres de la teoría Gaia⁴. Pero la figura dominante de la reunión era sin duda Stanley Miller, quien había ganado fama mundial en 1953 cuando, recién terminados sus estudios de química, había conseguido sintetizar aminoácidos (los «ladrillos del edificio de la vida», suelen llamarse) a partir de una mezcla de amoníaco, metano e hidrógeno, los gases que se suponía que componían la atmósfera primitiva de la Tierra. ¿Sobre qué podían discutir un científico planetario, dos biólogos y un químico? Precisamente sobre la clase de atmósfera que envolvía la Tierra hace 4.000 millones de años, la época en la que surgieron los primeros seres vivos. Los debates fueron grabados, de forma que podemos reproducirlos fielmente. Oigamos el momento clave:

«Mi punto de vista sobre la atmósfera primitiva es que hay un trabajo por hacer: sintetizar vida», dijo Miller.

³ La historia de la Tierra se divide en tres periodos o eones: Arcaico hasta los 2.500 millones de años, Proterozoico (=primera vida) entre 2.500 y 550 millones de años, y Fanerozoico (=vida visible), desde 550 millones de años hasta la actualidad.

⁴ Según la cual la biosfera controla el medio ambiente de la Tierra.

«Para hacerlo, de una u otra forma, es necesario sintetizar compuestos orgánicos. Y hasta donde yo sé, nadie ha conseguido nunca producir compuestos orgánicos bajo condiciones oxidantes, o sea, en presencia de oxígeno o con CO_2 pero sin hidrógeno. Esto significa que necesitamos condiciones reductoras, o sea hidrógeno libre, aunque sea en pequeñas cantidades. Y en estas condiciones, las especies químicas estables —al menos a bajas temperaturas— son el metano, el amoniaco, el nitrógeno, el agua y el hidrógeno».

Interviene Philip Abelson, un geoquímico especialista en atmósferas: «Pero había tal flujo de rayos ultravioleta de alta energía que cualquier cantidad de amoniaco (NH_3) que se produjese sería inmediatamente destruida. Además, a temperaturas bajas, los mecanismos de formación de amoniaco son lentísimos. Podríamos poner hidrógeno al lado de nitrógeno a 25° por toda la eternidad, y no pasaría nada».

«Lo que no entiendo es por qué sí hay amoniaco en Júpiter», objetó alguien.

«Yo no estoy hablando de Júpiter», cortó Abelson.

Varios de los problemas centrales de la química y la biología del siglo XX están resumidos en este rápido intercambio. En 1924, el químico ruso Alexander Oparin propuso que la energía de las descargas eléctricas, actuando sobre una atmósfera primitiva formada por amoniaco, hidrógeno y metano, había producido aminoácidos y otras moléculas orgánicas. Hacia 1950, las atmósferas planetarias mejor conocidas eran, paradójicamente, las de los planetas más lejanos. La causa era simple: Júpiter y Saturno están dotados de enormes envueltas de gases calientes, que proporcionan espectros nítidos, y por tanto son fáciles de analizar desde la Tierra. Junto con el hidrógeno y el

helio, los gases más abundantes en el Universo, el amoníaco y el metano (CH_4) resultaron ser los compuestos químicos más comunes en los planetas gigantes. Harold Urey, laureado con el premio Nobel y uno de los químicos más prestigiosos de la época, tomó estas atmósferas, y específicamente la de Júpiter, como patrón de todas las del Sistema Solar. Urey fue el director del trabajo de Stanley Miller, quien diseñó su famoso experimento siguiendo las ideas de su maestro.

Al hacer esta propuesta, Urey ponía en juego un concepto básico: ¿Eran todas las atmósferas planetarias herederas directas de la nebulosa protosolar? Según hemos visto, las envueltas gaseosas de los planetas gigantes sí parecen ser jirones de aquella nube atraídos por los núcleos sólidos de Júpiter y sus hermanos. Ahora bien, ¿se puede decir lo mismo de la atmósfera terrestre? La respuesta a esta pregunta es negativa, y los astrofísicos han dado con ella estudiando el Sol. Nuestra estrella (cuya composición se considera semejante a la de la nebulosa de la que surgió) contiene un millón de veces más gases nobles pesados (neón y kriptón⁵) que la Tierra. ¿Por qué estos gases son tan escasos en nuestro planeta? Como estos elementos deben precisamente su denominación a su repugnancia a mezclarse con otros, no podemos suponer que hayan desaparecido de escena por procesos químicos (por ejemplo, formando compuestos que hubiesen precipitado en el fondo marino); además, su elevado peso atómico impide que puedan perderse en el espacio como un globo hinchado con helio. Así que la única forma de eliminarlos es expulsar en bloque todos los restos de nebulosa

⁵ Nada que ver con la kryptonita de Superman.

protosolar que hubiesen podido quedar rodeando a la Tierra inicial. El Sistema Solar primitivo era un lugar tan violento que no faltan mecanismos para justificar esta voladura: el mismo proceso que dio origen a la Luna tuvo que expulsar, con más motivo, esos volátiles iniciales. Pero, aun sin choques, las atmósferas pueden ser eficazmente erosionadas por su gran enemigo, el viento solar, sobre todo si no están protegidas por un campo magnético que desvíe las partículas cargadas.

Por lo tanto, todos los gases que rodean a nuestro planeta (y, sin duda, también a sus vecinos) han surgido de su interior posteriormente, a medida que los planetesimales que lo habían formado se desgasificaban en procesos de vulcanismo masivo. En la jerga de los geoquímicos, ni la atmósfera actual ni tampoco la del Arcaico (llamada protoatmósfera) son atmósferas iniciales, sino secundarias. Si esto es así, las emanaciones que surgen actualmente del interior de la Tierra nos pueden indicar cuál fue la composición de la protoatmósfera. Estos gases volcánicos son sobre todo dióxido de carbono (CO_2) y vapor de agua, con trazas de monóxido de carbono (CO), hidrógeno y ácido clorhídrico (HCl).

El que el CO_2 sea el gas predominante en las emanaciones volcánicas actuales es uno de los motivos por los que los partidarios de una protoatmósfera de amoníaco y metano llevan años combatiendo a la defensiva. Pero hay un segundo argumento, más convincente: los estudios de estrellas jóvenes han permitido reconstruir la historia inicial del Sol. En su juventud, nuestra estrella debió de atravesar una corta pero energética fase (llamada T Tauri por el nombre de la estrella en que primero se estudió) en la que habría emitido un torrente de rayos ultravioleta de alta energía; hace 4.000 millones de años

este flujo sería aún unas diez veces superior al actual. En los años sesenta, varios geoquímicos demostraron en sus laboratorios que, sin una capa de ozono que protegiese la atmósfera, este baño de energía hubiese descompuesto rápidamente el amoníaco y el metano. Con la tajante frase con la que cierra la discusión histórica («Yo no estoy hablando de Júpiter»), Abelson marca sus distancias con la escuela de Urey y Miller: el amoníaco y el metano podían ser estables en los planetas exteriores, donde la radiación ultravioleta llega atenuada, pero no en los terrestres. Para éstos la mayoría de los especialistas proponían atmósferas secundarias formadas esencialmente por monóxido y dióxido de carbono, nitrógeno⁶ y agua. Una atmósfera a prueba de rayos ultravioleta, porque los óxidos de carbono tienen enlaces fuertes, resistentes a esta radiación.

Una atmósfera primordial de dióxido de carbono presenta, sin embargo, un serio inconveniente, planteado ya por Stanley Miller en su intervención: nadie había conseguido sintetizar (ni lo ha hecho después) moléculas orgánicas complejas en una atmósfera de CO₂. Así pues, esto significa que, si nos atenemos a la protoatmósfera preferida por los geoquímicos, nos quedamos sin procesos químicos sencillos que expliquen el origen de la vida en la Tierra. Abordaremos este problema al final de este capítulo.

Sin embargo, el dióxido de carbono tiene sus ventajas: por ejemplo, produce un eficiente efecto invernadero, es decir que deja pasar la radiación solar pero absorbe la energía reflejada por la superficie de un planeta, que es sobre todo infrarroja (calor). Una concentración elevada

⁶ El nitrógeno se considera inicial porque no hay ningún proceso razonable mediante el cual este gas inerte pudiese haber sido añadido más tarde.

de CO₂ hubiera calentado la Tierra de forma aceptable. Naturalmente, en este contexto temperatura aceptable significa temperatura idónea para los seres vivos.

La cuestión de por qué en la Tierra no hace ni demasiado calor ni demasiado frío es el centro de la llamada «paradoja del joven Sol frío», un dilema propuesto en 1972 a la comunidad científica por Carl Sagan y su colega George Mullen bajo la forma del siguiente silogismo:

—A lo largo de la evolución solar, parte del hidrógeno se convierte en helio.

—La masa de un átomo de helio es cuatro veces mayor que la de un átomo de hidrógeno. Los choques entre partículas más masivas desprenden más calor.

—Una estrella más caliente es también más luminosa, por lo que emite más energía.

—Luego el Sol calentará cada vez más, por lo que tuvo que hacerlo mucho menos (aproximadamente un 30%) al principio de su evolución.

La paradoja consiste en que, según estos datos, toda el agua de la Tierra tuvo que estar congelada durante la primera mitad de su historia; sin embargo, desde hace tiempo se conocen sedimentos de más de 3.800 millones de años de edad totalmente comparables a los que hoy se depositan en los fondos marinos. Así pues, la Tierra inicial no estaba congelada. Y hoy, al cabo de 4.000 millones de años y con el Sol un 30% más caliente, no está achicharrada. ¿Cómo lo ha conseguido?

CON TERMOSTATO INCORPORADO

La respuesta que los propios Sagan y Mullen proponían para su paradoja era que la especial composición de la

protoatmósfera había dado lugar a un efecto invernadero mucho más intenso que el actual, con lo que se capturaba más calor aunque la radiación solar fuese mucho más débil. Y proponían al metano como protagonista del invernadero que salvó a la Tierra del hielo. Después, cuando los inconvenientes del metano se pusieron de relieve, otros autores han aceptado la solución Sagan-Mullen pero con el CO_2 como gas de invernadero. Para una elevación eficaz de la temperatura (que nunca parece haber bajado de $10\text{ }^\circ\text{C}$, como media) haría falta una concentración de CO_2 de al menos un 3%. Aunque este valor es cien veces superior al actual, entra dentro de los cálculos razonables; algunos geoquímicos proponen que la protoatmósfera contenía un 20% de CO_2 . Ésta es una cantidad más importante de lo que parece, porque probablemente esa atmósfera primitiva era mucho más densa que la actual: la presión en la superficie pudo ser de hasta setenta atmósferas.

Sin embargo, esta atmósfera caliente plantea un problema añadido. Para que el vapor de agua se condense en lluvia hace falta que el aire esté relativamente frío, cosa que actualmente sucede hacia los diez kilómetros de altura; en cambio, si la atmósfera fuese muy cálida, el vapor de agua podría subir hasta alturas mucho mayores, de unos cien kilómetros... un peligroso lugar dominado por los temibles rayos ultravioleta, que como hemos visto, no se comportan nada amistosamente con los compuestos de hidrógeno. Rota la molécula de agua, el ligero hidrógeno escaparía al espacio y, si esta situación se hubiese prolongado, la Tierra hubiese perdido todo su vapor de agua, como seguramente le ha sucedido a Venus. Nuestro planeta sería ahora un desierto ardiente, en vez de un planeta oceánico. El que esto no haya sucedido

significa que la temperatura en la superficie de la Tierra nunca superó los 50 °C.

En resumen, la Tierra se ha conservado siempre ni muy caliente ni muy fría, y ello a pesar de que la fuente de calor ha variado sus prestaciones de forma notable. ¿Es que varió también, en paralelo, la concentración de gas de invernadero? ¿Por casualidad? Demasiada casualidad. ¿Por designio? Ésta fue la solución de la teoría Gaia a la paradoja. Los vegetales absorben CO_2 en la fotosíntesis; en una época muy cálida, los bosques avanzan y esta mayor masa biológica absorbe más CO_2 , lo que disminuye el efecto invernadero: la Tierra se enfría. La Vida (aquí, con mayúscula) cuida la temperatura de la casa común.

Los geoquímicos tenían otra solución a la paradoja: también existe un termostato en las rocas de nuestro planeta. La mayoría de las que forman la corteza están compuestas por minerales llamados silicatos. Los silicatos se forman en general a altas temperaturas (al enfriarse un magma, por ejemplo), y por lo tanto son inestables en la superficie. En particular, el agua con CO_2 atmosférico ataca las rocas, destruyendo los silicatos y formando carbonatos: en este proceso se consume CO_2 . En una época cálida, los procesos de ataque de los silicatos se acelerarán (las reacciones químicas suelen funcionar más eficazmente a altas temperaturas), lo que consumirá un exceso de CO_2 , y por consiguiente provocará un descenso de la temperatura.

Saber cuál de los dos termostatos, el vegetal o el mineral, ha salvado a la Tierra de ser un páramo helado o un desierto ardiente es una de las grandes preguntas, aún por resolver, de la ciencia moderna. La primera solución ha sido tachada de mística: la diosa Gaia protegiendo el

arca de Noé. Lo cierto es que los dos termostatos no son excluyentes, sino compatibles; y que en este debate estamos aprendiendo que el mantenimiento de condiciones habitables en un planeta depende de procesos sutiles y no siempre bien comprendidos.

TIEMPOS DIFÍCILES

William Hartmann, a quien presentamos como uno de los creadores de la hipótesis del gran impacto sobre el origen de la Luna, no está convencido de que hace 3.900 millones de años un enjambre de grandes asteroides cayese sobre los cuerpos del interior del Sistema Solar. Su principal argumento contra el Gran Bombardeo Terminal es que habían transcurrido ya más de 600 millones de años desde el origen del sistema. Las grandes catástrofes, como la que dio origen a la Luna, habían acabado aparentemente hacía cientos de millones de años. ¿Cómo explicar este repunte tardío de las colisiones? ¿Dónde habían estado los impactores durante todo este tiempo? Los discos de polvo alrededor de las estrellas jóvenes duran entre 300 y 400 millones de años; suponemos que algo semejante sucedió en el caso del Sol. Después, los procesos más socorridos para explicar la llegada de cuerpos extraños a las órbitas de los planetas terrestres son los choques en el cinturón de asteroides, choques en los que se producen fragmentos que invaden otras órbitas. Pero el tamaño y la frecuencia de las cuencas de impacto lunares requieren docenas de impactores de más de cien kilómetros de diámetro, y por lo tanto superan con mucho los tamaños típicos, no sólo de los fragmentos producidos en las colisiones, sino de los propios asteroides.

Sin embargo, análisis recientes de vidrios de impacto lunares siguen proporcionando tozudamente la misma edad: nunca más de 3.920 millones de años. Como ya adelantamos (véase «Nace un satélite»), quizá el bombardeo terminal fue obra no de asteroides sino de cometas; se ha argumentado que Urano y Neptuno pudieron atraer un enjambre de éstos hacia la zona interior del Sistema Solar; pero sigue sin haber ninguna explicación lógica para la cuestión crítica, el tiempo.

En cualquier caso, aunque no entendamos el proceso, sí podemos formular una pregunta intrigante: ¿Qué efectos pudo tener el Gran Bombardeo Terminal sobre los planetas terrestres, y específicamente sobre la Tierra? Considerando que la superficie de nuestro planeta es catorce veces más grande que la de la Luna, y que su gravedad es seis veces mayor (lo que supone también mayor capacidad de atracción de potenciales impactores), se ha calculado que sobre la Tierra debió de caer un número de asteroides unas 25 veces mayor que sobre la Luna: del orden de un millar de cuerpos de decenas a centenares de kilómetros de diámetro. Si el bombardeo hubiese durado tan sólo 20 millones de años, esto significaría que nuestro planeta habría sufrido un impacto de consecuencias globales aproximadamente cada 20.000 años; es decir, una crisis ambiental casi permanente. Si el periodo bélico hubiese sido más dilatado, habría habido intervalos de calma del orden de los 100.000 años.

En los últimos años se ha intentado precisar la influencia que esta tardía lluvia sólida pudo tener sobre una Tierra en la que la vida estaba intentando asentarse. Una forma de relacionar estos dos fenómenos es comparar el tiempo necesario para las síntesis químicas que podrían conducir a la vida con el intervalo medio de caídas

de grandes asteroides. Mientras el primero sea más largo que el segundo, la vida no estará garantizada: para emplear las palabras de Stanley Miller, el «trabajo por hacer» —la síntesis de la vida— no podría llevarse a cabo por falta de condiciones laborales. Ahora bien, los bioquímicos reclaman tiempos entre cien mil y un millón de años para esta tarea; lo cual, teniendo en cuenta el ritmo de las colisiones, haría las síntesis difícilmente viables. ¿Tendría entonces la vida que esperar hasta el final del bombardeo? Ésta es la respuesta clásica, con la que todo parece encajar, ya que rocas de 3.850 millones de años ya presentan indicios biológicos. Un guión impecable: acaba el último chaparrón cósmico y entra en escena la Vida sacudiendo su paraguas. El problema es de probabilidad: la de que encontremos preservados indicios precisamente del primer ser vivo que existió en la Tierra es pequeñísima. En pura lógica, encontrarlos en rocas de 3.850 millones de años (las rocas sedimentarias más antiguas, hay que subrayar) significa que la vida empezó en la Tierra hace al menos 4.000 millones de años.

Y aquí nos damos de bruces con un serio obstáculo: lo que antes llamamos crisis ambiental permanente. Se han realizado cálculos de la cantidad de energía liberada en los impactos del gran bombardeo terminal. Su distribución más probable es: 50% en fundir y vaporizar las rocas de la zona de impacto, 25% radiada al espacio, y 25% en vaporizar agua marina. Este último factor es crítico: esta vaporización masiva (una ebullición, por tanto) no se limitaría a la zona del impacto, sino que, a partir de un cierto tamaño del proyectil, se produciría una onda de choque global que afectaría a toda la Tierra. Los objetos de algo menos de 200 kilómetros de diámetro harían hervir la zona fótica (los 200 metros más superficiales del

mar) en todo el planeta; y un impactor de unos 500 kilómetros pondría en ebullición la hidrosfera terrestre en su totalidad. Algunos de los efectos de estos choques térmicos (como tsunamis gigantes y lluvias de ácido nítrico producido por la combinación explosiva del nitrógeno atmosférico) serían casi instantáneos; pero otros (como una atmósfera de vapor de agua y *vapor de roca* a 1.700 °C y 100 atmósferas, que impediría la fotosíntesis) pudieron durar cientos o incluso miles de años. Así que, sin pedir permiso a los operarios, el taller de la vida era esterilizado cada cierto tiempo, aparentemente antes de que la cuadrilla bioquímica tuviese ninguna opción de acabar su trabajo; o, en caso de que lo hubiese hecho, desbaratando irremisiblemente el producto de aquél.

De este violento guión se deduce que los primeros intentos de producir vida fueron muy probablemente frustrados por impactos asteroidales. Podemos dejar volar la imaginación y pensar en las otras posibles biosferas, no necesariamente iguales a la presente, que podrían haber echado raíces en la Tierra. Esta cuestión está relacionada además con uno de los grandes debates sobre el origen de la vida en la Tierra: el que se refiere al marco físico de las síntesis prebióticas. ¿Un charco mareal o una chimenea hidrotermal en el fondo oceánico? El primer ambiente es el preferido de la biología clásica: siempre se recuerda que el mismo Charles Darwin citó expresamente la posibilidad de que la vida surgiese en una zona litoral, en la que la evaporación favorecería la concentración de los productos de las primeras síntesis. Pero las chimeneas profundas tienen la ventaja de estar más protegidas de la esterilización, ya que sólo los impactores más grandes desprenderían energía suficiente para hacer hervir también el océano profundo. Aunque los cálculos son muy

toscas, se ha propuesto que hace 4.000 millones de años la zona fótica podría ser esterilizada cada 900.000 años, mientras que el mar profundo sólo sería visitado por los intrusos cada diez millones de años.

Las zonas profundas tienen además, como se verá, la ventaja de depender menos de la fotosíntesis, por lo que soportarían mejor la oscuridad posterior a los choques. En esto se basan muchos investigadores del origen de la vida para opinar que si ésta tuvo la oportunidad de originarse en chimeneas hidrotermales profundas, probablemente lo hizo. Se ha propuesto que, si las síntesis prebióticas tuvieron lugar en este ambiente protegido, quizá la vida pudo surgir sobre la Tierra hace 4.400 millones de años; en cambio, si tuvo que originarse en la expuesta zona intermareal, no lo habría hecho hasta hace 3.800 millones de años. En uno y otro caso, los bioquímicos siguen sorprendidos por la rapidez de un proceso en teoría tan complejo, y desarrollado además en unas condiciones ambientales tan traumáticas que algunos han llegado a preguntarse si este chaparrón de roca pudo ser, de alguna forma inimaginable, biológicamente beneficioso.

Lo que sí se puede asegurar es que este bombardeo cósmico contaminó químicamente los planetas interiores: los impactores, asteroides o cometas, pudieron traer nuevos componentes químicos. Agua, por ejemplo. Pero éste es otro tema, que trataremos a continuación.

LA TIERRA COMIENZA A ESCRIBIR SU DIARIO DE VIAJE

Cada vez que bebemos un refresco, las burbujas nos recuerdan que el dióxido de carbono es muy soluble en

agua. El mismo proceso debió de operar, aunque a escala global, en la Tierra recién nacida. Los gases que comenzaban a acumularse por desgasificación del interior generaron una densa atmósfera de CO_2 , vapor de agua y nitrógeno. ¿Cómo sería esta Tierra primitiva vista desde una nave espacial? Nada parecido al actual oasis blanco y azul, sino un planeta ardiente velado por una niebla rojiza, como ahora lo está Titán, el satélite de Saturno. Y es el oxígeno el que marca la diferencia: el famoso biólogo inglés James Lovelock (a quien encontramos antes en el simposio sobre la protoatmósfera) compara el oxígeno a la lejía, dos eficaces detergentes destructores de materia orgánica. Un viajero del tiempo no habría encontrado muchas diferencias entre la Tierra arcaica y Venus.

Cuando la Tierra estuvo lo bastante fría, el agua, que es menos volátil que el CO_2 y el nitrógeno, se condensó. Las depresiones se llenaron rápidamente con un agua ácida (al disolverse, el CO_2 se transforma en ácido carbónico) y caliente (entre 30 y 60 °C) debido al elevado calor que aún desprendía la Tierra recién solidificada. Aunque diluido, un ácido caliente es sin duda un disolvente eficaz, por lo que el carbónico arrastró rápidamente iones de las primeras rocas: el sabor salado del agua marina no se debe al amargo llanto de los pueblos mediterráneos (como propone Joan Manuel Serrat en una inolvidable canción), sino a las condiciones químicas de la Tierra recién nacida.

¿Proviene del interior terrestre todos y cada uno de los 1.348 kilómetros cúbicos de agua que forman la hidrosfera actual? La respuesta tradicional es un sí rotundo, aunque una alternativa reciente propone que algunos de los últimos impactores fueron cometas que aportaron una parte del agua, o incluso toda. Chris Chyba,

un joven científico planetario, ha calculado que si tan sólo un 10% de los cuerpos que chocaron contra la Tierra en su etapa de crecimiento final hubiesen sido cometas, toda nuestra agua (y también la poca que pueda existir en la Luna⁷) sería de origen cometario. Una curiosa materia de reflexión para la próxima vez que tomemos un baño en el mar.

Los compuestos de carbono podrían haber seguido la misma ruta. Teniendo en cuenta que se trata de especies químicas muy volátiles, lo lógico es que se encuentren sobre todo en las zonas exteriores del Sistema Solar (por la misma razón, en las mañanas de invierno el vapor de agua se condensa en los cristales de la ventana, y no sobre las mantas de la cama)⁸. La exploración del Sistema Solar ha demostrado que la proporción de carbono respecto al resto de los elementos va creciendo con la distancia al Sol, hasta alcanzar un máximo en los cometas: son los compuestos de este elemento, en una concentración cinco mil veces superior a la que tienen en la Tierra, los que dan al núcleo del cometa Halley su color casi negro. De hecho, el interior del Sistema está desprovisto de carbono respecto al exterior: por eso, para explicar por qué Venus y Marte tienen (y la Tierra primordial tuvo) atmósferas ricas en carbono, el bombardeo cometario resulta un mecanismo coherente. Aun así, la concentración de carbono en la biosfera nos habla de

⁷ A mitad de la década de los noventa, la sonda Lunar Prospector obtuvo datos que podían interpretarse suponiendo que en el fondo de algunos cráteres lunares que no recibían nunca la luz solar se concentraban capas de hielo.

⁸ Los volátiles, como el vapor de agua, pasan a líquidos o sólidos al enfriarse sobre una superficie a baja temperatura. El exterior del Sistema Solar está más frío que la zona interna, lo que explica la gran cantidad de hielo en esa zona externa: las cortezas de los satélites y los cometas son sobre todo hielo.

la ingente tarea química de los seres vivos, que a lo largo de miles de millones de años han conseguido hacer acopio de grandes cantidades de un elemento tan escaso en el planeta.

Si los cometas nos pudieron traer agua y carbono, ¿por qué no también aminoácidos o proteínas, las materias primas de la vida? El principal inconveniente de esta atractiva hipótesis es que los impactos generan muy altas temperaturas, en las que los compuestos orgánicos no se encuentran en su ambiente ideal. Lo normal sería que cualquier molécula compleja que pudiese viajar a bordo de un cometa se fragmentara cuando éste chocase contra un planeta. Y aunque Chyba y Sagan propusieron que sólo la mitad de los cometas llegan hasta la órbita terrestre a muy alta velocidad, no todos los autores están de acuerdo con estos cálculos.

Volvamos al agua. Tanto si es un producto de la desgasificación como si es un regalo de los cometas, el océano universal cubrió muy pronto la Tierra, ya que hay datos que prueban su existencia muy temprana: están grabados en los granos de un mineral prácticamente indestructible llamado circón, que se encuentra como accesorio en el granito, y cuya dureza le ha convertido en un auténtico superviviente de los primeros días de la Tierra. A mediados de los años ochenta, investigadores australianos idearon una nueva técnica para averiguar no ya la edad de un mineral aislado, sino incluso la de cada parte del mineral (como los adolescentes, muchos minerales crecen por etapas, de forma que su centro es más antiguo que sus bordes). El aparato que pusieron a punto se llama microsonda iónica, y lanza chorros de iones sobre un punto del mineral, del que desaloja y analiza los átomos. Ahora bien, al formarse el circón

atrapa átomos de uranio, un elemento inestable⁹ que se convierte en plomo a una velocidad que se ha determinado de forma muy exacta. Esta propiedad convierte a los circones en relojes de precisión, ya que midiendo la proporción de uranio que queda, y la de plomo formado, sabremos cuánto tiempo ha pasado desde que se originó el mineral.

Dado el amor de los anglosajones por las siglas, no es de extrañar que este instrumento maravilloso haya sido bautizado «SHRIMP» (gamba), de Sensitive High-Resolution Ion MicroProbe (las dos últimas palabras significan microsonda iónica). Se ha dicho que este aparato ha abierto una ventana sobre los años de aprendizaje del planeta, y sin embargo sus primeros resultados fueron recibidos con mucha desconfianza; el geoquímico británico Stephen Moorbath, uno de los mayores especialistas mundiales en datación de rocas muy antiguas, tras conocerse las primeras edades de circones, superiores a los 4.000 millones de años, comentaba en 1986: «Mientras tanto [se confirman por otros métodos los resultados] intentaré reprimir una pesadilla que me asalta una y otra vez: que SHRIMP obtiene uno de estos días una edad claramente mayor que 4.600 millones de años [la edad aceptada para la Tierra]».

Tal catástrofe no se ha producido, y por el contrario la «gamba» sigue produciendo noticias sobre la Tierra joven. Por ejemplo, a principios de 2001 un resultado espectacular de SHRIMP acaparó titulares en la prensa científica: algunos circones de Australia habían sido

⁹ Los elementos que, como el uranio, se descomponen espontáneamente emitiendo partículas y radiación se denominan radiactivos. Las partículas expulsadas chocan con los átomos vecinos, desprendiendo calor.

datados en 4.400 millones de años. Los minerales no estaban en granitos, sino en rocas sedimentarias. Esto significaba que los granitos que contenían los circones se habían erosionado, y que sus restos habían sido arrastrados, probablemente por un río, hasta quedar depositados en su desembocadura. Y aquí residía el interés de la noticia: los procesos deducidos (erosión, transporte, sedimentación) constituyen el triunvirato más clásico de acontecimientos geológicos. Para que puedan producirse hacen falta tierras emergidas (aunque sean de pequeña extensión) y océanos; descubrir la huella de estos procesos, que son triviales en la Tierra actual, fue todo un acontecimiento. La datación de estos humildes minerales (su tamaño medio rondaba un cuarto de milímetro) significaba también extender a las primeras tierras y los primeros mares una partida de nacimiento muy antigua, sólo unas decenas de millones de años después del origen de la propia Tierra. A su vez, unos mares tan antiguos proporcionan una base más creíble a las especulaciones sobre vida anterior a 4.000 millones de años.

La microsonda iónica ha podido también identificar la roca más antigua: es un gneis (una roca metamórfica, es decir, formada por la transformación a alta presión y temperatura de otra, en este caso un granito) del norte de Canadá, cuyos circones comenzaron a formarse hace 3.962 millones de años (el método es tan preciso que el error de la datación es de sólo ± 3 millones de años, o sea un 0,07%). Es aquí donde hemos encontrado por fin los restos directos de los primeros continentes. Sin embargo, las rocas de edad arcaica forman pequeñas manchas dispersas por todos los continentes. ¿Por qué hay tan poca corteza antigua?

Como en la historia humana, las épocas más remotas también son las más difíciles de estudiar, y por los mismos motivos: los documentos han sido destruidos. En el caso de la historia humana, a los actos de barbarie, indiscriminada o intencionada, se han sumado los accidentes: las termitas, el fuego o las inundaciones son los grandes enemigos de nuestra memoria escrita. Para la historia de nuestro planeta, si se exceptúa el expolio de algunos yacimientos de fósiles, el vandalismo no es tan importante. Pero la Tierra misma es una eficaz planta recicladora que se alimenta de rocas para fabricar más rocas; a las variantes de reciclado llamamos también procesos geológicos. Dicho de otra forma, el depósito de combustible que aún queda en su interior está tan lleno que la Tierra sigue siendo un planeta muy activo: las rocas antiguas son destruidas, o deformadas hasta volverse irreconocibles. Por ejemplo, las rocas sedimentarias cambian sus propiedades (v. gr., los fósiles desaparecen) cuando son sometidas a altas presiones y temperaturas; o una roca volcánica es desmenuzada por la acción del agua y los cambios térmicos.

Así que hay muy buenas razones para justificar la escasez de rocas antiguas. Sin embargo, para tratar esta cuestión en profundidad debemos retroceder hasta principios del siglo XX, cuando estaba naciendo la geología moderna.

UN PROFETA RECHAZADO

Nueva York, 1926. La Asociación Americana de Geólogos del Petróleo había convocado una reunión, reservada a los especialistas, sobre la deriva continental. La idea de

que los continentes derivan como balsas de piedra a través de los océanos había sido lanzada por un tal Alfred Wegener, un alemán que no sólo no era profesor universitario sino que ni siquiera era geólogo, y cuyo único logro destacado había sido participar en dos expediciones a Groenlandia. En su libro *El origen de los continentes y océanos* confesaba además que lo que le llevó a recolectar datos para confirmar su teoría fue una intuición que le sobrevino al comprobar sobre un globo terráqueo lo bien que encajaban las costas de África y Suramérica. Esta metodología fue considerada por el mundo académico como una afrenta al método científico clásico, que ordena recopilar datos de forma absolutamente neutral hasta que éstos compongan por sí solos una hipótesis.

Su teoría llevaba quince años perturbando la tranquilidad de los geólogos norteamericanos, que en su mayoría la rechazaban. Sin embargo, todos los grandes yacimientos de petróleo en Norteamérica ya habían sido descubiertos, y los especialistas se planteaban empezar la prospección en el mar. Evidentemente, los supuestos de la búsqueda serían muy distintos según que los océanos fuesen permanentes o por el contrario fueran surgiendo y desapareciendo a medida que los continentes se desplazaban sobre ellos. Por esa razón fue convocado el simposio. Su moderador era un geólogo holandés de nombre imponente: Walter van Waterschoot van der Gracht. Éstas fueron sus palabras iniciales:

«No nos perdamos en detalles menores: no los resolveremos ni siquiera en varias generaciones. Intentemos en cambio aproximarnos en los principios importantes. ¿Es posible la deriva continental? ¿Existen pruebas de ella? ¿Da una respuesta verosímil a los muchos problemas que hasta ahora nunca han sido explicados adecua-

damente? Sería aconsejable que, en la medida de lo posible, nos pusiésemos de acuerdo y no nos negásemos por más tiempo a considerar siquiera la idea de los desplazamientos continentales; creo que, si la tuviésemos en cuenta como una posibilidad seria, cooperaríamos mucho mejor en nuestra tarea común, que es resolver el problema de la evolución de la Tierra».

Pero estas constructivas palabras sólo fueron tenidas en cuenta por algunos de los ponentes. La mayoría, que incluía a profesores de las universidades más prestigiosas de Estados Unidos, rechazó rotundamente las ideas de Wegener. Encontramos una muestra representativa de sus argumentos en el párrafo con el que Bailey Willis, profesor emérito de la universidad californiana de Stanford, cerró su alocución:

«Cuando consideramos la manera en la que se presenta la teoría encontramos: que el autor no ofrece pruebas directas de su verosimilitud; que las pruebas indirectas reunidas a partir de la geología, la paleontología y la geofísica nada prueban; que, al buscar los argumentos de estas ciencias conexas, se han seleccionado los que podrían apoyar la teoría mientras que se han ignorado los hechos y pruebas contrarios a ella. De esta forma, da la impresión de que el libro ha sido escrito más por un abogado que por un investigador imparcial. Pero importa muy poco lo que pensemos de esta teoría; el futuro la tratará con imparcialidad, de acuerdo con el principio de que la verdad sobrevive sin ayuda».

No es difícil adivinar una intención despectiva en esta última frase, que, sin embargo, se convirtió en una de las grandes verdades del simposio: el tiempo —cuarenta años escasos— hizo justicia al meteorólogo alemán. Lo cierto es que bajo estas posturas defensivas se adivina el

miedo: si Wegener tenía razón, había que olvidar casi toda la geología construida desde mediados del siglo XIX, y comenzar de cero¹⁰. Y sin embargo, y a pesar de todas estas reticencias, pocas décadas más tarde las ciencias de la Tierra se reorganizaron en torno a la idea de los desplazamientos continentales. Alfred Wegener no pudo ser testigo de su triunfo, porque sólo cuatro años después de la reunión de Nueva York moría en su tercera expedición a Groenlandia, al perderse en el hielo tras llevar víveres a una estación aislada en el centro del casquete glaciar. Su epitafio reproduce un fragmento de un antiguo poema: «La materia pasa, las estirpes se suceden, tú mismo has muerto como ellas. Sólo conozco una cosa que no muere nunca: la memoria de una muerte gloriosa».

Y, SIN EMBARGO, SE MUEVEN

En 1964 se celebra en Londres un Congreso Internacional de Geología. El geofísico británico sir Edward Bullard demuestra el poder de una herramienta científica emergente: gracias a los ordenadores, su equipo ha podido comprobar la intuición de Wegener, al encajar matemáticamente los bordes de los continentes que rodean al océano Atlántico. Un ajuste casi perfecto, y un golpe de efecto mortal para la doctrina que defendía la inmovilidad de los continentes y los océanos.

¹⁰ En 1859, el geólogo norteamericano James Hall publicó su teoría del geosinclinal, en la que argumentaba que las montañas se formaban debido al levantamiento de sedimentos depositados en los bordes de los continentes. Aunque nadie pudo nunca explicar de forma creíble la causa de estos levantamientos, la teoría del geosinclinal reinó sin oposición durante un siglo, hasta que fue destronada por la versión moderna de las ideas de Wegener.

Por su parte, persiguiendo el petróleo, los oceanógrafos han descubierto unos fondos marinos llenos de sorpresas. Las dorsales oceánicas son grandes desgarrones sumergidos, zonas donde se crea el propio fondo del mar, separando los continentes al hacerlo. Las misteriosas trincheras (o fosas) oceánicas parecen zonas donde se zambulle el fondo marino, que vuelve al interior de la Tierra como una escalera mecánica que desaparece en el interior del mecanismo. Y hasta los terremotos cooperan, ya que permiten detectar movimientos a gran profundidad: los continentes y los fondos oceánicos sólo son pasajeros del movimiento global de la Tierra. Como una gran olla de caldo hirviendo, nuestro planeta se mueve para expulsar el calor que acumuló en su formación, y el que la radiactividad ha seguido produciendo después.

Sigue una época febril: entre diciembre de 1967 y septiembre de 1968, los descubrimientos se suceden y se publican a ritmo frenético, a veces semanal. La oposición cerrada de los geólogos norteamericanos de principios de siglo se ha convertido, curiosamente, en pasión por la deriva continental, porque esta revolución científica es esencialmente angloamericana. Los grandes equipos de investigadores en geofísica y oceanografía en Inglaterra (la Universidad de Cambridge) y Estados Unidos (el Laboratorio Scripps en California, el Observatorio Lamont-Doherty en Nueva York, y la Universidad de Princeton, en Nueva Jersey) entablan una encarnizada lucha por ser los primeros en redefinir la geología. Se empieza a entrever un nuevo planeta dinámico, ni uno solo de cuyos átomos (desde las nubes hasta el mismo centro de la Tierra) tiene un momento de reposo. La teoría que explica este planeta redescubierto tiene

al principio un nombre provisional: se la denomina nueva tectónica¹¹ global, y poco después tectónica de placas, ya que su descubrimiento central es que la capa externa rígida del planeta (litosfera) se divide en placas que interactúan entre sí.

Años después, uno de los protagonistas de esta etapa crítica (William Menard, un oceanógrafo californiano) la describió en un libro que llamó *Los océanos de la verdad*. El título alude a la famosa frase que Isaac Newton pronunció poco antes de morir: «No sé qué pensarán de mí los siglos posteriores: yo me veo a mí mismo como un niño que, jugando en la playa, se alegró al hallar una concha más bonita que las demás, mientras el océano de la verdad yacía ante mí sin que yo pudiese comprenderlo¹²». Una confesión de humildad especialmente encomiable en una persona de habitual tan poco humilde como fue Newton. Tiene además este título una segunda connotación: los estudiosos de la Tierra habían intentado comprenderla analizando sólo los continentes, es decir, la tercera parte de la superficie del planeta, pero sin apenas conocer las zonas sumergidas. No es de extrañar que se equivocasen. Los océanos (aunque también el interior de la Tierra, revelado por las ondas sísmicas) pusieron al descubierto un planeta bien distinto del que habían defendido los adversarios de Alfred Wegener en Nueva York en 1926.

¹¹ Tectónica (del griego *tektos*, constructor) es la rama de las ciencias de la Tierra que estudia los procesos de deformación de las rocas.

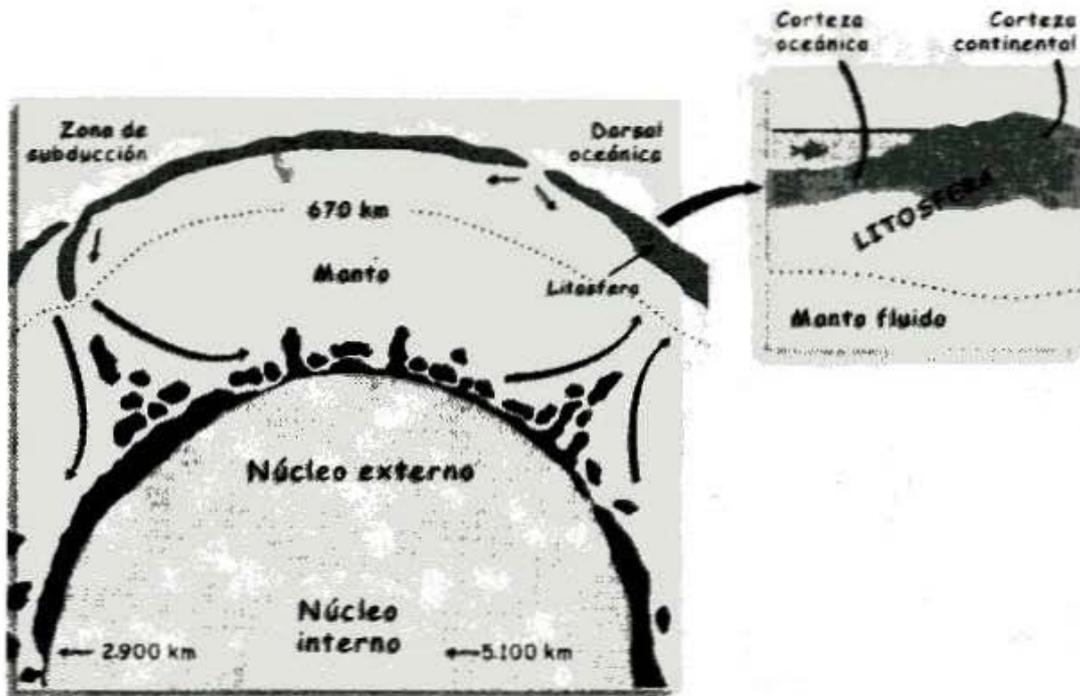
¹² En 1980, Carl Sagan volvió a utilizar la misma imagen en un capítulo de su obra *Cosmos* titulado «En la orilla del océano cósmico»: al comenzar a explorar su vecindad planetaria, el hombre actual acaba de mojar tímidamente la punta del pie en el agua de un océano del que desconoce casi todo.

LA NUEVA TIERRA

Como las catedrales de la Edad Media, las grandes teorías científicas crecen a impulsos, y varían a veces notablemente (complicándolos, en general) sus diseños iniciales. La tectónica de placas es un buen ejemplo de este tipo de evolución, ya que su versión de los años sesenta difiere bastante de la actual; pero no nos detendremos en estos cambios, porque para un viajero del tiempo lo único interesante es comprender cómo funciona (o creemos que funciona) la Tierra actual, y así intentar luego explicar su historia.

Hablar del «funcionamiento» de la Tierra no es algo casual sino intencionado: forma parte de la tradición científica llamada mecanicismo, en la que se descompone un sistema complejo en sus partes fundamentales para entender las reglas por las que se rige. Desde este punto de vista, la Tierra puede compararse a un motor cuyo combustible es la energía depositada en su interior por los planetesimales que la formaron, más el calor desprendido por los elementos radiactivos. Todo el interior del planeta está, como adelantamos, en movimiento, y equivale por tanto a las bielas y pistones de un motor de explosión; las placas litosféricas (continentes + fondos oceánicos) son equiparables a las ruedas, las partes móviles visibles desde el exterior. Los terremotos son como el traqueteo de cualquier motor al moverse; éste no parece estar especialmente bien engrasado. Y evidentemente los volcanes deben ser el tubo, múltiple, de escape.

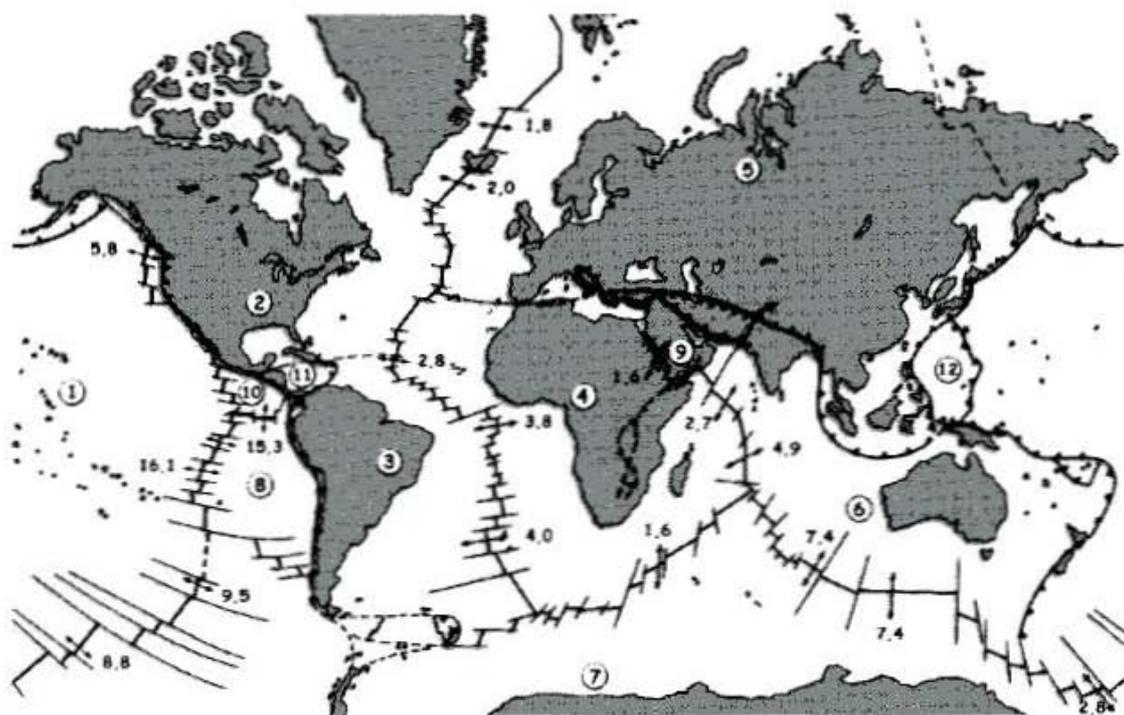
La Figura 1 ayuda a visualizar esta imagen. Tanto el núcleo metálico (fundido en su parte exterior) como el manto rocoso están animados por el movimiento llamado



1. La tectónica de placas. La corteza, tanto continental (ligera y gruesa) como oceánica (densa y fina), forma con el manto más superficial la litosfera, la capa externa rígida de la Tierra que se mueve sobre el interior fluido. Éste es rocoso (manto) hasta los 2.900 km, y metálico (núcleo) desde allí hasta el centro.

convección: sus zonas más calientes se expanden y al hacerlo pierden densidad y suben; luego se enfrían, vuelven a hacerse densas y descienden. Aunque una olla de agua calentándose sea un buen ejemplo de convección, es importante recalcar que (salvo el núcleo externo) la Tierra es sólida. ¿Cómo puede fluir, si es sólida? Porque las altísimas presiones del interior (unos cuatro millones de atmósferas en el centro) hacen que sus materiales se comporten como fluidos¹³. Este flujo en estado sólido se transmite a la litosfera, cuyas placas son como un

¹³ Por la misma razón los asteroides tienen formas irregulares en vez de ser esferas, como los planetas: la presión en su interior no es suficiente para hacer fluidos sus materiales. Los planetas y satélites grandes son como gotas en el espacio.



2. Las placas litosféricas actuales: 1, Pacífica; 2, Norteamericana; 3, Suramericana; 4, Africana; 5, Eurasiática; 6, Indoaustraliana; 7, Antártica; 8, de Nazca; 9, Árabe; 10, de Cocos; 12, Filipina. Las líneas gruesas son las dorsales oceánicas; las finas, fallas transformantes, y las de triángulos, las zonas de subducción. Los números junto a flechas indican la velocidad de separación en centímetros al año.

rompecabezas (Figura 2), pero uno cuyas piezas varían de forma y de sitio con el tiempo: crecen, se rompen, se sueldan, son destruidas. Las interacciones entre las placas litosféricas constituyen la base de la geología actual, cuyos principales conceptos son:

—Los puntos calientes. Son columnas¹⁴ de material a alta temperatura que, calentado por el núcleo, surge desde la base del manto (2.900 km). Cuando este material llega cerca de la superficie, y gracias al descenso de presión, se funde y provoca vulcanismo, tanto en los

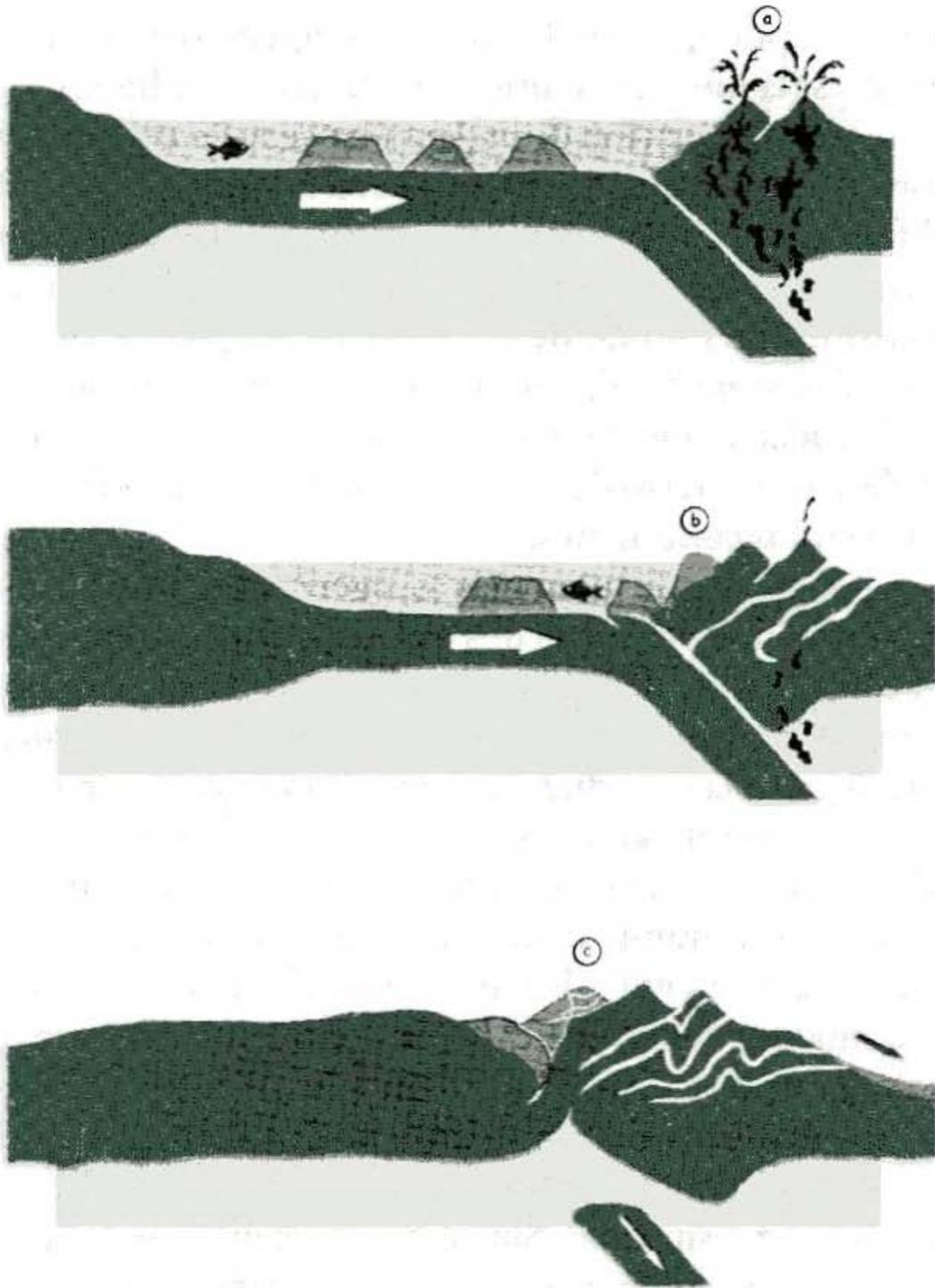
¹⁴ «Pluma» es una traducción incorrecta del inglés *plume*, que significa precisamente columna (de humo, por ejemplo).

océanos (por ejemplo, las islas Hawai) como en los continentes (la meseta basáltica del Decán, en la India).

—La destrucción de litosfera. Sucede en las llamadas zonas de subducción (ver de nuevo la Figura 1), donde el fondo oceánico se hunde a través del manto, hasta el mismo núcleo, 2.900 kilómetros más abajo (por lo tanto, constituyen el «flujo de retorno» de los puntos calientes). Al descender, algunos minerales son comprimidos y su densidad aumenta. Este peso añadido actúa como un ancla sobre el resto de la placa, tirando de ella: por eso se mueven los continentes.

—Cadenas de montañas (orógenos, Figura 3). En la subducción se producen dos efectos: calor y compresión. El calor (que se debe a la fricción y a la propia compresión) se transmite hacia arriba, produciendo magmas, que llegan a la superficie (volcanes) o se solidifican hacia los diez o veinte kilómetros de profundidad (plutones). Al enfriarse los magmas, se forman rocas como andesitas (volcánica) y granitos (plutónica): unas y otras forman la corteza continental, de baja densidad. Además, la placa que subduce comprime el borde continental, deformándolo (pliegues, fallas) y engrosándolo. Al engrosarse, esta corteza ligera elevará su línea de flotación: por eso se levantan las montañas, algo que nunca pudo explicar la teoría del geosinclinal. Sin embargo, el máximo levantamiento de las montañas se produce cuando otro continente llega a la zona de subducción. El choque de los dos continentes produce un orógeno de colisión (Figura 3c), como el Himalaya o los Pirineos.

—Dorsales oceánicas. Son los relieves submarinos descubiertos en los años sesenta, y las zonas más jóvenes de los océanos. Grandes fallas se abren en el fondo oceánico a medida que las placas son arrastradas por la sub-



3. La subducción genera cadenas de montañas: (a) es un orógeno de borde, formado por subducción del fondo oceánico bajo un continente. Sobre la corteza oceánica viajan «terrenos» (como un arco de islas, por ejemplo) que chocan (b) contra el continente. Cuando lo que llega a la zona de subducción es un continente, la menor densidad de su corteza le impide subducir, por lo que se empotra contra el otro continente, formándose un orógeno de colisión (c).

ducción. Por estas grietas (también denominadas con la palabra inglesa *rifts*) surge material fundido del interior: a veces proviene de puntos calientes, y otras se forma a causa de la propia descompresión que produce la fractura. En conjunto, las dorsales son zonas de creación de litosfera, que compensa a la que se destruye en la subducción.

LAS PRUEBAS A FAVOR DE LA NUEVA TIERRA

Algunas de las pruebas que se esgrimen para demostrar la realidad de la tectónica de placas son las mismas que propuso Wegener: por ejemplo, el encaje de los continentes. Éste no es tan sólo una cuestión de geometría, ya que también las estructuras geológicas (como los orógenos) continúan a uno y otro lado de los océanos, como las tarjetas de visita rotas que sirven de contraseña en las películas de espías. También los fósiles que hallamos en continentes hoy muy separados sirven como testigos de su anterior unión. La mayoría de los argumentos a favor de esta teoría, sin embargo, son nuevos:

—Distribución de los sedimentos oceánicos. Las dorsales, el lugar donde teóricamente se crea corteza oceánica, no están cubiertas por sedimentos, lo que confirma su juventud. En cambio, en las zonas de subducción, enormes masas de sedimentos se resisten (a causa de su baja densidad) a subducir, y se adosan al continente, deformándose y mezclándose con rocas del manto y con otras volcánicas del fondo oceánico. El conjunto se denomina prisma de acreción. Las ofiolitas son prismas de acreción antiguos, incorporados ya a los continentes.

—Edad de la corteza oceánica. Confirmando lo anterior, se han podido medir las edades máximas de la cor-

teza oceánica en los lugares más lejanos a las dorsales, y edades menores de un millón de años en éstas. Las edades máximas son, además, de sólo unos 180 millones de años, lo que significa que únicamente el 7% de la historia de la Tierra está registrado en los océanos. Así pues, el fondo oceánico se renueva, como predice la teoría.

—Bandeado magnético. Al formarse, los minerales de hierro se magnetizan, como pequeñas brújulas, en la dirección del campo terrestre. Las rocas volcánicas del fondo oceánico, que contienen estos minerales, tienen la curiosa propiedad de presentar bandas alternantes paralelas a las dorsales, con máximos y mínimos de magnetismo. La explicación es que el fondo oceánico, al formarse en las dorsales, adquiere la magnetización del campo terrestre, que (por causas aún desconocidas) cambia de polaridad cada cierto tiempo¹⁵. Por eso, si medimos el campo magnético actual junto a una roca de igual polaridad, los dos se sumarán y tendremos un máximo; en caso contrario, se restarán y habrá un mínimo. El fondo oceánico se ha comparado a un código de barras, un registro en código binario (norte/sur) de dos historias distintas: la del campo magnético y la de la evolución de las cuencas oceánicas.

—Paleomagnetismo. En el momento de su formación, cada pequeña brújula marca la dirección de los polos magnéticos. Ahora supongamos que un continente se rompe en varios más pequeños; cada fragmento seguirá un camino distinto (alguno puede girar, por ejemplo), lo que desorientará las pequeñas brújulas fósiles. En cada momento de la historia parecerá que había tantos polos

¹⁵ Si el viajero del tiempo hubiese llegado a la Tierra hace un millón de años, su brújula hubiese apuntado hacia el sur.

Norte magnéticos como continentes. A no ser que se proponga un campo magnético con docenas de polos Norte (y otros tantos Sur, claro), hay que aceptar el movimiento de los continentes.

—Anomalías paleoclimáticas. Glaciares en el Sáhara, sales (clima árido y cálido) en el norte de Canadá... Las rocas que están donde no deben solamente pueden entenderse si aceptamos que los continentes se han movido.

Por último, hoy disponemos de la prueba definitiva, que Wegener buscó pero no pudo conseguir por falta de tecnología adecuada: la medición directa de los movimientos continentales. Valiéndose de satélites especiales que reflejan la luz de proyectores láser, los científicos han medido los desfases de las ondas causados por los movimientos de las placas litosféricas. Los primeros resultados se obtuvieron en 1990, y supusieron una confirmación espectacular de las predicciones de la teoría. Desde entonces, se puede decir que la tectónica de placas ha sido confirmada con una garantía estadística del 95%, que es el porcentaje medio de coincidencia de las mediciones.

Este punto es el adecuado para una pequeña reflexión sobre las diferencias entre la vieja y la nueva geología. La teoría del geosinclinal dominó esta ciencia durante más de un siglo (exactamente de 1859 a 1964) a pesar de no poder responder a cuestiones tan básicas como el origen de las cadenas de montañas. En cambio, tan sólo pasaron 26 años entre la definición de la tectónica de placas y su confirmación cuantitativa. La gran diferencia es que esta última teoría hacía predicciones numéricas: tal continente se movería en tal sentido, y lo haría a determinada velocidad. Naturalmente, estas predicciones eran extrapolaciones de lo que los

geofísicos habían averiguado sobre el pasado del planeta. De este matrimonio entre geología y física surgió la nueva Tierra.

DE VUELTA AL ARCAICO

Repitamos ahora la pregunta que nos hacíamos en el apartado «La Tierra comienza a escribir su diario de viaje», pero con una pequeña variación: ¿por qué hay tan poca corteza arcaica? Además de los conocidos procesos de reciclaje de rocas, ¿podría ser que la corteza creada en la primera mitad de la historia de la Tierra hubiese sido también destruida por subducción? Hace pocos años, esta última pregunta no sólo no podía responderse, sino que además carecía de sentido. En la tectónica de placas clásica, la corteza continental, a causa de su baja densidad, no subduce; sin embargo, cada vez hay más indicios de corteza continental cuyos minerales de alta presión indican que ha «bajado a los infiernos» (o más bien al Purgatorio, ya que ha vuelto a la superficie). Aunque es la corteza oceánica la que experimenta sistemáticamente subducción, fragmentos de la continental también pueden ser arrastrados. En todo caso, ¿había tectónica de placas en el Arcaico?

Euan Nisbet, un pastor de la Iglesia presbiteriana que es además uno de los grandes especialistas en el eón más antiguo, escribía en 1985, sin duda recordando la *terra incognita* de los mapas renacentistas, decorada con dragones, que «mientras que los tiempos recientes [los últimos 600 millones de años] son el territorio de la tectónica de placas, en el Arcaico subsiste aún una malsana fauna de bestias fabulosas que se esconden de la luz

de la nueva geología». Veamos cuáles son las diferencias (también hay algún parecido) entre la Tierra arcaica y la actual:

—Una atmósfera distinta, sin oxígeno libre (aunque tampoco reductora) pero que generaba un efecto invernadero muy superior al actual y que compensaba la debilidad inicial del Sol.

—Una hidrosfera moderadamente más cálida que la actual (30-60 °C), y medio ácido. Eso podría explicar la ausencia de calizas¹⁶.

—Una Tierra que conservaba aún mucho del calor inicial. Esto significaría un manto más caliente que ahora, y por lo tanto más fluido: la circulación convectiva sería más rápida. Significaría también magmas más calientes que los modernos. Unas lavas ricas en magnesio que sólo existen en el Arcaico, las komatiitas, tienen minerales que indican que fueron emitidas a 1.600 °C. Las lavas basálticas, las más comunes en la Tierra actual, sólo alcanzan los 1.200 °C.

Las formaciones más típicas de la corteza continental arcaica eran conjuntos de rocas volcánicas y sedimentarias no muy metamorfizadas, que formaban bandas llamadas «cinturones de rocas verdes» (por el mineral clorita, de este color, que se forma en el metamorfismo ligero).

Había también enormes cantidades de minerales de hierro: de hecho, ésta es la fuente de casi todo el hierro que explotamos. Son las formaciones bandeadas de

¹⁶ Rocas sedimentarias formadas sobre todo por el mineral calcita, de fórmula carbonato cálcico (CaCO₃). En la Tierra actual, la mayoría de las calizas se deposita por influencia de los seres vivos. En medio ácido se disuelven, en lugar de precipitar.

hierro, llamadas así porque este elemento, en forma de óxidos, alterna con sedimentos ricos en sílice. Estas formaciones se generaron en volcanes submarinos profundos pero se depositaron como sedimentos en plataformas continentales, o sea en fondos marinos someros. Su interés científico (que se suma al económico) reside en que reflejan una atmósfera y una hidrosfera sin oxígeno libre. El razonamiento es el siguiente: si el agua de los mares arcaicos hubiese contenido oxígeno disuelto, el hierro (que tiene una fuerte tendencia a formar óxidos) se hubiese combinado con él nada más surgir de los volcanes, para depositarse después sobre la corteza oceánica. Por el contrario, si pudo llegar disuelto a las plataformas continentales es porque en el mar profundo (y, por extensión, en el resto de los mares y en la atmósfera) no había oxígeno con el que combinarse. En las plataformas continentales, el hierro disuelto se encontró con bacterias fotosintéticas (fosilizadas a veces en las capas de sílice) que le cedieron el oxígeno que segregaban: esta precipitación masiva constituyó los actuales yacimientos.

Esto es lo que los especialistas en fabulosas bestias arcaicas han podido reconstruir en una primera aproximación. Dibujado el cuadro general, acerquémonos a ver algún detalle de interés. Probablemente el mejor lugar del mundo para esta inspección sea el distrito de Isua, en Groenlandia, un cinturón de rocas verdes que contiene rocas volcánicas y sedimentarias y que, por la excelente conservación de sus afloramientos, algunos geólogos han llamado «el paraíso arcaico». Allí, en el extremo de una isla frente a la costa, aflora un nivel de hierro bandeado de unos tres metros de espesor cuya edad es superior a 3.850 millones de años. Otras rocas cerca-

nas parecen turbiditas, es decir, sedimentos depositados por corrientes de turbidez, avalanchas densas de partículas que descienden por el fondo oceánico hasta las llanuras abisales. La existencia de sedimentos profundos alternando con rocas volcánicas ha llevado a diversos investigadores (por ejemplo, el groenlandés Minik Rosing, del Museo Geológico de Copenhague) a proponer que estas rocas forman parte de una ofiolita, es decir, un antiguo prisma de acreción.

Recordemos que un prisma de acreción se forma por aplastamiento contra el borde continental de parte de las rocas de una placa litosférica que ha llegado hasta una zona de subducción. La conclusión es que en la Tierra existían placas litosféricas que subducían hace unos 3.900 millones de años. Es decir, tectónica de placas. ¿Exactamente igual que la actual? Hasta hace unos pocos años se solía decir que las placas litosféricas del Arcaico tenían que ser más plásticas que las de hoy, como consecuencia del mayor flujo térmico. Sin embargo, la existencia de diques y de grandes fallas (datos ambos que implican rigidez de la corteza) de edad arcaica ha convencido a la mayoría de científicos de que esta tectónica de placas inicial era idéntica a la presente. Además, en Isua se han descubierto rocas de hasta siete edades distintas entre 3.900 y 3.600 millones de años, lo que se ha interpretado como una serie de choques de arcos insulares contra el borde continental (como los ilustrados en la Figura 3). Hoy se piensa que los cinturones de rocas verdes representan los arcos de islas del Arcaico.

Suráfrica y Australia completan con Groenlandia la trilogía de los paraísos arcaicos. Dos paraísos lejanos... en la actualidad. Según una arriesgada hipótesis propues-

ta a principios de la década de los noventa por Alfred Kröner, un científico de la Universidad de Maguncia (Alemania), las curvas paleomagnéticas de las zonas más antiguas de los dos continentes (Kapaal, en Suráfrica, y Pilbara, en Australia) coinciden durante casi todo el Arcaico, de lo que dedujo que las dos regiones fueron una sola durante buena parte de este eón. Investigaciones posteriores han apoyado esta idea. El supuesto continente de VaalBara (nombre formado con una sílaba de la primera región y dos de la segunda) habría existido entre 3.600 y 2.700 millones de años, lo que lo convertiría en el continente más antiguo reconstruido. Sin embargo, un dato discordante ha surgido de esta hipótesis: puesto que las curvas paleomagnéticas permiten averiguar las distancias recorridas por los continentes, una simple división por el tiempo empleado en el viaje (que obtendremos de la edad de las rocas) permitirá deducir la velocidad de crucero. Kröner ha calculado así que VaalBara viajó a una velocidad media de 1,7 cm/año, semejante a la velocidad a la que se abre el Atlántico en la actualidad, y que contradice la teoría según la cual en el Arcaico los movimientos del manto debían ser más rápidos que los actuales y, por lo tanto, mayor la velocidad de las placas. Es evidente que este problema tiene varias soluciones sencillas: o bien los continentes no viajaron en línea recta, o bien pudieron detenerse a descansar en el camino.

Proyectos internacionales en marcha intentarán dispersar estos últimos monstruos de la selva arcaica. Entre otras cuestiones aún sin precisar están las siguientes: ¿Representan todos los cinturones de rocas verdes arcos insulares, o hay variantes significativas? ¿En qué tipo de corteza se depositaron los primeros sedimentos? ¿Cuál

era la composición del agua de mar hace 4.000 millones de años? ¿En qué condiciones se formaron las komatiitas? ¿Podemos esperar encontrar granitos de 4.400 millones de años, como los circones de Australia? Y una especialmente intrigante: ¿Por qué no encontramos brechas de impacto entre las rocas de más de 3.800 millones de años? En efecto, todas las rocas lunares de esta edad llevan las cicatrices del gran bombardeo terminal. ¿Por qué no las terrestres? ¿Quizá no son representativas, o de alguna forma fueron protegidas de las colisiones? ¿O tal vez hay algo equivocado en nuestras reconstrucciones?

El estudio de estas cuestiones se enmarca en un método de trabajo muy específico de la geología, que es el actualismo. El actualismo nos permite deducir las condiciones del pasado a partir de comparaciones con el presente: por ejemplo, deducimos que las rocas de Isua son una ofiolita por comparación con los prismas de acreción actuales. Pero los procesos que no permiten comparaciones por no suceder ya en la Tierra actual quedan fuera del dominio del actualismo. Hoy no se forman komatiitas, ni hay una densa atmósfera de CO₂, ni chocan planetas contra la Tierra. ¿Con qué bases podemos entonces reconstruir el pasado, tanto el semejante al presente como el distinto de él? Lo haremos con una mezcla de actualismo y extrapolaciones osadas, algunas de las cuales caen de lleno en una metodología que ha sido duramente criticada en todos los libros clásicos de geología: el catastrofismo, teoría que intentaba explicar los procesos geológicos como sucesos en los que se liberaban cantidades ingentes de energía. Algunas propuestas catastrofistas (como el hundimiento de continentes enteros) han pasado a la selva fabulosa de Nisbet, pero

otras, como las colisiones, se han convertido en elementos respetables de la geología.

De todas las cuestiones pendientes sobre este primer acto de la historia del planeta destacaremos, por sus muchas implicaciones, la aparente tranquilidad cósmica de las primeras rocas: su carencia de huellas de impactos afecta a un tema tan crítico para unos seres vivos pensantes como es el origen mismo de la vida.

A PESAR DE TODO, LA VIDA ASOMA

El origen de la vida en la Tierra es quizá el más interdisciplinar de los temas científicos, ya que, además de la propia biología y su rama bioquímica, interesa a la astronomía y a la geología, sin olvidarnos de la filosofía. Pero lo que lo convierte en uno de los más arduos problemas de la ciencia moderna no es su carácter de mosaico, sino su lejanía en el tiempo y su categoría de hecho único. Esto último, un problema común en las ciencias de la Tierra, queda de relieve cuando nos preguntamos, por ejemplo, si las proteínas, o el carbono mismo, son imprescindibles para la vida, o tan sólo son las variantes elegidas (de entre muchas posibles) por la vida en este planeta. Más enigmática aún es la posibilidad de que existan otros sistemas de transmitir información distintos a los ácidos nucleicos¹⁷, el código genético que el hombre comparte con los mirlos, los álamos y las bacterias.

¹⁷ Moléculas producidas por los seres vivos, que contienen los mecanismos de la herencia y las instrucciones para producir proteínas. Se llaman así por concentrarse en el núcleo de la célula.

Algo parecido sucede con el intervalo de tiempo necesario para que lo vivo aparezca en un planeta (por cierto, ¿es imprescindible un planeta?): no sabemos si el apresuramiento con el que se aposentó la vida en la Tierra es un rasgo casual o necesario. La ciencia moderna está poniendo cerco a esta cuestión fundamental, pero es importante evitar pensar que nuestro planeta es el modelo biológico universal. Por ejemplo, en un artículo reciente, Christopher McKay, un especialista en la búsqueda de vida en Marte, planteaba los siguientes requisitos mínimos para la vida:

- Una fuente de energía, normalmente luz solar.
- Carbono.
- Agua líquida.
- Algunos otros elementos, como nitrógeno, fósforo o azufre.

Es evidente que con estas premisas difícilmente se podrá encontrar en Marte una vida que no sea exactamente igual que la terrestre. El tiempo dirá si estas búsquedas geocéntricas tienen o no sentido. Lo que parece claro es que no podremos despejar nuestras dudas hasta que no encontremos otra biosfera. Si alguna vez creemos haberlo conseguido, ¿cómo sabremos que estamos ante un sistema vivo? Definiciones como la de Francis Crick, uno de los descubridores del ADN («La vida parece ser casi un milagro, tantas son las condiciones que debieron cumplirse para ponerla en marcha»), no son realmente muy útiles, salvo para valorar la dificultad de la tarea. Otras, como «La vida es información [contenida en los ácidos nucleicos] replicable [mediante proteínas] al abrigo de una membrana», aunque son ultraprecisas, no nos ayudarían mucho en la búsqueda porque, ¿cómo saber, por ejemplo, el tiempo típico de replicación? Un explorador

espacial podría quedarse perplejo durante años ante un líquen alienígena. Una tercera posibilidad, «La vida es desequilibrio, e imprime en el ambiente las huellas de ese desequilibrio», del belga Christian de Duve, resulta mejor sin duda: por lo menos ya sabemos que debemos buscar moléculas complejas o concentraciones anómalas de elementos o de sus isótopos. Así estamos reconstruyendo la vida en el principio de la Tierra, y así nos preparamos para buscarla en otros mundos.

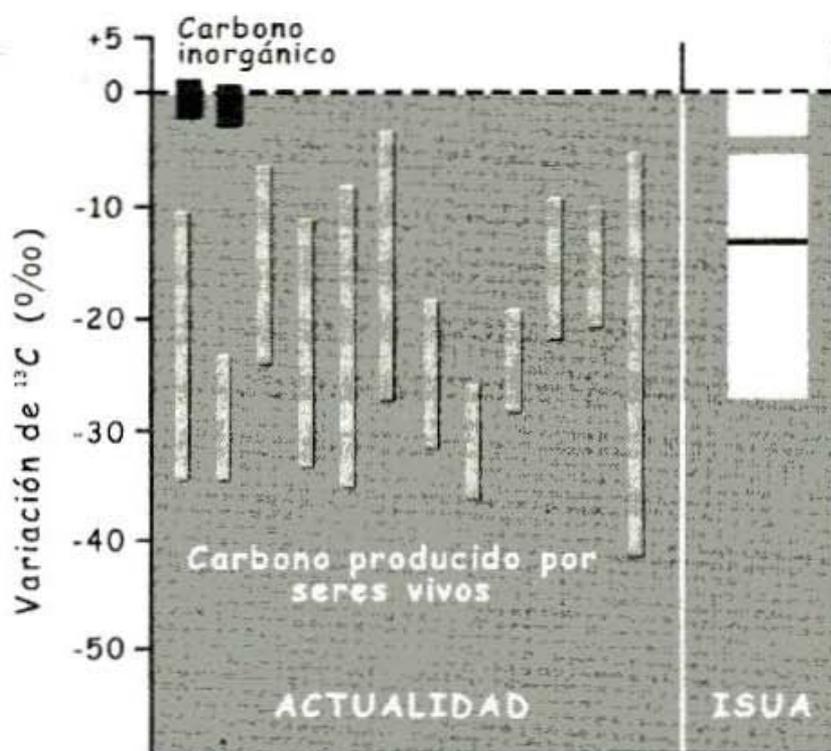
Esta fortaleza formidable se puede asaltar por dos vías: el laboratorio y la Naturaleza. El punto de partida inevitable de la vía experimental es el ya comentado¹⁸, y famoso, ensayo de Stanley Miller, que, aunque impecable desde el punto de vista de su diseño, estaba basado en unas ideas erróneas sobre la composición de la protoatmósfera; sin duda merece quedar registrado en la historia de la ciencia, pero siempre que se aclare que sus supuestos entran en contradicción con las hipótesis actuales sobre la Tierra primitiva. Como advertía el propio Miller, si se repite el experimento empleando los gases que creemos que formaban la protoatmósfera (CO_2 , N_2 , H_2O) no se forma ningún aminoácido. Sin embargo, todo el mundo está de acuerdo en que no podemos sintetizar proteínas, las factorías de la materia orgánica, sin aminoácidos; lo que nos conduce a una difícil situación, para la cual, afortunadamente, se ha encontrado una elegante respuesta que veremos en el apartado siguiente.

Además de este problema básico, la síntesis de aminoácidos que consiguió Miller en 1953 se ha revelado, medio siglo después, como un callejón sin salida: los

¹⁸ En el apartado «Arqueólogos de la atmósfera».

experimentalistas no han podido sintetizar ni proteínas de estructura típica ni ácidos nucleicos, los pasos obligados en la tarea de reconstruir vida en el laboratorio. De hecho, esta vía ha dejado prácticamente de mencionarse en la literatura especializada, a pesar de lo cual Miller sigue protagonizando todos los debates sobre el tema. Algunos autores han apuntado que, sin conocer el ambiente en el que la Naturaleza llevó a cabo esta operación, el método experimental está condenado necesariamente al fracaso. Por ejemplo, la síntesis de vida pudo requerir condiciones especiales, como algún catalizador específico (se han propuesto varios tipos de minerales, como son las arcillas, la pirita o la galena). Sin más que intuiciones sobre estos detalles, quizá esenciales, intentar dar con la receta de la vida puede parecerse a la búsqueda de la piedra filosofal: una tarea imposible porque no se comprende el sistema que se trata de reproducir.

Esto nos lleva directamente al segundo enfoque: la búsqueda de las huellas de la vida en los escenarios donde se originó. En los últimos años, ayudados por la tecnología SHRIMP, los científicos han conseguido remontarse de forma espectacular en el tiempo. Sin embargo, no han logrado retroceder lo suficiente río arriba como para ser testigos del nacimiento de la biosfera: las rocas más antiguas encontradas están marcadas ya por la huella de la vida. El año 1975 es una fecha clave en esta búsqueda. Manfred Schidlowski, un bioquímico del Instituto Max Planck, en Alemania, anunciaba un descubrimiento sorprendente: los análisis de isótopos de carbono de las rocas de Isua, en Groenlandia, reflejaban un exceso del isótopo ligero (Figura 4) que es típico de los sedimentos donde ha habido actividad



4. Distribuciones isotópicas del carbono inorgánico y del carbono de origen biológico que se producen en la actualidad, comparadas con la de las formaciones de hierro bandeado de Isua (la línea gruesa es la media). El empobrecimiento de estas últimas en carbono 13 solapa claramente con los del carbono actual de origen biológico. Simplificado de Mojzsis et al., *Nature*, 384, 1996.

orgánica¹⁹. Parecían las huellas dactilares de la vida. Pero, ¿lo eran realmente? El anuncio fue recibido con escepticismo: ¿vida reflejada en rocas de más de 3.800 millones

¹⁹ El carbono de peso atómico 13 es menos reactivo que el carbono 12 (lo que podemos visualizar pensando en que, por pesar más, requiere más energía para ser movilizad); por tanto, los seres vivos asimilan preferentemente este último, y los ambientes donde ha habido actividad biológica quedan enriquecidos en carbono 12. Por costumbre, este dato se expresa en términos de empobrecimiento en carbono 13 (variaciones de ^{13}C negativas); sin embargo, existe una continua fuente de malentendidos en torno a esta expresión, ya que algunas veces el empobrecimiento en carbono 13 se refiere al sedimento donde se acumuló la materia orgánica (y entonces las variaciones negativas de ^{13}C indican actividad biológica), pero otras (como en el caso de la Tierra Blanca, que veremos en el capítulo siguiente) se refiere a los sedimentos de una época en general. Supongamos un tiempo de muy baja actividad biológica: sin organismos que secuestren el ^{12}C , la abundancia de éste diluirá el isótopo pesado: entonces el empobrecimiento de ^{13}C implicará *inactividad* biológica.

de años, y que (en ese momento) son las más antiguas de la Tierra? La casualidad parecía increíble. Los fósiles más antiguos no pasan de 3.500 millones de años, y no existen otros restos hasta los 2.500 millones de años. Paralelamente, William Schopf, un micropaleontólogo de la Universidad de California, que es la gran autoridad mundial en los fósiles más antiguos, estaba preparando un catálogo con las falsas alarmas sobre fósiles arcaicos, que llamó despectivamente «dubiomicrofósiles», microfósiles dudosos. El ambiente era el peor posible, y el mismo Schidlowski no tuvo más remedio que reconocer que las rocas estaban muy alteradas por el metamorfismo; aun así, seguía defendiendo que sólo la actividad de seres vivos podía provocar un empobrecimiento tan marcado en carbono 13. Sin embargo, Schopf ganó: oficialmente, la vida siguió comenzando hace 3.500 millones de años.

Veintiún años después, en Orleans, Francia, Stephen Mojzsis, un joven doctor (como Hartmann, como Miller antes), anunció nuevos datos de empobrecimiento de carbono pesado en grafito (un mineral de carbón) en rocas de Groenlandia todavía un poco más antiguas, cercanas a 3.900 millones de años. Schopf vio que peligraba su récord mundial, y se mantuvo incrédulo: «... es un trabajo muy interesante, pero creo que deberíamos reservar un juicio más sólido hasta que tengamos más experiencia con esta técnica...». Se refería a SHRIMP, la técnica que ya llevaba años revolucionando la ciencia de medir edades. A pesar de las protestas, Mojzsis ganó la batalla: las posibles alternativas para explicar la anomalía isotópica fueron descartadas una a una, y su análisis le permitió caracterizar la asociación biológica conservada en la roca como un conjunto complejo de bacterias,

algunas fotosintéticas. El 7 de noviembre de 1996, *Nature*, la revista científica más leída del mundo, ilustra su portada con los grafitos de Groenlandia y un gran titular: «Las huellas más antiguas de vida en la Tierra». En 1999, el groenlandés Minik Rosing confirma nuevas anomalías y declara tajante: «Hace 3.900 millones de años, la vida ya había tomado el timón».

¿EN LA PLAYA, O EN EL FONDO DEL MAR?

En el párrafo final de *El origen de las especies*, Charles Darwin hizo una suprema concesión al espíritu religioso de la época y afirmó: «Hay grandeza en esta idea de que la vida [...] fue originalmente alentada por el Creador en contadas formas, o acaso en una sola». Sabemos que no era realmente sincero porque poco después, en una carta a su amigo John Hooker que se ha hecho tan famosa como su obra capital, dejaba el origen de la vida no en manos de Dios sino de la química: «La vida podría haber surgido en una charca templada [*a warm little pond*], con toda clase de sales de amonio y fósforo, luz, calor, electricidad, etcétera». Una charca en la llanura intermareal de un mar arcaico caliente ha sido la versión moderna de la charca templada de Darwin. Esta idea ha sobrevivido un siglo casi exacto (desde 1871 hasta la década de 1970) como el lugar ideal para el origen de la vida, y aún sigue siendo uno de los ambientes que se proponen; sin embargo, ha sido superado por otras posibilidades. Actualmente, la mayoría de los especialistas prefiere pensar en ambientes de alta temperatura, aunque también se han propuesto medios fríos, como lagos subterráneos bajo los glaciares. Las alternativas *vivas* para el origen de

la vida son tres: las llanuras intermareales, los sistemas hidrotermales (someros o profundos) y el origen extra-terrestre (panspermia).

La primera hipótesis se basa en que la evaporación concentraría los productos químicos aportados por el mar, facilitando las reacciones prebióticas (pre-biológicas); en marea alta, los productos de las síntesis se dispersarían. Los inconvenientes son dos: por una parte, la protoatmósfera no parece haber sido, como vimos, muy propicia para las síntesis de especies químicas que acabarían originando vida. El otro inconveniente es que un sistema que se abre a diario no es idóneo para mantener una concentración alta durante tiempos largos.

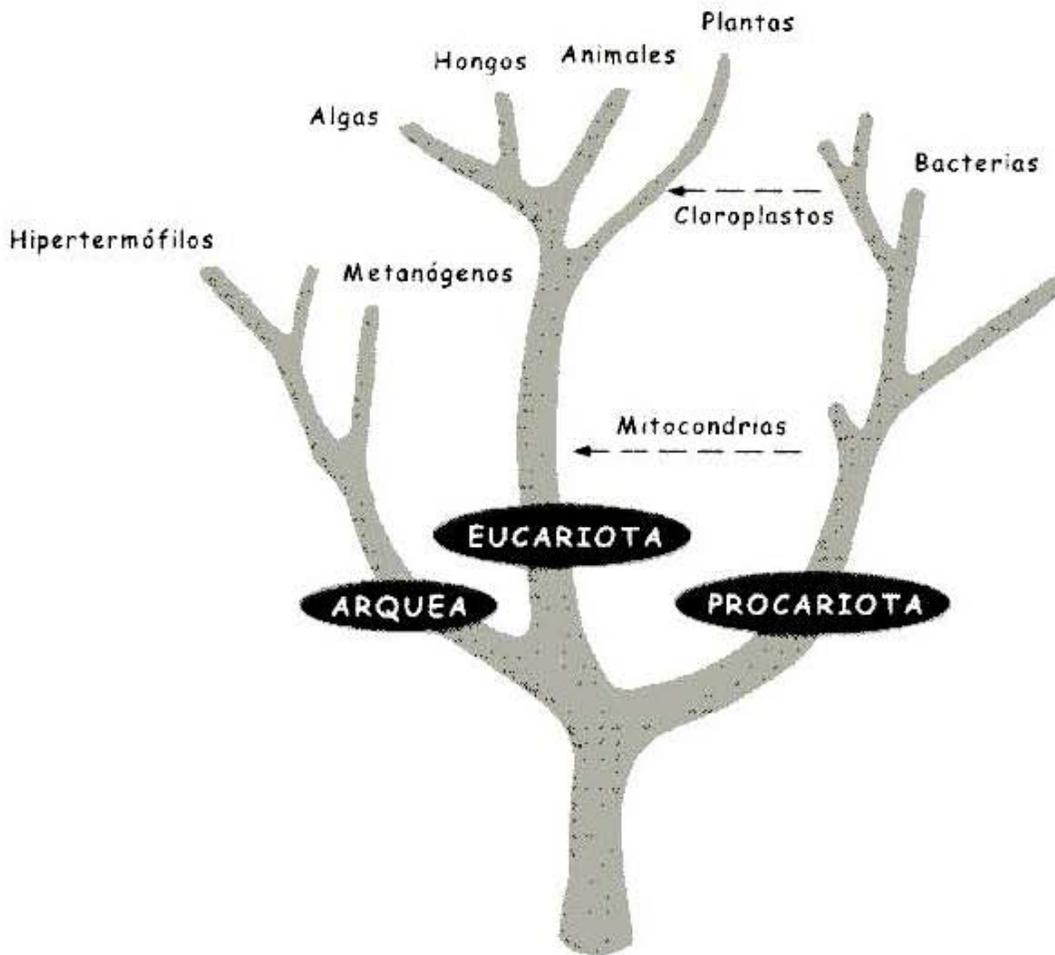
Si actualmente se llevase a cabo una votación entre los especialistas para designar el ambiente favorito como cuna de la vida, la ganadora sería sin duda una chimenea hidrotermal. Varios factores han confluído para colocar esta idea, relativamente nueva, en el centro de la escena. El primero fue el descubrimiento, en los años setenta y por medio de sumergibles de investigación, de comunidades de seres vivos en torno a sistemas de evacuación de agua hasta a 400 °C (en profundidad, debido a la alta presión, el agua hierve por encima de 100 °C), que se escapa de cámaras magmáticas en las dorsales oceánicas. Se constató que se trataba del único ecosistema terrestre que no dependía de la energía solar²⁰; y que, por tanto, tampoco dependía de

²⁰ Cosa no totalmente cierta, ya que algunas bacterias de estos ambientes obtienen energía oxidando gases (que proceden de una cámara magmática, por ejemplo H₂S) con oxígeno que fue producido mediante fotosíntesis (un proceso que sí requiere energía solar) por organismos superficiales, como las algas. Otros microorganismos, en cambio, viven de oxidar H₂ con azufre (ambos de origen volcánico): en este caso sí que existe una independencia energética absoluta respecto al Sol.

la composición de la atmósfera, ya que podía funcionar con independencia de los acontecimientos de la superficie. Y aquí se encontró por fin la salida al laberinto de Miller: aunque la composición de la protoatmósfera no fuese reductora, emisiones de gases reductores de origen volcánico podían crear (por ejemplo, en cavidades cerradas en rocas volcánicas, o incluso en el interior de minerales, como las arcillas) microambientes en los que las síntesis (de aminoácidos y posteriores) pudiesen llevarse a cabo.

El segundo hallazgo que contribuyó a realzar el papel de las chimeneas hidrotermales fue la reorganización, en 1981, del *árbol de la vida* (Figura 5). Se cayó entonces en la cuenta de un hecho sorprendente: todas las encrucijadas situadas cerca de las raíces (es decir, las líneas más primitivas) estaban ocupadas por organismos que viven a temperaturas entre 80 y 110 °C: son los llamados hipertermófilos. Aunque no todos los microbiólogos están convencidos, este hecho podría implicar que el ancestro (o, más bien, la población ancestral) común a toda la vida se sentiría a sus anchas cerca de una chimenea hidrotermal. Aquí surgen dos posibilidades, a cual más interesante, que Euan Nisbet (quien al fin y al cabo no puede negar su condición eclesiástica) llama, respectivamente y con sentido bíblico del humor, «Edén hipertermófilo» y «Arca de Noé hipertermófila». El paraíso hipertermófilo podría ser de tipo volcánico (como las chimeneas actuales), o bien caldeado por impactos asteroidales. El modelo del Arca se produciría si un impacto elevase la temperatura de la hidrosfera, aunque sin vaporizarla, de forma que sólo sobreviviesen los termófilos.

Un tercer argumento a favor de un origen de la vida a alta temperatura es la presencia en muchos orga-



5. El árbol genealógico de los seres vivos. Las ramas procariota y arquea, formadas por organismos unicelulares de células sin núcleo, se clasificaban como una sola hasta 1995. Las arqueas están, sorprendentemente, más próximas a los seres complejos (eucariotas, seres uni o pluricelulares formados por células con núcleo) que a las bacterias. Las líneas de trazos indican las simbiosis mediante las que muchas bacterias se convirtieron en órganos internos de los organismos complejos (los eucariotas), un proceso que se detalla en el capítulo segundo.

nismos primitivos de las llamadas proteínas de choque térmico, que (entre otros muchos usos) sirven para proteger a sus poseedores de los cambios bruscos de temperatura. ¿Para qué necesitaría proteínas así una bacteria que viviese en un charco mareal? Estas moléculas, en cambio, podrían ser muy útiles como herramientas de

reparación de daños bioquímicos en hipertermófilos que viviesen alrededor de chimeneas volcánicas, a los que cambios en el flujo de las corrientes podrían exponer a rápidas fluctuaciones de temperatura.

No resulta muy sorprendente que Stanley Miller no esté en absoluto de acuerdo con un origen hidrotermal de la vida. Objeta que las dorsales oceánicas son sistemas muy inestables. En efecto, los valles de *rift* en los fondos oceánicos actuales se activan y se desactivan de nuevo (para abrirse en otro lugar) con intervalos de pocos millones de años: una chimenea concreta no duraría mucho más de 100.000 años, un tiempo insuficiente para las síntesis prebióticas. Además, temperaturas demasiado altas desestabilizan las proteínas. Su dictamen final es lapidario y no del todo académico: «Basura». Nisbet contraataca: en torno a cada chimenea existiría un gradiente de temperaturas, de forma que los hipertermófilos podrían elegir su rango favorito, de 80 a 110 °C. En cuanto a la inestabilidad de los sistemas, apunta dos posibles respuestas: o bien la evolución prebiótica es más rápida de lo que pensamos, o bien las comunidades hipertermófilas son capaces de desplazarse, colonizando los nuevos sistemas hidrotermales a medida que se forman. Esta capacidad migratoria sería una evidente ventaja cuando los hipertermófilos evolucionasen para poder abandonar los sistemas hidrotermales y colonizar los océanos. Pero eso aún requerirá algunos ajustes importantes en la maquinaria.

Este discutido mundo hidrotermal contiene un mensaje de fuerte carga simbólica: esta conexión entre el interior y la superficie puede representar a la madre Tierra alimentando a su primera prole con calor y nutrientes. Después, el Sol tomará el relevo.

UNA SIMPLE HÉLICE

Los ácidos nucleicos contienen las instrucciones para fabricar proteínas. Un tipo de proteínas, las enzimas, son necesarias para producir ácidos nucleicos. De forma que ni los ácidos nucleicos ni las proteínas pueden existir por sí mismos. Entonces, ¿cómo aparecieron en la célula estos dos tipos de moléculas? Aparentemente, la única solución posible (aunque inverosímil) a este enigma es que unos y otras surgiesen al mismo tiempo. Este problema del huevo y la gallina complicó aún más, si cabe, la vía experimental hacia el origen de la vida, una vía que se atascó en la síntesis de proteínas pero que, incluso si hubiese tenido éxito, no hubiese resuelto nada, ya que, por sí solas, las proteínas no son otra cosa que moléculas complejas, sin ninguna capacidad para reproducirse.

A finales de la década de 1960, y de forma independiente, varios bioquímicos consiguieron resolver este dilema. Uno de ellos, el británico Leslie Orgel, cuenta su razonamiento: «Propusimos que el ácido ribonucleico [ARN, una molécula gigante parecida al ADN pero de hélice sencilla] habría aparecido primero, estableciendo lo que ahora se llama “mundo de ARN”. Sería un sistema en el que el ARN catalizaría todas las reacciones necesarias para que el primer ser vivo se alimentase y se reprodujese: esto implicaba la capacidad de producir proteínas, que podría haberse desarrollado siempre que el ARN estuviese dotado de dos propiedades que entonces no eran evidentes: la de duplicarse sin la ayuda de proteínas, y la de catalizar todos los pasos de la síntesis de las proteínas. Si propusimos el ARN fue porque es una molécula más sencilla que el ADN, y también porque no

era difícil imaginar mecanismos en los que el ADN podía formarse a partir del ARN».

Orgel y sus colegas no vieron confirmados sus pronósticos hasta principios de los años ochenta, cuando se demostró que el ARN podía autocopiarse sin necesidad de enzimas, y que además podía desempeñar el papel de una enzima, o sea proporcionar la base de un metabolismo (fabricar alimentos), aunque fuese primitivo. La paradoja se resolvía con una gallina que era huevo al mismo tiempo. La historia de la vida en la Tierra se dividiría en un antes y un después del ADN, la poderosa fábrica de proteínas que domina la biosfera actual, en la que el ARN tiene un papel secundario. De ahí la expresión «mundo de ARN», una época en la que la maquinaria bioquímica era distinta de la presente.

¿Es este mundo un mundo real, o una entelequia como el séptimo cielo del cantante catalán Sisa? El ARN, aunque es una molécula más sencilla que el ADN, es difícil de sintetizar en el laboratorio, incluso en condiciones óptimas. Y, una vez sintetizada, sólo empezará a autorreplicarse si el investigador se lo facilita bastante. «Es una molécula bastante inepta, especialmente si se la compara con las proteínas», admite Orgel. Además, los experimentos son tan complicados que no se puede averiguar a través de ellos nada sobre las condiciones reales del mundo de ARN. Stanley Miller protesta también contra esta hipótesis: «Las condiciones para el origen de la vida tuvieron que ser fáciles, no especiales». Quizá, después de todo, hubo un mundo más sencillo, anterior al de ARN. Últimamente, el equipo de Orgel está estudiando una molécula del mismo grupo pero aún más sencilla, el ácido péptidonucleico (APN), de propiedades parecidas y síntesis más fácil. Lo que es cierto es que el

par ADN-proteína, hasta no hace mucho tiempo considerado imprescindible, se aleja rápidamente del centro de la escena del origen de la vida.

INVASORES DEL ESPACIO

En 1969, un meteorito cayó cerca de la ciudad de Murchison, en el oeste de Australia. Recogido de inmediato, resultó pertenecer al grupo de las denominadas condritas carbonáceas, que se caracterizan por tener hasta un 4% de carbono. Cuando se analizó, el meteorito de Murchison parecía un producto del experimento de Miller, ya que rebosaba aminoácidos. No sólo eso: mientras que cualquier sustancia biológica terrestre es, como las personas, diestra o zurda (los términos científicos son dextrógiro y levógiro, lo que significa que polarizan la luz hacia la derecha o hacia la izquierda), los aminoácidos sintetizados en un laboratorio son la mitad diestros y la mitad zurdos. Esto significa que los procesos químicos tienen igual probabilidad de producir un tipo u otro, mientras que los seres vivos siguen construyendo el mismo tipo con el que comenzaron. Los aminoácidos del meteorito de Murchison eran dextrógiros y levógiros al 50%, lo que significaba que la roca no había sido contaminada con materia orgánica terrestre. Los aminoácidos habían sido fabricados en el cinturón de asteroides, y más concretamente en su parte más lejana (a 500 millones de kilómetros), en la que abundan los asteroides ricos en carbono.

La posibilidad de que la vida terrestre provenga del espacio fue sugerida por vez primera, hacia el año 500 a.C., por el filósofo griego Anaxágoras, quien la llamó

panspermia (mezcla de semillas), concibiéndola como un gran intercambio vital entre los muchos mundos habitados. La idea resucitó en el siglo XIX, precisamente al estudiarse los primeros meteoritos carbonosos. El físico británico lord Kelvin, uno de los científicos más prestigiosos de su época, opinaba que «debemos aceptar como altamente probable la existencia de incontables piedras meteóricas portadoras de semillas que vagan por el espacio». En cambio, el químico sueco Svante Arrhenius rechazó esta posibilidad con un argumento que pareció irrefutable: «Hay que considerar fantástica la idea de que organismos incluidos en meteoritos sean transportados por el espacio universal y depositados en otros cuerpos celestes. La superficie de los meteoritos se vuelve incandescente a su paso por la atmósfera, con lo que cualquier germen que pudiesen transportar quedaría destruido».

Si Arrhenius hubiese tenido la oportunidad de recoger un meteorito recién caído, hubiese comprobado con sorpresa que estaba helado. Las rocas son muy malas conductoras del calor, por lo cual el generado en el paso del meteorito a través de la atmósfera produce tan sólo la fusión de una capa superficial de uno o dos milímetros, y se pierde cuando esta corteza fundida se desprende en gotas incandescentes (que son los rastros luminosos de los meteoros). De esta forma, tan sólo serían destruidas las sustancias situadas en la superficie del meteorito, pero no las que se hallasen en su interior: así se explica la supervivencia de los aminoácidos de Murchison. Este meteorito marcó la resurrección de la idea de la panspermia; sin embargo, no representó ningún avance real en el problema del origen de la vida en la Tierra. Como vimos (en el apartado «¿En la playa, o en el fondo

del mar?»), los aminoácidos son fáciles de producir en nuestro planeta.

La cuestión clave es, por supuesto, si han podido llegar a nuestro planeta organismos vivos desde el espacio. Hoy nadie discute esta *posibilidad*: la materia a debate es su *probabilidad*. En los últimos años del siglo XX, la discusión se ha centrado en la probabilidad de que la vida en la Tierra se haya originado... en Marte. La controversia se produjo cuando en un meteorito de inequívoco origen marciano (catalogado como ALH84001 por el lugar del impacto, en la Antártida, y fecha de su hallazgo) se hallaron formas semejantes a las bacterias terrestres. Sabemos que los fragmentos de asteroides que viajan por el interior del Sistema Solar juegan un billar cósmico que tiene como consecuencia el intercambio de rocas entre planetas: un asteroide choca contra un planeta, y las salpicaduras del impacto viajan por el espacio hasta caer en otro. Si las rocas de la zona de impacto contenían organismos, éstos pueden viajar como pasajeros hasta otro planeta siempre que logren superar tres situaciones peligrosas: el impacto de salida, las condiciones del viaje interplanetario, y la brusca llegada a destino.

Como hemos visto, este último escollo no es difícil de vencer siempre que el pasajero esté bien abrigado en el interior de la roca. Algo semejante se puede decir de la salida de un planeta como Marte, porque los diecinueve meteoritos marcianos que han llegado a la Tierra no están demasiado alterados por choques ni altas temperaturas (se ha demostrado que la temperatura de ALH84001 en su salida fue inferior a 40 °C), lo que significa que tuvieron un despegue relativamente suave. El gran problema de la panspermia es el viaje interplanetario. En el espacio, al vacío y a la temperatura cercana al

cero absoluto hay que añadir la radiación, intensa en las órbitas de los planetas interiores. Y todo ello durante un largo tiempo: ALH84001 pasó quince millones de años en este medio hostil.

Sorprendentemente, algunos microorganismos terrestres pueden soportar (al menos durante tiempos cortos) estas duras condiciones: se han realizado experimentos con diversos virus y bacterias, que han sobrevivido (mejor las bacterias) en el espacio cuando han estado protegidas de la radiación ultravioleta, la más letal para la vida. Bacterias de la cavidad bucal permanecieron vivas durante años en la superficie de la Luna, un medio comparable al espacio. Teniendo en cuenta que a lo largo de la historia del Sistema Solar podrían haber llegado a la Tierra millones de toneladas de rocas marcianas, y que basta una sola célula viva para contaminar todo un planeta, las probabilidades no son despreciables. Nisbet, por ejemplo, afirma que Marte es el planeta con mayores probabilidades de haber sido la cuna de toda la vida del Sistema Solar interior. Para ello se basa en su menor gravedad, que hace más fácil extraer rocas de su superficie. Se podría decir que Marte es un exportador nato de rocas, mientras que los otros planetas cercanos con atmósfera, Venus y la Tierra, son importadores típicos.

En 1961, el bioquímico español Joan Oró fue el primero en proponer que la panspermia podría resolver el problema de la rapidez de la aparición de la vida en la Tierra. Si al menos algunas de las síntesis prebióticas hubiesen tenido lugar fuera de la Tierra, el enojoso problema de la fábrica de materia viva trabajando bajo el bombardeo asteroidal sería un poco menos complicado. Algunos descubrimientos recientes han alentado esta línea de pensamiento: Louis Allamandola, el fundador del

laboratorio de Astroquímica en el centro Ames de la NASA (el laboratorio donde trabajan los científicos *marcianos* más conspicuos), ha sugerido que «esta ventana de tiempo para la aparición de la vida, que se cierra cada vez más, implica que el proceso puede haber requerido ayuda molecular desde el espacio».

Sin embargo, otros autores han puesto en duda esta sugerencia: hace 4.000 millones de años, la situación del Sistema Solar en general no era mejor que la de la Tierra. Suponemos que nuestro planeta estaba recibiendo la visita de asteroides gigantes porque hemos visto las señales de esa granizada en la Luna y en Marte. Pero, ¿qué decir del propio cinturón de asteroides, el lugar de procedencia de los impactores? Si había fragmentos cayendo hacia el interior del Sistema era porque en el cinturón había una gran inestabilidad, con colisiones frecuentes. De forma que, desde la órbita de Júpiter hacia adentro, no podemos imaginar ningún oasis donde la maquinaria bioquímica pudiese comenzar a organizarse sin sobresaltos.

En esta perspectiva planetaria, el problema del escaso tiempo y las malas condiciones para el surgimiento de la vida en el Sistema Solar sigue sin estar resuelto. Para aportar una solución, vuelve a escena Christopher Chyba, el hombre que creía en los cometas. Los cometas son ricos en compuestos carbonosos (el 25% del Halley), y su lugar de procedencia, la nube de Oort, está mucho más allá del ambiente revuelto de las órbitas planetarias. Un medio ideal, por lo tanto, para que las síntesis prebióticas se desarrollen con calma. Pero estos hipotéticos portadores de vida plantean un problema: cuando llegan al Sistema Solar interior, se aceleran enormemente (aunque son de natural tranquilo, no les queda más remedio

que cumplir con la segunda ley de Kepler²¹, por lo que una colisión contra un planeta se produciría a demasiada velocidad como para que las moléculas orgánicas quedasen intactas. El propio Chyba calculó que el choque del Halley contra la Tierra liberaría una energía de unos cien millones de megatones. Hay dos posibles soluciones a este problema: una, que la Tierra estuviese rodeada por una atmósfera muy densa (unas diez veces más que la actual) que frenase eficazmente el impacto, de la misma forma que se usan las atmósferas de Marte o Venus para frenar las sondas planetarias. La otra idea es que los portadores de vida fuesen cometas de los llamados de periodo corto, que residen entre las órbitas de Saturno y Urano, y cuyas velocidades son menores.

En 1980, Orgel y Crick dieron lo que podría llamarse otra vuelta de tuerca a la panspermia. Su «panspermia dirigida» apelaba a inteligencias superiores sembrando vida por el Universo, un tema tan querido a la ciencia-ficción que es el argumento de clásicos como *2001: una odisea espacial*, de Arthur C. Clarke. Luego, Orgel declaró que se trataba de una broma, una pequeña provocación dirigida tanto al público como a sus doctos colegas, aunque en el fondo de la broma había, como suele suceder, una intención seria: recordar las grandes incógnitas que aún subsisten en el problema del origen de la vida.

Veinte años después, los científicos que investigan el meteorito ALH84001 han dado un golpe de efecto

²¹ Según la cual las áreas barridas por cualquier cuerpo en órbita alrededor del Sol son constantes. Como (según la primera ley) estas órbitas son elípticas, con el Sol en un foco de la elipse, las distancias a éste varían a lo largo de la órbita. Cuando la distancia sea mínima, la velocidad debe aumentar para compensar la menor longitud del radio.

panspérmico, al revelar alineaciones de cristales de magnetita que en la Tierra son sintetizadas por bacterias llamadas magnetotácticas para, ayudadas por el campo magnético, orientarse en el agua. Aunque el meteorito ha sido invadido por materia orgánica terrestre, el ambiente ultraseco de la Antártida no es el lugar ideal para organismos flotantes, por lo que, en buena lógica, estos restos minerales podrían ser la huella de bacterias marcianas. Éste es, por el momento, el último revuelo en el apasionante mundo de la panspermia. Significa que, después de todo, quizá no tengamos que viajar hasta Marte para encontrar marcianos. O incluso que, como Ray Bradbury profetizó en un sentido más poético en sus *Crónicas marcianas*, los marcianos seamos nosotros.

ALIMENTARSE DE LUZ

¿Cómo pasó la Tierra de su atmósfera de nitrógeno y CO₂ a la actual de nitrógeno y oxígeno? Cualquier escolar conoce la respuesta: para construir sus tejidos, las plantas tienen la capacidad de asimilar carbono, rompiendo, mediante la energía solar, moléculas de dióxido de carbono atmosférico, y emitiendo oxígeno (nada menos que 20.000 millones de toneladas cada año) como subproducto. Es la famosa «función clorofílica», una reacción exotérmica del tipo redox, en la que siempre tiene que haber un compuesto reducido y otro oxidado: al oxidarse el primero se produce energía, con la que el organismo propulsa sus procesos metabólicos. Las plantas usan agua como sistema reducido, y moléculas complejas (como quinonas) como oxidado.

Sin embargo, cuando formulamos esta pregunta en el marco de la evolución del planeta, nos encontramos con el pequeño inconveniente de que en el Arcaico no había plantas, ya que éstas tienen menos de mil millones de años de antigüedad. Pero el enriquecimiento en carbono ligero que presentan las rocas de Isua es precisamente la huella de que *algo* estaba asimilando (selectivamente) CO_2 hace más de 3.800 millones de años. Este enigma no es, de todas formas, muy complicado de resolver. Entre las bacterias actuales existen varios grupos (las principales son las llamadas cianobacterias, literalmente bacterias azules) que contienen un tipo de clorofila. Parece evidente que, desde su aparición, estos individuos se dedicaron sistemáticamente a alterar la composición de la atmósfera de la Tierra, en lo que James Lovelock ha calificado irónicamente como el mayor atentado ecológico de la historia del planeta.

Algo más complicado es esbozar una hipótesis sobre cómo las bacterias llegaron a tener clorofila. Nisbet propone que en ambientes hidrotermales, con fuertes desequilibrios químicos debidos a la emisión masiva a través de las chimeneas volcánicas de elementos atípicos (por ejemplo, concentraciones importantes de metales), la síntesis de pigmentos como la clorofila fue puramente casual; y su asimilación por organismos simples, algo aleatorio. Pero este paso supuso una enorme ventaja evolutiva, ya que significó una nueva fuente de energía que explotar, y por lo tanto el principio de la independencia respecto a las chimeneas volcánicas. Nisbet imagina que esta adaptación pudo surgir en bacterias termotácticas (es decir, las que se mueven hacia las fuentes de calor), una adaptación lógica en un ambiente volcánico. Luego, alguna estirpe especialmente aventurera pudo utilizar

esta sensibilidad para orientarse hacia las aguas más cálidas de la superficie, y así colonizar el océano.

Estos organismos usaban una forma primitiva de la fotosíntesis denominada anoxigénica, que aprovecha las longitudes de onda menos energéticas del espectro (infrarrojo, por ejemplo), y sustancias reducidas como hidrógeno o azufre. En contraste, la fotosíntesis actual implica una complicada maquinaria bioquímica, que incluye la enzima ribulosa bifosfato carboxilasa (que todo el mundo denomina en broma «Rubisco», por la semejanza, algo forzada, de sus iniciales con una conocida marca americana de patatas fritas), y que es la encargada de capturar el carbono del CO_2 atmosférico, o del disuelto en el mar. Esta fotosíntesis oxigénica utiliza además la parte luminosa del espectro, más energética que la infrarroja. El paso de la fotosíntesis primitiva a la moderna seguramente se produjo a través de una simbiosis, ya que existe casi total certeza de que los cloroplastos, los organismos celulares de las plantas verdes en cuyo interior tiene lugar la fotosíntesis, son antiguas bacterias admitidas en el interior de las células de los eucariota²², los seres complejos dotados de células con núcleo. Pero para su aparición quedan aún al menos mil millones de años. Por el momento, durante este largo periodo, las modestas bacterias perfeccionaron sus sistemas para, alimentándose de luz, cambiar la atmósfera del planeta.

Una última y curiosa reflexión sobre la función clorofílica: Rubisco es una extraña enzima porque sirve tanto para asimilar CO_2 (en la fotosíntesis) como oxígeno (en la respiración de la planta). Es decir, de alguna forma, para destruir lo construido. ¿Cómo, en 4.000 millones

²² Véase la Figura 5.

de años, la evolución no ha producido un sistema más estable para sintetizar materia orgánica? Una posible respuesta utiliza el paralelo con el teclado de nuestros ordenadores: existe una leyenda según la cual el famoso «teclado qwerty», una combinación diabólica de letras frecuentes e infrecuentes, fue una trampa para evitar que las mecanógrafas demasiado rápidas produjesen demasiados atascos en la mecánica no muy sutil de las primeras máquinas de escribir. De igual forma, la madre Naturaleza no habría tenido demasiado interés en hacer demasiado eficiente su enzima básica, que digiere el dióxido de carbono: de haberlo hecho, quizá a estas alturas de la evolución planetaria no quedase nada de CO₂ para los siguientes 5.000 millones de años.

EL VOLKSWAGEN DE LA BIOSFERA, Y OTROS MODELOS

Por su forma, el fósil más antiguo conocido parece una bacteria idéntica a las actuales. Aunque tiene 3.500 millones de años, es joven comparado con las rocas de Groenlandia donde otros seres vivos dejaron sus huellas en forma de desequilibrios isotópicos. Aquellos organismos también debían de ser bacterias, al igual que la mayoría de los seres vivos actuales. Las bacterias no son muy variadas: como algunos fabricantes de automóviles, se han limitado a generar un diseño básico simple y fiable, y lo repiten con muy ligeras variantes. Aún así, forman una parte muy importante de la vida en la Tierra, una de las tres grandes divisiones de la biosfera (ver Figura 5).

Pero no se trata tan sólo de una cuestión de número, sino también de tiempo. Los eucariota no aparecieron

hasta hace unos 3.000 millones de años, lo que significa que se perdieron casi la mitad de la historia del planeta, que durante ese larguísimo primer acto estuvo dominada por organismos de tipo bacteriano. Un tiempo suficiente para inventar los distintos tipos de fotosíntesis y así cambiar la composición de la atmósfera. Suficiente también para salir de los refugios volcánicos submarinos y colonizar los océanos; para —como afirmaba Minik Rosing— tomar el timón.

Solamente en tres de los escasos terrenos arcaicos de todo el mundo hay rocas sedimentarias. Pues bien, se da el hecho sorprendente de que en los tres (Groenlandia, África del Sur y Australia Occidental) se han hallado signos de actividad biológica. Quizá incluso más que su antigüedad, esta aparente universalidad es lo que ha hecho cambiar nuestros esquemas sobre la vida: mientras que hace pocos años la veíamos como algo frágil, ahora no tenemos más remedio que considerarla un fenómeno ubicuo y tenaz. La vida es oportunista: parece surgir inmediatamente, en cualquier medio, y es capaz de extenderse adaptándose a todos los nichos ecológicos existentes en un planeta; incluso quizá de viajar de un planeta a otro, dentro de un sistema estelar. Éste es su techo, ya que no puede viajar entre las estrellas. Que sepamos.

Todavía más: como vimos en el apartado anterior, algunos órganos de las células de los eucariota (los cloroplastos pero también las mitocondrias, que son almacenes de enzimas) son en realidad bacterias que fueron admitidas como simbioses. Hasta el núcleo de nuestras células, donde residen los genes, es probablemente una bacteria modificada. Así pues, habría que concluir que las bacterias han terminado inundando la biosfera te-

rrestre, y quizá el Sistema Solar. Lo han hecho de forma sigilosa, muchas veces disfrazadas en organismos más importantes, a los que han enseñado sus mejores trucos: cómo producir alimentos con energía solar, o cómo bajar los genes en cada generación con la reproducción sexual. Por eso, cuando busquemos vida en el Sistema Solar, el modelo con el que compararemos será también una bacteria. Por los indicios actuales, no sería del todo extraño que tuviésemos éxito. Esas cadenas de cristales de magnetita halladas en el interior del meteorito marciano quizá nos están intentando contar una historia fascinante: si son lo que parecen, habría que concluir no sólo que las bacterias constituyen un patrón multiplanetario (¿universal?) de vida, sino también que sus comportamientos (por ejemplo, cómo orientarse en un campo magnético) son también cosmopolitas. Las bacterias nos dicen que, suponiendo que no exista panspermia, el mundo es un pañuelo.

EL FIN DE LA INFANCIA

Hace 2.600 millones de años aparecieron en la Tierra unas rocas nuevas. Se trataba de capas rojas, extensas formaciones de areniscas impregnadas de hematites, un óxido de hierro. Los sedimentólogos han reconstruido su ambiente de formación, concluyendo que se trata de depósitos fluviales. Esto implica dos consecuencias: la primera, que en esa época ya existían continentes extensos; la segunda, que la atmósfera estaba cambiando, porque la hematites es el óxido de hierro más rico en oxígeno, y por ello no podría haberse formado bajo una atmósfera de CO_2 .

Ya sabemos quién es el culpable de la alteración de la atmósfera. En cambio, el origen de los continentes es el gran enigma con el que se cierra el eón Arcaico: una gran parte (quizá hasta el 80%) de la actual corteza continental se formó en un corto periodo, entre 2.800 y 2.500 millones de años. Hasta aquí la Tierra había sido esencialmente un planeta oceánico, pero en poco tiempo estaba sembrada de grandes extensiones de tierra emergida. No se sabe cuál fue la causa de esta aceleración en el proceso de producción de granitos. Hace unos años, cuando se pensaba que la dinámica interna de la Tierra arcaica era distinta a la actual, se solía argumentar que este exceso de producción era el reflejo del comienzo de la tectónica de placas; pero después, el consenso en una dinámica «moderna» desde el principio dejó a este periodo de magmatismo extraordinario sin explicación (aunque en el siguiente capítulo se propondrá una idea reciente). El tema de fondo es saber si la Tierra expulsa su calor gradualmente o mediante pulsos térmicos; y, en este último caso, cuál es la causa de esta conducta tan extravagante desde el punto de vista termodinámico: nada parecido le ha sucedido nunca a nuestro plato de sopa.

El acontecimiento térmico con el que acaba el Arcaico cierra también la Tierra no actualista. Un viajero del tiempo sólo notaría la falta de cubierta vegetal, pero la geología ya le resultaría familiar: las formaciones de hierro bandeado persistirán todavía, pero poco a poco serán sustituidas por capas rojas; la Tierra ya se ha enfriado considerablemente, por lo que no habrá más lavas komatiíticas. En una palabra, desde el final del Arcaico este planeta comienza a parecerse bastante al actual; todo será más fácil de explicar, y por ello menos fascinante. Después de aventurarnos en la selva arcaica, podemos

entender la atracción que esta *terra incognita* ejerce sobre los especialistas. El Arcaico es, como el espacio profundo, una de las fronteras del conocimiento humano.

Tabla 1
Acontecimientos clave en la Tierra arcaica
(4.570-2.500 m.a.)

Edad (m.a.)	Datos	Interpretación
4.400	Circones	Primeros granitos
3.900	Fuerte $\delta^{13}\text{C}$ negativo	Actividad fotosintética
3.900	Últimas cuencas de impacto (Luna y Marte)	Final del Gran Bombardeo Terminal
3.600	Paleomagnetismo	Primer continente
3.500	Primeros microfósiles	Océanos poblados por bacterias
2.800-2.500	Granitos masivos	Continentes extensos
2.600	Primeras capas rojas	Atmósfera oxidante

REVISIÓN DEL CAPÍTULO I.

p 13-14: La importancia de β Pictoris

Las elucubraciones de Alfred Vidal sobre el sistema de β Pictoris con las que inicio el libro han sido confirmadas: la **Figura 1** [*Nature* (433, 133) 2005] muestra que el disco es asimétrico, y la mejor explicación del punto térmico excéntrico es que se trata de una gran nube de polvo causada por el choque de dos cometas gigantes, o tal vez de dos planetas. En 2009 [*Science* (329, 57) 2010] se ha podido localizar el primer planeta embutido en el disco, un gigante ($M = \sim 9 \pm 3 M_{\text{Júp}}$) situado a 12 ± 3 unidades astronómicas de la estrella.

A pesar de que algunos de los datos sobre ésta eran inexactos [su distancia es de 63 ± 1 (no 53) años-luz, y su edad no es de ~ 100 , sino de ~ 10 millones de años], β Pictoris continúa siendo un modelo excepcional para estudiar la génesis planetaria, así que elegirlo para encabezar el libro me sigue pareciendo adecuado. Además, su edad muy reciente confirma que los planetas gigantes se forman en tiempos muy cortos, de pocos millones de años.

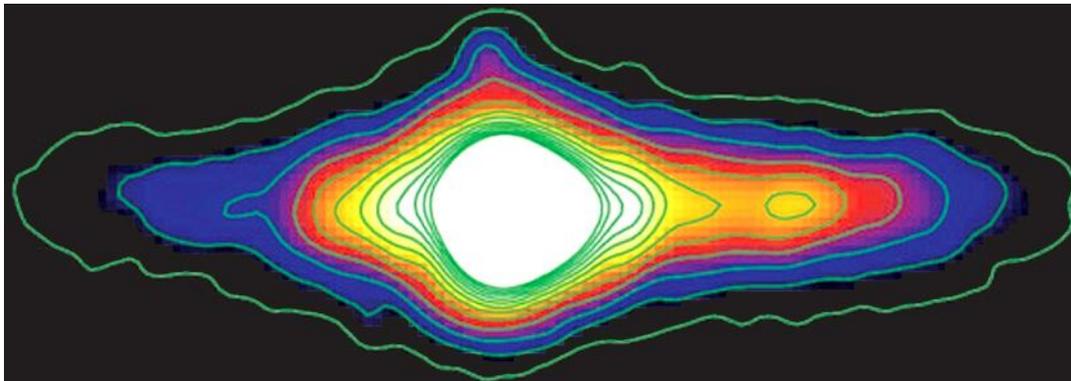


Fig. 1.

p 14-15: El Sol, ¿hijo único?

Esto es lo que se creía en 2002; hoy existen alternativas. La contaminación de la nebulosa protosolar con material exterior (demostrada por ejemplo en las inclusiones blancas del meteorito de Allende, **Figura 2**) dio lugar a la hipótesis de la supernova próxima (tan próxima como 0,07 años-luz); y sólo en un enjambre estelar es verosímil que una estrella muera al mismo tiempo que nace otra en la vecindad. Estos enjambres, compuestos de miles de astros (~ 10.000 en el caso de R136, **Figura 3**), son ahora el modelo preferido para la génesis solar. Se ha calculado [*Scientific American* (en adelante *Sci Am*, (301-5, 22) 2009] que nuestro enjambre pudo tener entre 1.500 y 3.500 estrellas, hoy dispersas por la galaxia.



Fig. 2.

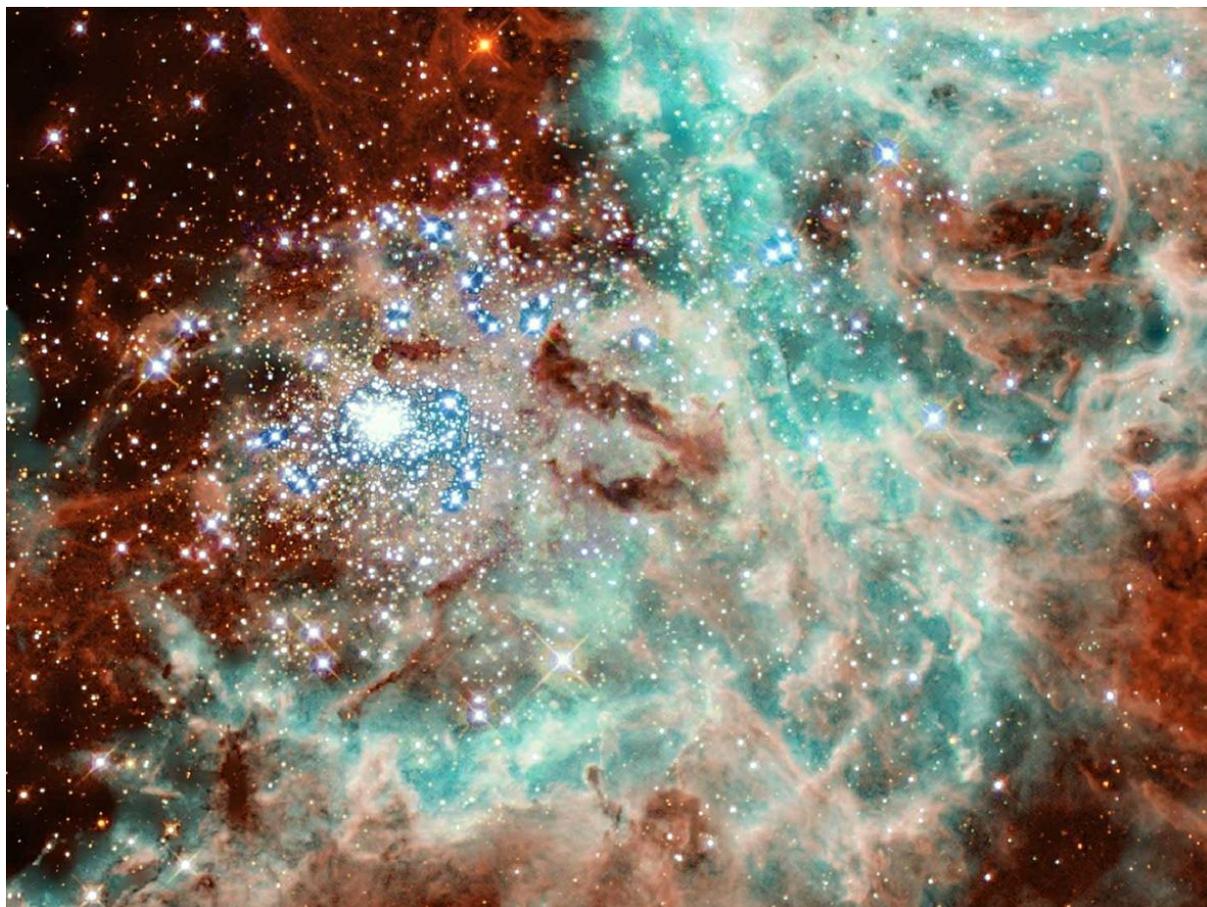


Fig.3.

p 16: ¿Existe el Cinturón de Kuiper?

En el inventario del Sistema Solar que figura en esta página paso directamente de los planetas a los cometas, omitiendo por lo tanto el Cinturón de Kuiper (o de Edgeworth-Kuiper). La hipótesis más apoyada [*Icarus* (196, 258) 2008] propone que este conjunto

de millones de cuerpos pequeños, entre los que destaca Plutón, se formó a partir de la migración de Neptuno hacia el exterior del sistema.

p 17: Las migraciones de los planetas gigantes

La duda que planteo sobre este tema está hoy resuelta: los planetas gigantes muy cercanos a la estrella no pueden haberse formado en su posición actual, porque en ella el corto radio de giro no les habría permitido recoger de la nube protoestelar su abundante material. La única solución válida es por lo tanto la migración, que debe realizarse con conservación del momento angular: el momento ganado por el planeta migrante debe perderlo la materia próxima, (o sea el gas y polvo del disco), igual que el nadador gana impulso a costa del retroceso del agua que le rodea. El que algunos planetas hayan migrado y otros no, dependerá, por lo tanto, de que la estrella haya sido eficiente en su tarea de limpiar de residuos el plano orbital. Júpiter y los otros gigantes no se acercaron más al Sol porque, a partir de un cierto momento, no había más partículas de las que extraer momento angular; por igual razón no podrán migrar en el futuro.

p 17: Los planetas solitarios

O errantes, o libres, son los que no orbitan alrededor de ninguna estrella. Localizados desde principios del siglo XXI en zonas de generación estelar, parecen demasiado numerosos para ser cuerpos expulsados de sistemas normales de planetas. La hipótesis dominante es que resultan del colapso de nebulosas demasiado pequeñas para dar origen a estrellas [LAEFF Reporter (34, 3) 2003]. Si la abundancia de los ejemplos conocidos (**Figura 4**) es extrapolable, serían *mucho más abundantes que éstas*.

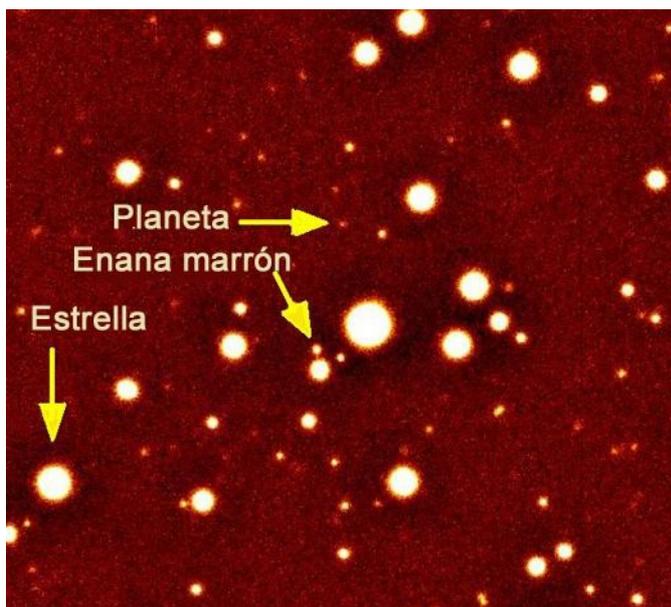


Fig. 4.

p 17: ¿Cuántos planetas hay?

En este momento, el consenso de los científicos apunta hacia cifras gigantescas. En 2009, Dimitar Sasselov, un especialista en exoplanetas, afirmó en una famosa (y deliciosa) conferencia [http://www.youtube.com/match?v=F8bM8K7W_R8] que sólo en nuestra galaxia podía haber unos cien millones de planetas habitables. Teniendo en cuenta que los requisitos de habitabilidad (para formas de vida de nuestro nivel de complejidad) son bastante exigentes, y que pueden existir cien mil millones de galaxias, la cifra potencial de planetas en el Universo se escapa hacia los trillones.

p18: La etapa oligárquica

Es el nombre con el que recientemente se designa la fase de construcción de los planetas de roca y metal. Los superordenadores han permitido intentos de cuantificar esta época turbulenta (**Figura 5**): en sólo miles de años se formarían objetos de centenares de metros; de centenares de kilómetros (como los mayores asteroides actuales) en unos $\sim 10^4$ años; y en ~ 1 Ma, cuerpos de tamaño marciano ($\sim 0,1 M_T$). La Tierra pudo tardar entre 15 y 30 Ma en formarse, si contamos desde el comienzo de la condensación de materiales en la nebulosa protosolar hace 4.569 ± 1 Ma.

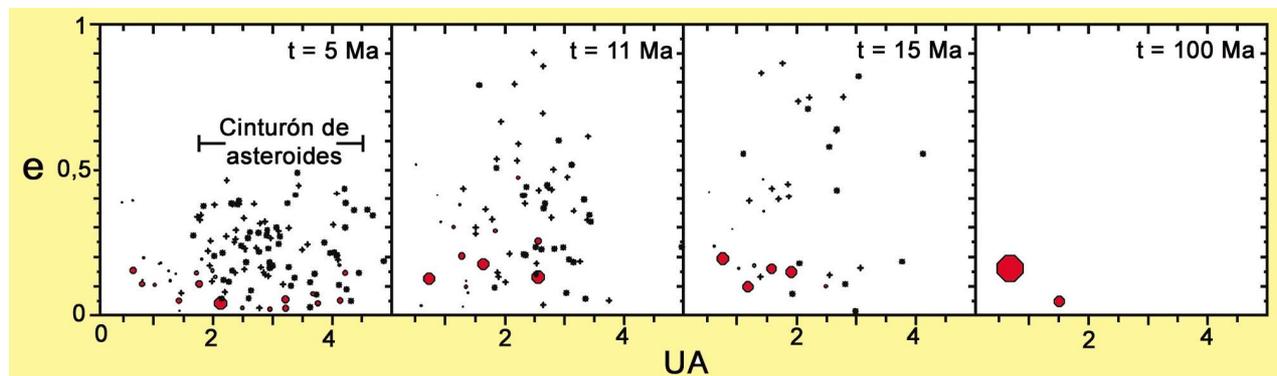


Fig. 5.

p 19: El modelo de Kyoto

La hipótesis de que los planetas terrestres capturaron al formarse grandes cantidades de volátiles no se mantiene actualmente. El “aspecto oscuro” que comento en esta página (que los núcleos rocosos de los planetas gigantes sí atrajeron gases masivamente) no es un proceso comparable, ya que en las zonas externas de la nebulosa el hidrógeno y el helio eran mucho más abundantes que en la órbita terrestre.

p 21: El agua de la Luna

¿Está nuestro satélite “absolutamente deshidratado”, como escribí en esta sección? Nuevos análisis de algunas rocas de las misiones Apollo (especialmente de los llamados *vidrios naranja*, **Figura 6**) han sembrado dudas sobre esta categórica afirmación, al hallar contenidos de agua no muy diferentes a los que contienen vidrios de la corteza oceánica terrestre [*Nature* (454, 192) 2008]. A este hallazgo se ha añadido la

detección [*Science* (326, 531) 2009] de hielo de agua (hasta 1%) en los cráteres polares; pero estos depósitos parecen de procedencia asteroidal. A pesar de estas novedades, el modelo de génesis lunar por impacto de otro planeta contra la Tierra no parece estar en peligro de momento.

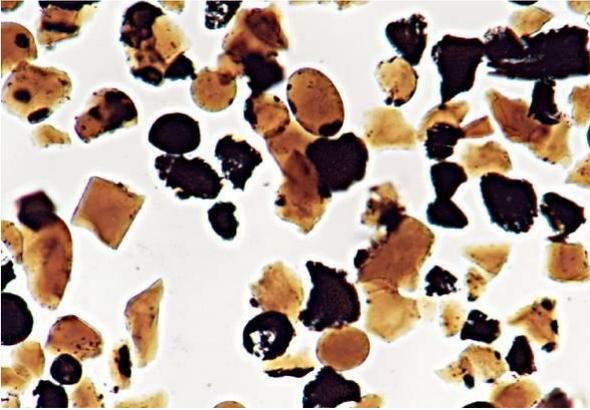


Fig. 6.

p 22: Nombres propios

El doctor Cameron no se llama Alan, sino Alastair. La costumbre científica de ocultar con iniciales los nombres de pila es la disculpa de mi error; y en 2001 yo no manejaba internet, que permite resolver fácilmente este tipo de dudas. En la p 132, otra confusión de nombres: atribuyo a Luis Alvarez una frase de su hijo Walter. Y en la p 133-134 hablo de Jacques Lascar, que realmente se llama Jacques Laskar.

p 23: La densidad de Mercurio

Al principio de esta página escribo, erróneamente, que de Mercurio a Marte los planetas más grandes son también los más densos, pero en el párrafo siguiente exceptúo a Mercurio, así que debería haber escrito “de Venus a Marte”.

Un impacto no es ahora la única explicación para la densidad anómala de Mercurio: se ha propuesto también que el viento solar expulsó de esa órbita muchos planetesimales rocosos, dejando un residuo enriquecido en hierro. Esta discusión tiene hoy más importancia que la que le concedí en el libro: a todo lo largo y ancho del Sistema Solar, los matemáticos (partidarios de las interacciones a distancia, como mareas) y los geólogos planetarios (defensores de los impactos) libran una guerra sin cuartel.

p 24 [y de nuevo en la p 38-39]: La causa del Gran Bombardeo Terminal

Este tema ha conocido grandes avances recientes basados en los modelos obtenidos por los superordenadores. El llamado “Modelo de Niza” (porque fue ideado en esa ciudad francesa [*Icarus* (196, 258) 2008]) propone que una migración hacia el Sol de Júpiter y Saturno generó una resonancia (una coincidencia orbital cuyos efectos gravitacionales se suman) que desestabilizó a Urano y Neptuno. Este último planeta habría penetrado profundamente en lo que ahora es el Cinturón de Kuiper, expulsando

de sus órbitas a billones de cuerpos. No sólo el bombardeo de los planetas interiores, sino también los satélites capturados por los exteriores, así como la estructura actual del cinturón de asteroides, serían efectos de esta revolución. La **Figura 7** ilustra tres fases de esta hipotética etapa turbulenta, separadas por 200 Ma.

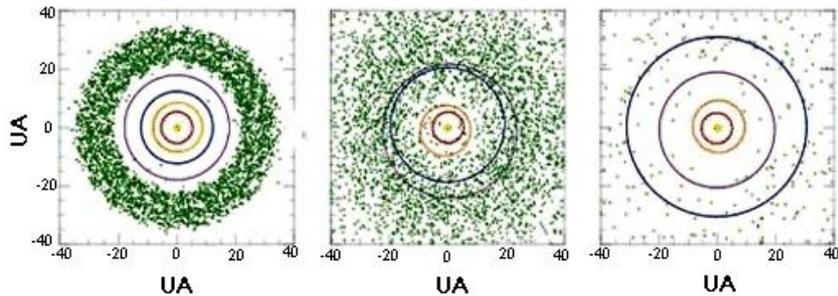


Fig. 7.

p 30: Las grandes divisiones de la historia de la Tierra

El comienzo del Fanerozoico se establece (en una nota al pie, pero también en las págs 151 y 153) en 550 Ma, pero el límite moderno está fijado en 542 ± 1 Ma. También debí fijar aquí la duración del Hádico (¿O Hadéico?), que va desde el origen de la Tierra hasta los 3.800 Ma.

p 33: ¿Protegen realmente los campos magnéticos las atmósferas planetarias contra el viento solar?

Esto es lo que dicen los libros, pero entonces, ¿cómo es que Venus posee una hermosa atmósfera (92 bars de presión en superficie) a pesar de carecer de campo magnético y recibir, por su cercanía al Sol, un viento de protones a gran velocidad? Yo creo que el gran protector de atmósferas es el campo gravitatorio, que es quien realmente amarra los elementos ligeros al planeta sólido. Es más: como más o menos puede verse en la **Figura 8**, el campo magnético marciano (hoy inactivo, pero fosilizado en sus rocas) parece estar contribuyendo a la erosión de su atmósfera por el viento solar, al concentrar éste en las zonas más magnéticas.

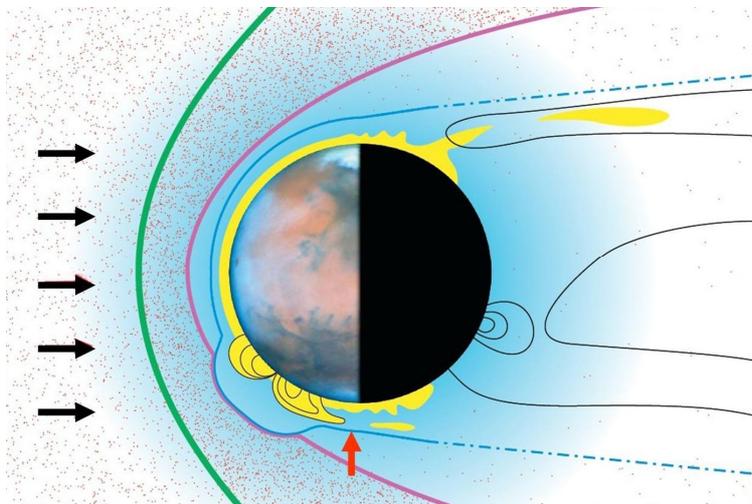


Fig. 8.

p 34: La composición de la atmósfera primitiva

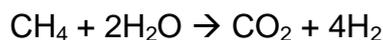
Aquí, y también en otros puntos del libro, me decanto por una atmósfera dominada por el dióxido de carbono, o sea muy ligeramente oxidante. Mi principal argumento es la inestabilidad de los gases reductores más comunes (amoníaco y metano) en un medio bañado por abundante radiación ultravioleta, como debía ser la Tierra arcaica; y también (esto no está en el libro) en que nuestros planetas vecinos tienen atmósferas de dióxido de carbono, y me parece demasiado geocéntrico proponer una atmósfera especial para nuestro planeta.

Sin embargo, el debate sobre la composición de la atmósfera en el Arcaico inicial no sólo sigue abierto, sino que es uno de los más inestables de la Geología Histórica. Son muy frecuentes en él los cambios de posición motivados por una nueva especulación de los geoquímicos atmosféricos. Las dos hipótesis (atmósfera de CO₂, o bien reductora) han coexistido durante medio siglo sin conseguir prevalecer. Un ejemplo un tanto cómico de esta situación es que en artículos distintos de un número especial (2006) de la revista *Earth, Moon and planets* dedicado al origen de la vida se planteaban una y otra hipótesis como *la buena*, sin siquiera enfrentarlas. Cito una referencia de cada bando. Para la atmósfera de CO₂: [*Earth & Planetary Science Letters* –en adelante *EPSL* (227, 179) 2004]; y para la atmósfera reductora: [*Science* (308, 1014) 2005].

También escribo que el nitrógeno “se considera inicial”, y tengo que matizar esto. La fuente más verosímil de este gas sería el amoníaco expulsado por los volcanes y casi inmediatamente (en tiempos de <10 años) descompuesto por la radiación UV:



Igual sucedería con el metano que por igual conducto apareciese en la superficie:



En ambos casos, el hidrógeno escaparía. Según esto, el amoníaco y el metano sí existieron (pero sólo muy fugazmente) en la atmósfera primitiva. Mi opinión es que sus tiempos de residencia son tan cortos que no se puede contar con ellos para procesos complejos como es el originar vida. Pero los reductores no se dan por vencidos, y han propuesto [p ej, en *EPSL* (269, 29) 2008] que los óxidos de azufre generarían una niebla química (parecida a la de Titán) que sería transparente para la radiación luminosa pero no para la ultravioleta, protegiendo así a los gases reductores. Otro intento parecido [*Nature* (464, 687) 2010] descarta el amoníaco pero se queda con el metano, un gas interesante para explicar glaciaciones, como veremos al comentar la p 125.

p 35: La paradoja del joven Sol frío

Tal como lo he escrito, el punto segundo del “silogismo” de Sagan y Mullen es el mayor disparate del libro: en la fase de combustión de hidrógeno, el helio es inerte, y por tanto no desprende energía. El núcleo del Sol no se calienta porque los choques entre partículas más pesadas desprendan más energía, sino porque, como todos los núcleos

atómicos tienen prácticamente el mismo volumen, al convertirse cuatro hidrógenos en un helio el núcleo solar se comprime.

Rectificado esto, hay que decir que la paradoja sigue sin estar resuelta: no comprendemos cómo, con un Sol que calentaba un tercio menos que el actual, la Tierra arcaica no se congeló. No está claro que los gases de invernadero (que eran la solución clásica a este problema) estuviesen presentes en la concentración necesaria. Una alternativa reciente [*Nature* (464, 744) 2010] propone que, con pocos continentes, el albedo del planeta era mucho menor (los océanos son más oscuros que la tierra) y que eso compensaría la escasez de CO₂; pero ha sido seguida por un aluvión de críticas. Ante situaciones como ésta, me pregunto cómo podemos aspirar a comprender la hipotética vida en otros planetas, si no logramos explicarla en el nuestro.

p 39-42 [y de nuevo en p 67]: El Gran Bombardeo Terminal sobre la Tierra

Lo que en 2002 era sólo una extrapolación razonable del bombardeo sobre la Luna se ha convertido en una hipótesis apoyada por múltiples datos. Muchas rocas arcaicas contienen elementos típicos de asteroides, como iridio y algunos isótopos de wolframio; y abundan también los niveles de esférulas de vidrio (*Figura 9*), una prueba adicional de que en su historia inicial la Tierra recibió un gran número de impactos asteroidales.

Dos novedades: una [*Nature* (459, 419) 2009], que recientes modelos numéricos del calentamiento de la Tierra por megaimpactos no apoyan la esterilización completa del planeta en el GBT. Así que, después de todo, quizá la vida sólo haya surgido una vez, y no es imposible que lo haya hecho antes de 4.000 Ma. La segunda [*Science* (332, 302) 2011] es que el bombardeo intenso no se limitó al periodo 4.000 – 3.900 Ma, sino que aparentemente se prolongó durante todo el Arcaico (o sea, hasta 2.500 Ma), con un intervalo entre grandes impactos de ~40 Ma, y no de 500 Ma como se había propuesto hasta ahora. Una vida incierta, la de nuestros antepasados bacterianos.

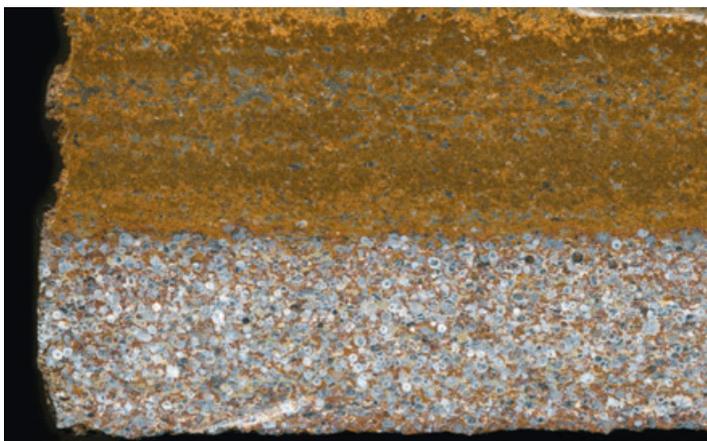


Fig. 9.

p 40 [y con mayor detalle en p 71-73]: ¿Vida hace 3.850 Ma?

Las rocas estudiadas por Minik Rosing en Isua, en el suroeste de Groenlandia, y en las que Schidlowski encontró un exceso de carbono ligero aparentemente indicativo

de actividad biológica han sido (y siguen siendo) el centro de una dura polémica. Sin embargo, hasta los críticos más exigentes [p ej, en *Nature* (434, 155) 2005] conceden que al menos algunos de estos afloramientos son de rocas sedimentarias oceánicas, y que su grado de metamorfismo no es extremo, por lo que el desequilibrio de carbono puede ser realmente biológico [ver la discusión sobre la edad de estas rocas en el comentario de la p 64]. En vista de la incertidumbre, la frase (p 90) "...las rocas de Groenlandia donde otros seres vivos dejaron sus huellas..." debería matizarse: "...otros seres vivos quizá dejaron sus huellas..."

p 43-44 [y también en las p 85-86]: El origen del agua terrestre

La procedencia cometaria de nuestros océanos, que doy como hipótesis alternativa a su procedencia del interior, está hoy fuera de juego, ya que se encontró con dos obstáculos insalvables. El primero es la alta excentricidad de las órbitas de los cometas, que, según dictaminó Kepler en su segunda ley, les obliga a acelerar en su tránsito cerca del Sol. De esta forma, llegarían a la Tierra a tales velocidades (de hasta 20 km/s) que el agua que transportasen (e incluso la que ya hubiese en el planeta) sería expulsada en la colisión. El segundo es definitivo: el agua de los cometas analizados es isotópicamente muy distinta al agua de mar. Hoy se cree [*Meteorites & Planetary Science* (35, 1309) 2000] que el agua provino de asteroides de la parte exterior del cinturón, que están hidratados y cuya agua sí tiene la misma firma isotópica que la terrestre.

p 44-45: El carbono de la Tierra

La **Figura 10** [*Icarus* (91, 93) 1991] es una perfecta expresión gráfica del proceso de concentración de carbono en la biosfera. Ésta contiene unas 25 veces la concentración solar, a pesar de que en la Tierra existe, como en todos los planetas interiores, una cantidad muy pequeña de este elemento, como también de los otros volátiles.

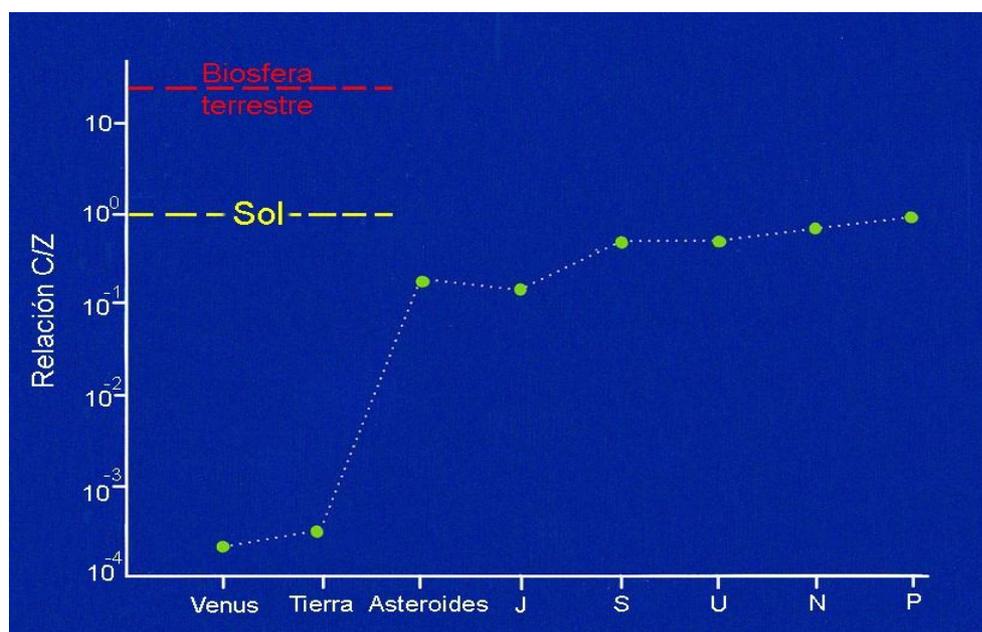


Fig. 10.

p 47: La roca más antigua

La roca que describo en esta página es (**Figura 11**) un gneis tonalítico (o sea, relativamente rico en cuarzo) de la cuenca del Río Acasta, Territorios del Noroeste, Canadá, casi en la costa del Océano Ártico. *Shrimp* ha dictaminado que sus circones se formaron hace 3.962 ± 3 Ma. Cuando daba clase, utilizaba a veces este ejemplar para ilustrar el actualismo: la mayoría de las rocas no pasa nunca de moda.

Esta roca ya no es la más antigua de la Tierra: en 2008 se encontró otra, en la Península de Labrador, también en Canadá, con una edad de 4.280^{+53}_{-81} Ma [*Science* (321, 1828) 2008], una interpretación que sin embargo se discute.



Fig. 11.

p 49: Alfred Wegener en Nueva York

Contra lo que afirmo, Wegener sí fue profesor universitario: entre 1911 y 1914 en Marburg, y en Graz (Austria) desde 1924 hasta su muerte. Pero se trataba de pequeñas universidades de provincia, lo que no dejó de ser tenido en cuenta por sus adversarios norteamericanos, instalados en centros universitarios tan poderosos como Stanford, Yale o Johns Hopkins.

p 63-64: ¿Cómo es una formación de hierro bandeado?

Añado la **Figura 12**, un depósito de este tipo en Australia.

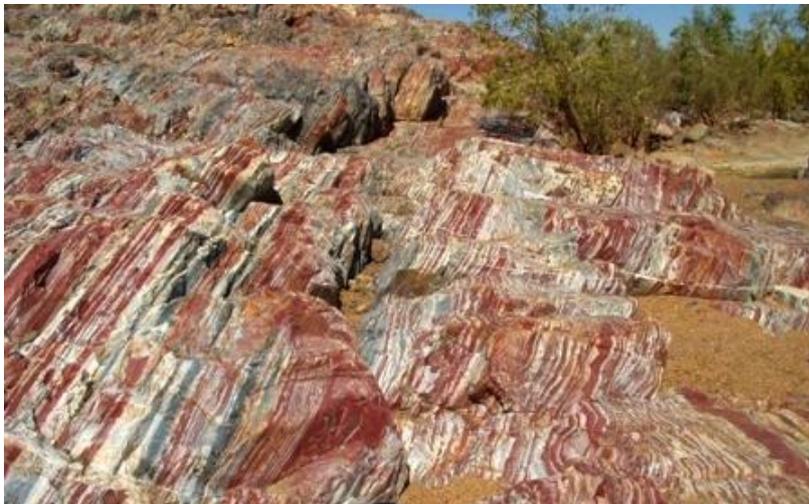


Fig.12.

p 64: La edad de las rocas de Isua

Según especialistas británicos en Geocronología [*Geological Society of London* (190, 177) 2001], la edad de las rocas con posibles indicios biológicos es de sólo 3.680 a 3.750 Ma, y no de >3.850 Ma. La diferencia puede parecer trivial, pero no lo es: la edad más joven no solapa con el Gran Bombardeo Terminal (y por tanto sería compatible con la hipótesis clásica de aparición de la vida una vez que hubiese acabado aquél), cosa que sí sucede con la mayor. En este contexto es importante lo dicho en la nota a las p 39-42.

p 69: ¿Son el agua y el carbono imprescindibles para la vida?

Lamentablemente no me animé a explorar esta doble pregunta. Gabriel Castilla y yo lo hemos hecho recientemente [*Planetas, Ed. Rueda* (p 433-436) 2010], así que me permito un poco de autopropaganda (ya sé que no debería hacerlo).

p 70-71: Avances en las síntesis de material biológico

En 2009, un equipo de investigadores británicos demostró [*Sci Am* (301-3, 38) 2009] que algunos nucleótidos (las unidades básicas de los ácidos nucleicos) pueden formarse mediante reacciones químicas espontáneas. De todas formas, el intento de construir ácidos nucleicos (la vía llamada “replicador primero”) parece actualmente, para muchos bioquímicos, menos prometedor que el esquema “metabolismo primero”, que aspira a comprender las reacciones metabólicas que llevaron a la síntesis de sustancias prebiológicas.

p 73: Más sobre la biobatalla de Groenlandia

El estado actual del combate entre Rosing-Schidlowski y otros investigadores del Arcaico ya está relatado en la nota a la p 40. Es nueva, en cambio, la peripecia de los descubrimientos de Stephen Mojzsis. Sus afloramientos de la isla de Akilia fueron examinados con lupa, y el veredicto fue casi unánime [p ej, *Nature* (434, 155) 2005]: no tienen ningún aspecto de haber sido nunca rocas sedimentarias. Al lado de este problema básico, las otras objeciones, a saber: (1) la incapacidad de otros investigadores de encontrar carbono en las muestras, (2) el intensísimo metamorfismo de éstas, y (3) las serias dudas sobre su edad, son ya irrelevantes, a pesar de la portada de *Science*.

p 76: ¿Somos todos termófilos?

La frase “todas las encrucijadas situadas cerca de las raíces [del árbol de la vida]...estaban ocupadas por organismos que viven a temperaturas de entre 80 y 110°C” debería cambiarse a: “muchas de las encrucijadas...”.

p 77: Eucariotas y eucariontes

Después de escribir el libro me enteré de que estas palabras no son sinónimos, y que para referirse a organismos compuestos por células con núcleo hay que usar la segunda, reservando la primera para la célula o el taxón. Así que en el pie de la Figura 5

debería haber escrito: “(eucariontes, seres complejos...)”. Este error (y el paralelo procariota-procarionte) está disperso por todo el libro, p ej en las p 89, 140-142, 159, 183 y 191.

p 81: Los aminoácidos extraterrestres

Me faltó decir que son sistemáticamente racémicos, y no levógiros como los terrestres. Pero, ¿dónde y cómo se forman? En una publicación reciente [*Science* (332, 1304) 2011] se describen experimentos realizados sobre una condrita carbonácea, y se concluye que sus compuestos orgánicos, aminoácidos y otros, se generaron en el asteroide parental por alteración hidrotermal a temperaturas moderadas (<150°C). O sea, nada muy exigente.

p 83: ¿Cuántos meteoritos marcianos?

En 2001 eran 19, pero ahora ya son 34, casi todos los últimos encontrados en Marruecos y Argelia. La NASA tiene una página especial [<http://www2.jpl.nasa.gov/snc>] para seguir los nuevos hallazgos.

p 87 [también en la p 92]: La magnetita en el meteorito ALH84001

Las cadenas de cristales de magnetita descubiertas en el meteorito marciano ALH84001, aparentemente similares a las de algunas bacterias que viven en ambientes marinos, fueron la última carta en la manga del bando pro-biológico. Ello a pesar de que el meteorito era una roca de origen magmático formada en las profundidades del manto, muy lejos del hipotético océano marciano. Sin embargo, la idea tuvo un recorrido muy corto: sólo meses después de su publicación, se demostró que estos cristales también pueden producirse por la descomposición, en impactos, de otros minerales de hierro.

p 87 [de nuevo en la p 96]: ¿Cómo se enriqueció la atmósfera en oxígeno?

Mi segunda mayor metedura de pata en todo el libro fue escribir (¡y encima por duplicado!) que el oxígeno que hoy forma la quinta parte de nuestra atmósfera procede de la ruptura de moléculas de CO₂ por los organismos fotosintéticos. Para terminar de arreglarlo, me adorné diciendo: “Cualquier escolar conoce la respuesta...”. Espero que los escolares la vayan conociendo, pero yo sólo me he enterado a través de las advertencias (todas extremadamente corteses) de hasta cinco profesores de Secundaria: por orden cronológico, José Luis Pérez Mendía, Daniel Climent, Concha Gil, Ricardo Martínez y Victoria Recuenco. A todos ellos, mil gracias por enseñar al que no sabe, y otras mil más por su benevolencia.

La realidad es que, como saben hasta los escolares, la fuente del oxígeno es la fotólisis del agua:



p 89: Rubisco y las patatas fritas

Al lado de la pata anterior, ésta es un pecado pequeño. La marca a la que me refiero es la americana Nabisco (de **national biscuits company**), y no fabrica patatas fritas sino galletas: las más conocidas en España son las Oreo.

p 90: Los fósiles más antiguos

En la página 73 daba cuenta del triunfo de William Schopf sobre Stephen Mojzsis. Ahora, como la alegría va por barrios, le toca sufrir a Schopf, el gran preboste de los fósiles arcaicos. Sus *bacterias* australianas, que aparecen en muchísimos libros de texto, han sido objeto de duras críticas [*Nature* (416, 76) 2002]. Por una parte, las rocas que las contienen han sido reclasificadas: no son una antigua playa, sino una chimenea hidrotermal; por lo tanto, los fósiles, si lo son, no pueden ser fotosintéticos. Después, algunas morfologías (como bifurcaciones, señaladas con flechas en la **Figura 13**) son francamente impropias de bacterias, e igual de impropio es algún proceder de Schopf, como eliminar en las microfotografías las partes del supuesto fósil con menos aspecto biológico. Schopf ha reconocido que se equivocó en la reconstrucción del ambiente de formación de la roca, ha recalificado sus pseudobichos como termófilos [*Nature* (416, 73) 2002] y ha insistido en su estirpe biológica, pero la duda está sembrada. Especialmente cuando, casi a continuación [*Science* (302, 1194) 2003] un grupo iconoclasta (encabezado por el famoso iconoclasta Juan Manuel García Ruiz, CSIC-U. de Granada) ha conseguido reconstruir en un laboratorio (con ingredientes tan simples como sílice, carbonatos y un poco de materia carbonosa) formas bastante parecidas a las bacterias en cuestión (**Figura 14**). No todo lo que parece familiar tiene que ser biogénico.

Entretanto, y a pesar de todo, las mejores reconstrucciones geoquímicas (llevadas a cabo sobre fosfatos de 3.500 Ma [*Nature* (464, 1029) 2010]) sugieren un océano templado ($T \sim 40^\circ\text{C}$) y biológicamente activo en la época de estos discutidos restos.



Fig.13.

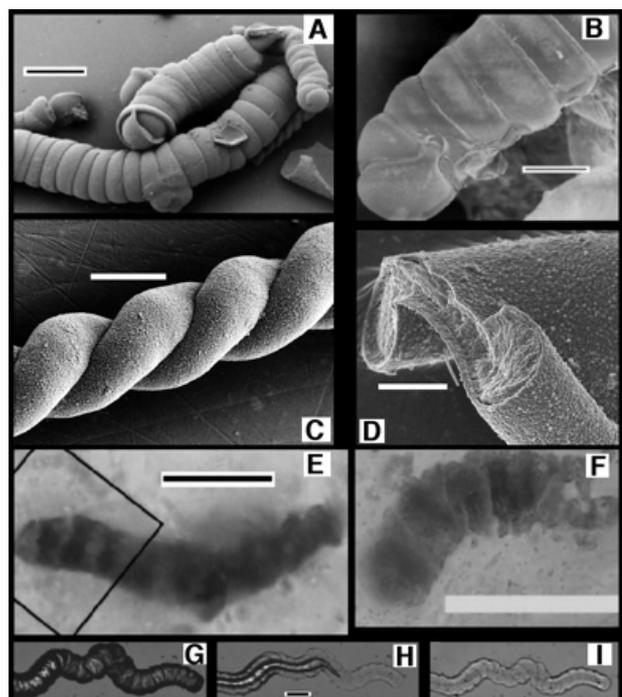


Fig.14.

p 93: El origen de los continentes

“El gran enigma con el que se cierra el eón Arcaico”, la producción en ingentes cantidades de corteza continental al final de este periodo, recibe una solución provisional en el capítulo siguiente (págs 115 y 151): sería la primera de las avalanchas en el manto propuestas en 2000 por Kent Condie. Hay que reconocer que ésta es una respuesta más bien *ad hoc*, ya que no hay huellas concretas de lo que pudiese estar pasando en el manto al final del Arcaico. En 2008 se ha propuesto [*Science* (322, 540) 2008] otra idea un poco más sólida: al irse enfriando el manto, algunos minerales hidratados pudieron subducir sin descomponerse. Esta transferencia de agua desde la hidrosfera al manto superior resultaría en una producción masiva de magmas hidratados (granítico-andesíticos, o sea, de corteza continental) sobre las zonas de subducción.

La edad adulta

LA ATMÓSFERA PETRIFICADA

Hacia el principio del Proterozoico, hace 2.500 millones de años, la mayor parte de la densa atmósfera del Arcaico había desaparecido. Pero no había sido expulsada por impactos, como la atmósfera primaria. Su destino había sido mucho más singular: se había convertido en piedra. Esta paradoja aparente tiene una explicación sencilla: el CO_2 es muy soluble en agua, donde forma ácido carbónico. A su vez, este compuesto reacciona con el calcio disuelto en el mar y forma una sal, el carbonato cálcico (CaCO_3) relativamente insoluble, que precipita como el mineral calcita. Según vimos en el capítulo anterior, las rocas formadas por calcita se llaman calizas, y se forman sobre todo en fondos someros de mares cálidos: por este sistema, los corales fabrican diez kilos de caliza por metro cuadrado y año. Solemos encontrar estas rocas mucho después, cuando las fuerzas que modelan la superficie de la Tierra han levantado el fondo oceánico por encima del nivel del mar. Las calizas vuelven a disolverse, a veces en formas caprichosas, y así se forman las grutas calcáreas. Cuando visitamos una de estas cuevas estamos contemplando atmósfera petrificada.

Casi todo el dióxido de carbono que envolvía la Tierra arcaica siguió este camino; pero aun así, quedaba en la atmósfera del final del Arcaico una cantidad todavía muy importante de CO_2 . Entonces, hace aproximadamente 2.400 millones de años, tuvo lugar lo que muchos historiadores de la Tierra consideran el cambio ambiental más importante de la evolución del planeta. Las cianobacterias y otros organismos fotosintéticos habían proliferado hasta constituir una masa importante, y su consumo de CO_2 había, lógicamente, crecido con ellos. Hay que recordar que, al romper esta molécula, estas bacterias incorporan el carbono para fabricar con él sus moléculas orgánicas, y eliminan oxígeno como un producto de desecho. Al principio, el oxígeno desaparecía rápidamente convertido en óxidos, porque los activísimos volcanes submarinos del Arcaico emitían grandes cantidades de hierro, elemento por el cual el oxígeno tiene gran avidez: se formaron así los depósitos de hierro bandeado. Pero cuando la actividad volcánica declinó, el oxígeno se acumuló en el mar y, al sobrepasar un cierto nivel, empezó a exsolverse (el proceso contrario a la disolución) e invadir la atmósfera. Sabemos cuándo sucedió este cambio porque la pirita (un mineral, según vimos, incompatible con el oxígeno) empieza a ser rara a partir del comienzo del Proterozoico. Se ha dicho que el oxígeno actuó como una especie de lejía que limpió la atmósfera: sólo desde el Proterozoico podemos imaginar cielos azules.

Sin embargo, la persistencia de hierro bandeado durante otros mil millones de años significa, probablemente, que el oxígeno aún tardó en saturar las zonas más profundas de los océanos. Tampoco la concentración inicial de oxígeno bastaba para construir la capa de ozono (O_3)

que ahora tiene la atmósfera a unos 40 kilómetros de altitud, y que bloquea eficazmente los peligrosos rayos ultravioleta. Esto constituye un argumento más para defender que la vida inicial tuvo que estar protegida, probablemente por un considerable espesor de agua. El charco intermareal que imaginó Darwin hubiese sido un ambiente poco recomendable durante todo el Arcaico y el principio del Proterozoico, ya que seguramente no hubo una pantalla de ozono hasta hace 2.000 millones de años. En cualquier caso, éste no era el principal problema al que se enfrentaban nuestros antepasados microscópicos en esta época.

ESTRATEGIAS PARA UN PLANETA DISTINTO

Los organismos arcaicos sólo podían vivir en ambientes desprovistos de oxígeno. Por lo tanto, la acumulación de este elemento desencadenó una crisis biológica global, en la que probablemente desapareció la mayoría de la vida generada en el Arcaico. Los supervivientes tuvieron que refugiarse en ambientes marginales pobres en oxígeno, como aguas profundas y estancadas, el interior de sedimentos, o materia orgánica muerta. Se comprende que, al lado de esta hecatombe, las modificaciones que el hombre está produciendo en la atmósfera actual le parezcan cosa de poca monta a James Lovelock, el padre de Gaia.

Sin embargo, otros microorganismos fueron capaces de adaptarse al nuevo ambiente. Una proeza considerable, teniendo en cuenta las ya comentadas siniestras propiedades del oxígeno. Los depósitos de hierro bandeado que se describieron en el capítulo anterior deben

su nombre a las capas de sílex (un precipitado formado por sílice, SiO_2) que alternan con las de óxidos de hierro: en estas bandas silíceas se conservan abundantes biomarcadores (moléculas provenientes de la descomposición de seres vivos), e incluso microfósiles, entre ellos cianobacterias, es decir seres fotosintéticos. Esto significa que el hierro emitido por los volcanes submarinos estaba siendo aprovechado por las cianobacterias como depósito del oxígeno que producían: los propios responsables de la catástrofe medioambiental tampoco sabían qué hacer con el veneno que estaban produciendo, por lo que buscaban cualquier sumidero, aunque fuese provisional. Una situación curiosamente similar a la que afronta hoy el hombre con sus residuos químicos y nucleares. Como el hombre, las cianobacterias adoptaron una solución transitoria, pero ésta no era más que una huida de la realidad: el hierro mantenía los océanos libres de oxígeno, pero en conjunto la situación era insostenible.

La adaptación definitiva al mundo oxidante se logró con la aparición de enzimas capaces de utilizar el oxígeno en reacciones químicas beneficiosas. Por ejemplo, para descomponer (mediante su oxidación) moléculas complejas en CO_2 y agua. Además de producir combustible adicional para la fotosíntesis, estas reacciones generan gran cantidad de energía. Con ello, la biosfera da un paso significativo: no sólo domestica la nueva situación, sino que abre una puerta hacia metabolismos más complejos, que requieren fuentes de energía más poderosas. Una hipótesis muy atractiva, desarrollada recientemente, se basa en la confirmación genética de que la célula eucariota (o sea, con núcleo) surgió a favor de endosimbiosis (asimilación mutuamente beneficiosa)

de diversas bacterias. Un tipo de éstas parece ser el que ha dado lugar a las mitocondrias, órganos celulares especializados en tratar el oxígeno y convertirlo en ATP (adenosin trifosfato, energía pura). A partir de este dato, podemos visualizar una historia *estilo Hitchcock*, en la que unos fagocitos (células especializadas en digerir bacterias) que estaban a punto de perecer a causa de la creciente concentración de oxígeno, tuvieron la suerte de digerir un tipo de bacteria que, en lugar de servirle de alimento, le salvó la vida y cambió así el curso de la evolución.

UN IRRESISTIBLE MAGNETISMO

En esta búsqueda de mecanismos para afianzar su dominio de la superficie terrestre, la biosfera quizá encontró un aliado insólito en el interior del planeta. Aunque no es fácil medir la magnetización impresa en rocas muy antiguas, los datos de intensidad del campo magnético actualmente disponibles muestran, sorprendentemente, que el Proterozoico es la época de mayor magnetismo en toda la historia de la Tierra. Las medidas muestran una brusca subida de la intensidad del campo entre 2.700 y 2.500 millones de años, al final de la cual la Tierra disfruta de un dipolo magnético con una intensidad que duplica la actual; hay un máximo hacia los 2.000 millones de años, y luego un declive hasta que se alcanza el presente valor hace unos 800 millones de años.

El hecho de que las grandes variaciones en la intensidad del magnetismo se produzcan en los límites entre eones (Arcaico-Proterozoico primero, y Proterozoico-Fanerozoico después) quizá sea casual; pero, aunque los arqueólogos de la Tierra están acostumbrados a no aceptar

las casualidades, sino a buscar relaciones causa→efecto, lo cierto es que, en el caso de las variaciones magnéticas del final del Arcaico, todavía no se ha dado ninguna explicación convincente. El modelo aceptado para explicar el campo magnético terrestre es el llamado de la dinamo autoinducida, que está basado en las leyes del electromagnetismo propuestas hacia 1860 por el físico escocés James Clerk Maxwell: al moverse, un conductor eléctrico (como lo es el hierro fundido del núcleo terrestre) produce un campo magnético; pero el movimiento de material magnetizado provoca (como en las dinamos industriales) corrientes eléctricas, las cuales alimentan a su vez el campo magnético. Y, ¿por qué se mueve el hierro del núcleo? Porque éste aún está muy caliente (unos 6.000 °C, la misma temperatura que la superficie del Sol), por lo que se producen en él corrientes de convección. A su vez, y aunque el planeta se enfría, la convección se mantiene por el crecimiento del núcleo interno sólido a expensas del núcleo externo líquido; ya que, al caer las partículas solidificadas, su energía potencial se convierte en energía térmica que alimenta el campo.

Como vimos, el tránsito Arcaico-Proterozoico se caracteriza por la enorme cantidad de corteza continental producida en un intervalo corto de tiempo. ¿Está relacionado este hecho con el despertar del campo magnético? Parecería lógico que fuese así, ya que los dos fenómenos tienen que ver con la convección en el interior de la Tierra: el campo magnético por lo que se acaba de explicar, y la corteza continental porque se produce sobre las zonas de subducción, que se deben a la convección del manto. Si, por ejemplo, el núcleo hubiese comenzado a solidificarse hace 2.700 millones de años, al magnetismo producido por la convección habría que sumarle el derivado de

la transformación de energía gravitacional en térmica al crecer el núcleo interno; a su vez, la convección en el núcleo transportaría calor al manto, cuya convección mueve la litosfera. Y un movimiento acelerado de ésta podría explicar por qué se produjo más corteza. El único pequeño obstáculo en este elegante esquema es que no hay ninguna explicación convincente para que el núcleo terrestre comenzase a solidificarse precisamente en esta época. [En el apartado titulado «Los muchos *pulsos de la Tierra*» se propone una alternativa a la producción masiva de corteza continental al principio del Proterozoico].

Fuese cual fuese su causa, estos movimientos profundos tuvieron una repercusión importante en la superficie del planeta: un campo magnético intenso significa una elevada capacidad de desviar partículas solares cargadas (que solamente llegarían a las zonas polares, provocando las inofensivas auroras), así como un seguro contra la erosión de la atmósfera por el viento solar. De forma que, aunque no comprendamos bien su evolución, este gran paraguas magnético puede explicar algunas de las conquistas de la vida en el Proterozoico. Una época en la que aún quedaban asteroides peligrosos vagando por el Sistema Solar.

EL ORO QUE CAYÓ DEL CIELO

El primer proyectil lanzado por la artillería alemana sobre la ciudad de Leningrado, en los inicios de la Segunda Guerra Mundial, mató al único elefante del zoo. Medio siglo después, el geólogo norteamericano Bert King utilizó esta anécdota para ridiculizar la hipótesis de que la singular geología de la zona de Vredefort, en Suráfrica,

la fuente de la mitad del oro que se produce en el mundo, podía explicarse mediante un impacto asteroidal. La estructura consta de una elevación (el domo de Vredefort) rodeada por una cuenca sedimentaria donde el oro se encuentra impregnando estratos de edad arcaica. ¿Qué lógica tenía que en un área tan especial se hubiese producido además un acontecimiento único? Hoy sabemos que la respuesta correcta a esta pregunta era que la singularidad de la zona se debía precisamente a que sufrió hace 2.000 millones de años el impacto de un cuerpo celeste, un asteroide de unos ocho kilómetros de diámetro. Pero para llegar a este convencimiento hubo que recorrer un largo camino.

En los años cuarenta, casi todos los geólogos estaban convencidos de que los cráteres lunares eran estructuras volcánicas. Forma parte de las curiosidades de la historia de las ciencias de la Tierra que tuviese que ser Robert Dietz, un especialista en geología marina con experiencia en batiscafos (por definición, el científico menos indicado para escrutar los cielos), el primero que, contra la teoría dominante, propusiese que nuestro satélite estaba marcado por las huellas de miles de impactos asteroidales. Lo cierto es que, en 1950, los impactos seguían siendo rarezas: en la Tierra sólo se habían admitido once. La discusión se mantuvo a lo largo de la preparación de la llegada a la Luna de los astronautas del programa Apolo. En 1959, Dietz propuso criterios «de campo» para identificar cráteres de impacto, y *profetizó* que algunas de estas estructuras serían localizadas en Vredefort. Sólo dos años más tarde, los geólogos surafricanos encontraron conos astillados (unas estructuras con esa forma y diez a veinte centímetros de largo) donde Dietz predijo, pero ello no hizo cambiar el signo de la batalla.

Había dos factores que se oponían con fuerza al relevo de las ideas: por una parte, las poderosas escuelas de minas de Suráfrica llevaban un siglo estudiando Vredefort como una estructura geológica convencional, formada por enfriamiento en profundidad de una masa de magma, y no estaban dispuestas a abandonar esta tradición por unas pequeñas estructuras cónicas. En segundo lugar, la fanática política racista de los gobiernos surafricanos había contribuido a aislar a los científicos de este país, haciéndoles menos permeables a las nuevas corrientes científicas.

Las pruebas siguieron acumulándose: primero fueron deformaciones microscópicas en granos de cuarzo, que implican presiones mínimas de 100.000 atmósferas; luego, formas de cuarzo de alta presión que nunca antes habían sido observadas (ni lo han sido después) sino en cráteres de impacto. Pero los geólogos surafricanos encontraban explicaciones para todo. Los rasgos que denotaban alta presión se explicaron como resultantes de una «criptoexplosión», una explosión en profundidad. Cuando el bando pro-impacto argumentó que no había precedentes actuales de tal fenómeno, replicaron (con razón) que tampoco los había de colisiones de asteroides contra la Tierra. En 1987, una conferencia internacional sobre Vredefort terminó en tablas, con cada facción atrincherada en sus posiciones previas. Y así habrían seguido de no ser porque el estudio de los impactos experimentó un avance significativo en los años noventa, como consecuencia del debate sobre la extinción de los dinosaurios (otra interesante polémica que se revisará en el capítulo cuarto). Los geoquímicos habían saltado al ruedo de las discusiones sobre impactos, y ello desequilibró definitivamente la batalla. En 1996, Christian Koeberl,

de la Universidad de Viena, midió la cantidad de osmio, un elemento metálico similar al platino que es muy escaso en la Tierra pero está relativamente concentrado en los asteroides. Los valores resultantes eran imposibles si no había habido una mezcla de las rocas de la zona con material extraterrestre. Se había encontrado lo que los científicos anglosajones denominan *smoking gun*, la pistola humeante, la prueba definitiva del impacto.

Ya nadie discute sobre el origen de Vredefort; por el contrario, esta estructura de impacto, la más antigua conservada hasta hoy, ha servido de modelo a otras descubiertas después. En las décadas del debate se aprendió mucho sobre el domo, y también sobre impactos en general. Pero queda un tema por aclarar, y no es del todo trivial: ¿Hasta qué punto el enorme yacimiento de oro es una consecuencia del impacto? El oro es anterior al choque, y por lo tanto no vino con el asteroide; sin embargo, al crear una zona hundida, la cuenca de impacto, el asteroide fue el causante de que los sedimentos que contienen el oro se librasen de la erosión (que ataca más a las rocas elevadas). Además, al chocar, un impactor de esas dimensiones libera una cantidad gigantesca de energía, lo que ha dejado su huella en Vredefort: a raíz del impacto, toda la zona muestra una intensísima actividad hidrotermal, y estos fluidos calientes seguramente transportaron el oro hacia las grietas de las rocas rotas por el choque, generando filones.

En suma, el mayor yacimiento aurífero del mundo es un regalo final de la fase turbulenta de la evolución del Sistema Solar. Y otro tanto se puede decir de Sudbury (Canadá), la mina de níquel más grande del mundo. Fue también Dietz quien propuso que esta estructura no era de origen terrestre, sino que se había formado

por causa de la colisión contra la Tierra, hace 1.850 millones de años, de un asteroide de unos 4 kilómetros de diámetro. Este caso era, si cabe, más dudoso que el de Vredefort, porque Sudbury no es una estructura circular; pero Dietz pudo demostrar que una orogenia sucedida hace mil millones de años deformó el cráter, dándole su actual forma elíptica. Hasta el día de hoy se han reconocido unos 170 cráteres de impacto en todo el mundo; y cada año, gracias a la generalización de las imágenes de satélite, se descubren cuatro o cinco nuevos²³.

Acaba, con estas últimas catástrofes, lo que algunos han llamado historia pre-geológica de la Tierra. A partir de aquí, los acontecimientos principales tejen un tapiz mejor hilado; pero en él, contra lo que podríamos esperar, las leyendas y las reconstrucciones científicas parecen tener, no sabemos si por casualidad, un fondo común.

MITOLOGÍA Y GEOLOGÍA: LA EXTRAÑA CONEXIÓN

En diciembre de 1760, al excavar en el Zócalo (la plaza principal de México) para construir los cimientos de la catedral, los arquitectos del virrey de la Nueva España encontraron una enorme losa circular de basalto esculpida en altorrelieve. Afortunadamente, el Siglo de las Luces había alcanzado, aunque muy tímidamente, al imperio español, y las piezas arqueológicas no se destruían

²³ Aunque los tiempos difíciles no han pasado totalmente para los «impactólogos»: la única posible estructura de impacto reconocida en España (centrada en Azuara, Zaragoza) ha sido discutida durante los últimos quince años, y sigue siéndolo actualmente.

sistemáticamente por ser objetos paganos, como antaño. Eso sí, la piedra, de casi cuatro metros de diámetro, fue «convertida» al cristianismo al ser usada como base de una de las torres de la catedral. Hoy, con el nombre de Piedra del Sol o Calendario Azteca, es la joya del Museo Nacional de Antropología de Ciudad de México.

Aunque contiene también un calendario, la Piedra del Sol es sobre todo una historia del mundo, dividida en cuatro épocas («soles») representadas en cuatro rectángulos próximos al centro. La primera es Ocelotonatiuh, el Sol del Jaguar: en este tiempo, los dioses crearon gigantes que habitaban en cavernas, pero que fueron devorados por jaguares. La segunda época, Ehecatonatiuh, es el Sol de los Vientos: la raza humana fue diezmada por los huracanes, pero los dioses transformaron a los últimos hombres en monos para que, al aferrarse a la tierra con sus cuatro extremidades, pudiesen sobrevivir. En la tercera época, Quiautonatiuh, el Sol de la Lluvia de Fuego estuvo a punto de exterminar a los mortales bajo la lava y las cenizas, hasta que los dioses les convirtieron en pájaros. Por último, Atonatiuh, el Sol del Agua, representa la versión azteca del Diluvio Universal; pero en vez de sugerir la construcción de un arca, los dioses transmutaron en peces a los hombres para salvarlos de la inundación del mundo. Ninguna de estas leyendas es totalmente gratuita, sino que representa la interpretación en clave mítica de observaciones locales: los restos de gigantes eran en realidad huesos de grandes mamíferos que los aztecas hallaron en cuevas; los bosques antiguos devastados por los huracanes daban testimonio del Sol del Viento; los esqueletos descubiertos bajo capas de lava eran sin duda la huella de la Lluvia de Fuego; y los fósiles de peces en los montes fueron interpretados, igual

que en otras partes del mundo por otras culturas pre-científicas, como la prueba de una inundación global.

En 1951, Mircea Eliade, un antropólogo rumano especializado en la historia de las religiones, publicó un libro titulado *El mito del eterno retorno*. En él describía una sorprendente coincidencia entre los mitos sobre el origen del mundo sostenidos por culturas primitivas que de ninguna forma imaginable podían haberse comunicado entre sí. Los iránicos, los escandinavos o los aztecas repiten, con ligeros cambios en los detalles, varias historias: en muchas de ellas, el mundo es destruido una y otra vez, de forma casi total, sólo para renacer después en una forma nueva con la ayuda de las divinidades respectivas. Por ejemplo, el Sol de la Lluvia de Fuego parece una trasposición de la idea griega de *ekpirosis* o destrucción del mundo en un vasto incendio, tomada aparentemente de los iránicos y prolongada con variantes en el *ragnarok* escandinavo. Propone Eliade que estos apocalipsis tienen su origen en el ritmo lunar (la Luna crece, mengua y desaparece sólo aparentemente para renacer enseguida), que sirve de arquetipo para periodos de duración mucho mayor, y de base para una visión del mundo «optimista». No lo parecería, con tanta catástrofe, se podría objetar. Pero lo es, sostiene Eliade: en primer lugar, el mundo nunca se destruye totalmente; y, lo más importante, el reloj se pone a cero en cada renacimiento del mundo. Y aquí viene la parte sutil y maravillosa del argumento: al recomenzar el tiempo, la historia se anula. ¿Con qué beneficio? Para la humanidad primitiva, la vida debía de ser una sucesión de calamidades: sujeta a un jefe tiránico, expuesta sin apenas defensa a las fieras, al frío, al hambre y a las enfermedades, comenzar el tiempo desde el principio podía ser una forma (sin duda burda pero quizás psicoló-

gicamente efectiva) de negar sus desgracias. Una prueba de la realidad de este «terror de la historia» sería la frecuencia de los ritos mágicos de refundación de ciudades como símbolo de un tiempo nuevo y distinto.

Según esta teoría, las épocas de los aztecas no corresponden literalmente a una historia lineal del mundo tal como la entiende el hombre moderno, sino a una visión circular del tiempo. Puede ser, interviene de nuevo el lector, pero ¿qué relación tiene todo esto con la historia de la Tierra? Una no sólo estrecha, sino incluso sorprendente. En 1795, el médico y terrateniente escocés James Hutton, el padre oficioso de la geología, publicó su *Teoría de la Tierra*, libro de enorme influencia en el que por vez primera se intentaba una comprensión global de los procesos que experimenta el planeta. El mayor hallazgo conceptual del naturalista británico fue haber intuido la enorme magnitud de los tiempos implicados en los procesos geológicos, y con ella la gran antigüedad de la Tierra: lo que después los autores anglosajones han llamado *Deep Time* (en castellano, menos poéticamente, tiempo geológico), y que se suele considerar como la mayor contribución intelectual de la geología a la cultura científica moderna.

Merece la pena citar literalmente el relato de ese descubrimiento, uno de los momentos culminantes de la historia de las ciencias de la Tierra. Se produjo durante una excursión de Hutton y algunos de sus discípulos a un punto de la costa escocesa denominado Siccar Point (ilustrado en la Figura 12), y lo cuenta John Playfair, discípulo aventajado de Hutton y escritor de altura:

«Nos sentimos como si retrocediésemos a los tiempos en los cuales los esquistos, sobre los que nos hallábamos situados, estaban aún en el fondo del mar; los

tiempos en los que las areniscas que teníamos enfrente empezaban apenas a depositarse en forma de arena o lodo, desde las aguas de un océano que estaba por encima. Todavía aparecía una época más remota, en la cual incluso los más antiguos de estos terrenos, en vez de estar situados verticalmente en capas, yacían formando planos horizontales en el fondo del mar, y no habían sido aún inquietados por esta inconmensurable fuerza que irrumpió haciendo pedazos el sólido pavimento del planeta. En la distancia, al fondo de esta perspectiva extraordinaria, todavía aparecían revoluciones más remotas: nuestros pensamientos se volvían vertiginosos al contemplar momentos tan lejanos en el abismo del tiempo».

Hay que subrayar que Playfair, un maestro en el uso del lenguaje, estaba utilizando la palabra «vertiginoso» (*dizzy*) en su sentido literal: lo que produce vértigo²⁴. Pues bien, lo curioso es que Hutton, claramente un hombre de la Ilustración, precisamente después de hacer este descubrimiento fundamental, adoptó una visión cíclica del mundo muy parecida en el fondo a la de los aztecas. Para él era evidente (y aquí habla el propietario rústico) que el suelo agrícola procedente de la degradación de las rocas es arrastrado hasta el mar, con lo cual el relieve de las montañas se rebaja cada vez más. A su vez, el peso de los sedimentos hunde el fondo marino que, al llegar a las zonas profundas de la Tierra, que están calientes debido al *fuego central* (aquí se ve la influencia de

²⁴ Otros científicos se han sentido poseídos por el vértigo al descubrir una verdad fundamental. Así, Werner Heisenberg, una madrugada de 1925, al desentrañar las leyes básicas de la mecánica cuántica: «Tenía la sensación de que, a través de la superficie de los fenómenos atómicos, estaba mirando a un interior extrañamente hermoso; y me sentí casi mareado por esta idea».

su amigo James Watt, el inventor de la máquina de vapor), se funde, aumentando de volumen, y se eleva, formando las nuevas montañas que reemplazarán a las gastadas. La Tierra es como un gran columpio, en el que tierras y mares intercambian sus posiciones, pero donde nunca ha pasado, pasa ni pasará nada realmente significativo. De ahí la famosa frase con la que Hutton cerraba su libro: «Por lo tanto, el resultado de nuestra investigación es que no encontramos vestigios de un comienzo ni perspectivas de un final». Una Tierra sin historia, en la que el tiempo volvía periódicamente a comenzar con cada elevación de nuevas montañas (como el mundo azteca comenzaba de nuevo tras cada destrucción), pero bastante más aburrida.

El ciclo de Hutton (erosión → sedimentación → fusión → nueva elevación) ha tenido una excelente carrera: conocido como «Ciclo geológico» o «Ciclo de las rocas», sigue siendo hoy un concepto casi obligado en los manuales de geología, y ha sobrevivido a todas las revoluciones que se han sucedido en los dos siglos de historia de las ciencias de la Tierra. Junto a él, otras ideas cíclicas se han instalado en la cultura geológica, como es el ciclo del agua (precipitación → escorrentía → evaporación), el ciclo del CO₂ (disolución → reprecipitación de calizas), o el ciclo geomorfológico (relieve montañoso → llanuras → nueva elevación → nueva erosión). Algunos de ellos, como el ciclo del agua, son indiscutibles, pero la realidad de otros ha sido objeto de debates inacabables. Teniendo en cuenta todo lo que se ha dicho en este apartado, no se puede descartar que esta exuberancia de ideas cíclicas responda en parte a la necesidad, quizás anclada en el subconsciente colectivo de la especie, de escapar al «terror de la historia».

LOS MUCHOS *PULSOS DE LA TIERRA*

Entre todos los ciclos propuestos, ninguno ha sido tan discutido como el llamado ciclo orogénico, una insistente hipótesis de los geólogos del siglo XIX según la cual las cadenas de montañas, con todo su aparato de volcanes, pliegues y fallas, se construirían periódicamente. Una huella de esta idea son los «calendarios de fases de plegamiento», especie de listas de reyes godos compuestas por un sinfín de nombres de épocas (por ejemplo, la «fase pirenaica») en las que las cadenas de montañas se habrían plegado. Tales calendarios, presa favorita de los fabricantes de «chuletas» para exámenes, circularon por las facultades de ciencias geológicas hasta que, en los años setenta, el viento de la revolución post-wegeneriana los barrió del escenario. Estas listas se basaban en la premisa de que todas las montañas del planeta se plegaban al unísono, en una suerte de apretones globales más o menos periódicos que el holandés Johannes Umbgrove llamó «el pulso de la Tierra».

Sin embargo, según los postulados de la tectónica de placas, las deformaciones de una cadena de montañas no representan sino colisiones más o menos aparatosas (de otro continente, de un arco insular...) en la zona de subducción sobre la que aquélla se está formando (ver la Figura 3). Para seguir con el mismo ejemplo anterior, la «fase pirenaica» representaría en realidad el choque de la península Ibérica contra el sur de Francia, que creó los Pirineos. Pero esta colisión no debe tener, lógicamente, reflejo en los Andes o en el Himalaya; luego los plegamientos universales no tenían ninguna base lógica en el marco de la nueva geología.

Y, sin embargo, cuando el avance de la geocronología permitió datar rocas cada vez más antiguas, apareció

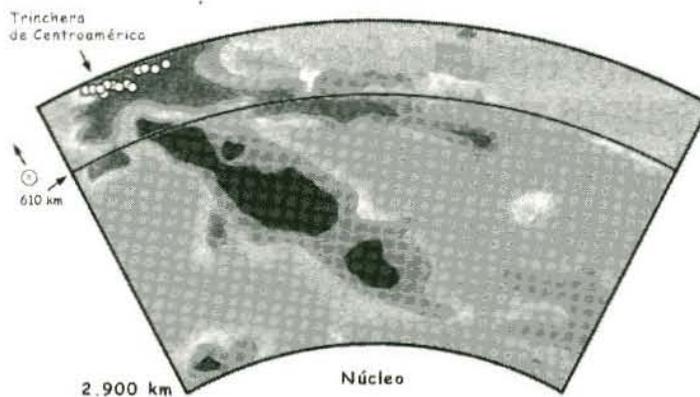
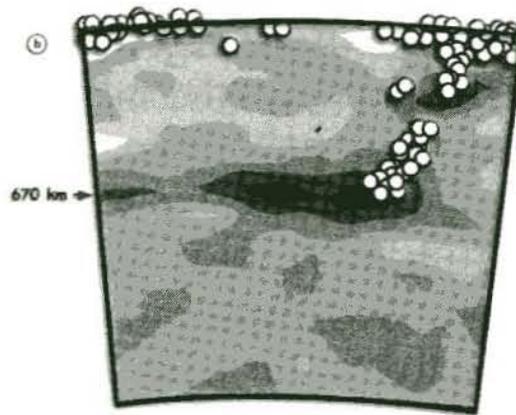
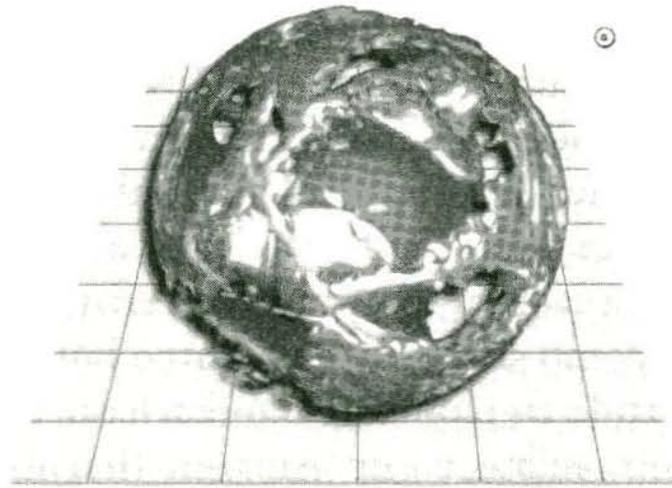
una molesta periodicidad: en determinados momentos de la historia del planeta parecían producirse más rocas de origen magmático, que los partidarios del pulso de la Tierra interpretaron como las raíces de antiguos orógenos. Primero se pensó que la periodicidad desaparecería cuando los datos fuesen más abundantes y fiables; pero no lo hizo. Y así se llegó a una incómoda situación: mientras que el proceso de subducción, aparentemente continuo, llevaba a pensar en una producción de magmas también continuada, la biblioteca de rocas (el llamado reverencialmente registro geológico, que, como todo registro, es la verdad oficial, sobre la Tierra en este caso) hablaba de discontinuidad y periodicidad. ¿Tenía o no tenía pulso el planeta?

Las dos escuelas coexistieron durante todo el siglo XX, y sólo al final de éste han llegado propuestas sintéticas; una vez más, de la mano de especialistas en un tema totalmente distinto, y muy alejado de la geología histórica. Un equipo de geofísicos del Instituto Tecnológico de California (más conocido como CalTech) había propuesto en 1993 que, como en las cumbres alpinas o en los taludes submarinos, en el manto terrestre se producían avalanchas. Desde luego, hay una importante diferencia: en las montañas, las avalanchas circulan bajo el aire; en las pendientes submarinas, bajo agua; aire y agua son fluidos. Pero, ¿cómo puede una avalancha producirse dentro de la Tierra sólida? Según el equipo de CalTech, la clave estaba en la densidad. Cuando subduce, la litosfera es comprimida: sus átomos se aproximan, con lo que se gana densidad, pero a costa de alterar la estructura cristalina. El mayor aumento de densidad se produce a los 670 kilómetros de profundidad. Pero cambiar cada átomo de sitio en la red del cristal requiere energía,

y la litosfera (una losa de unos 100 kilómetros de grueso que viene de la superficie terrestre) está demasiado fría. Por ello, las placas suelen detenerse a esa profundidad algunos millones de años hasta que, habiendo obtenido calor del manto circundante, ya tienen energía suficiente para llevar a cabo su transmutación cristalina. Cuando lo hacen es como si el gas de un barco butanero se hubiese convertido en plomo: se hunden hasta el núcleo terrestre como piedras en un estanque (bueno, algo más lentamente, unos pocos centímetros cada año).

Las simulaciones por ordenador con las que el grupo de CalTech ilustró su hipótesis eran lo bastante atractivas (Figura 6a) como para ser publicadas en una revista tan orgullosa de su diseño gráfico como es *National Geographic*. Pero la revolución no era solamente visual, ya que las cataratas del manto coincidían con las imágenes del interior terrestre que sismómetros y ordenadores²⁵ estaban produciendo desde finales de los años ochenta, y que mostraban tanto litosfera *aparcada* a los 670 kilómetros (Figura 6b) como lanzada sin frenos hacia el núcleo (Figura 6c). Estos buenos mimbres sirvieron a Kent Condie, un tectónico de Nuevo México, para hacer el cesto con el que proponer una solución al dilema del pulso de la Tierra. Su hipótesis era sencilla: en un momento determinado, se produce una avalancha masiva de litosfera a través del manto. Al llegar a la base de éste, la litosfera desaloja material a alta temperatura, que sube como un enjambre de puntos calientes hasta la superficie, provocando un

²⁵ A través de la aplicación de la técnica denominada tomografía sísmica, análoga a la usada en medicina para realizar imágenes tridimensionales de órganos. Múltiples trayectorias de ondas sísmicas son analizadas para conocer el estado físico (temperatura, por ejemplo) de cada punto. El resultado permite delimitar las zonas frías del manto, que corresponden a la litosfera subducida.



6. Reconstrucción de ordenador (a) y por tomografía sísmica (b, c) de las avalanchas en el manto terrestre. En el diagrama (b) se puede comprobar cómo a veces la litosfera (círculos [focos sísmicos] y color negro) se resiste a penetrar a través de la discontinuidad de 670 km, quedando «aparcada» hacia esta profundidad. En (c) vemos el caso general, de subducción hasta el núcleo (En Tackley et al., *Nature*, 361, 1993).

máximo de magmatismo. Éste sería, según Condie, el auténtico «pulso de la Tierra», una pulsación desencadenada en último término por la gravedad. Los máximos de producción de magma en la historia de la Tierra parecen producirse en ciclos de unos 800 millones de años. Uno de estos máximos coincide con el límite Arcaico-Proterozoico, con lo que la teoría de las avalanchas profundas de Condie proporciona una explicación para el mayor enigma pendiente de la dinámica terrestre, la gran producción de corteza continental en esta época, que sería el eco de la primera gran avalancha a través del manto. La menor cantidad de corteza producida en los últimos mil millones de años se debería a la menor energía de la convección, en una Tierra que se enfría rápidamente.

Los pulsos gravitacionales de Condie representan sólo la última de las ideas cíclicas propuestas en el marco de la movilidad continental. Cuando, en los años setenta, el tectónico canadiense John Tuzo Wilson sugirió que el océano Atlántico quizá se había abierto y cerrado más de una vez, estaba delineando un esquema que pronto se conoció como «ciclo de Wilson», y que describe el nacimiento y muerte de un océano cuando un continente se rompe y vuelve después a soldarse. A finales de la década de los ochenta, varios grupos ensancharon el ciclo de Wilson y lo hicieron global, como la nueva geología movilista: así nació la idea del «ciclo del supercontinente», definido como el periodo entre dos pangeas²⁶ que se fragmentan y se reúnen de nuevo. Puesto que la subducción implica la entrada de material frío en profundidad, el

²⁶ Derivada del griego «todas las tierras», esta palabra es un neologismo acuñado por Wegener para designar la reunión de todos los continentes. Supercontinente se emplea como sinónimo.

manto bajo un supercontinente (que está, por una cuestión de puro tamaño, alejado de toda zona de subducción, ya que ésta sólo puede darse bajo sus costas) estará más caliente de lo normal, por lo que se expandirá. Como consecuencia, el supercontinente se abovedará primero, y terminará por romperse. Esto provocará una descompresión que en un periodo relativamente corto (quizá unos cien millones de años) facilitará la formación de una nube de puntos calientes que romperá la pangea. Así pues, todos los supercontinentes son intrínsecamente efímeros; pero, puesto que las placas litosféricas 1) viajan sobre una superficie limitada (la esfera terrestre), y 2) se calientan al chocar, lo que tiende a soldar los fragmentos, la formación periódica de supercontinentes es inevitable.

Las huellas más directas de un supercontinente son precisamente las rocas (en general, basaltos) formadas por los puntos calientes; pero también hay otras marcas más sutiles, como las variaciones del nivel del mar. Al formarse una pangea, los continentes son comprimidos, con lo que la superficie cubierta por los océanos aumenta, y por tanto (puesto que la cantidad de agua no lo hace) su profundidad se hace menor: el nivel del mar baja (regresión), y vuelve a subir (transgresión) al dispersarse el supercontinente. También el clima llevaría las huellas de los supercontinentes: en las épocas de regresión, la mayor cantidad de rocas expuestas a la erosión significaría (según lo visto en el capítulo anterior) un mayor consumo de CO_2 , y con ello un enfriamiento que podría terminar formando glaciares continentales (glaciación). Por otra parte, la biosfera sería menos diversa en épocas supercontinentales, debido al menor aislamiento geográfico, de forma que habría más extinciones coincidiendo con los supercontinentes, y diversificación biológica tras

su ruptura. En resumen, como se afirma en uno de los artículos fundacionales de la idea, «el ciclo del supercontinente constituye, en cierto modo, el pulso de la Tierra: en cada latido, el clima, la geología y la población de organismos progresan y se renuevan».

Algunas de estas predicciones se cumplen aproximadamente si tomamos un periodo de unos 500 millones de años como duración del ciclo supercontinental. Se han datado importantes enjambres de diques basálticos (interpretados como momentos de ruptura de supercontinentes) hace unos 2.600, 2.050, 1.600, 1.050, 550 y 250 millones de años. Las dos últimas épocas son también momentos de crisis biológicas, y la última sigue de cerca a una glaciación. Sin embargo, la escasez de fósiles anteriores a 600 millones de años impide confirmar otros posibles momentos difíciles de la biosfera antigua, y las otras glaciaciones (2.300-2.150, 850-580, 450-420 y 15-0 millones de años) se niegan a cumplir el esquema. Por ello hay que concluir que el ciclo del supercontinente es en este momento una ambiciosa e interesante hipótesis de trabajo pendiente de confirmación o refinamiento. Su principal virtud reside en que da respuesta a la aspiración de encajar en un único esquema los trabajos de la máquina interna que regula el viajar de los continentes y las profundas zambullidas de los fondos oceánicos, y los del motor superficial movido con energía solar, que modula el clima y la vida.

RODINIA

Aunque ya hemos trabado conocimiento con minerales, rocas y hasta continentes del eón Arcaico, lo cierto es

que la cantidad de corteza continental existente en aquel periodo era aún muy escasa. Los primeros continentes importantes detectados en el registro geológico, hace unos 2.000 millones de años, son los de Laurentia (que comprende la parte más antigua de Norteamérica) y Báltica (Escandinavia + Rusia). A su vez, Laurentia parece haberse formado por la unión de siete pequeños continentes de edad arcaica; recordemos que, desde el punto de vista mecánico, la corteza continental es «pegajosa»: las colisiones nunca acaban en rebotes, y sí en fusiones, cuyas cicatrices (en la jerga geológica, “suturas”) son orógenos más o menos erosionados. Forzando ligeramente un paralelo histórico con las colonias inglesas que se convirtieron en los Estados Unidos, algún bromista ha llamado a estos siete bloques las *United Plates of America*.

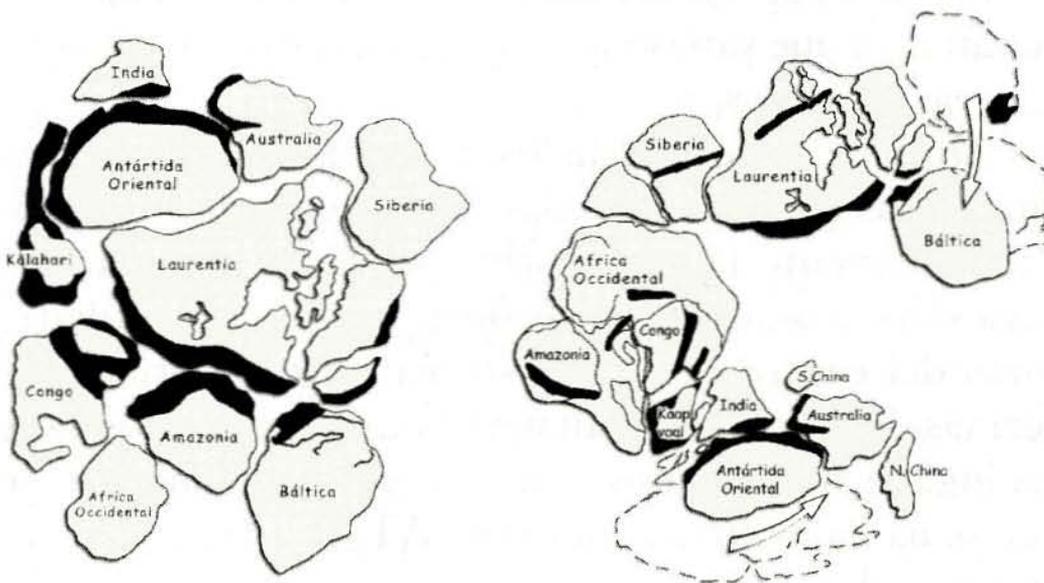
Laurentia y Báltica chocaron entre sí hace 1.800 millones de años. ¿Se formó en torno a este bloque el primer supercontinente? Los datos no permiten afirmarlo, aunque sí sugerirlo, ya que existen orógenos de esta edad en Suramérica, África, Asia y Australia, como si también estos continentes se hubiesen *soldado* a algo en esa época. Un dato indirecto que apoya esta supuesta pangea es la inyección en todos esos continentes, entre 1.600 y 1.300 millones de años, de un gran volumen de magmas de los llamados anorogénicos, o sea, no relacionados con una zona de subducción. Este episodio se explicaría como consecuencia del ya descrito aislamiento térmico que experimenta el manto debajo de un supercontinente, y que sería especialmente eficaz en una Tierra más caliente, como era la proterozoica respecto a la actual. Es muy posible que, si existió, la primera pangea se desmembrase al impulso de estas intrusiones gigantes.

Doscientos millones de años después del final de este episodio se forma el orógeno de Grenville, la primera gran cadena de montañas que ha dejado una huella clara en la biblioteca de rocas. Surgió hace unos 1.100 millones de años a lo largo de 5.000 kilómetros de Laurentia (donde, entre otros efectos, dio forma elíptica al cráter de impacto de Sudbury) y Báltica, desde México hasta Suecia, aunque rocas magmáticas de esta edad se encuentran también en Australia, India, África, Suramérica y Groenlandia; es decir, en casi todos los continentes existentes en esta época. Aunque de este Himalaya proterozoico hoy sólo quedan las raíces gastadas por más de mil millones de años de erosión, no cabe duda de que estas rocas representan las soldaduras, hoy rotas de nuevo, de un gran supercontinente. En 1990, un paleontólogo metido a paleogeógrafo, Mark McMenamin, llamó a este supercontinente Rodinia (del ruso *rod*, engendrar, ya que supuso que era el precursor de todas las pangeas posteriores).

Durante la década de los noventa, Rodinia ha sido una de las grandes estrellas de la geología histórica. Probablemente la causa principal de su popularidad haya sido lo osado de su reconstrucción: las familiares rocas del centro-oeste de Norteamérica habrían sido vecinas de las de las montañas Transantárticas, uno de los lugares más remotos e inhóspitos del planeta: es lo que se ha llamado la conexión SWEAT (= sudor, seguramente el producido por el esfuerzo de encontrar una sigla ingeniosa), de suroeste (de Norteamérica) + este de la Antártida.

Aunque ha habido varias tentativas de reconstruir Rodinia, la más completa (Figura 7a) ha sido la de Paul Hoffman (de la Universidad de Harvard, y que, por cier-

to, era el bromista de las Siete Microplacas Unidas). Como todas las reconstrucciones de supercontinentes, ésta se apoya en dos tipos de datos: el paleomagnetismo y la correlación de unidades geológicas. Es decir, se trata de colocar los fragmentos continentales de manera que tanto sus segmentos de orógenos como la dirección de sus brújulas magnéticas fósiles coincidan. Un problema importante de cualquier reconstrucción, especialmente de las muy antiguas como ésta, es que no es fácil obtener datos precisos; otro, aún mayor (que trataremos en el apartado siguiente, «El Gran Frío»), es que los datos, aunque sean óptimos, sólo definen la latitud, pero no la longitud, de los antiguos continentes, lo que introduce un grado importante de ambigüedad.



7. El supercontinente de Rodinia según la reconstrucción de Paul Hoffman (a) y la Paleopangea de Piper (b). Los trazos negros son los orógenos proterozoicos. Las flechas en (b) indican movimientos al final de este eón.

Aunque estos obstáculos pueden resolverse «desarrugando» la roca, y repitiendo las medidas con objeto de minimizar el error, la ambigüedad permite pensar en soluciones alternativas. Por ejemplo, James Piper, de la Universidad de Liverpool, ha criticado las diversas reconstrucciones de Rodinia y ha propuesto en su lugar el supercontinente que ha denominado Paleopangea, ya que su forma recuerda a la del que Wegener reconstruyó a principios de siglo (Figura 7b). Esta reconstrucción (al igual que otras) excluye la famosa «conexión SWEAT», ya que Norteamérica queda enfrentada a Siberia y no a la Antártida. Piper defiende que su supercontinente es de mejor calidad paleomagnética que Rodinia, ya que sólo presenta cinco ambigüedades paleomagnéticas, frente a las 18 de su competidor. Los próximos años decidirán quién es el vencedor de esta pequeña batalla científica; hoy nos toca asombrarnos de los avances de las técnicas de reconstrucción de la historia de la Tierra, que nos han permitido llegar tan lejos.

Rodinia, o Paleopangea, tuvo (a diferencia de otros supercontinentes, y a semejanza de algunos imperios) una muerte lenta: comenzó a desmembrarse hace mil millones de años, pero no terminó de hacerlo hasta después de 600; poco después sería de nuevo reconstruido, culminando un perfecto ciclo de Wilson; pero esto es ya parte de la historia moderna de la Tierra, que trataremos en el capítulo siguiente.

EL GRAN FRÍO

Aunque no estamos seguros del momento, sabemos que los hielos volverán a cubrir Europa y Norteamérica, como

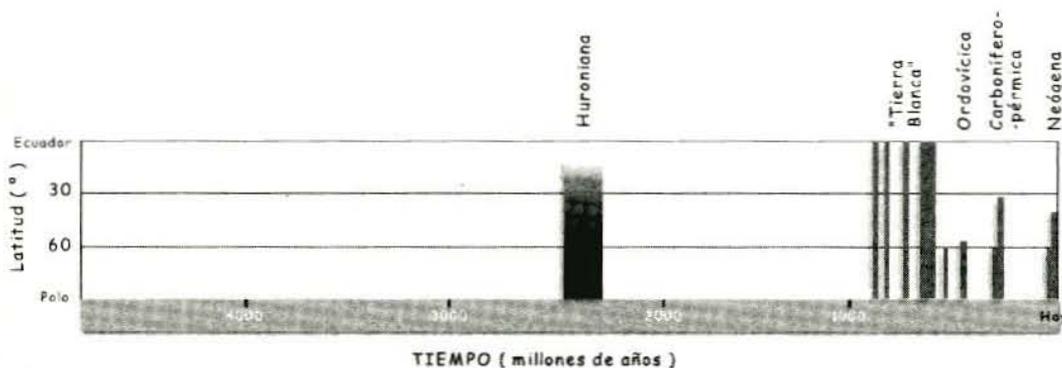
lo hacían hace 20.000 años. Esto significa que, para periodos algo superiores al milenio, el clima es un sistema relativamente predecible, que funciona al ritmo de la cantidad de energía solar que la Tierra recibe, una cifra que depende a su vez de la forma de su órbita, y de su posición en ella. Esta escala de tiempo es interesante para plantear problemas que conciernen a la especie humana. Por ejemplo, ¿qué futuro climático nos aguarda, dentro de tres o cuatro milenios? Abordaremos esta cuestión en el capítulo sexto; ahora nos interesa intentar comprender el clima no desde el punto de vista del hombre, sino del planeta. Esto significa estudiar sus variaciones en periodos de centenares de millones de años: pasar de la escala de los periodos glaciales, que se producen aproximadamente cada cien mil años, a la de las glaciaciones²⁷, que duran decenas de millones de años.

Un primer concepto a discutir es si tiene sentido hablar de un «clima normal» para la Tierra. Si el registro climático fuese representativo (es decir, si estuviésemos seguros de que todas las glaciaciones ocurridas han dejado una huella que podamos reconocer), entonces deberíamos concluir que la Tierra es climáticamente «normal» cuando no hay glaciares a nivel del mar, ya que no los ha habido durante el 90% de su historia. Averiguar qué sucedió (¿qué falló en el termostato?) durante el 10% restante de la historia de la Tierra sería tanto como comprender el sistema climático, algo que, dada la incierta

²⁷ Las glaciaciones son los periodos de la historia de la Tierra en los que, como actualmente, hay una cantidad importante de hielo sobre los continentes *a nivel del mar* (y no sólo sobre las montañas). Dentro de ellas se distinguen periodos glaciales (máximo frío, el hielo avanza) e interglaciales (el hielo retrocede). La Tierra atraviesa actualmente un periodo interglacial de una glaciación que comenzó hace quince millones de años.

perspectiva actual sobre el futuro de la Tierra, parece importante. Descontando eventuales «averías» en la factoría energética que es el Sol, el problema se reduce a averiguar por qué en esos periodos la Tierra rechaza más calor solar. Con toda lógica, los climatólogos buscan al culpable en la composición de la atmósfera, mientras que los geólogos miran hacia los continentes y la facilidad con la que se enfrían, y algunos biólogos (los gaianos a la cabeza) echan la culpa, como siempre, a las omnipresentes bacterias.

Lo que nadie propone es que haya un cierto ritmo climático, un equivalente del discutido pulso de la Tierra. La Figura 8 permite ver por qué: la irregularidad en la ocurrencia de las glaciaciones es tan evidente que está fuera de duda que su desencadenamiento tiene que obedecer a causas complejas, y seguramente muy específicas para cada caso. De entrada, el conjunto del clima terrestre pre-



8. Glaciaciones en la historia de la Tierra. Además de su duración, se ha representado su intensidad, reflejada en la latitud alcanzada por el hielo. Las glaciaciones antiguas fueron, al parecer, mucho más intensas. La acumulación de glaciaciones durante los últimos mil millones de años es paradójica, teniendo en cuenta que la energía irradiada por el Sol ha ido, según la teoría, creciendo con el tiempo.

senta una paradoja: las glaciaciones se producen en la segunda mitad de la evolución del Sistema Solar, cuando, según vimos en el capítulo anterior, el Sol calentaba cada vez más los planetas. Esta paradoja, que es una variante de la del joven Sol frío, podría resolverse, como aquélla, con una atmósfera primitiva muy densa que provocase un intenso efecto invernadero. El problema es que no podemos estar seguros de que la Tierra no haya experimentado alguna glaciación durante el Arcaico: las rocas de esta edad son tan escasas que no constituyen un registro fiable.

Por ello, la historia climática de la Tierra comienza en la práctica al principio del Proterozoico y (muy apropiadamente) en el helado norte de Canadá, cerca del lago Hurón. Allí, unos conglomerados angulosos de 2.300 a 2.150 millones de años de edad reposan sobre un pavimento estriado; los dos rasgos parecen indicar que se trata de una tillita, o sea un sedimento glaciar²⁸ (una morrena) compactado. Se han localizado rocas semejantes, y de la misma edad, en África del Sur y Australia. Aunque, como vimos, es prácticamente imposible saber si los tres continentes formaban uno solo al principio del Proterozoico, ése es un detalle menor, ya que una glaciación extensa puede, como las actuales, abarcar varios continentes. El dato esencial para reconstruir el clima es la paleolatitud de estas formaciones, es decir la latitud a la que las tillitas se depositaron. Adoptando un modelo actualista (es decir, suponiendo que las glaciaciones antiguas tenían características parecidas a la actual), habría que esperar paleolatitudes elevadas, por encima de 60°,

²⁸ A diferencia de los cantos transportados por los ríos, que se redondean al chocar entre sí, las rocas transportadas por los glaciares siguen siendo angulosas. Las estriás se producen cuando estos bloques rozan contra el lecho rocoso.

la latitud del sur de Groenlandia. Como hemos visto en el caso de Rodinia, estos datos no son fáciles de obtener para rocas tan antiguas; sin embargo, los mejores análisis indican que las tillitas canadienses se formaron a una latitud de 28° , y las surafricanas, a $11 \pm 5^\circ$; no hay datos para las australianas. De una lectura literal de estas cifras se deduce que la glaciación huroniana (como se ha llamado a este periodo frío de principios del Proterozoico) se desarrolló en los trópicos. Un extraño planeta, la Tierra proterozoica, con un clima aparentemente benigno que de repente da paso a otro profundamente glacial.

En su libro *Las edades de Gaia*, James Lovelock ha propuesto una explicación biológica para esta primera glaciación. Con su producción masiva de oxígeno, las bacterias fotosintéticas hicieron inestables las pequeñas cantidades de metano producidas por un tipo de arqueas llamadas metanógenas, aún existentes hoy. La desaparición de este potente gas de invernadero explicaría la caída de la temperatura y el desencadenamiento de la glaciación huroniana. Lovelock escribe con gran confianza sobre su hipótesis: «Este modelo sencillo [...] es resistente y no se distorsiona fácilmente por cambios en la radiación solar en las poblaciones de bacterias²⁹ o en los aportes volcánicos de dióxido de carbono [...]. Está basado en la suposición de que el crecimiento del sistema bacteriano es máximo a 25°C , y cesa en el punto de congelación y por encima de 50°C . Hay un abrupto cambio de temperatura, como cuando aparece la vida. Los organismos aumentan rápidamente hasta que se llega a un nivel estacionario en que crecimiento y muerte se

²⁹ Recordemos que hasta 1995 las arqueas estaban clasificadas como un tipo de bacterias.

compensan: el sistema evoluciona rápidamente [...] hasta aproximarse a un equilibrio. Pronto se alcanza la estabilidad, y el planeta se mantiene en una homeostasis [un equilibrio biológico] adecuada».

Sin embargo, con los datos en la mano, no es fácil compartir este optimismo. Por una parte, la hipótesis está hecha a la medida de las observaciones: si la glaciación huroniana se hubiese producido no hace 2.300 sino 2.000 millones de años, es muy posible que Lovelock hubiera colocado entonces la desaparición del metano; cosa que, por cierto, hubiese sido mucho más lógica, ya que es en este tiempo cuando empieza a acumularse el oxígeno. Además, la glaciación termina al cabo de 150 millones de años, sin que ningún otro acontecimiento biológico justifique esta vuelta al «clima normal». Por último, el concepto mismo de glaciaciones inducidas biológicamente es de difícil digestión en términos gaianos: Lovelock repite que Gaia prefiere un planeta frío. Entonces, ¿por qué sólo lo ha conseguido durante la décima parte del tiempo geológico? Por eso es doblemente extraño que a este periodo de más de cien millones de años de frío intenso sucedan 1.300 millones de años sin glaciaciones. Y más aún que, justo al final del Proterozoico, esta época climáticamente apacible dé paso al periodo más frío, y más debatido, de la historia de la Tierra.

Para intentar comprender esta época excepcional, conocida con nombres diversos, como Véndico, o incluso periodo Criogénico (o sea, «generador de frío», que parece especialmente apropiado), tenemos que analizar un fenómeno que agitó los departamentos universitarios de física en los años ochenta. La física del caos argumentaba que la evolución de los sistemas complejos era

impredicible, ya que una mínima variación en las condiciones iniciales se agigantaba hasta dominar el sistema entero. Era el famoso *efecto mariposa*, según el cual el aleteo de uno de estos insectos en Asia podía (o no) ser la causa de una borrasca en California. El ejemplo no es del todo casual, ya que, por varios motivos, la meteorología fue el tema de estudio preferido de la física del caos: había un largo registro de datos meteorológicos con los que alimentar programas de simulación, aunque el factor decisivo fue que la eclosión de estas ideas coincidió con los primeros debates sobre el futuro climático del planeta. De forma que en los grandes ordenadores comenzaron a desarrollarse modelos climáticos, de los que surgieron sorpresas diversas. En su libro *Caos*, el periodista científico James Gleick nos relata una de ellas:

«Desde hace algunos años, los climatólogos saben que sus modelos globales de ordenador, con los que simulan el comportamiento de la atmósfera y los océanos, admiten cuando menos un equilibrio absolutamente distinto al *clima normal*. Ese clima alternativo jamás existió en el pasado geológico, pero parece ser una solución igualmente válida del conjunto de ecuaciones que gobiernan el globo terráqueo. Algunos climatólogos le atribuyen el nombre de “clima de la Tierra Blanca”, y lo describen como una situación en la que los continentes se hallan cubiertos de nieve, y los océanos, helados. Un mundo como ése reflejaría el setenta por ciento de la radiación solar, y sería por lo tanto absolutamente gélido. La troposfera, o capa inferior de la atmósfera, contraída por el frío, tendría mucho menos espesor, y las tempestades que azotasen la helada superficie, con escasa alimentación térmica, carecerían de la intensidad de las que conocemos. En general, el clima sería tremendamente hostil hacia la vida.

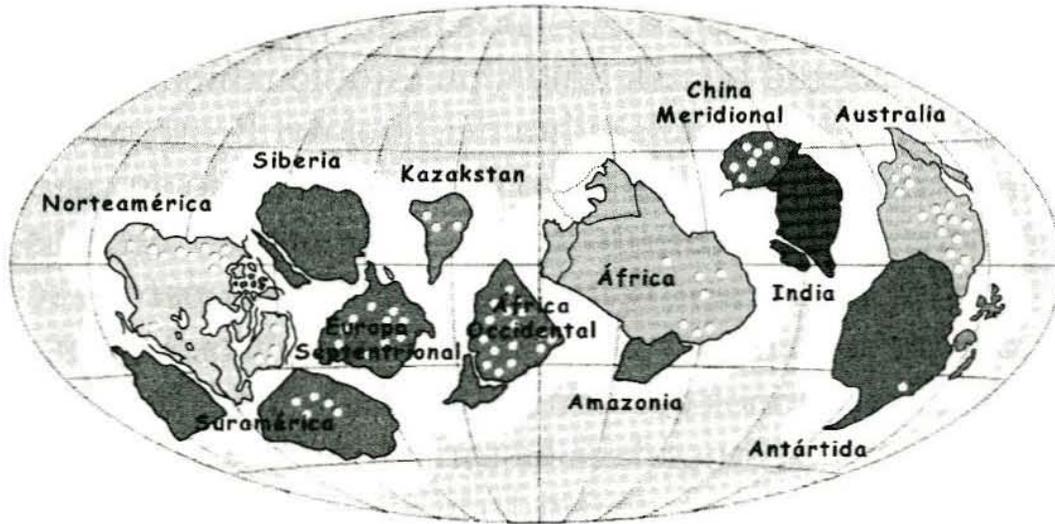
Los modelos de ordenador tienen una tendencia tan acusada a buscar el equilibrio de la Tierra Blanca que los especialistas se extrañan de que este clima nunca haya existido. Tal vez sea cuestión de suerte».

El primero en obtener una «solución Tierra Blanca» en sus modelos fue Mijaíl Budyko, del Observatorio Geofísico de Leningrado, en los años sesenta; pero el climatólogo ruso no creyó que esta «catástrofe de hielo», como la bautizó, tuviese ninguna posibilidad de haberse materializado. En cambio, una mayoría de los estudiosos del clima de la Tierra en el Proterozoico cree hoy que la Tierra no tuvo tal suerte y que, al menos en una ocasión (y quizá en dos), cayó en la trampa climática de la Tierra Blanca (o Tierra «bola de nieve»).

Aproximadamente al mismo tiempo que los meteorólogos descubrían que las ecuaciones valían de poco ante la complejidad de los sistemas naturales, los paleoclimatólogos confirmaban que la situación de glaciación tropical que al parecer se había dado al principio del Proterozoico se repetía pero aún más acusada al final de este eón. En efecto, en un largo periodo comprendido entre 850 y 580 millones de años se formaron abundantes tillitas en África, Norteamérica, Groenlandia, Suramérica, Europa, Asia central, sur de China, Australia y la Antártida, continentes situados entonces en posiciones cercanas al ecuador (Figura 9). Probablemente estos datos representan un conjunto de hasta cuatro glaciaciones.

El asunto se conoció como «la paradoja de las glaciaciones de baja latitud del Proterozoico terminal», y admitía tres posibles soluciones:

—Las reconstrucciones paleogeográficas eran incorrectas, y las glaciaciones se habían producido realmente cerca de los polos.



9. Distribución de las tillitas del periodo Védico sobre un mapa con la geografía de hace unos 600 millones de años. En Hoffman y Schrag, *Scientific American*, enero de 2000.

—El eje de giro de la Tierra estuvo muy inclinado durante el Proterozoico: el ecuador de una Tierra con fuerte oblicuidad (más inclinada respecto al Sol) es más frío que los polos.

—El planeta había atravesado una o más situaciones de Tierra Blanca durante el Proterozoico, sin alteraciones en su eje rotacional.

Las tres hipótesis tienen problemas importantes. La primera, que podríamos llamar actualista porque toma como modelo la glaciación actual (sólo en altas latitudes), es desde luego la menos interesante: a pesar de que seguimos sin entender bien por qué hay glaciares, siempre es más sugestivo intentar explicar una Tierra en la que había glaciares hasta en el ecuador. Naturalmente, este argumento subjetivo no tiene ningún peso, pero es que además existen demasiados datos en contra de la hipótesis de que la glaciación del final del Proterozoico se desarrollase cerca de los polos. Aunque es cierto que muy

pocos de los depósitos glaciares pueden ser situados en una paleolatitud bien definida, un estudio reciente no ha encontrado ni una sola tillita del final del Proterozoico con una paleolatitud de 60° o mayor. Teniendo en cuenta que existen más de un centenar de ejemplos bien distribuidos en los seis continentes, este dato parece ser suficiente para descartar la solución actualista. Definitivamente, debemos acostumbrarnos a la idea de que las mayores glaciaciones de la historia de la Tierra tuvieron los trópicos como escenario.

Esto nos obliga a explorar las otras dos alternativas. La más extraña de ellas es la que propone una alteración de la inclinación de la Tierra en el espacio. ¿A quién se le ocurriría sugerir que la Tierra cabecea tan profundamente que su eje de rotación puede pasar de una inclinación como la actual (24°) a otra próxima a los 60° ? ¿Cuál sería la causa de este cambio, y mediante qué mecanismo adopta el planeta su postura actual? ¿Hay alguna demostración de que tales cambios son posibles? ¿Y de que han sucedido realmente?

UN POCO DE CIENCIA TEÓRICA

En 1861, poco después de publicar *Sobre el origen de las especies*, Charles Darwin escribió: «Hace treinta años se decía siempre que los geólogos sólo deberían observar, y no teorizar; y recuerdo muy bien a alguien planteando como ideal que un geólogo, por ejemplo, fuese a una gravera, contase los guijarros y anotase los colores. Cuán extraño me parece que alguien no se dé cuenta de que, para que sea de alguna utilidad, cualquier observación debe efectuarse a favor o en contra de una opinión previa».

La metodología científica que Darwin estaba criticando se llama inducción, y defiende que las hipótesis se deben proponer sólo al final del proceso científico. Por el contrario, el gran biólogo sabía que en el mundo real a los científicos se les ocurren ideas que intentan comprobar construyendo aparatos y experimentando con ellos en un laboratorio (esto es lo usual entre químicos y físicos), o bien llevando a cabo observaciones dirigidas (caso más frecuente entre los biólogos y geólogos). Esta metodología, llamada hipotético-deductiva, quedó perfectamente ilustrada con el caso de Alfred Wegener, al que le llamó la atención el encaje geométrico de África y Suramérica, y se dedicó luego a buscar datos a favor de su teoría de la deriva continental. Recordemos, sin embargo, que en el simposio de Nueva York, Wegener había sido acusado de no actuar como un científico, sino como un abogado, seleccionando tan sólo los argumentos favorables a su tesis e ignorando los adversos. ¿Se puede ser imparcial, cuando se busca confirmar una hipótesis?

La respuesta a esta pregunta es afirmativa; sin embargo, hay que añadir enseguida que la imparcialidad no es una plaza de fácil conquista. Los ejemplos son demasiado abundantes: en la mayoría de las polémicas que se han descrito, hemos visto cómo cada científico se encasilla en sus ideas e intenta tener razón hasta el final, con frecuencia despreciando la opinión de sus contendientes. Esto conduce a veces a situaciones patéticas, que tienen muy poco que ver con la ciencia, y mucho con la soberbia humana, que afecta en diversa medida a científicos y no científicos. Pero la cosa no es simple: ¿debió Wegener renunciar a sus ideas por absurdas, como le reclamaba la mayoría de los geólogos de su época? Hoy

pensamos que acertó manteniendo su hipótesis contra el viento y la marea de sus numerosos detractores porque creemos que estaba en lo cierto, pero ¿cómo distinguir *a priori* el límite entre la perseverancia y la simple cabezonería? Luis Alvarez, un conocido geólogo al que encontraremos en el capítulo cuarto, dijo que un científico debe poseer en grado sumo dos cualidades contradictorias entre sí: tesón para explorar una idea hasta el final, y humildad para reconocer que ha seguido un camino equivocado. Probablemente éste sea un resumen de lo que es la ciencia mucho más esclarecedor que cualquier descripción del «método científico».

En todo caso, la ciencia moderna ha establecido un sistema, en teoría perfecto, para defenderse de los cabezotas y de los deshonestos: se llama publicación controlada por colegas³⁰, en la cual dos o más árbitros anónimos deciden si las nuevas ideas merecen incorporarse a la ciencia oficial mediante su publicación en revistas especializadas. El problema es que los árbitros no siempre son insensibles a la fama (buena o mala) del autor, al prestigio o desprestigio de su centro de investigación, a su dominio de la *lingua franca* de la Ciencia moderna... aspectos todos ellos independientes de la calidad de las ideas presentadas. Se ha dicho que, como la democracia, el sistema de *peer review* es tan sólo el menos malo de los imaginables.

Volvamos al Proterozoico terminal. La discusión sobre el clima de esta época es un buen ejemplo de cómo, en la práctica, todas las metodologías científicas se entremezclan en la búsqueda interminable que suscita nuestra necesidad de comprender.

³⁰ *Peer review*, o sea revisión por iguales.

PLANETAS COMO PEONZAS

Algunas de las preguntas que dejamos planteadas al final del penúltimo apartado tienen respuestas nítidas; casualmente, de nuevo relacionadas con la física del caos. A principios de los años noventa, los matemáticos franceses Jacques Lascar y Pierre Robutel propusieron que los ejes de rotación de los planetas no mantenían una posición espacial fija, sino que variaban de forma impredecible en función de sus distintas condiciones dinámicas iniciales: el *efecto mariposa* aplicado a la rotación planetaria. En cierto sentido, esto no supuso ninguna sorpresa, ya que el cabeceo del eje de giro es uno de los movimientos terrestres bien determinados (y la causa, por ejemplo, de que en un futuro lejano no sea la estrella Polar, sino una de la constelación de Casiopea, la que señale el norte). Pero lo que Lascar y Robutel estaban sugiriendo eran cambios mucho mayores y mucho más bruscos: Urano no estaría «tumbado» a causa de una colisión, sino que ésa era la posición adoptada por su eje de giro en este momento de la evolución planetaria. Como es sabido, las estaciones son una característica exclusiva de los planetas con oblicuidad, mientras que los verticales carecen de ellas. Pero el clima de los planetas cuya inclinación supera un cierto valor (54°) cambia por completo, pasando el ecuador a ser la zona más fría (porque la luz del Sol es allí muy rasante), y cada polo la más caliente durante la mitad de cada órbita.

Tal disposición del eje de giro terrestre podría explicar la paradoja de las glaciaciones tropicales del Proterozoico. La enorme ventaja de la propuesta de Lascar y Robutel es que no hay que buscar una causa definida a los cambios de geometría del eje de giro: se producen caóticamente, o sea de forma aleatoria. A la Tierra le habría

tocado una posición de alta oblicuidad durante el Proterozoico, y más o menos vertical antes y después, en función de la dinámica de los planetesimales que la formaron, de la misma forma que las oscilaciones de una peonza son función de la forma precisa del impulso inicial que impartimos a ésta, sin que sea posible repetir exactamente cada una de las series de cabeceos, porque las condiciones iniciales nunca son exactamente las mismas.

El caso de las glaciaciones tropicales puede analizarse a la luz de las consideraciones sobre métodos de la ciencia revisados en el apartado anterior. Una intuición teórica (el cabeceo de los ejes de giro de los planetas) basada en una nueva perspectiva científica (la física del caos) conduce a observaciones dirigidas (búsqueda de indicadores climáticos anómalos) como paso necesario para la confirmación o refutación de la hipótesis. Éste parece un caso típico de aplicación del método hipotético-deductivo. Pero en cambio el trabajo de los «detectives del clima», los paleoclimatólogos, siguió una vía inductiva, ya que, precavidos ante la posibilidad de una equivocación, revisaron una y otra vez los datos de paleolatitud de las supuestas tillitas, hasta llegar a la conclusión de que no había error, y de que debían buscar una hipótesis que explicase los datos anómalos. Ya conocemos la fuente de estas precauciones, que se remonta a James Hutton y su planeta-en-el-que-nunca-pasaba-nada. El rechazo a proponer que algún sistema terrestre, como el clima, funcione de manera distinta a la actual, se basa en este tabú fundacional, que sigue pesando de forma no del todo consciente sobre los científicos que estudian la Tierra.

Dicho esto, hay que añadir que la mayoría de los climatólogos no cree que la propuesta de Lascar y Robutel resuelva la paradoja. ¿Por qué, si todo parece encajar? Pues

porque los mismos matemáticos, en sus cálculos, exceptuaron a la Tierra del cabeceo caótico de gran periodo. ¿La causa? La acción estabilizadora de la Luna, que actuaría, a través de la conexión mareal estudiada en el capítulo anterior, como un ancla gigantesca que estabilizaría el eje de giro. La inestabilidad rotacional sí afectaría a planetas sin satélites o con satélites pequeños, como Venus y Marte. ¿Se ha podido comprobar en éstos? La única forma sería verificar si existen en ellos rasgos climáticos «descolocados» que nos hablen de un clima «tipo Urano». Pero esto es imposible en Venus, porque la presión atmosférica de este planeta es de 90 atmósferas, y una atmósfera muy densa es un sistema muy eficaz de redistribuir el calor, de forma que en este planeta no habrá zonas climáticas como en el nuestro. Marte, por el contrario, podría ser el laboratorio perfecto para la tesis del cabeceo caótico, ya que últimamente se han descubierto distintos indicios de que su clima ha sido mucho menos frío en el pasado reciente, y el mejor sistema para explicar un cambio climático brusco es precisamente un cambio rápido en la inclinación del eje de giro. ¿Y en la Tierra? La paradoja podría ser la prueba de la inestabilidad caótica del eje de giro, pero siempre que no exista ninguna solución alternativa. El clima de la Tierra Blanca es precisamente esa solución. La que, recordemos, reclamaban insistentemente los modelos de ordenador, aun antes de que los climatólogos hubiesen explorado en detalle el clima del Proterozoico terminal.

LA TIERRA BLANCA

El periodo Véndico, con el que acaba el Proterozoico, encierra hasta cuatro paradojas. La primera es el hecho

mismo de las glaciaciones tropicales. La segunda, una consecuencia de la primera: ¿por qué no funcionó en esta época el termostato carbonato-silicato que se describió en el capítulo anterior? La tercera, la abundancia del hierro bandeado (que en teoría debería haber dejado de formarse al final del Arcaico, al aumentar la concentración de oxígeno en los océanos), que parecería indicar que durante este periodo el oxígeno escaseó en los océanos. Y la cuarta, la yuxtaposición de indicadores climáticos contrapuestos: las tillitas alternan con calizas masivas, que representan depósitos en mares cálidos. Todos estos indicios encajan en la hipótesis de la Tierra Blanca, que propuso en 1998 un equipo dirigido por nuestro conocido Paul Hoffman: la situación de la mayoría de los continentes cerca del Ecuador traería como consecuencia un máximo en la meteorización química, proceso que, como sabemos, consume dióxido de carbono, el principal gas de invernadero de la atmósfera moderna. De esta forma, la temperatura de la Tierra comenzaría a descender, y el establecimiento de los primeros glaciares en las montañas acentuaría este proceso, ya que el hielo rechaza prácticamente todo el calor solar. De esta manera, el enfriamiento se autoalimentaría hasta que los glaciares cubriesen también las tierras bajas (neutralizando así el termostato, ya que no habría rocas que meteorizar) y llenasen los océanos de icebergs. No todos los defensores de la hipótesis están de acuerdo en que el océano universal se haya helado por completo; pero algunos modelos pronostican una cantidad total de hielo diez veces superior a la que cubrió la Tierra en lo más duro de la actual glaciación.

Veamos si la hipótesis Tierra Blanca es capaz de explicar las peculiares paradojas proterozoicas. En esta época, la radiación solar era solamente un 6% menor que la actual,

lo que no justifica que hubiese glaciares a nivel del mar en posición tropical; hace falta por lo tanto un mecanismo especial para el enfriamiento del planeta, y hay que reconocer que el propuesto, aunque simple (continentes en latitudes bajas) es al menos coherente. La posible anoxia de los mares vándicos, necesaria para dar razón de los depósitos de hierro, sería explicable tan sólo con un océano totalmente helado (el hielo impediría la renovación del oxígeno consumido por la vida marina), pero ello plantea un problema mayor del que resuelve: ¿cómo sobrevivió la biosfera? Las bacterias podrían haberse refugiado en volcanes submarinos, pero en el Proterozoico había ya importantes poblaciones de algas, y éstas necesitan oxígeno. Lo cual ha llevado a Hoffman a una propuesta de compromiso, en la que la cubierta de hielo se rompería ocasionalmente, lo bastante como para oxigenar algunas zonas someras. Por último, las calizas representarían el final de la glaciación, y se formarían cuando los volcanes, no antes de algunas decenas de millones de años, hubiesen logrado acumular la suficiente cantidad de CO_2 como para regenerar el efecto invernadero y fundir el hielo. Esta acumulación podría haber sido muy importante, ya que al estar todas las rocas cubiertas por el hielo y la biosfera al borde de la extinción, no habría apenas consumo de CO_2 . Una vez comenzada, la fusión se desarrollaría de forma catastrófica, al volver la Tierra a aceptar más calor solar. Con ello, se pasaría de un clima glacial extremo a otro de sauna (¿de -50°C a $+50^\circ\text{C}$?) en cuestión de siglos: probablemente el contraste climático más brutal de la historia del planeta.

Según el equipo de Hoffman, el clima de la Tierra Blanca se repetiría al menos dos veces, y quizá cuatro, entre 850 y 580 millones de años, hasta que la lenta danza de las placas litosféricas alejase a una parte de los con-

tinentes de su peligrosa posición ecuatorial. Los detractores de la idea se preguntan por qué hay carbonatos sobre algunas tillitas y no sobre otras, y por qué a veces unos y otras están intercalados, como si las condiciones de glaciación e invernadero hubiesen alternado repetidamente. Otro problema reside en el estroncio de masa 87. Este isótopo es producido por los granitos, y se acumula en los sedimentos marinos como resultado de la erosión de los continentes. En una Tierra Blanca, sin erosión, la cantidad de ^{87}Sr debería descender en picado; pero algunas investigaciones registran exactamente lo contrario, como si los ríos no hubiesen dejado de trabajar.

Está por ver si el modelo aguantará los ataques. Lo que sí explica son varios descensos bruscos en la abundancia relativa de carbono 13, producidos hace 840, 810, 720 y 590 millones de años, y que son los más acusados de toda la historia de la Tierra, una prueba de que la vida estuvo a punto de estrangularse: sin consumo de ^{12}C , el isótopo de masa 13 queda diluido. La idea de que la causa última de esta situación límite pudo no ser otra que una disposición específica de los continentes constituye un buen tema de reflexión: una ocasión para volver a meditar si la vida es frágil o resistente. La Tierra Blanca ha constituido la mayor sorpresa sobre la historia de la Tierra en el fin de siglo. Como dijo el comentarista de una revista científica, «ya no hace falta *bajar* hasta el Arcaico para encontrar cosas raras».

EL ÁRBOL, O MÁS BIEN ARBUSTO, DE LA VIDA

Junio de 2001. Un periódico de difusión nacional publica en sus páginas de ciencia una noticia de dudoso interés:

«Un estudio confirma que no hubo paso de genes de bacterias al genoma humano». Un poco más adelante encontramos la explicación de por qué este hallazgo ha merecido cuatro columnas: «estas pruebas están aplacando los temores sobre los organismos genéticamente modificados». En todo caso, se insiste en que lo que se ha demostrado es que no hubo paso *directo* de genes. Pero esto no es decir gran cosa: *Homo sapiens*, recién llegado, como vimos, al escenario de la biosfera, sólo ha tenido unos cientos de miles de años para recibir genes ajenos, mientras que las bacterias llevan 4.000 millones de años de generoso reparto de su dotación genética. A veces infectando y matando, otras veces siendo utilizadas como mano de obra (genética) esclava; y algunas más, para beneficio mutuo de invadido e invasor. Con todo este trasiego, la biosfera ya no es lo que era; y el famoso árbol de la vida, tampoco.

Este concepto, tan simple y tan reverente al tiempo, de que la biosfera puede asimilarse a un árbol frondoso, de tronco único y múltiples ramas, está profundamente arraigado (por una vez esta palabra se puede emplear literalmente) en la biología moderna. El mismo Charles Darwin especuló sobre la ascendencia común de todas las especies modernas, que provendrían de un conjunto menor de especies ancestrales, y así hasta el origen de la vida. La ilustración más lógica de este principio de complejidad creciente de la vida era un árbol, y así se ha representado desde Darwin hasta muy recientemente, con la etiqueta «Último antecesor común» (que sería la primera célula viva) en la raíz. Sin embargo, a finales de los años sesenta los biólogos moleculares comenzaron a usar una nueva herramienta para averiguar relaciones de parentesco entre las ramas del árbol. Se trataba de los genes

contenidos en moléculas que forman parte de los ribosomas, las «factorías» celulares de proteínas. A través de ellos se pudieron confirmar algunas sospechas evolutivas, pero también (como siempre que una nueva tecnología se pone a punto) se destaparon unas cuantas sorpresas. Los puntos confirmados eran:

—Que algunos órganos de la célula eucariota, como los cloroplastos (fábricas de oxígeno en la función clorofílica) y las mitocondrias (útiles precisamente para tratar el oxígeno) son bacterias asimiladas para que vivan en simbiosis. La prueba es que aún conservan genes del tipo de los que tienen las bacterias. Lynn Margulis (a quien encontramos en el capítulo anterior en una discusión sobre la protoatmósfera terrestre) fue quien primero propuso esta idea en 1961.

—Que los eucariotas (organismos uni o pluricelulares, de células con núcleo, y que incluyen las algas, los hongos, los animales y las plantas) evolucionaron a partir de los procariotas (organismos unicelulares, de células sin núcleo, como las bacterias) hace unos 3.000 millones de años. Según Margulis, también el núcleo es un antiguo procariota asimilado.

La gran sorpresa fue que existía un tercer grupo de seres vivos diferente a los procariotas y a los eucariotas. Hacía sólo dos décadas que los batiscafos más osados habían traído a la superficie unos tipos de bacterias desconocidos hasta entonces, aficionados a vivir en el límite, junto a las chimeneas hidrotermales, a miles de metros de profundidad. Al principio, debido a lo primitivo de su dotación genética, los llamaron arqueobacterias; pero el análisis de estos genes demostró que estaban muy alejadas de las auténticas bacterias, por lo que se cambió su nombre a arqueas. Sorprendentemente, el modo en que

replican su material genético es más parecido al de los eucariotas, por lo que en el árbol evolutivo, que iba complicándose cada vez más, ocuparon una rama intermedia entre procariotas y eucariotas, pero más cercana a estos últimos (ver de nuevo la Figura 5).

La otra sorpresa lo fue sólo a medias: la transferencia lateral de genes se reveló un proceso tan extendido que el árbol de la vida se transformó en un arbusto, con múltiples tallos y ningún tronco, como suelen ser los arbustos. Por supuesto que las personas a las que les preocupen los alimentos transgénicos pueden respirar tranquilas: estos procesos han requerido miles de millones de años, y con seguridad miles de millones de ensayos. Sobre todo, se han producido porque son beneficiosos para la célula receptora: ¿cómo fabricarían las plantas el oxígeno que ha hecho de nuestra atmósfera algo único en el Sistema Solar sin las bacterias que asimilaron? Más aún, ¿cómo trataríamos ese oxígeno los animales sin nuestras bacterias convertidas en mitocondrias? Por encima de estas alarmas, el gran damnificado en esta batalla bioquímica por conocer en detalle nuestros orígenes es el concepto de árbol de la vida, no en el sentido icónico sino en otro más profundo. Desde Darwin, nos hemos acostumbrado a considerar la evolución como un proceso *vertical*, que se desarrollaba exclusivamente en función del tiempo, y cuyas unidades (las especies) eran cápsulas genéticas cerradas. Ahora sabemos que debemos imaginar una biosfera mucho más plástica, en la que los procesos de hibridación son decisivos, y en la que la búsqueda de una «primera célula viva» resulta ser un ideal sin sentido. Uno de los investigadores que ha contribuido a modificar el árbol en arbusto ha escrito: «El antecesor no puede haber sido un organismo particular:

era un conglomerado difuso de células primitivas que evolucionó como una unidad, y que en un momento dado se desarrolló hasta un punto en el que se separó en comunidades distintas, que a su vez se convirtieron en las tres líneas principales de la vida: bacterias [procariotas], arqueas y eucariotas».

Si aplicamos a esta investigación el esquema inducción contra deducción, podremos comprobar su perfecto cumplimiento de la metodología hipotético-deductiva: un concepto teórico (el «árbol de la vida») se somete a verificación experimental, lo que en este caso resulta en su modificación profunda.

EL REGISTRO DE LA VIDA PROTEROZOICA: DE LOS BIOMARCADORES A LAS COLINAS DE EDIACARA

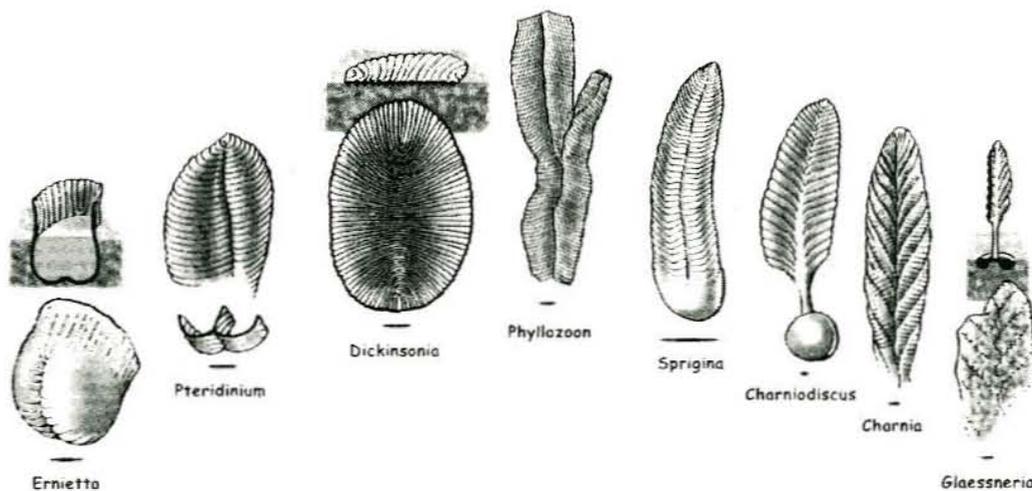
Desde el punto de vista paleontológico, no hay una discontinuidad apreciable entre Arcaico y Proterozoico. Las adquisiciones evolutivas básicas de los procariotas ya habían tenido lugar en el eón anterior. Sin embargo, las técnicas de detección de microfósiles, y sobre todo de biomarcadores, han avanzado mucho, lo que significa que tenemos un registro mucho más completo que el de hace unos años. A mediados de los años ochenta aún se sostenía que los primeros eucariotas habían surgido hacía unos 1.400 millones de años. En 1999, la detección de esteroles (compuestos de carbono que son productos típicos del metabolismo de células nucleadas) en rocas de hace 2.700 millones de años en el oeste de Australia fue la primera prueba de que los eucariotas se acercaban a su edad teórica de separación de los procariotas, unos 3.000 millones de años. Según esto, los primeros seres complejos

habrían estado acompañando a las bacterias desde el Arcaico. Complejos y de reproducción sexual, habría que añadir. ¿Qué ventajas aporta el sexo? Al menos una fundamental: al «revolver» los genes en cada generación, permite a las poblaciones desembarazarse de las mutaciones perjudiciales en paquetes, cuando el individuo que posee varias muere antes de alcanzar la edad reproductiva.

Lo que sí parece un invento de la biosfera proterozoica son los animales, es decir, los seres con tejidos diferenciados y cavidad interna. Desde hace algunos años, los biólogos moleculares han predicho que, a juzgar por las diferencias genéticas con otros eucariotas, el reino *Animalia* tiene que haber existido desde hace unos 1.200 millones de años; sin embargo, hasta finales de los noventa, el registro fósil no daba más allá de unos míseros 600 m.a. En 1998, un equipo dirigido por un prestigioso paleontólogo alemán, Adolf Seilacher, de la Universidad de Tubinga, publicó el hallazgo de surcos aparentemente formados por gusanos fósiles en rocas de 1.100 millones de años situadas en el centro de la India. Estos gusanos parecen haberse movido, como las lombrices actuales, mediante la contracción rítmica de los músculos, lo que requiere una cavidad interna y un aparato muscular. Pero no todo el mundo está convencido del hallazgo: por una parte han surgido dudas sobre la edad real de las rocas, que algunos paleontólogos indios dicen que podría ser mucho menor. Por otra, se ha planteado una objeción muy práctica: si había gusanos recorriendo los fondos marinos hace 1.100 millones de años, ¿dónde se escondieron sus sucesores durante los 500 millones de años siguientes?

Un acontecimiento que ha dejado huellas indiscutibles en la biosfera proterozoica son las glaciaciones del Véndico. El descenso de carbono de origen biológico

que comentamos antes corre paralelo al decrecimiento en la variedad de especies planctónicas, aproximadamente entre los 700 y 550 millones de años. Lo llamativo es que esta primera derrota documentada de la biosfera coincida con la aparición de la primera fauna compleja y universal. Hallada primero en 1947 en las colinas de Ediacara (pronunciado Ediácara), en el sur de Australia, la fauna de Ediacara, que ha aparecido después en todos los demás continentes salvo la Antártida, se encuentra en rocas depositadas entre 700 y 570 millones de años (es decir, en plena Tierra Blanca) en el fondo de mares someros. Contemplados desde la biosfera actual, lo más característico de la mayoría de estos organismos (Figura 10) es su aspecto *experimental*: más del 70% presentan extravagantes arquitecturas espirales o radiales de tres, cuatro, cinco o ¡siete! radios. Y no es sólo en el departamento de diseño donde hay novedades, sino también en



10. Representantes de la fauna de Ediacara. Las barras son escalas de 10 centímetros. Nótese el enorme tamaño de *Dickinsonia*. La pregunta de Seilacher: si eran animales, ¿dónde estaba la boca? En Seilacher, *Journal of the Ecological Society* 149, 1992.

el de «estilo de vida»: por vez primera encontramos habitantes del fondo, reptantes, excavadores y filtradores. De hecho, Ediacara inventa todos los oficios biológicos salvo los de depredador y carroñero. Gracias a ello se ha podido conservar esta fauna: Ediacara fue el último momento en la historia del planeta en el que «trozos de carne» de buen tamaño podían quedar intactos en el fondo marino hasta que las bacterias los corrompían, o los sedimentos los enterraban.

Vaya un momento para probaturas, podría argüirse, y con razón: lo más sensato que podía hacer este extraño grupo era extinguirse rápidamente, como en efecto hicieron. Pero nos dejaron como herencia una serie de hermosos enigmas científicos: ¿Fueron realmente un ensayo de la vida para pruebas mayores, que vendrían enseguida? ¿Cómo compaginar su aparición y desaparición meteóricas con su distribución universal? ¿Por qué apenas hay vestigios de organización tipo Ediacara en la fauna que aparece sólo cien millones de años después? ¿Implicaban algunas morfologías (como la simetría tri-radiada) desventajas fundamentales respecto a otras que sí se repitieron, como la pentarradiada? ¿Por qué hay en Ediacara tan pocos organismos de simetría bilateral, que fue la que predominó en la biosfera moderna? Por último, Adolf Seilacher nos regala la mejor polémica, argumentando que en realidad los organismos de Ediacara no eran animales, sino procariotas muy evolucionados. No encuentra indicios de cavidad interna ni de tejidos diferenciados, y propone que el fracaso de este intento se debió a que no había soluciones innovadoras al problema de la alimentación y transporte bioquímico, sino una organización general tipo «colchón de playa», formas planas con acolchamientos interconectados. *Dickinsonia*,

una especie de torta de un metro de diámetro y pocos milímetros de grosor, es su ejemplo preferido: en lugar de boca y un sistema digestivo, este organismo quizá absorbía su alimento a través de toda su superficie. Si esto es así, Ediacara estaba experimentando, entre otras cuestiones, el aumento del tamaño corporal a costa de un gran aumento de superficie; así, cualquier punto del organismo podía intercambiar productos metabólicos con el exterior. Se ha propuesto que *Dickinsonia*, como los corales actuales, viviría en simbiosis con algas fotosintéticas, lo cual también explicaría su gran superficie, que podría absorber mucha luz. Pero este aumento de superficie complicaría, hasta hacerla inviable, la tarea de mantener la temperatura del organismo, por lo que éste sería enormemente frágil ante los cambios climáticos.

Y, sin embargo, la fauna de Ediacara había surgido ya en un periodo de frío extremo. ¿Cómo pudo llegar *Dickinsonia* a su tamaño, contra el clima y contra la termodinámica? Seilacher no responde a esta pregunta, y deja planteado un interrogante sobre su extinción: quizá un acontecimiento exterior (¿un impacto?) borró de la biosfera a este último intento de explotar hasta el límite las características de la vida unicelular. Seguramente la fauna de Ediacara coexistió con animales auténticos, como gusanos. Esto significaría que, en este momento del fin del Proterozoico, la vida pudo elegir entre dos planes anatómicos totalmente distintos. Al optar por organismos con cavidad interna, estaba dando paso a la biosfera que conocemos; pero el hecho de que la alternativa existiese es, para algunos científicos, una prueba de que el mundo vivo está gobernado por pautas aleatorias. Seilacher remata uno de sus estudios sobre la fauna

de Ediacara con una broma dirigida a los exobiólogos, los especialistas en imaginar vida fuera de la Tierra: si tenemos curiosidad por saber el aspecto que podrían presentar formas alienígenas de vida (es decir, organismos con un plan estructural totalmente distinto al nuestro), dice, no hace falta que viajemos a planetas lejanos, ya que existieron en el planeta Tierra. Se conocen como fauna de Ediacara.

LA BIOSFERA EN EL PROTEROZOICO Y LA DISCUTIDA MARCHA HACIA EL PROGRESO

La teoría darwinista de la evolución es muy sencilla en sus enunciados básicos, ya que consta de dos proposiciones y una conclusión, todas ellas indiscutibles. Las dos primeras son que los organismos varían, y que algunas de las variaciones son heredadas por sus descendientes, en general demasiado numerosos para sobrevivir todos. La conclusión es que los descendientes que varíen en el sentido de mayor compatibilidad con el ambiente tendrán mayores oportunidades de sobrevivir. Siglo y medio de avance de la biología no han alterado la aceptación del darwinismo básico, aunque sí han sido testigos de encendidas discusiones sobre sus implicaciones más ideológicas, y en concreto sobre la falta de propósito que se desprende de un mundo gobernado por el azar de las variaciones y el de los cambios ambientales. Fue este materialismo inherente a la teoría evolucionista el que soliviantó a la sociedad victoriana en la que nació la idea, y el que sigue siendo digerido a duras penas por muchas personas que poseen una cultura religiosa, incluidos no pocos científicos.

Sin embargo, algunos especialistas se quejan de que la historia de la vida se sigue leyendo en una clave determinista que en realidad está basada en el sustrato religioso de la sociedad occidental. El más señalado entre estos protestones es el paleontólogo Stephen Jay Gould, de la Universidad de Harvard. Gould, a quien tras las muertes de Asimov y Sagan muchos señalan como el mayor divulgador científico vivo, libra desde hace años una batalla dialéctica a favor de la contingencia, una tesis que ha expuesto en un sinfín de escritos, entre los que destaca su libro *La vida maravillosa*. La gran bestia negra de Gould es la idea de «progreso» que queda explícita en un archiconocido icono de la evolución humana en el que los sucesivos primates desfilan hacia el futuro como un ejército bien organizado. La idea subyacente, según argumenta el paleontólogo, es la del Hombre-Rey-de-la-Creación, la culminación final de un proceso laboriosamente *conseguido* que, pasase lo que pasase, no podía tener un final distinto del que ha tenido. En otras palabras, dice Gould, se está intentando traducir al lenguaje científico el relato del Génesis, añadiendo los temas del progreso biológico y del «inevitable» ascenso hacia la complejidad.

Por el contrario, Gould defiende, apasionadamente, que el surgimiento de *Homo sapiens* es el resultado final de una larguísima serie de casualidades, entre las que cita la aparición, en un grupo marginal de peces, de aletas con un radio central capaz de sostener el peso del cuerpo fuera del agua, un requisito anatómico imprescindible para que evolucionasen los vertebrados terrestres; y la caída del asteroide que fulminó a los dinosaurios, acontecimiento sin el que los mamíferos nunca hubiesen podido desarrollarse como lo hicieron. Sostiene Gould

(¡otro admirador de las bacterias!) que el rasgo predominante de la biosfera es la estabilidad del esquema procarionta (bacteriano). No es sólo que las bacterias hayan reinado sobre la Tierra en solitario durante al menos mil millones de años, sino que, aun compartiéndola después con los eucariotas, siguen siendo con enorme diferencia el tipo básico de vida, lo cual es un serio argumento contra la inevitabilidad de lo complejo. Para Gould, tanto el Proterozoico como el Arcaico y el Fanerozoico son «las eras de las bacterias», porque sólo una mínima parte de la biosfera se ha hecho compleja; y su mejor demostración es que nada de lo que el hombre haga al medio ambiente planetario puede poner a las bacterias en peligro, aunque la capacidad humana de exterminar animales y plantas sea formidable.

Si el progreso hacia lo complejo formase parte intrínseca del tejido de la evolución, aquél habría sido continuo, justo lo contrario de lo que muestra el registro paleontológico: larguísimos periodos sin avances alternando con cortas épocas frenéticas, en las que la biosfera inventa sin medida. En concreto, 3.000 millones de años de seres unicelulares (¿por qué tardaron tanto los animales?) seguidos de cinco millones de años de intensa creatividad³¹, y rematados por quinientos millones de años de variaciones sobre el mismo tema. Por otra parte, están las extinciones masivas, que evidentemente no han podido ser programadas, y cuyos supervivientes parecen serlo por suerte y no por las cualidades que trabajosamente adquirieron en el curso de millones de años de adaptación a un medio que de pronto cambia sin ningún miramiento. Como dice Gould con evidente fruición,

³¹ Se refiere al comienzo del Fanerozoico, que se estudia en el capítulo siguiente.

las extinciones masivas pueden hacer descarrilar cualquier refinado experimento evolutivo. Cuando hace 225 millones de años se extinguieron 96 de cada 100 especies marinas no hubo mucho margen para plantear la supervivencia del más apto: se extinguieron grupos enteros, entre los que sin duda habría especies mejor y peor adaptadas. En estos periodos (de alguna manera semejantes a las guerras de los humanos) rigen «reglas evolutivas distintas»: de entre todo el plancton que vivía hace 65 millones de años, sólo las diatomeas, un grupo de algas, sobrevivió. Lo hizo gracias a su capacidad de mutar a una espora de reposo cuando hay menos alimentos, pero esto no autoriza a suponer que las diatomeas habían previsto la caída de un asteroide sobre la Tierra. Se podría decir, más bien, que las diatomeas tenían un as en la manga, y que la mecánica celeste las colocó en el trance de tener que usarlo.

El discurso de Stephen Jay Gould es una batalla más de una larguísima guerra que comenzó, como tantas, en el siglo de oro de la filosofía griega, con Parménides y Heráclito defendiendo respectivamente el determinismo más absoluto y el más brutal azar. Y, aunque Demócrito intentó una síntesis («todo lo que sucede es fruto del azar y de la necesidad»), la realidad es que la ciencia moderna, desde Newton sobre todo, ha sido ferozmente determinista, despreciando la indeterminación como el lastre de un conocimiento insuficiente. Propuestas como la de Gould nos invitan a completar psicológicamente la revolución darwinista reconociendo que la biosfera (la Naturaleza, si preferimos) no ha sido hecha a medida del hombre, sólo un invitado casual, y sin duda no el último, a la Tierra. Un discurso humilde, fácil de leer en clave ecológica, y una sana interpretación de la biosfera.

EL FIN DE UNA LARGA ETERNIDAD

El eón Proterozoico abarca un 40% de la historia de la Tierra. Al comenzar este periodo, el rugiente interior del planeta experimentaba catastróficas avalanchas sólidas de las que quizá nacieron los continentes, y su núcleo apenas estaba comenzando a cristalizar. Un caliente océano universal salpicado de unas pocas islas volcánicas y de los primeros gérmenes de los continentes cubría unos fondos plagados de chimeneas submarinas, y una sucia atmósfera ultradensa de CO₂ era atravesada aún, ocasionalmente, por asteroides que producían conmociones globales en la apenas organizada biosfera, cuyo estreno más reciente era la célula con núcleo.

La Tierra que sale del Proterozoico es totalmente distinta. Por una parte, el interior ha evacuado una buena parte del calor primordial, de forma que la convección se ha estabilizado. Los continentes se han vuelto rígidos, y danzan a través del globo un baile que, en último término, es el gran motor de la evolución. La vida, sin embargo, se estanca, como si no tuviese interés en colonizar nuevos ambientes. Desde la mitad del periodo podemos ya dibujar los increíbles mapamundis de los tiempos antiguos. Las pangeas marcan la pauta de la historia del mundo proterozoico, que termina con un supercontinente (¿Rodinia? ¿Paleopangea?) que se resiste a morir, y que no lo hará hasta el Fanerozoico, el siguiente eón.

Esto significa que el tránsito entre la Tierra intermedia y la moderna, que se ha fijado en 550 millones de años, no está determinado por acontecimientos internos: Rodinia prosigue su lenta desintegración, lo que provoca unos mares elevados. ¿O quizá serán éstos

consecuencia de la fusión de los glaciares del Véndico? No parece muy probable, ya que los hielos vuelven a avanzar al principio del Fanerozoico. La única novedad importante la proporcionan los seres vivos: hay una dramática aceleración de la vida tras pasar la frontera, tan brusca que durante años se creyó que la evolución no podía explicarla. Hoy hemos podido comprobar que el *big bang de la evolución* es real, aunque seguimos tan impotentes para explicarlo como en tiempos de Darwin.

Así, aún intentando comprender, entramos en el epílogo de la historia...

Tabla 2
*Acontecimientos clave en la Tierra proterozoica
(2.500-550 m.a.)*

Edad (m. a.)	Datos	Interpretación
2.400-2.000	Desaparece la pirita	Acumulación de oxígeno
2.300-2.150	Tillitas de baja paleolatitud	Glaciación tropical
2.000	Estructura de Vredefort	Impacto asteroidal
	Máximo de magnetismo	¿?
1.800	Laurentia se une a Báltica	¿Primera pangea?
1.400-1.300	Intenso magmatismo anorogénico	Ruptura de la 1ª pangea
1.100	Surcos en sedimentos	¿Primeros animales?
1.100	Orógeno de Grenville	Supercontinente de Rodinia
850-580	Tillitas universales	¿Tierra Blanca?
700-550	Desciende la actividad orgánica	¿Primera extinción?
670	Fauna de Ediacara	¿Primeros animales?

REVISIÓN DEL CAPÍTULO II.

p 96-97: La oxidación de la atmósfera

Tuvo lugar, al parecer [*Science* (308, 1730) 2005, y (322, 541) 2008], en varios pasos. Entre 2.400 y 2.200 Ma tendría lugar lo que se ha llamado “la Gran Oxidación”, en el que el mar somero quedó saturado en oxígeno y éste empezó a aparecer en la atmósfera (pero en concentraciones de ~1% de las actuales), mientras que las partes profundas de los océanos se mantenían anóxicas. El oxígeno se incrementó hasta sus niveles actuales en otros dos periodos: el primero entre 750 y 550 Ma (o sea, al final del Proterozoico), y el último entre 360 y 300 Ma (Carbonífero). Estos escalones han sido identificados midiendo la cantidad de molibdeno (que procede del continente, pero sólo se moviliza en ambiente oxidante) en sedimentos marinos.

Todos estos periodos de oxidación tienen reflejo en la biosfera: el primero sigue de cerca a la aparición de cianobacterias; el segundo coincide aproximadamente con la aparición de la fauna de Ediacara, los primeros organismos de tamaño importante (animales o no); y el tercero registra el poblamiento vegetal de los continentes, cuando los árboles doblaron la productividad de biomasa del planeta. En la *Figura 15* [*Science* (330, 1490) 2010] se puede comprobar cómo la concentración de oxígeno y el tamaño de los organismos evolucionan en paralelo.

No todo en esta progresión fue positivo: a partir del Devónico (~400 Ma) comienzan a detectarse en los sedimentos restos carbonizados: la cantidad de oxígeno empezó a ser peligrosa.

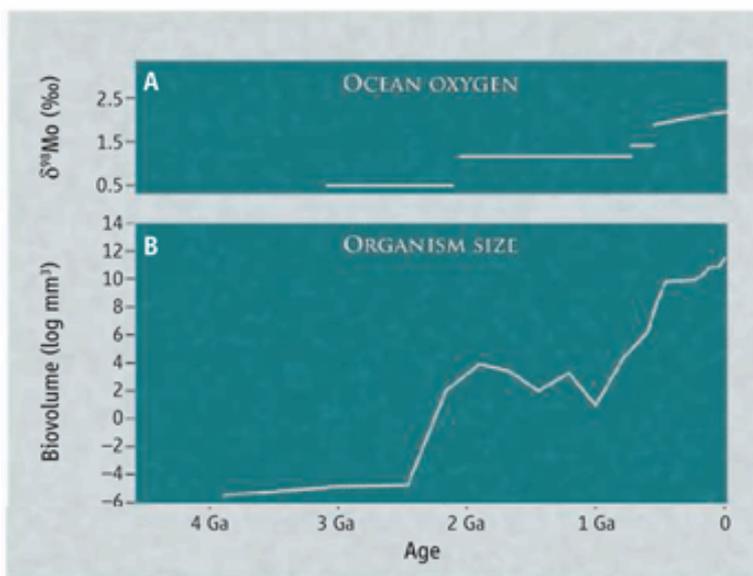


Fig. 15.

p 99: El nacimiento del campo magnético

Según la teoría, el campo magnético no debió de aparecer en la Tierra hasta el final del Arcaico, ya que estos ~2.000 Ma serían necesarios para que el núcleo de la Tierra se enfriase y comenzase a cristalizar; el calor latente de fusión desprendido pondría en

convección la parte aún líquida, dando origen al campo. Esto encaja con las fechas de aparición (2.700–2.500 Ma) que cito. Sin embargo, se han encontrado recientemente en Suráfrica [EPSL (302, 314) 2011] rocas magnetizadas de ~3.500 Ma. Esto supone un problema para la teoría, ya que parece indicar que el campo surgió antes del comienzo de la cristalización del núcleo; o, más probablemente, que el núcleo se enfrió más deprisa de lo que prevén los modelos físicos (en caso de conflicto entre rocas y modelos, hay que fiarse de las rocas).

p 100: La estructura del núcleo terrestre

Hay muchas novedades sobre el centro metálico de nuestro planeta (que, sorprendentemente, sigue siendo, tras ~4.400 Ma de enfriamiento, líquido en un 96%), que se ha convertido en estos años en la *frontera profunda* final de los geofísicos. Es también, a 5.000 K de temperatura promedio (no a 6.000, como afirmaba aquí) la gran reserva energética del planeta; pero el ^{40}K que contiene sólo puede explicar el 2% de este calor [EPSL (256, 567) 2007], lo que significa que cuando vemos un volcán en erupción, contemplamos sobre todo la emisión de energía primordial, acumulada en las profundidades del planeta desde su origen a través de choques de planetesimales.

Se ha descubierto posteriormente [EPSL (269, 56) 2008] que el núcleo interno (1) no es totalmente sólido, sino que contiene hasta un 8% de fundido; (2) es heterogéneo en la vertical, ya que está dividido en al menos dos partes: la más profunda, probablemente de distinta cristalografía, se llama núcleo interno-interno; y (3) es heterogéneo también en la horizontal, con un hemisferio oriental de mayores velocidades sísmicas (en rojo en la [Figura 16](#)), una asimetría al parecer relacionada con la subducción [Nature Geoscience (4, 264) 2011].

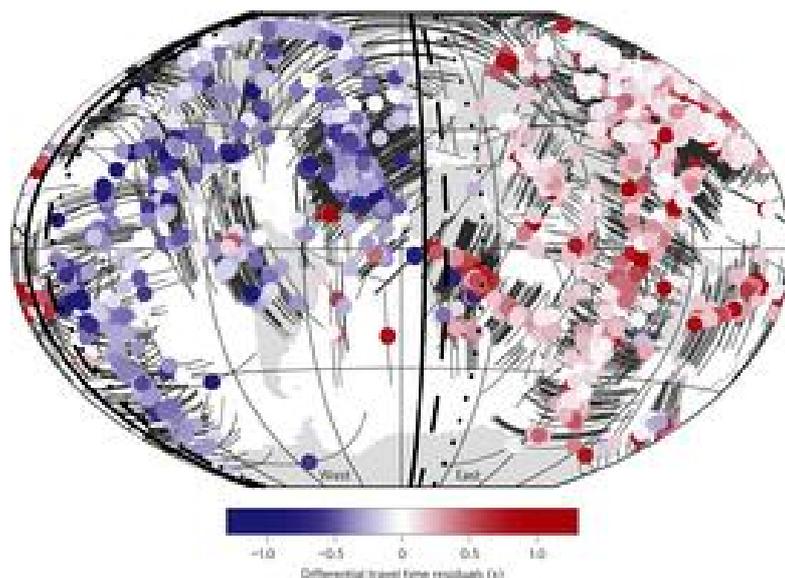


Fig. 16.

p 101: El elefante de Leningrado

Probablemente esta historia es apócrifa, ya que los tres libros que con mayor detalle cuentan la historia del sitio de la ciudad no la incluyen.

p 105-106: El Calendario Azteca

Aunque todo el mundo lo conoce, creo que merece la pena poner una foto (*Figura 17*) de esta tremenda Historia del Mundo.



Fig.17.

p 112: Los máximos magmáticos en la historia de la Tierra

Incluyo esta figura (*Figura 18*) para que se pueda comprobar la realidad de los ciclos magmáticos: otra cosa es que sepamos qué significan.

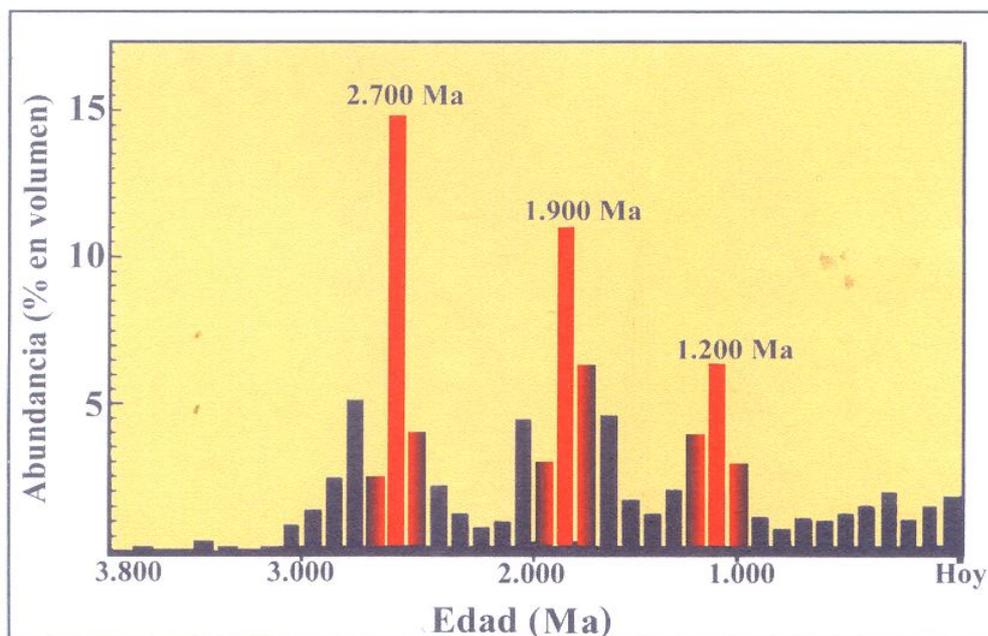


Fig. 18.

p 117-121: Rodinia y otros supercontinentes

El primer posible supercontinente que se ha propuesto es el de Vaalbara (~3.500 Ma), que tiene como base las coincidencias entre los terrenos de estas edades entre Suráfrica (transVAAL) y Australia (pilBARA). El segundo en la lista sería Nuna, que es la respuesta afirmativa a la pregunta que me hacía en la p 118: en efecto, los datos

paleomagnéticos [*Geology* (39, 443) 2011, **Figura 19**] parecen indicar que Laurentia y Báltica (más un fragmento de Siberia) formaron este supercontinente entre 1.900 y 1.300 Ma.

En cuanto a Rodinia, su configuración sigue siendo objeto de debate veinte años después de su definición; pero, sea cual sea ésta, el nombre de Paleopangea ha desaparecido de las publicaciones.

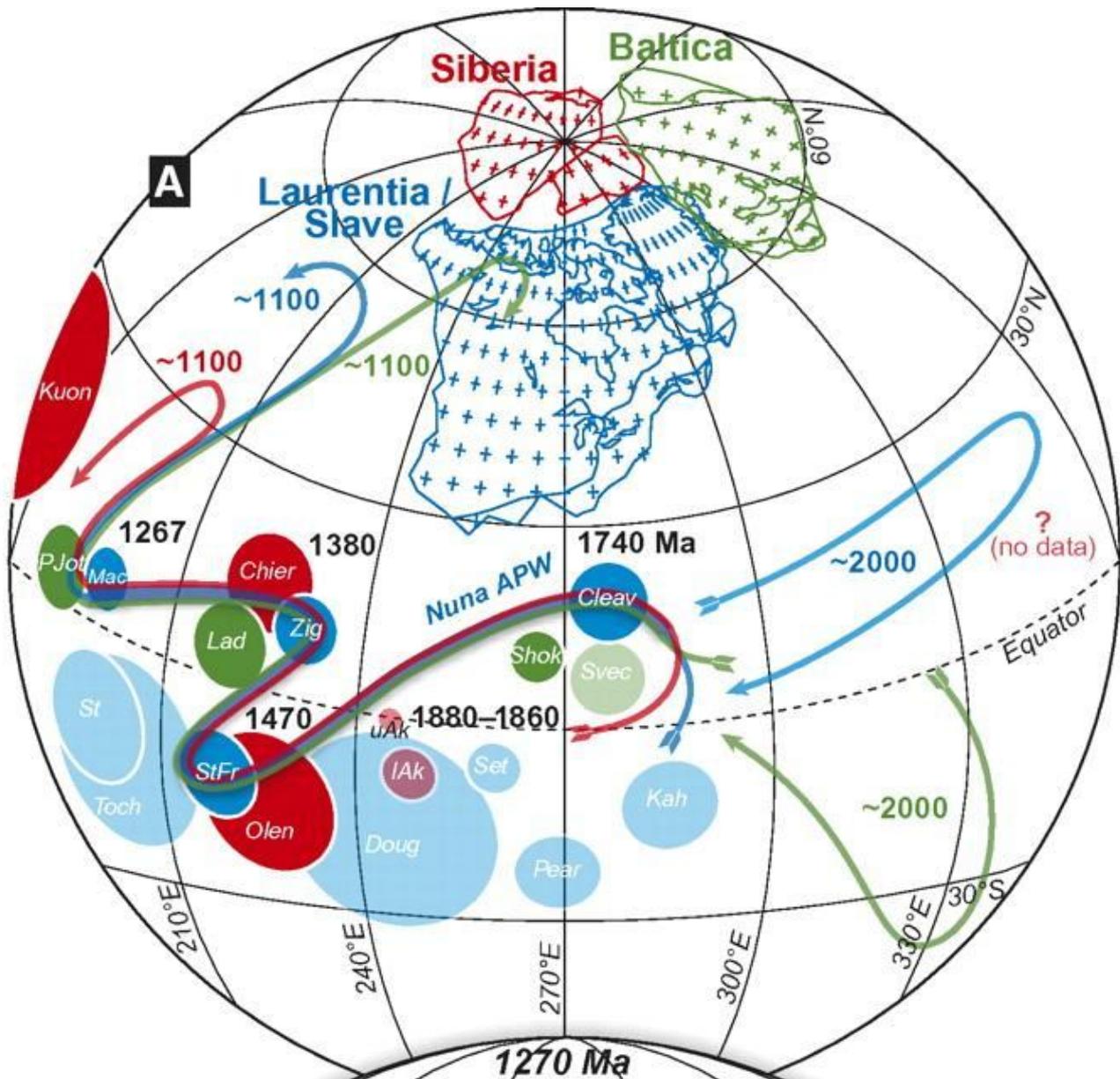


Fig.19

p 121-124: Sobre las causas de las glaciaciones

Este tema surge en distintos puntos del libro: la glaciación huroniana (p 125), la *Tierra Blanca* (p 137), la glaciación carbonífero-pérmica (p 189) y la neógena (p 266). Quizá no haya una causa común para todas ellas: la huroniana podría estar relacionada con una variación, de origen biológico, de la composición atmosférica, mientras que las otras tres

quizás tienen desencadenantes paleogeográficos: la *Tierra Blanca*, los continentes ecuatoriales; la carbonífera, la formación de Pangea; y la neógena, el aislamiento de la Antártida. Sobre la Ordovícica, la menos estudiada, se ha propuesto recientemente [*Geology* (38, 327) 2010] una hipótesis volcánica.

En cuanto a la autopregunta: ¿Cuándo volverá el hielo?, intento responderla en la nota a las páginas 329-331.

p 124: ¿Son los cantos de las morrenas siempre angulosos...

...como escribo en la nota de esta página? Mi experiencia es que no: en muchos sitios (sobre todo ahora, con los glaciares fundiéndose) los torrentes intranivales retrabajan los cantos que desprende el hielo, con lo que las morrenas están compuestas sobre todo por cantos redondeados. Más aún: hace años oí a un geólogo islandés que la redondez era el principal criterio por el que identificaban morrenas antiguas.

p 125-126: ¿Metano en la atmósfera proterozoica?

Con los datos actuales, tengo que admitir que mi crítica al esquema de Lovelock sobre el origen de la glaciación huroniana es infundado, porque la edad de ésta (~2.300 Ma) sí coincide con la fecha de acumulación de oxígeno en la atmósfera, como vimos en la nota a la p 96. Ahora podemos comprender mejor el cariño que le tienen muchos científicos atmosféricos al metano [p ej, *Geology* (31, 87) 2003]: les resuelve a las mil maravillas el problema del origen de la primera glaciación. Llega el oxígeno y destruye el metano y su efecto de invernadero = glaciación huroniana.

p 131: Los cabezotas

Stanley Miller y William Schopf podrían muy bien entrar en esta categoría. Pero, ¿y si llevan –o llevaban- razón?

p 137-138: La Tierra Blanca, hoy

Estas superglaciaciones forman ya parte de la *ciencia normal*, pero no en su versión más extrema, que requeriría también que el hielo cubriera los océanos. Son frecuentes los estudios [p ej, *Geology* (39, 31) 2011] que acreditan mares libres de hielo en plena glaciación. Las glaciaciones parecen tres o quizás cuatro, y su datación se ha podido precisar [*Science* (327, 1241) 2010]: Kaigas (dudosa, ~740 Ma), Sturtiense (717-711), Marinoense (647-635) y Gaskiers (584-582).

Por el contrario, un apoyo muy importante para la superglaciación ha sido el hallazgo [*Science* (308, 181) 2005] de un máximo de iridio (*Figura 20*) en los sedimentos depositados justo al final de las dos glaciaciones más importantes de la Tierra Blanca, hace 711 y 635 Ma. La cantidad de metal indica que esta última glaciación duró unos 12 millones de años, al término de los cuales el hielo fundido depositó en los primeros sedimentos el iridio que los micrometeoritos habían acumulado sobre él durante la época glacial. Por otra parte, la sugerencia de Hoffman de que la meteorización fuese la causa principal de la glaciación se ha visto reforzada por las dataciones [*Science* (327, 1242) 2010] de la gran

intrusión basáltica de Franklin, que abarca ~3.000 km en el norte de Canadá, y que coincide con el comienzo de la glaciación Sturtiense. La sustracción de CO₂ atmosférico para meteorizar tanta roca nueva parece un mecanismo al menos viable.

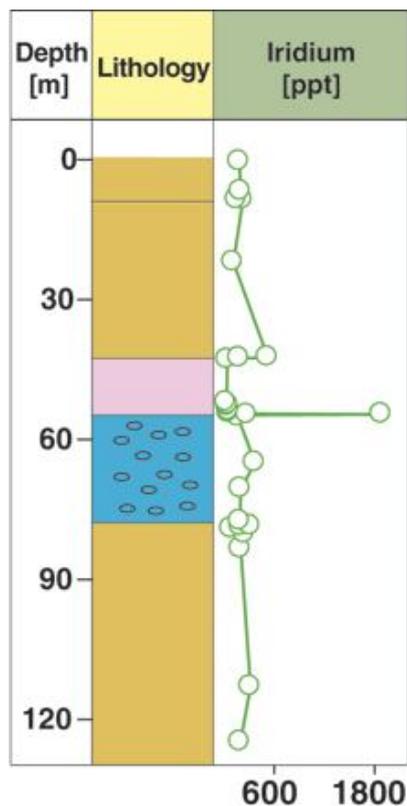


Fig. 20.

p 140-142: Una estadística sobre el árbol de la vida

Un estudio estadístico [[Nature \(465, 219\) 2010](#)] de las secuencias de aminoácidos extraídos de proteínas de eucariontes, bacterias y arqueas ha confirmado la vieja idea de Darwin de que todos procedemos de un único antecesor, el famoso LUCA (*Last Universal Common Ancestor*).

p 148: Stephen Jay Gould no debería haberse muerto

Cuenta Groucho Marx en sus memorias que una vez, cuando ya era mayorcito, una pareja le paró por la calle y le dijo: “Por favor, no se muera usted nunca”. Por desgracia, tanto Groucho (en 1977) como Gould (en 2002) se murieron, y yo tengo que actualizar esta página donde calificaba al segundo como el mayor divulgador científico vivo.

La Tierra moderna

EL BIG BANG DE LA VIDA

No lo parece a primera vista, pero la historia de la vida y la Guerra Fría pueden estar muy relacionadas. En 1995, y como resultado de la apertura a los civiles de una zona del Ártico siberiano que albergaba antiguos radares antimisiles, geólogos rusos y norteamericanos pudieron estudiar por vez primera una serie de estratos depositados hace 530 millones de años, en el periodo Cámbrico Inicial³², casi justo al principio del Fanerozoico. Las rocas no sólo estaban llenas de fósiles, sino que tenían intercaladas coladas de lava que permitieron datarlas con precisión. Las edades redujeron el tiempo de nacimiento de toda la biosfera moderna a unos simples cinco millones de años. De toda la biosfera que existió hace 531 millones de años, lo único que se ha conservado son unas conchas insignificantes; pero cinco millones de años después habían aparecido diez nuevos *fila* (plural de *filum*,

³² Los eones (por ejemplo, el Fanerozoico) se dividen en periodos (por ejemplo, el Cámbrico, entre 550 y 505 millones de años), y éstos en épocas Inicial, Media y Final. Las épocas también se escriben con mayúscula porque corresponden a periodos de tiempo bien definidos: por ejemplo, el Cámbrico Inicial abarca desde 550 hasta 530 m.a.

grupo de animales que comparten el mismo diseño básico). Cinco millones de años parece mucho tiempo, pero no lo es, teniendo en cuenta que una simple especie puede durar hasta diez millones de años. Y, sobre todo, que en la «explosión» aparecen representantes de todos los grupos del reino animal: gusanos, artrópodos (los antepasados de los insectos y los crustáceos), equinodermos, celentéreos (los modernos corales), esponjas, moluscos... hasta un cordado, el antecesor de todos los vertebrados. En total, hasta veinticinco planes anatómicos diferentes. Este esfuerzo creativo parece agotar la capacidad de improvisación de la biosfera, ya que en los restantes 500 millones de años ésta no hace más que retocar lo inventado, sin aportar ni un solo diseño nuevo. Pero lo más inexplicable sigue siendo lo repentino del acontecimiento, que le ha merecido el apelativo de *big bang* de la evolución, y la reputación de ser la mayor paradoja de la biología evolutiva.

En tiempos de Darwin, este brusco ensayo general de la vida fue considerado un serio obstáculo real al evolucionismo, puesto que se parecía mucho más a una creación que a la lenta transformación de unas especies en otras que propugnaba el darwinismo. Los evolucionistas, con el mismo Darwin a la cabeza, consideraron entonces que el salto no era real sino debido a lagunas en el registro: argumentaron que no faltaba tiempo para la evolución, sino fósiles que la demostrasen. Sin embargo, como vemos, la mejora del registro no ha hecho sino ahondar en lo brusco del salto. Éste sigue incluso incrementándose: en 1999, otro guiño del final del deshielo político ha permitido la localización en China de los primeros peces fósiles, que ¡también vivieron en el Cámbrico Inicial! Las preguntas son diversas: ¿Dónde están

los antecesores de toda esta fauna? ¿Por qué se extinguió la mayoría de los diseños? ¿Por qué no hay diseños nuevos desde entonces? ¿Había algo diferente en el ambiente del Cámbrico Inicial? ¿Podría ser que la evolución funcionase más deprisa hace 500 millones de años? Ninguna es fácil de contestar, pero comenzaremos por abordar esta última.

En lo que se refiere al surgimiento de las especies, la evolución puede ser extremadamente rápida. Por ejemplo, en el lago Victoria (Uganda-Tanzania) han aparecido 400 nuevas especies de peces del grupo de los cíclidos en un tiempo inferior a 14.000 años. Por el contrario, en el registro geológico los rasgos cambian mucho más lentamente. Es muy probable que la diferencia se deba a que la mayoría de los rasgos no evolucionan linealmente, y a que la fosilización no registra los vaivenes evolutivos. En todo caso, ha registrado perfectamente la revolución del Cámbrico, lo que demuestra que este periodo fue realmente especial. ¿Pudo deberse esta aceleración evolutiva a alguna alteración súbita del ambiente? Varias pistas nos llevan a una curiosa rueda de sospechosos. Tradicionalmente, el principal ha sido el periodo de invernadero que siguió a las brutales glaciaciones del final del Proterozoico. El problema es que éstas acabaron hace 580 millones de años, o sea 50 millones de años antes de la explosión evolutiva. Pero también existen huellas de otra glaciación, menos drástica, que coincide aproximadamente con la explosión faunística. Desde el punto de vista biológico, un planeta glaciado es más interesante que otro muy cálido, ya que las aguas polares de fondo afloran en latitudes ecuatoriales, dando lugar a surgencias ricas en nutrientes, como sucede hoy en las costas peruanas. En el tránsito al Cámbrico se encuentran im-

portantes depósitos de fosfatos, lo que ha servido para apoyar la idea de que en los mares de este periodo se dieron grandes incrementos de nutrientes, que a su vez favorecieron cambios críticos en las estrategias evolutivas. Los caparazones de fosfato cálcico de una parte de la fauna del Cámbrico Inicial serían una novedad permitida por la nueva química marina; pero también son muy comunes las conchas de carbonato cálcico, tan usadas por la nueva fauna como las fosfáticas. El conjunto refuerza la idea de un aumento general de la disponibilidad de nutrientes (fósforo, calcio y otros elementos) en los océanos cámbricos, lo que permitió variados diseños geológicos.

Si la fauna de Ediacara (como vimos especialmente en el ejemplo de *Dickinsonia*) pudo representar el último esfuerzo por una estrategia simbiótica, la nueva y favorable situación alimenticia habría estimulado la aparición de organismos filtradores y carroñeros, y también la de depredadores. La novedad, por lo tanto, no se limita tan sólo a los nuevos tipos anatómicos, sino también a la aparición de cadenas alimenticias semejantes a las del mundo moderno. Las primeras víctimas de la nueva situación son los estromatolitos: estas cúpulas de algas, que habían dominado la vida en el Proterozoico, declinan rápidamente con la nueva fauna, a una parte de la cual (y en este caso los acusados son los moluscos) le encantaban las algas. Se inaugura el tiempo de los heterótrofos, los gorriones de la biosfera, que se alimentan de otros seres vivos. Algunos de estos recién llegados exhibían unos modales bien discutibles, como el llamado *Anomalocaris*, un matón de casi medio metro de largo que inicia, con unas garras temibles, la primera escalada armamentista. Stephen Jay Gould se pregunta qué clase

de película de terror hubiese podido rodar Steven Spielberg con *Anomalocaris* gigantes devorando humanos en su boca como un brocal de pozo. En la realidad, este cazador del Cámbrico sólo devoraba trilobites, algunos de los cuales han fosilizado mutilados en desagradables encuentros.

Pero *Anomalocaris*, como la gran mayoría de la fauna del Cámbrico Inicial, se extinguió sin tener la oportunidad de crecer más. ¿Por qué? La opinión clásica es que todas las formas no representadas en la fauna actual parecen haber sido «callejones sin salida» de la evolución, destinados a ser sustituidos por organismos mejor adaptados o más eficientes. Opinión que proporciona al profesor Gould una nueva oportunidad para abrir la caja de los truenos. ¿Cómo sabemos que estaban mejor adaptados?, se pregunta. Respuesta: porque sobrevivieron. Pero ésta, dice, es la típica perogrullada evolucionista. La pregunta correcta es: ¿Podría adivinarse *a priori*, en un inventario de la fauna cámbrica, qué organismos iban a sobrevivir y cuáles estaban destinados a perecer? Leamos su respuesta:

«Pero si nos enfrentamos sin prejuicios a la fauna del Cámbrico Inicial, hemos de admitir que no tenemos evidencia alguna (ni una pizca) de que los perdedores en la gran mortandad fueran sistemáticamente inferiores en diseño adaptativo a los que sobrevivieron. Cualquiera puede inventarse una historia convincente *después* del hecho. Por ejemplo, *Anomalocaris*, aunque era el mayor de los depredadores del Cámbrico, no resultó ser uno de los ganadores. De modo que puedo argumentar que su mandíbula única tipo cascanueces [el brocal de pozo], incapaz de cerrarse por completo, y que probablemente funcionaba por constricción en vez de despedazar a la

presa, no era realmente tan adaptativa como una mandíbula más convencional constituida por dos piezas articuladas. Quizás. Pero debo afrontar también la situación contraria. Supongamos que esta especie hubiese vivido y medrado. ¿No me sentiría tentado de decir, en este caso, sin ninguna evidencia adicional, que había sobrevivido porque su mandíbula única funcionaba tan bien? Si es así, entonces no tengo motivo alguno para decir que *Anomalocaris* estaba destinado al fracaso».

Como ya conocemos las debilidades del profesor Gould, sabemos que está abogando, una vez más, por la contingencia. En efecto, un poco más adelante añade que los especialistas en esta primera fauna ya están comenzando a matizar sus opiniones, y a admitir que algunas especies sobrevivieron porque, «sin duda, tuvieron más suerte que otras». De los tipos anatómicos representado en el Cámbrico Inicial, puede decirse que los artrópodos tuvieron un éxito espectacular (tanto, que la mayoría de los insectos vivientes aún está por clasificar); los moluscos, celentéreos y anélidos, un éxito notable, mientras que los equinodermos y las esponjas se han defendido. Los cordados, el *filum* al que pertenecemos, está representado por algunos organismos bastante insignificantes, parecidos a gusanos. ¿Podría un viajero del tiempo atreverse, al verlos, a pronosticar que sus descendientes incluirían a los tiburones, los dinosaurios, los avestruces, y a él mismo?

Sin duda este primer cordado habla el lenguaje de la contingencia, al igual que la mayoría del resto de la fauna del Cámbrico Inicial, esbozos de un proyecto de biosfera que no cuajó, y sobre el que los paleontólogos seguirán discutiendo en el futuro. Lo que está fuera de discusión es que de aquí en adelante la vida tuvo materia

presa, no era realmente tan adaptativa como una mandíbula más convencional constituida por dos piezas articuladas. Quizás. Pero debo afrontar también la situación contraria. Supongamos que esta especie hubiese vivido y medrado. ¿No me sentiría tentado de decir, en este caso, sin ninguna evidencia adicional, que había sobrevivido porque su mandíbula única funcionaba tan bien? Si es así, entonces no tengo motivo alguno para decir que *Anomalocaris* estaba destinado al fracaso».

Como ya conocemos las debilidades del profesor Gould, sabemos que está abogando, una vez más, por la contingencia. En efecto, un poco más adelante añade que los especialistas en esta primera fauna ya están comenzando a matizar sus opiniones, y a admitir que algunas especies sobrevivieron porque, «sin duda, tuvieron más suerte que otras». De los tipos anatómicos representado en el Cámbrico Inicial, puede decirse que los artrópodos tuvieron un éxito espectacular (tanto, que la mayoría de los insectos vivientes aún está por clasificar); los moluscos, celentéreos y anélidos, un éxito notable, mientras que los equinodermos y las esponjas se han defendido. Los cordados, el *filum* al que pertenecemos, está representado por algunos organismos bastante insignificantes, parecidos a gusanos. ¿Podría un viajero del tiempo atreverse, al verlos, a pronosticar que sus descendientes incluirían a los tiburones, los dinosaurios, los avestruces, y a él mismo?

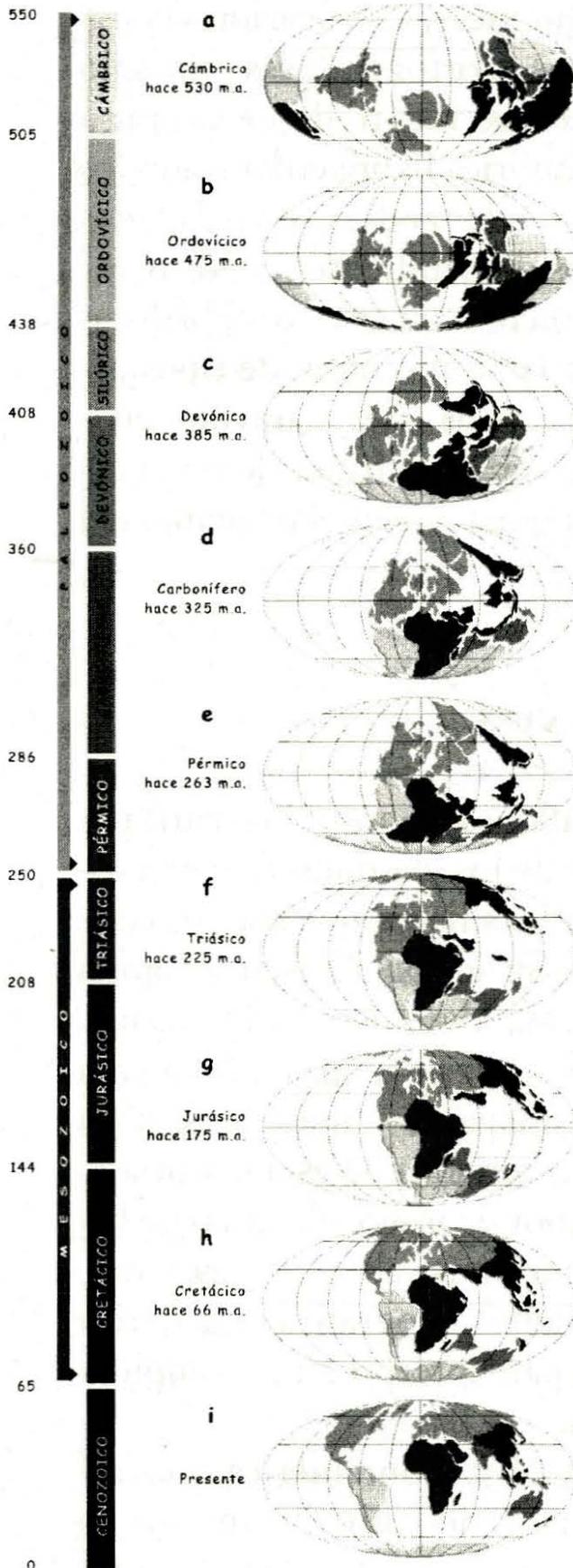
Sin duda este primer cordado habla el lenguaje de la contingencia, al igual que la mayoría del resto de la fauna del Cámbrico Inicial, esbozos de un proyecto de biosfera que no cuajó, y sobre el que los paleontólogos seguirán discutiendo en el futuro. Lo que está fuera de discusión es que de aquí en adelante la vida tuvo materia

prima de sobra para sus experimentos. Si las bacterias son eficacísimas máquinas químicas, los eucariotas constituyen admirables máquinas morfogenéticas. En sólo 300 millones de años, un tiempo récord desde el punto de vista evolutivo, la vida cámbrica habrá colonizado los continentes y la atmósfera (inventando varios sistemas distintos de alas), y entre los descendientes de los trilobites habrá, por ejemplo, insectos con aparatos libadores exquisitamente adaptados a la polinización de tipos específicos de flores. Pero, a pesar de tales maravillas evolutivas, la biosfera nunca volverá a disfrutar de tanta diversidad anatómica como la que tuvo en el principio del Fanerozoico.

EL BAILE DE LOS CONTINENTES

Durante los últimos 550 millones de años, los datos paleomagnéticos y las huellas de los choques y separaciones de esos témpanos de corteza ligera que son los continentes han permitido reconstrucciones bastante fiables de sus posiciones geográficas. Algunos detalles varían, pero la mayoría de las secuencias de mapas que relatan la historia de los continentes se parecen mucho a la de la Figura 11. La principal característica de esta historia es que los rasgos geográficos (por ejemplo, el clima) de cada continente han sufrido continuas alteraciones, a medida que cambiaba su posición geográfica. La deriva continental es la gran clave para interpretar la complejísima evolución de la Tierra.

En el mundo cámbrico, África, Suramérica, Australia, la Antártida, India y partes de China formaban un bloque que los geólogos del siglo XIX (movilistas antes



11. La evolución de los continentes en el Fanerozoico. La proyección usada tiene las ventajas de permitir la representación de toda la Tierra en una elipse, y la de conservar las áreas; a cambio, los contornos de los continentes quedan muy deformados cerca de los bordes. Los paralelos son los de 30 y 60°. A la izquierda, la división del Fanerozoico en periodos. Los nombres de los cuatro primeros (Cámbrico, Ordovícico, Silúrico y Devónico) están tomados de regiones o tribus antiguas de Gran Bretaña. Carbonífero significa «el que trae carbón»; Perm es una región de Rusia; el Triásico recibe este nombre por estar dividido en tres partes, el Jurásico por los montes del Jura, y el Cretácico por la abundancia de creta (una roca caliza formada por caparzones de algas planctónicas). Cenozoico viene del griego «vida final».

de Wegener) llamaron de Gondwana, por el nombre de una antigua región de la India. En cambio, Norteamérica y el fragmentado resto de Asia estaban aislados. Ésta es, recordemos, la Tierra en la que se produjo la gran explosión evolutiva. El mar cámbrico, como corresponde a una época de ruptura de una pangea, era muy transgresivo, y por lo tanto grandes zonas de los bordes continentales estaban inundadas: es en estos mares someros donde surgió la biosfera moderna.

En el Ordovícico, Gondwana se movió hacia el sur; de hecho, el actual desierto del Sáhara ocupaba el polo Sur geográfico, lo que explica los rastros glaciares que en esta época jalonan no sólo África, sino también Suramérica y partes del sur de Europa que estaban unidas a África hace 450 millones de años; lo que se desconoce es si la glaciación ordovícica fue asimétrica (sólo en el polo Sur), o bien si sus restos en el Norte no se han conservado por no existir ningún continente allí en aquella época. Como puede comprobarse en la secuencia de mapas, el Ordovícico fue la época del Fanerozoico con menos continentes en el hemisferio Norte. Al mismo tiempo, un bloque formado por Rusia y el norte de Europa (Báltica, en la jerga de los paleogeógrafos) se fue acercando a Laurentia (la antigua Norteamérica), contra la que acabó por chocar entre el Silúrico y el Devónico. Esta colisión generó la orogenia llamada Tacónica en Norteamérica y Caledónica en Europa, y un nuevo continente, Laurussia.

Desde el Devónico, los continentes comenzaron a amagar la formación de una Pangea, aunque hubieron de transcurrir 160 millones de años antes de que lo consiguieran (suponiendo que unirse sea un objetivo de los continentes). El orógeno anterior fue erosionado bajo

un clima ecuatorial: los sedimentos fluviales producto de ese desgaste, enrojecidos por óxidos de hierro, cubrieron buena parte de Norteamérica (el delta Catskill) y el noroeste de Europa (la «Arenisca Roja Antigua»). En ellos encontramos los primeros restos de grandes plantas, organismos que habían comenzado la conquista de los continentes desde el Silúrico.

En el Carbonífero, Gondwana se movió hacia el norte, hasta cerrar el océano que la separaba de Laurussia; se formaron los Apalaches en Norteamérica y la cadena Hercínica (de la región de Harz, en Alemania) en Europa. Aunque se suele decir que Pangea se formó en el Carbonífero, lo cierto es que en esta época buena parte de Asia estaba aún a la deriva en el Pacífico. Una situación que cambió en parte en el Pérmico, cuando Siberia chocó con Laurussia (formando los montes Urales), con el bloque de Kazajstán (montes Altai) y, ya en el Triásico, con China (montes Aldan y Verjoiansk). A partir de estos acontecimientos, Laurussia pasa a denominarse Laurasia, y además ya se puede hablar formalmente de Pangea. Un rasgo dominante del Carbonífero son los yacimientos de carbón de Norteamérica, Europa central y Rusia, formados cuando estos continentes estaban en latitud ecuatorial, en general en deltas ocupados por marismas y que recibían grandes masas de sedimentos de las montañas recién formadas. El carbón de Siberia y China se formó con estos continentes en la zona templada, probablemente bajo un clima monzónico. Mientras tanto, todo el enorme continente de Gondwana sufrió una segunda glaciación, que ha quedado registrada en África del Sur, Suramérica, India y Australia; y que alcanzó, como la glaciación actual, las latitudes medias.

Como consecuencia de la formación de las anteriores cadenas de montañas, el Pérmico y el Triásico fueron épocas en las que el nivel del mar era muy bajo: sin duda el momento de la historia de la Tierra en el que el planeta tuvo más superficie emergida. Las montañas, probablemente tan altas como el actual Himalaya, provocaron un «efecto de sombra» pluviométrico sobre grandes zonas de Pangea, que se convirtieron en desiertos. La reunión de todas las tierras generó un enorme océano universal (que algunos han llamado Panthalassa, del griego «todos los mares») que abarcaba más de 30.000 kilómetros en el ecuador. Las corrientes ecuatoriales movidas por los vientos alisios podían fluir sin obstáculos alrededor de cinco sextas partes de la circunferencia terrestre: por recibir de lleno esta corriente, el fondo del golfo oriental de Pangea, ocupado precisamente por Iberia, debió de ser una zona extremadamente cálida, sin duda orlada por arrecifes como los actuales del sur del Pacífico.

Como vimos en el capítulo anterior, en el apartado «Rodinia», los supercontinentes son configuraciones poco duraderas, y Pangea no fue una excepción: apenas formada, comenzó a dar señales de inestabilidad. En el Jurásico, grandes diques basálticos intruyeron en las zonas que enseguida iban a ser las costas del Atlántico central. En el Cretácico, el cisma se propaga hacia el norte y el sur, y afecta también a Gondwana, que se desmembra por primera vez en cientos de millones de años. La separación comienza por India, a la que sigue Australia, dejando a la Antártida aislada en el polo Sur. A medida que los continentes americanos migraron hacia el oeste, el fondo del Pacífico subdujo bajo ellos, lo que causa el levantamiento de las Rocosas y los Andes en sus bordes

occidentales. El microcontinente de Cimeria (que comprende desde la actual Turquía hasta Pakistán) chocó contra Asia. La dispersión de Pangea volvió a cambiar el clima, al abrirse un corredor oceánico ecuatorial que funcionaba como una cinta transportadora de calor por todo el planeta. Parece, además, que algo sucedió en el interior de la Tierra en el Cretácico, porque los océanos se abrieron a un ritmo inusitadamente rápido, y una explosión universal de plancton indica que el aporte de nutrientes a la hidrosfera pasa también por un máximo. Como corresponde a una etapa de dispersión continental, el mar inundó las plataformas continentales, donde depositó abundantísimas calizas. Buena parte de los paisajes espectaculares que vemos hoy en todos los continentes son calizas cretácicas elevadas desde el fondo marino.

El Cenozoico nos conduce a la geografía y el clima actuales. India recorrió todo el océano Índico hasta chocar contra Asia y formar así el Himalaya, la última gran cadena de montañas; Arabia colisionó con Cimeria (montes Zagros), e Iberia e Italia contra el sur de Europa (Pirineos y Alpes). Se configuran dos grandes zonas de generación de montañas: una este-oeste, de colisión, desde los Pirineos hasta el Himalaya, y la otra, subductiva, rodeando el Pacífico desde Nueva Zelanda hasta Tierra del Fuego. En cuanto al clima, se enfrió rápidamente tras el máximo cretácico. Algunos achacan este empeoramiento a la elevación de la meseta tibetana, una secuela de la formación del Himalaya; pero en realidad, como todos los grandes cambios climáticos, éste es también una incógnita. Resolverla supondría comprender por qué hay glaciaciones, ya que en los últimos 30 millones de años la Antártida se cubre de hielo, y desde hace unos 15 podemos hablar de una glaciación global.

Éste es a grandes líneas el argumento de la película de la Tierra moderna. Enseguida nos detendremos en algunas de sus escenas más interesantes; pero antes tenemos que discutir por qué la biosfera ha sufrido, a lo largo del Fanerozoico, una catástrofe tras otra.

LAS CRISIS DE LA VIDA

A principios del siglo XIX, el naturalista francés Georges Cuvier, al estudiar las rocas de la zona de París, halló que algunas contenían fósiles mientras que otras, intercaladas con aquéllas, eran completamente estériles. Cuvier no encontró mejor explicación a este hecho que proponer que cada fauna había desaparecido en un cambio abrupto que naturalmente (puesto que escribía en la Francia bonapartista) denominó «revoluciones geológicas». Ahora sabemos que estas rocas fosilíferas representaban invasiones periódicas del continente por el mar (o sea, transgresiones): las faunas fósiles no se extinguían, sino que se retiraban cuando el mar lo hacía. Como vimos en el capítulo primero, este tipo de ideas dio lugar a lo largo del siglo a una metodología geológica conocida como catastrofismo, y que aspiraba a interpretar todo el registro de las rocas como una sucesión de acontecimientos únicos de alta energía, tales como hundimientos de continentes. Pero Hutton y sus discípulos predominaron sobre los catastrofistas, y esta escuela quedó desacreditada: una de las acusaciones que se vertieron contra Wegener fue, precisamente, que la deriva continental, con sus rupturas y choques de continentes, era una teoría catastrofista.

¿Cuál es la opinión actual? Habla Richard Benson, un ilustre paleontólogo de la Institución Smithsonian,

uno de los organismos privados de investigación más respetados de Norteamérica: «Los que acuñaron los nombres de estos acontecimientos fueron notablemente tímidos en su elección, al describir estos tiempos como de “crisis”. Una época en la que hay una mortandad en todos o casi todos los tipos de vida, y en la que los sistemas oceánicos y geológicos son completamente reestructurados, es algo más que una época de crisis. Los niños atraviesan “crisis” febriles a causa de la varicela; pero si uno muere y otro es adoptado para ocupar su puesto, uno no diría que la familia ha pasado una “crisis”, sino que ha sufrido una “catástrofe”. Sé, sin embargo, que esta crítica no va a cambiar nada». ¿A qué tipo de acontecimientos se refiere Benson? A extinciones como la del final del periodo Pérmico, hace 252 millones de años: según algunos cálculos, 96 de cada cien especies marinas se extinguieron en esa época. ¿Crisis o catástrofe? El nombre quizá no sea tan importante; como, por lo que acabamos de ver, la palabra «catástrofe» no ha tenido tradicionalmente buena prensa en geología, podemos seguir hablando de crisis cuando tratemos de estas extinciones masivas.

Como es lógico, todas las especies terminan por extinguirse: normalmente, en un tiempo máximo de unos diez millones de años, aunque los llamados «fósiles vivientes» pueden durar incluso cientos de millones (por ejemplo, los tiburones, probablemente gracias a su eficazísimo sistema inmunológico, han sobrevivido a todas las extinciones sucedidas desde su aparición hace 450 millones de años). En total, teniendo en cuenta la antigüedad y diversidad de la vida en la Tierra, se calcula que más del 99% de las especies que han habitado el planeta están ya extintas. Las extinciones forman parte, por lo tanto, de la

evolución normal de la biosfera, pero su intensidad varía enormemente: hay un «nivel de fondo» de extinciones, y momentos en que éste se supera de forma clara. Entonces podemos decir que nos encontramos ante una extinción masiva, pero no existe ninguna definición universalmente aceptada para este acontecimiento: la que más circula habla de un mínimo de 50% de especies eliminadas de un determinado ambiente. Pero en la práctica nadie ha podido establecer un límite entre las extinciones de fondo y las masivas, como lo demuestra el hecho de que no haya acuerdo en cuántas (¿cuatro? ¿seis?) de estas últimas han azotado a la biosfera. Los paleontólogos más gradualistas niegan que las extinciones masivas sean distintas de las de fondo, mientras que los más catastrofistas proponen hasta ocho, y los más prudentes reconocen que no hay un límite bien definido entre las dos categorías. El único punto de acuerdo es que la extinción del final del Pérmico está en una categoría aparte, y superior, a las demás.

Un punto probablemente esencial para comprender las extinciones masivas es que son un rasgo exclusivo de la vida del Fanerozoico. La gran mayoría de los seres vivos que poblaron la Tierra en el Arcaico y el Proterozoico eran, como hemos visto, procariotas: organismos generalistas, o sea de ecología versátil (no explotaban un nicho ecológico determinado) y poblaciones de distribución cosmopolita compuestas por millones, o billones, de individuos, que evolucionaron de forma extremadamente lenta, y cuyas innovaciones eran todas bioquímicas. No es difícil percibir que se trata de una organización biológica muy resistente a los cambios ambientales. Por el contrario, la gran diversificación de los eucariotas que tiene lugar en el Fanerozoico genera una multitud de organismos de formas especializadas (recordemos el

ejemplo de los insectos diseñados para libar únicamente flores de una especie), adaptados a climas determinados y con poblaciones limitadas en número que con frecuencia ocupan espacios geográficos restringidos. Es evidente la fuerte dependencia de los eucariotas respecto a las condiciones ambientales, y por lo tanto su fragilidad evolutiva, castigada con extinciones en masa. Aquí hay que rendir homenaje a la perspicacia de Darwin, que reconoció el principio de la supervivencia selectiva de los organismos no especializados.

Aceptado esto, nos toca preguntarnos si las extinciones masivas han desempeñado un papel importante en la evolución de la biosfera fanerozoica. En la geología clásica, las extinciones se veían, paradójicamente, como sucesos constructivos: eran el sistema natural mediante el cual la vida se deshacía de las formas peor adaptadas, mejorando así su aptitud en conjunto. En cuanto a las extinciones masivas, eran consideradas como continuaciones (o, como mucho, amplificaciones) de esta labor de depuración. Actualmente, ha aumentado el número de los paleontólogos que, como Stephen Jay Gould, opinan que, por el contrario, las extinciones son, como parece a primera vista, una importante fuerza destructiva que no siempre respeta a las formas mejor adaptadas. Esta corriente de pensamiento considera las extinciones masivas como fuerzas modeladoras de la vida de igual importancia que la selección natural del darwinismo clásico. Según Niles Eldredge, colega y correligionario de Stephen Jay Gould, sin extinciones masivas, la vida actual se parecería mucho a la del Devónico (400 millones de años).

Pero, como cabía esperar, el debate (o más bien combate) de fondo tiene como tema la causa de las extinciones

masivas, aceptando que éstas existan. En un artículo clásico publicado en 1963, Norman Newell, un paleontólogo tradicional, hacía un listado de posibles culpables de la gran extinción del final del Cretácico que incluía la aparición de hongos patógenos que atacaron a los dinosaurios, radiaciones de alta energía procedentes de supernovas, envenenamiento por metales pesados, cambios bruscos en el clima, paroxismos orogénicos, y —su favorita— fluctuaciones en el nivel del mar. Descartaba en cambio dos ideas anteriores: «fatiga evolutiva» (y a saber lo que eso significa) y cataclismos globales. Para estos últimos, argumentaba, «no existe ninguna prueba geológica». Sólo diecisiete años después, un equipo multidisciplinar, pero sin ningún paleontólogo, hallaba pruebas diversas de que un cataclismo global (el impacto de un asteroide, una catástrofe mayor que las propuestas por Georges Cuvier) había podido ser la causa de la extinción de los dinosaurios.

Es a partir de esa fecha, 1980, cuando estalla una guerra en la que, en uno u otro bando, se implican todos los paleontólogos del mundo. Uno de ellos, David Raup, escribe un libro sobre extinciones masivas en cuyo título (*¿Malos genes o mala suerte?*) se burla de la «fatiga evolutiva», aboga por una visión «contingente» (azarosa) de la evolución y describe las trincheras del enemigo: «Muchos paleontólogos están furiosos al ver que científicos de otras disciplinas están invadiendo la paleontología con instrumentos sofisticados pero sin ninguna experiencia de rocas o fósiles. Para otros, sin embargo, las nuevas ideas son coherentes, y están apoyadas por datos de campo y de laboratorio; estos optimistas opinan que la paleontología está haciendo ahora nuevas aportaciones al conocimiento no sólo de

la historia de la Tierra sino también de la astronomía, y por supuesto a nuestra comprensión de las extinciones y de su papel en la evolución de la vida [...] Normalmente los paleontólogos han adoptado una postura defensiva ante las propuestas de que ha habido influencias cósmicas en la historia de la vida. Cuando se ha planteado una nueva hipótesis, la reacción típica ha sido buscar sus puntos débiles. La idea es: “Culpable hasta que se demuestre su inocencia”. Probablemente esta actitud es la correcta en cualquier campo científico que afronta hipótesis radicalmente nuevas, pero también significa que podemos perder oportunidades de hacer progresos importantes».

De todos modos, hay que reconocer que las ideas de Raup sobre las extinciones eran realmente atrevidas. Al hacer un inventario de familias fósiles extinguidas durante los últimos 250 millones de años, llegó (junto con su colega John Sepkoski) a la conclusión de que las extinciones se producían con una periodicidad de 26 millones de años; como no se conoce ningún proceso geológico con ese intervalo, achacaron aquéllas a impactos de cometas. Para explicar este ritmo, imaginaron diversas posibilidades de alborotar la nube de cometas que rodea a la Tierra: una compañera no identificada del Sol (Némesis, la Estrella de la Muerte, la llamaron las revistas sensacionalistas de divulgación científica), el paso del Sistema Solar a través del plano galáctico, o incluso algún planeta transplutoniano. Mecanismos todos ellos ingeniosos, pero de comprobación difícil o imposible. Lo que quedaba más al alcance de la verificación era la realidad de las extinciones identificadas. Y aquí los colegas de Raup y Sepkoski (aquellos que estaban furiosos) sí que pudieron hacer sangre en la hipótesis. De las diez extinciones

que, con un espaciado de 26 millones de años, deberían haber sucedido en 250 m.a., los dos paleontólogos tuvieron que reconocer no haber hallado huellas de dos, los números 5 y 7. Pero el análisis detallado de los datos de los números 6, 8 y 9 hacía imposible, por distintos motivos, una explicación extraterrestre. La hipótesis periódica de Raup-Sepkoski, hoy prácticamente abandonada, ha representado el cenit del nuevo catastrofismo en geología: algún colega cruel ha dicho de ella que era una solución ingeniosa para un problema inexistente.

Si la hipótesis de los impactos periódicos ha supuesto la resurrección de una antigua metodología geológica, la última teoría sobre las extinciones masivas, propuesta en 1997, significa una intrusión de la física del caos en la paleontología. La diversidad de la biosfera fluctuaría sin ninguna causa determinada, al igual que no hay que buscar una razón definida para cada frente frío que llega en invierno a las zonas templadas. Siguiendo con el paralelo meteorológico, de la misma manera que existen frentes fríos de desigual intensidad, habría fluctuaciones más profundas en la diversidad, a las que llamaríamos extinciones masivas: la variedad de la biosfera subiría y bajaría como la Bolsa, y la forma de sus picos mayores sería idéntica a la de los más pequeños. En la jerga de la física del caos, de estas formas que contienen formas idénticas pero menores, en una especie de sucesión sin fin de muñecas rusas, se dice que tienen dimensión fractal.

La teoría fractal representaría el fin de la búsqueda: ni hongos asesinos, ni metales pesados, ni estrellas de la muerte. El preguntarse sobre la causa de las extinciones masivas tendría el mismo sentido que preguntarse por la causa de la forma de cada nube en una tarde de verano.

Los paleontólogos, tanto los «modernos» como los «furiosos», podían colgar sus botas de campo, porque nada en el registro geológico podría resolver nunca un enigma que, en definitiva, sólo había existido en su imaginación. Afortunadamente para la ciencia, poco después de publicada esta teoría, otro trabajo halló en ella serios defectos: de la serie de 570 puntos utilizada para generar sus curvas, tan sólo 77 eran reales, siendo los otros interpolados. Pero la interpolación genera puntos que están correlacionados entre sí, lo que significa que la forma de las curvas era totalmente artificial.

Por el momento, los fósiles pueden respirar tranquilos. Sin embargo, todos estos encendidos debates han dejado una víctima, y ésta es la plácida seguridad con la que el hombre moderno consideraba sus probabilidades de supervivencia en el planeta. La simple propuesta de una idea como la de la fatiga genética (los «malos genes») como causa de las extinciones significa que hasta muy recientemente no hemos sabido calibrar la decisiva influencia que los acontecimientos exteriores, no biológicos (la «mala suerte»), ejercen sobre la vida. Pero, hablando de la probabilidad de impactos asteroidales, Carl Sagan dijo que debemos acostumbrarnos a la idea de que vivimos en una galería de tiro cósmica. A partir de las polémicas sobre las extinciones, el planeta y sus habitantes parecen más frágiles.

LA EVOLUCIÓN SE TOMA VACACIONES

Queda aún por responder una pregunta sobre la evolución: ¿qué sucede entre las extinciones masivas? Carl af Linné, Linneo, el famoso naturalista sueco del siglo XVIII,

había dicho que la naturaleza no marcha a saltos («*Natura non facit saltum*»), y eso influyó de manera decisiva sobre Darwin, imbuido, como todos los naturalistas de su época, de este espíritu gradualista. Para explicar los cambios evolutivos, el darwinismo propuso por tanto una acumulación de cambios pequeñísimos³³, acumulados, según se dice literalmente en *El origen de las especies*, en un millar, o quizá un millón, o cien millones, de generaciones. Es importante recalcar que a mitad del siglo XIX había menos costumbre que hoy de usar números tan grandes: claramente Darwin quería dar a la evolución todo el tiempo del mundo para que pudiese producir especies. Y sin embargo, le asaltaba una duda práctica, que reflejó también en su libro:

«¿Por qué entonces no está cada formación geológica y cada estrato lleno de tales formas intermedias? Es evidente que la geología no refleja una cadena orgánica finamente graduada; y esto es, quizás, la mayor objeción que puede argumentarse contra mi teoría».

En efecto, tanto en tiempos de Darwin como ahora, los paleontólogos constatan que en general las especies no cambian continuamente de aspecto a lo largo de su desarrollo en el tiempo. En parte, esto puede explicarse recurriendo al argumento de la imperfección del registro fósil; el problema es que de esta forma se está aceptando que el registro no permite demostrar la evolución. En 1972, nuestros conocidos Niles Eldredge y Stephen Gould propusieron una teoría alternativa de funcionamiento de la evolución en épocas «normales», que lla-

³³ En la versión moderna del darwinismo, llamada neodarwinismo, estas variaciones se conocen como micromutaciones, alteraciones genéticas aleatorias teóricamente capaces de producir, por acumulación, nuevas especies.

maron del equilibrio interrumpido³⁴, y que se resumía en dos propuestas:

—En general, las especies apenas cambian de forma (estasis, del griego *statos*, inmóvil) desde que aparecen hasta que se extinguen; precisamente gracias a ello podemos reconocerlas como tales especies.

—Las especies no surgen por adición de micromutaciones, sino por grandes cambios (macromutaciones) en genes que controlan a otros muchos. Ésta es la causa de que las nuevas especies aparezcan rápidamente en sólo cientos o miles de años.

Lo curioso es que el dúo estasis-macromutación no es completamente nuevo, porque también Darwin previó esta posibilidad. Citando de nuevo *El origen de las especies*:

«Los periodos durante los cuales las especies han sufrido modificaciones son probablemente cortos comparados con aquellos durante los cuales han permanecido inmutables».

Como argumenta Gould, Darwin era un pluralista, en el sentido de que daba cabida a argumentos variados; aunque a menudo, como en este caso, contradictorios entre sí. Ahora, al cabo de treinta años de la teoría del equilibrio interrumpido, la mayoría de los biólogos evolucionistas aceptan esta idea, sobre todo teniendo en cuenta que la hipótesis no pretende explicar todos los casos, sino que se declara compatible con el neodarwinismo clásico. A su favor juega el hecho de que algunas otras innovaciones en la ciencia de finales del siglo XX (como la teoría de catástrofes, o la teoría de las revoluciones científicas) presentan

³⁴ La expresión *Punctuated equilibrium* se ha traducido de varias formas. Una de ellas, saltacionismo, parece pensada expresamente para llevar la contraria a Linneo.

estructuras semejantes: largos periodos de «normalidad» interrumpidos por frenéticos momentos creativos. En 1997, algunos paleontólogos norteamericanos dieron un paso más en la misma línea, al proponer que habían encontrado estasis y evolución rápida no en especies aisladas sino simultáneamente en toda una comunidad fósil. Esta «estasis coordinada» ha encontrado una fuerte resistencia; pero igual sucedió con el equilibrio interrumpido, que ahora casi todos aceptan como una representación fiel del mecanismo detallado de la evolución.

MUERTE DE UN ANTIGUO OCÉANO

Una de las consecuencias geográficas de la destrucción de Rodinia fue la apertura, entre los fragmentos, de nuevas cuencas oceánicas (que después volverían a cerrarse, completando así sus «ciclos de Wilson» particulares). La situada entre Laurentia (Norteamérica) y Báltica (Europa del norte) [ver el mapa de la Figura 11a, periodo Cámbrico] recibió primero el nombre de proto-Atlántico, que después se cambió por el de Japeto (en la mitología griega, uno de los titanes, antepasado de los humanos). Las pruebas de la existencia del océano de Japeto son múltiples: paleomagnetismo y fósiles distintos para Laurentia y Báltica indican que estos dos continentes estuvieron separados entre aproximadamente 700 y 400 millones de años. Además, en zonas del borde de ambos continentes aparecen numerosas ofiolitas que (como vimos en el capítulo primero) son indicadores de colisión. Aunque se ha puesto en duda que Japeto fuese un océano de anchura semejante a la del Atlántico, la gran diferencia entre los fósiles de los dos antiguos continentes parece atestiguar que fue así.

Tenemos pruebas aún más claras de la fase terminal de este océano: en el sur de Suecia y en el centro-este de Estados Unidos hay una extensa formación de bentonitas, un tipo de arcilla procedente de la alteración de cenizas volcánicas que se usa en la industria por sus propiedades absorbentes. Las dataciones radiométricas han permitido determinar que la erupción tuvo lugar hace exactamente 454 millones de años. Ahora bien, los especialistas en tectónica han podido datar fases de deformación (o sea, pequeñas colisiones) en el borde oceánico de Laurentia desde hace 480 millones de años. Esto significa que el fondo del océano de Japeto estaba subduciendo bajo Laurentia; y en la subducción se produce vulcanismo, de forma que todo encaja. Lo realmente espectacular es que las bentonitas tienen un volumen de 340 km^3 y que, calculando las que debieron de caer en el fondo de Japeto, se obtiene una cifra bastante superior a mil kilómetros cúbicos, lo que haría de esta antigua erupción volcánica una de las mayores del Fanerozoico.

Hace 430 millones de años, Báltica ya había chocado contra Laurentia, dando lugar a Laurussia. Pero el impulso de la colisión se mantenía, y seguiría causando deformaciones durante millones de años, al tiempo que la cadena de montañas que la colisión había generado (Caledónica, por el nombre romano de Escocia) seguía levantándose, igual que sucede actualmente en el Himalaya. Quedaban aún algunas islas acercándose a Laurussia, que acabaría por absorberlas. En total, la zona no quedaría pacificada hasta hace 390 millones de años. El nuevo continente, coronado por la cadena Caledónica, era un territorio lleno de lagos donde se acumulaban los productos de la erosión de aquella. En su zona meridional, situada en el ecuador, la alteración proporcionó a los

sedimentos un tono rojizo, que vale a Laurussia el apodo de Continente de la Arenisca Roja Antigua (Figura 12). En los lagos, la evolución realiza ensayos de la invasión de los continentes. Encontramos allí las primeras plantas terrestres y también unos extraños peces sin mandíbulas (como la lamprea, su único sucesor directo) y con el cuerpo recubierto por placas («peces acorazados»), inmigrantes marinos adaptados al agua dulce. Poco después surgirán los primeros anfibios: la evolución seguía acelerando su marcha.



12. El final del océano de Japeto. Las rocas con planos verticales son sedimentos de la plataforma continental de Báltica, plegados y metamorfizados en la colisión contra Laurentia; las inclinadas que las cubren, a la izquierda, son la Arenisca Roja Antigua, que delatan la erosión de las montañas Caledónicas, formadas en el choque. El lugar de la foto, Siccar Point, en Escocia, es además un punto mítico en la historia de la geología, ya que la contemplación de esta discordancia (el choque de los planos de las dos rocas) permitió a James Hutton conjeturar la inmensidad del *Deep Time*, el tiempo geológico.

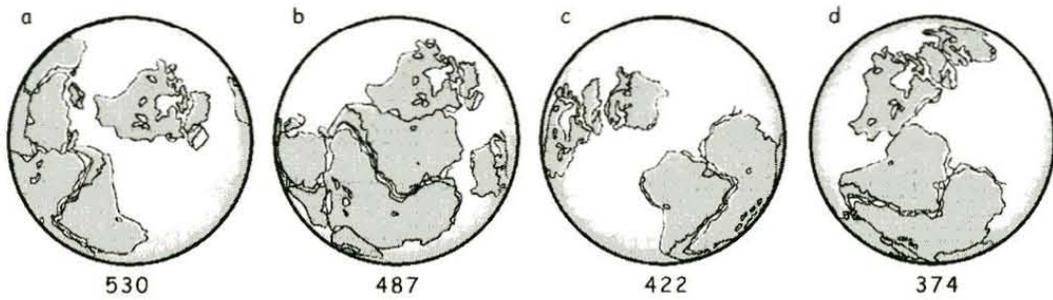
LA DISPUTADA HERENCIA DE RODINIA

En el capítulo anterior comentamos las dudas que en algunos científicos especializados en el análisis del paleomagnetismo despertaba la configuración del supercontinente de Rodinia, y que les habían llevado a proponer una alternativa que llamaron Paleopangea. Estas dudas no sólo se deben a que las rocas tan antiguas están muy deformadas, lo que dificulta averiguar la dirección en la que apuntaban sus minerales magnéticos en el momento de formarse: el problema realmente grave es el de la ambigüedad de la paleolongitud. La estructura del campo magnético permite transformar la inclinación del vector magnético en paleolatitud. Si una roca con suficiente hierro para ser magnetizable se forma justo en un polo magnético, el campo impreso en ella será vertical, mientras que otra magnetizada en el ecuador tendrá un campo horizontal. Es decir, que si los datos son fiables, podremos averiguar con bastante precisión la latitud a la que se encontraba un determinado continente antiguo. En cambio, no hay ninguna diferencia en el magnetismo de dos continentes situados en el mismo paralelo, aunque estén a miles de kilómetros de distancia entre sí.

Éste es el verdadero talón de Aquiles de las reconstrucciones paleomagnéticas, el que hace posibles soluciones geográficas muy distintas para igual época. Existe una salida a estas situaciones ambiguas, y es utilizar el segundo tipo de lógica en las reconstrucciones: la táctica de «la tarjeta de visita rota». Si determinados fósiles, o grandes fallas, o segmentos de un orógeno, pueden continuarse en continentes hoy separados, podremos alegar que antes formaron uno solo. Y como encajar continentes es un juego parecido a solucionar rompecabezas, podemos

usar un símil de estos pasatiempos: dos continentes con igual paleolatitud son como dos piezas de la misma forma, mientras que los datos de la geología regional son como el fragmento de dibujo impreso en cada una. El dibujo decide cuál es el encaje correcto. Los expertos en rompecabezas pueden objetar que, en ocasiones, las dos piezas sospechosas son de un homogéneo azul cielo. Tienen razón: por desgracia, hay ocasiones (y de inmediato vamos a ver una de ellas) en las que, incluso empleando este tipo de argumentos, las dos posibilidades se mantienen. Los mapas paleogeográficos de la Figura 11, que datan de mediados de la década de 1990, están basados en datos paleomagnéticos depurados, pero eso sólo significa que la paleolatitud de cada continente es bastante segura. En cuanto a la paleolongitud, es la mejor que ha podido conseguirse con datos de geología regional. Hagamos ahora un pequeño experimento: en el mapa de la Figura 11b, correspondiente al Ordovícico, movamos Laurentia (Norteamérica) 60° (dos retículas) hacia el oeste, sin cambiar su latitud, y por lo tanto respetando los datos paleomagnéticos. De esta forma, Laurentia choca contra Suramérica. ¿Hay datos de geología regional que apoyen esta alternativa? Existe al menos uno, y es que en partes del noroeste de Argentina se encuentran trilobites de edad cámbrica y ordovícica (o sea, unos 550 a 450 millones de años) iguales a los de Norteamérica.

Tomando este dato como base, un grupo de geólogos argentinos, formando equipo con Ian Dalziel, un escocés en la Universidad de Texas, ha planteado reconstrucciones paleogeográficas alternativas para todo el periodo anterior a la construcción de Pangea, hace unos 250 millones de años. Los cuatro primeros mapas de la Figura 11 podrían ser sustituidos por los cuatro de la Figura 13.



13. Paleogeografías alternativas para los periodos Cámbrico, Ordovícico, Silúrico y Devónico, según Dalziel. Laurentia se ha separado de los restantes continentes, con los que choca de forma ocasional. Los números son edades en millones de años.

Toda una geografía alternativa. ¿Qué se gana y qué se pierde con el cambio? Las ventajas son:

—Se explica la anomalía de los fósiles suramericanos. Los trilobites serían iguales a los norteamericanos porque hubo una conexión geográfica entre los dos continentes en el Cámbrico y el Ordovícico.

—Se explica el orógeno Famatiniano, una cadena de colisión que asoma en Suramérica por debajo de los Andes, y que parece el resultado de la colisión de este continente con otro durante el Ordovícico: este otro sería, en esta hipótesis, Laurentia.

Y los inconvenientes:

—Hay también trilobites cámbricos iguales a los de Laurentia en Escocia, lo que implicaría también vecindad entre Laurentia y Báltica.

—Las deformaciones contemporáneas en Laurentia y en Báltica quedan sin explicación, como sucede en general con las características del orógeno caledónico que se dan en los dos continentes.

—En la hipótesis alternativa, Báltica chocaría sólo con Groenlandia (Figura 13c), es decir, con la parte nor-

te de Laurentia. Sin embargo, la distribución de la Arenisca Roja Antigua, que llega hasta Estados Unidos, parece indicar una colisión más al sur, como propone la hipótesis clásica.

—Los depósitos gigantes de cenizas volcánicas de Suecia y Estados Unidos quedarían también sin explicación si Laurentia y Báltica no hubiesen estado muy próximas al final del Ordovícico.

Así están las cosas en este momento, en el que se diría que la alternativa plantea más problemas de los que resuelve. Su principal virtud es la de todas las ideas que van contra corriente: obligan a la hipótesis dominante a evaluar cuidadosamente los datos, a buscar pruebas decisivas. Dalziel suscita un tema interesante cuando se pregunta si la hipótesis clásica de colisión Laurentia-Báltica no estará reflejando la gran concentración, en ambas orillas del Atlántico norte, de los geólogos que trabajan en estos temas. La objeción tiene resonancias posmodernas, ya que abunda en la queja de esta filosofía según la cual la Ciencia no sería una empresa objetiva, sino que estaría lastrada por los intereses de grupo de las escuelas científicas de los países dominantes. En todo caso, la hipótesis alternativa no es mucho más universalista: en los mapas de la Figura 13, Laurentia (Norteamérica) tiene un protagonismo desaforado, pues parece bailar una danza ritual alrededor de los otros continentes, que, salvo precisamente Báltica (Europa), parecen pasivos, como conscientes de su papel de comparsas. Además, las reconstrucciones alternativas son hijas de Rodinia, ya que surgieron como un desarrollo de la «conexión SWEAT», que enlazaba el suroeste de Estados Unidos con la Antártida. De una u otra manera, Norteamérica siempre ocupa el centro de la escena, lo que

probablemente significa que, suponiendo que las ideas de Ian Dalziel sobre los sesgos de la ciencia sean correctas, él no ha podido evitar que éstos hayan invadido también su hipótesis.

EN EL GRAN PANTANO

En realidad, aunque el tópico sólo se cumple en lo que fue una estrecha faja de terreno de 10.000 kilómetros a caballo del ecuador, y en otras menores en Siberia y en China, entre 30 y 60° norte, seguimos imaginando todo el periodo Carbonífero como un enorme pantano universal, con árboles gigantes como secuoyas, e insectos igualmente gigantescos. Teniendo en cuenta que hacen falta varios metros cúbicos de madera para generar un metro cúbico de carbón, los miles de millones de toneladas de este material acumuladas en este periodo (y en el Pérmico, que le siguió) significan, desde luego, miles y miles de bosques comprimidos y almacenados uno sobre otro en forma de combustible fósil. Sin embargo, el periodo Carbonífero no es notable sólo por esto: fue testigo del comienzo del ensamblaje de la última pangea, y su clima fue el más movido de todo el Fanerozoico. Sufrió una intensa glaciación, al mismo tiempo que grandes desiertos se instalaban junto al hielo: y en el Pérmico funcionaron, a pleno rendimiento, las mayores salinas de la Tierra moderna.

Podríamos preguntarnos si las selvas actuales (la Amazonia, por ejemplo) están dando lugar a yacimientos de carbón; y, en caso negativo, por qué no. La respuesta es que, en un ambiente muy húmedo, la materia vegetal muerta se pudre inmediatamente a causa de la acción de

las omnipresentes bacterias (acompañadas, desde luego, por hongos y termitas), a no ser que consiga un escudo protector. El más común es una capa de sedimentos que la aíse del oxígeno³⁵, del que viven la mayoría de los procariotas desde la revolución atmosférica del Proterozoico. Así que la única forma segura de fabricar carbón es acumular materia orgánica recién muerta en una zona donde haya fuerte sedimentación. Los yacimientos de carbón más importantes se formaron en el borde de grandes lagos o en enormes marismas deltaicas periódicamente inundadas por el mar y situadas al pie de unas montañas en plena formación, que se erosionaban y llenaban las marismas de sedimentos. El combustible para la Revolución Industrial se formó porque las enormes selvas carboníferas no sólo fueron destruidas, sino también inmediatamente enterradas. Las montañas eran los Apalaches, en América, y el orógeno Hercínico en Europa.

Algunos de los habitantes de estas selvas no carecen de interés. La evolución hizo con algunos insectos su primer ensayo de conquista del aire: *Meganeuron*, una libélula de la envergadura de una gaviota, ha adquirido una cierta fama, pero estaba acompañada por amigos menos recomendables, como arañas y escorpiones como los de algunas películas de terror. Aunque las cucarachas eran, afortunadamente, de tamaño casi normal, había, por ejemplo, un ciempiés de dos metros de longitud. ¿Podría ser que nuestra repugnancia natural por muchos

³⁵ Una alternativa interesante, aunque difícil de demostrar, es que las bacterias, hongos y termitas aún no estaban fisiológicamente preparados en el Carbonífero para digerir la celulosa y la lignina, los compuestos que forman los tejidos de sostén de la nueva vegetación.

insectos se remonte al tiempo de las selvas carboníferas, cuando los antepasados de los mamíferos competían con una fauna menos fuerte pero en ocasiones dotada, caso de los escorpiones, de armamento químico? Quizá alguna de las batallas que a veces tenemos que librar en nuestra cocina contra las cucarachas esté impresa en nuestros genes desde hace 300 millones de años.

El otro gran avance evolutivo se da con los anfibios, un intento algo tímido de adaptación al medio terrestre. ¿Por qué los anfibios comenzaron la exploración de la tierra firme? En los años cincuenta la hipótesis dominante era que los peces se habían transformado en anfibios para adaptarse a un clima más seco. Esta idea choca con las evidencias del registro fósil: la inmensa mayoría de los anfibios siguió viviendo en medios húmedos, y muchos no quisieron saber nada de la tierra. Parece mucho más lógico pensar que la adaptación de algunos peces a respirar fuera del agua tuvo que ver con el móvil universal de la evolución: la tendencia a explotar todos los recursos disponibles, realizando para ello todas las modificaciones morfológicas imaginables. En este caso los recursos no eran sólo alimenticios (los insectos gigantes debían de componer menús ricos en proteína y fibra), sino también oxígeno, mucho más fácil de asimilar en tierra que en el agua.

Estas recompensas tenían sus contrapartidas, y la transformación de las branquias en pulmones fue el menor de los problemas. El principal fue el del soporte: la columna vertebral de un pez está adaptada a realizar flexiones laterales, mientras que la de un anfibio tiene que soportar sobre todo presión vertical, lo que requiere una modificación tanto de la columna como de su musculatura asociada, para evitar el desplome de la espalda cuando

el animal se incorpora. Igual sucede con los músculos del cuello, que deben aprender a sostener la cabeza, y los ventrales, sin los cuales el paquete intestinal andaría por los suelos. Y, por supuesto, la modificación de las aletas en patas, que requiere su anexión a la columna (en los peces se unen a la cabeza, o son flotantes), de forma que puedan combinar su función impulsora con otra, nueva, de soporte.

Pero hay que decir que, tras este *lifting* tan completo, la madre evolución consiguió unos modelos de excelentes prestaciones: los anfibios del Carbonífero no eran seres huidizos como las ranas o salamandras actuales, sino los depredadores supremos de su tiempo. *Eriops*, con aspecto de cocodrilo, era un piscívoro de dos metros, pero tenía primos que llegaban a los seis. Sus escamas parecen haber estado destinadas a protegerle tan sólo de la desecación, ya que ocupaba el escalón más alto de la pirámide alimenticia. Esta idílica situación iba a cambiar pronto, en cuanto la evolución dio con una fórmula mejorada para la reproducción de grandes vertebrados terrestres. Hacia el final del Carbonífero (~300 m.a.), los anfibios vieron aparecer otros familiares de extrañas costumbres, ya que no ponían sus huevos en el agua sino en tierra, y además éstos eran de un diseño nuevo, que incorporaba los últimos adelantos de la tecnología: alimento sobrado para el viaje, un saco para los desperdicios, una cómoda envuelta para el embrión y (aquí reside el secreto del éxito) una carrocería a prueba de (algunos) accidentes y que, además de asegurar la conservación del grado óptimo de humedad, permitía la salida del CO₂ y la entrada de oxígeno.

Esta «charca autocontenida», cuyo nombre técnico es huevo amniótico, supuso la ruptura definitiva con el

modo de reproducción de los anfibios, que era sólo una copia del de los peces. Ésta era la única novedad de los primeros reptiles, pero fue suficiente para proporcionarles una ventaja decisiva sobre los anfibios. A principios del Pérmico (~280 m.a.), los primeros reptiles no sólo se reproducían con más éxito, sino que se habían vuelto decididamente peligrosos: algunos, como el llamado *Dimetrodon*, modificaron sus mandíbulas, convirtiéndolas en palancas más eficaces, e inventaron unos dientes como hojas de cuchillo y rematados por picos que les permitían cortar carne de forma muy práctica: una escalada de armamentos cualitativa, ya que a partir de ese momento no hay un límite de tamaño para las presas potenciales. Cada vez que utilizamos un cuchillo de cocina con la hoja serrada estamos imitando a este antiguo reptil, el primer carnicero eficaz de la historia de la vida.

Pero lo más curioso de *Dimetrodon* fue otra innovación anatómica, una especie de vela dorsal. La mayoría de los paleontólogos piensa que le servía para obtener calor más rápidamente, en un mundo, el Pérmico, que se encaminaba rápidamente hacia otra glaciación. Modelos matemáticos han permitido calcular que, si este depredador colocaba su vela de forma que recibiese de lleno los rayos del sol matinal, su temperatura corporal subiría muy rápidamente, lo que le permitiría actividades de caza varias horas antes que si no hubiese dispuesto de esta especie de panel solar. Lo curioso es que *Edaphosaurus*, un reptil del mismo grupo pero herbívoro, estaba también dotado de cresta dorsal. ¿La utilizaba para huir de *Dimetrodon*? Quizá enfrentada a la más bien esperpéntica posibilidad de una biosfera en la que todos los animales terrestres ostentasen una enorme cresta, la evolución dio marcha atrás (el equivalente pérmico de las actuales

conferencias de limitación de armamentos) y decidió retirar las velas dorsales del arsenal táctico. Parece que acertó, ya que los restantes reptiles se apañaron muy bien sin ellas. De todas formas, hay que considerar estas estructuras como un primer ensayo de la endotermia o regulación interna del calor, que caracteriza a los mamíferos.

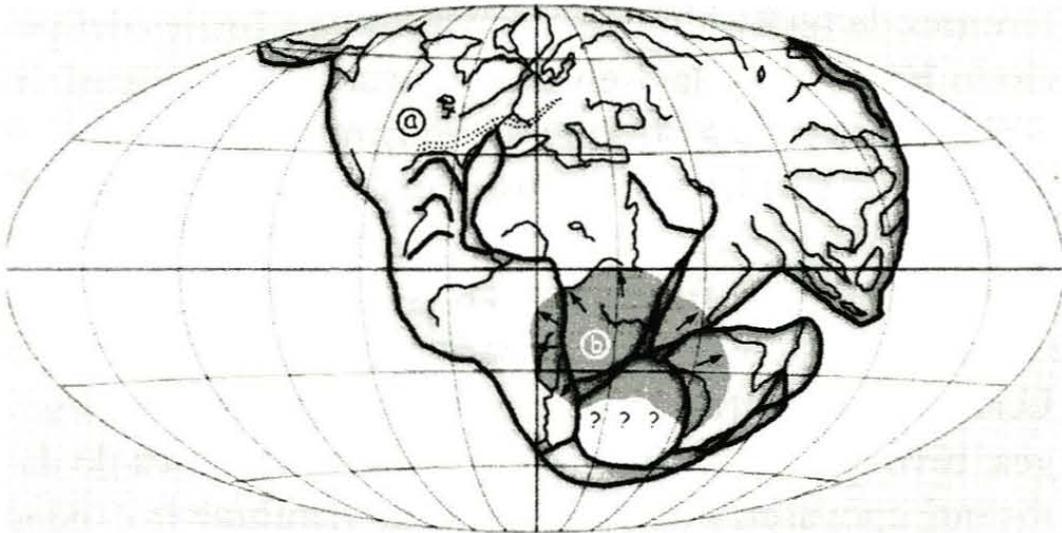
O quizá a algunos reptiles más avanzados: para muchos especialistas, los terápsidos, que aparecieron hará unos 270 millones de años, y cuya estructura corporal recuerda ya mucho a la de los mamíferos, fueron los primeros endotermos: a veces los representan incluso con el cuerpo recubierto de pelo. Para un depredador, las ventajas de la endotermia son enormes, ya que permite, por ejemplo, la carrera continuada. Sin embargo, había también terápsidos herbívoros, con una dentición tipo rumiante y troncos más anchos para acomodar paquetes intestinales más largos. En conjunto, la evolución parece satisfecha con sus nuevos modelos: en sólo cinco o siete millones de años aparecen más de veinte grupos diferentes de terápsidos. Pero estamos ya a finales del período Pérmico, y las selvas donde se formó el carbón están dando paso a otro paisaje muy distinto.

EL CONTINENTE DE UN DETECTIVE AFICIONADO

Una vez que Alfred Wegener hubo imaginado su Pangea, tuvo que revisar bibliotecas enteras en busca de datos que apoyasen su intuición. Es un tributo a la calidad de su trabajo que, al cabo de casi cien años, muchos de los ejemplos que aportó sigan siendo utilizables como pruebas del movimiento de los continentes. Veamos tres de ellos:

—Las piezas del rompecabezas. Considerado desde la perspectiva del tiempo geológico, 250 millones de años no es un intervalo demasiado grande, por lo que muchas de las huellas de Pangea deben de ser fáciles de identificar, incluso para un detective aficionado. Por ejemplo, el orógeno Hercínico-Apalachiense ha sido partido en dos por la posterior apertura del Atlántico, pero sus dos mitades rotas parecen «llamarse» desde ambas orillas del océano (Figura 14). Aún más llamativo es el caso de las tillitas de edades carboníferas y pérmicas, ya que estos indicadores del paso de los glaciares se encuentran en cinco continentes (Suramérica, África, India, la Antártida y Australia), y tanto sus límites como las direcciones de flujo del hielo encajan cuando se reconstruye Pangea.

—Entre docenas de casos de fósiles cuyos yacimientos se hallaban incomprensiblemente (salvo para Wegener) separados por los actuales océanos, escogemos el ejemplo



14. Huellas de Pangea detectadas por Alfred Wegener: el orógeno Hercínico-Apalachiense (a), y (b) las tillitas en los continentes del sur, incluyendo las direcciones en las que se movió el hielo (flechas).

de *Mesosaurus*, uno de los reptiles que, en el Pérmico, estaban relegando a los anfibios. Era un depredador fluvial cuyos fósiles sólo se encuentran en Brasil y en Namibia. La pregunta de Wegener —¿cómo pudo *Mesosaurus* vivir en ríos tan distantes entre sí?— sigue teniendo hoy la misma solución que el ilustre meteorólogo alemán le dio.

—¿Qué hace un arrecife de coral en las islas Spitzberg, a 80° de latitud Norte? Ha sido transportado hasta esta gélida latitud por la lenta deriva de los continentes (en concreto, del de Báltica) desde la latitud tropical donde se formó hace 500 millones de años (comprobar en la Figura 11a).

Según los datos actuales, la colisión de Gondwana contra Laurussia, con la que comenzó la construcción de Pangea, se produjo desde hace unos 335 millones de años, o sea a mitad del Carbonífero. Como es normal en las colisiones, el nivel del mar baja (recordemos, los continentes se encogen, y las cuencas oceánicas ensanchadas aumentan su capacidad); sin embargo, en este caso la causa de la regresión es doble, porque precisamente en esta época hallamos los primeros indicios de que un gran casquete glacial está creciendo sobre Gondwana. Millones de kilómetros cúbicos de agua oceánica van a quedar atrapados sobre los continentes durante cien millones de años, y el nivel del mar bajará 60 metros sólo por esta causa.

Igual que en otras glaciaciones, el desencadenante no está claro, pero la situación geográfica parece muy favorable: como puede verse en la Figura 11d, la punta sur de África estaba casi sobre el polo Sur, es decir, en un clima muy frío pero con un océano muy próximo. Esta cercanía de la fuente de humedad se considera decisiva para que el volumen de nieve sea grande y pueda formarse

una importante masa de hielo. A esto se unieron otros dos factores que enfriaron el clima: la propia construcción del supercontinente (que interrumpió las corrientes marinas ecuatoriales) y la elevación de una gran cadena de montañas, que provocó la aparición de campos de nieve que a su vez rechazan más calor solar. La superficie cubierta por el hielo en esta glaciación carbonífero-pérmica fue del mismo orden que en la actual: los hielos llegaron hasta una latitud de 30° Sur. Tradicionalmente se ha dicho que, como en la glaciación ordovícica, tampoco en la permocarbonífera hubo glaciares en el hemisferio Norte. Sin embargo, como puede verse en las Figuras 11d y e, Siberia estuvo situada muy cerca del polo Norte en ambos periodos, y recientemente han aparecido en este continente pruebas de un episodio de glaciación en el Pérmico.

Los glaciares, que se habían instalado hace 340 millones de años, comenzaron a retroceder hacia los 270, pero cerca del polo Sur se mantuvieron hasta los 240 m.a., o sea, durante todo el Pérmico. En este periodo final de la glaciación encontramos uno de los contrastes climáticos más extraños de la historia de la Tierra, porque nunca el clima ha sido tan continental como entonces: el ecuador era una zona muy cálida (seguía formándose carbón), mientras que cerca del polo Sur la diferencia entre las temperaturas *medias* del verano y del invierno era de ¡50 °C!: esto significa que, a lo largo del año, probablemente podían oscilar entre, p. ej., -40 y +40 °C. Resulta difícil imaginar que la vida pudiese prosperar bajo esta especie de ducha escocesa climática; por eso el reciente hallazgo de un bosque fósil de edad pérmica en las montañas Transantárticas ha desconcertado tanto a los paleoclimatólogos. Sobre todo

teniendo en cuenta que los datos paleomagnéticos indican que los árboles vivieron entre 80° y 85° Sur, por lo que a los problemas de temperatura deben añadirse los de oscuridad total durante los meses de invierno. Evidentemente, el reino vegetal es capaz de hazañas que escapan a la comprensión del reino animal; o, al menos, de los eucariotas.

EL TIEMPO DE LOS DESIERTOS

Un indicador geoquímico que ya conocemos, el isótopo de masa 87 del estroncio, nos confirma que el periodo Pérmico sufrió extremos climáticos que incluían una intensa aridez: la proporción de ^{87}Sr desciende claramente durante todo este periodo, y sólo se recupera parcialmente durante el siguiente (Triásico). La interpretación de los defensores de la «Tierra Blanca» proterozoica era que, al ser el estroncio 87 un isótopo característico de los continentes (se acumula en los granitos, la roca típica de la corteza continental) que es transportado por los ríos hasta los océanos, su empobrecimiento en sedimentos marinos significaría que el transporte fluvial había comenzado una huelga de bajo rendimiento. En el Pérmico, el descenso del estroncio pesado es un indicio que se une a otras pruebas más evidentes de aridez: en el norte de Alemania, los depósitos de sales de esta edad alcanzan espesores de más de mil metros, incluyendo sales potásicas. Estas sales son más solubles que las sódicas, por lo que sólo precipitan cuando la masa de agua que las contiene se evapora de forma prácticamente total: por lo tanto, indican una aridez extrema.

Así pues, entre el ecuador cálido y los helados polos existieron en el Pérmico unas franjas tropicales de intensa aridez, con precipitaciones máximas de 20 mm/mes durante casi todo el año (ésta es precisamente la precipitación mensual media en el árido sureste español). La zona norte abarcaba desde Texas hasta Rusia, y la sur desde Brasil hasta Arabia. Una parte de estas zonas estaba ocupada por desiertos de arena (se han conservado espectaculares dunas fósiles), mientras que otras eran invadidas periódicamente por el mar. En este caso operaría un mecanismo semejante al de las salinas artificiales: evaporación, con saturación y precipitación de las sales, comenzando por las menos solubles. Así se forman series de sedimentos evaporíticos, como las de la zona de Perm, en Rusia central, donde encontramos, en orden de depósito, calizas (relativamente insolubles), sulfatos como el yeso (más solubles), cloruro sódico (muy soluble) y por fin cloruro potásico (la sal más soluble). Esta situación se mantuvo en el Triásico, donde el ya descrito clima de Pangea, con una corriente ecuatorial global, debió de generar una zona hiperárida que incluía a la península Ibérica.

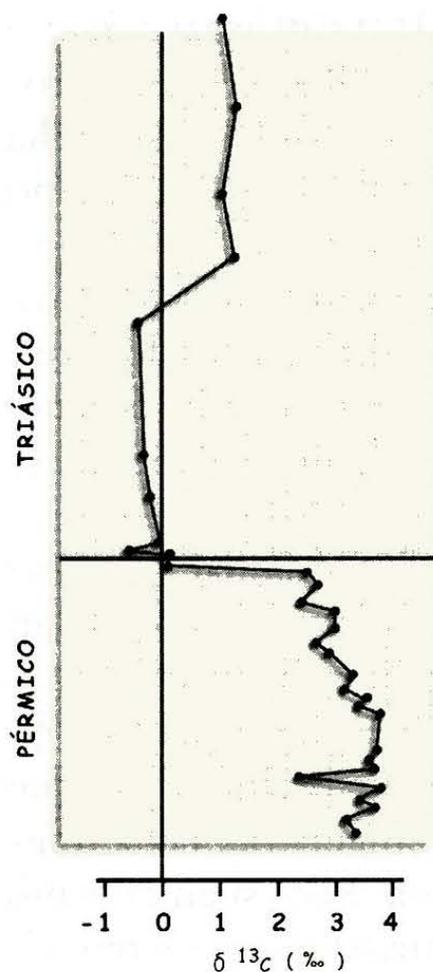
En total, la cantidad de sales que se encuentran en el Pérmico es de un millón y medio de kilómetros cúbicos; teniendo en cuenta las zonas ya erosionadas, puede calcularse que la cantidad de sal retirada del mar pérmico fue aproximadamente el doble. Según algunos geoquímicos, esto sería suficiente como para rebajar la salinidad desde el nivel normal (35 gramos por litro) hasta 30 gramos por litro. ¿Cómo influyó esta desalinización en el mar universal, la Panthalassa, en un tiempo de cambios acelerados como fue el final del Pérmico?

LA ESPOSA DE OCÉANOS Y EL DOCTOR STRANGELOVE

Muchas mitologías asiáticas sitúan un mar interior en el centro-sur del continente. En 1893, el gran geólogo austriaco Eduard Suess identificó, en el lugar aproximado de estos lugares míticos, una masa de agua auténtica, al localizar en Irán sedimentos depositados en el fondo de un océano que, comprimido entre Asia y Gondwana, había dado lugar al Himalaya y otras montañas próximas. Para subrayar el carácter oceánico de este nuevo mar, Suess lo llamó Tethys, por la esposa y hermana de Océanos, el dios griego del mar. Suess demostró su olfato, pues el mar de Tethys ha sobrevivido intacto a la revolución wegeneriana: en los mapas modernos de evolución continental (por ejemplo, los de la Figura 11e, f y g) aparece como un enorme golfo de más de 10.000 kilómetros de profundidad, con Eurasia al norte, África, India y Australia al sur, y las penínsulas Ibérica e Itálica en su extremo occidental.

El mar de Tethys duró doscientos millones de años, desde el Triásico hasta el Cretácico. Los mapas del Triásico y Jurásico reflejan la movida historia de este océano: en el primero (Figura 11f), un fragmento continental se ha desprendido de África y viaja hacia el norte; en el segundo (Figura 11g), está a punto de colisionar contra el sur de Asia. Este microcontinente, quizá un arco insular, ha recibido el nombre de Cimeria, por un antiguo pueblo asiático. Su viaje hacia el norte a través del mar de Tethys hasta chocar con Asia es un preludio del que tiempo después realizará India y, en general, de la fragmentación de la antigua Gondwana. Pero si en el plano tectónico el dominio de Tethys estuvo lleno de aconteci-

mientos, la evolución química de sus aguas también resultó movida: como acabamos de ver, algunos geoquímicos sospechan que la sustracción de sal en el Pérmico pudo causar una cierta desalinización pasajera, de inciertos efectos sobre la fauna marina. Más sólidas son las huellas químicas que marcan el final de este periodo (Figura 15). El descenso brusco de la proporción de carbono 13 parece significar que, justo en el tránsito entre los periodos Pérmico y Triásico, *algo* impidió (igual que sucedió durante la Tierra Blanca) que el plancton absorbiese el carbono 12, con lo cual el isótopo pesado se diluyó. Kenneth Hsü, un geoquímico chino de la Universidad de Zúrich, relata cómo su curiosidad le llevó a averiguar la causa de estos colapsos de ^{13}C :



15. Variación en la proporción de isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) en el tránsito Pérmico-Triásico, medida en un sedimento que fue depositado en el fondo del mar de Tethys y ahora se encuentra en Irán: los océanos se convirtieron en lugares hostiles para la vida.

«Como depende de la luz solar, el fitoplancton [formado por algas, y el zooplancton, que se alimenta de él] sólo aparece hoy en las aguas superficiales. Dado que las algas prefieren los átomos de carbono 12 a los de carbono 13, las aguas superficiales quedan enriquecidas en carbono 13 en las zonas en que florece el plancton. Si el enriquecimiento relativo en carbono 13 en las aguas oceánicas superficiales es obra del plancton, ¿qué pasaría si no hubiera plancton en los océanos?

»Le planteé esta cuestión a Wallace Broecker en 1981, cuando vino a Zúrich a dar una conferencia. Wally trabaja en Lamont³⁶, y su fama procede de sus investigaciones sobre los ciclos del anhídrido carbónico en los océanos. De su cabeza las ideas brotan continuamente, como las burbujas en las bebidas carbónicas. Cuando le hice esta pregunta, al final de su conferencia, me contestó con sorna: “Ah, lo que me estás preguntando es el efecto ‘Doctor Strangelove’. Un océano sin plancton no tendría ninguna variación de isótopos de carbono. La composición sería la misma desde el fondo a la superficie. ¡Ese océano sería un océano del doctor Strangelove!”.

»Yo no había visto la película, pero comprendí que el doctor Strangelove quería borrar de la superficie de la Tierra a todos los seres vivos, excepto una reducida élite entre la que, evidentemente, se encontraba él, utilizando una explosión nuclear. Esta selecta élite sería la que, en su momento, repoblaría el planeta. Medio en broma, Broecker había elegido un término muy pintoresco, y no desaproveché la ocasión para formalizar tanto la idea como el término en mi siguiente publicación».

³⁶ Ver el apartado «Y, sin embargo, se mueven» en el capítulo primero.

Un suspenso al doctor Hsü (a quien, por cierto, volveremos a encontrar) por pasarse la vida estudiando y no ver la obra maestra de Stanley Kubrick³⁷, lo que explica que haga un resumen algo pintoresco de su argumento. Sobresaliente, en cambio, por la celeridad con la que se apropió de la idea del doctor Broecker, que ha conseguido popularizar (citando además, como es debido, la procedencia). Ahora podemos interpretar sin problemas la Figura 15: el plancton desaparece bruscamente de los océanos al final del Pérmico, con lo que deja de secuestrar carbono 12, y el agua deja de estar enriquecida en carbono 13. Pero, ¿por qué toma valores negativos el carbono 13? Según Hsü, esto se debe a que los «océanos Strangelove» estaban acompañados de «continentes Strangelove», llenos de materia vegetal muerta que, al ser arrastrada a los océanos, los llenó de carbono 12, diluyendo aún más el isótopo pesado; una idea que se ha reforzado al detectarse en este nivel una elevada concentración de esporas de hongos, que se nutren de materia vegetal muerta.

En suma, todo parece implicar que el final del periodo Pérmico fue una época muy dura para la vida.

LA MADRE DE TODAS LAS EXTINCIONES

Conseguir que se extingan más del 90% de las especies oceánicas, y más del 70% de las familias de vertebrados terrestres, no es una tarea fácil. En 1998, un equipo de geocronólogos y paleontólogos consiguió demostrar que real-

³⁷ *Dr Strangelove: or How I learned to stop worrying and love the bomb* (1963) fue estrenada en España con el extraño título de *¿Teléfono rojo? Volamos hacia Moscú*.

mente había existido un cataclismo, al datar, con la técnica SHRIMP, 172 granos de circón hallados en niveles de cenizas volcánicas que están a caballo del tránsito Pérmico-Triásico en China. Los resultados fueron espectaculares: casi todas las especies extinguidas perecieron en menos de un millón de años, alrededor de 252 m.a.; y el descenso del carbono 13 que señala el «océano Strangelove» pudo durar solamente 10.000 años. «Sea lo que fuese, sucedió muy rápidamente», dijo un miembro del equipo.

Sin duda el final del Pérmico ha sido el momento en el que, a lo largo de toda su evolución, la biosfera terrestre ha estado más cerca del colapso total. A partir del renovado interés por las extinciones masivas, una lluvia de propuestas de explicación ha caído sobre «la madre de todas las extinciones», irónica expresión con la que en los años noventa los paleontólogos empezaron a aludir a dicha extinción masiva. Ahora es necesario evaluar esta selva de hipótesis a la luz de los últimos hallazgos; los principales asuntos aún sin aclarar son: a) La extinción afectó tanto a la fauna marina como a la continental, pero las plantas pasan la crisis sin apenas bajas. b) En el Triásico reaparecen una serie de especies que aparentemente se habían extinguido al final del Pérmico (son los llamados «grupos Lázaro», ya que parecen haber resucitado). c) Como vimos en el apartado anterior, en el límite hay una clara anomalía en los isótopos de carbono y de estroncio; en cambio, no hay concentración de iridio. d) Aunque hay en el Pérmico grupos que muestran declives prolongados, la extinción en masa se produjo rápidamente.

Las principales hipótesis propuestas para explicar esta extinción masiva son:

—La hipótesis del supercontinente. La regresión consecuente a la formación de Pangea redujo en un 70% la

extensión de las plataformas continentales, lo que diezmó la vida en la zona fótica.

—La hipótesis del cambio climático. El enfriamiento causado por la glaciación carbonífero-pérmica hizo desaparecer la zona climática intertropical, donde se produjeron la mayoría de las extinciones. La desertización de parte de Pangea pudo contribuir a este proceso.

—Las hipótesis de los cambios geoquímicos. La regresión dejó expuesta a la acción atmosférica gran cantidad de materia orgánica de los organismos que vivían en la plataforma continental. La oxidación masiva de esta masa orgánica muerta consumió mucho oxígeno atmosférico, lo que provocó un episodio de anoxia (carencia de oxígeno) en los océanos. Otra alternativa geoquímica es la desalinización que pudo producirse en los mares a causa de los grandes depósitos de sales del Pérmico.

—La hipótesis volcánica. Al final del Pérmico, y en un intervalo menor de un millón de años, se produjeron en Siberia las mayores erupciones volcánicas del Fanerozoico, que emitieron 1,5 millones de kilómetros cúbicos de lava. Asimismo, un millón de kilómetros cuadrados de China están cubiertos por cenizas, al parecer de una erupción volcánica explosiva producida al final del Pérmico. Los efectos climáticos de estas erupciones aún no se han estudiado en detalle, pero pueden interpretarse como agentes de calentamiento global (a través de la emisión de CO_2), aunque también como causa de enfriamiento, si emitieron aerosoles como ácido sulfúrico, que velan la radiación solar.

—La hipótesis del impacto. La colisión de un asteroide habría llevado a la atmósfera una gran cantidad de polvo, que opacaría la radiación solar, quebrando las cadenas alimentarias desde la base, por la imposibilidad de fotosíntesis.

Algunos de los rasgos básicos de la extinción son fáciles de explicar. Por ejemplo, que las plantas sufriesen menos que la fauna es totalmente lógico, dado que los vegetales han desarrollado un conjunto de eficaces sistemas de supervivencia, como un aparato reproductor (la semilla) resistente a la desecación, o raíces, que pueden sobrevivir a la muerte del aparato subaéreo. Igualmente carece de misterio la aparición de especies resurrectas, que evidentemente debieron de buscar refugio en lugares más protegidos de los cambios ambientales. Y en cuanto a las anomalías isotópicas de carbono y estroncio, ya explicadas, parecen efectos respectivos de la mortandad del plancton, y de la desertización de finales del Pérmico.

Pero la mayoría de las explicaciones tiene inconvenientes serios. El principal problema de la hipótesis del supercontinente es que una regresión no sirve para explicar extinciones de animales terrestres; además, otras regresiones no han causado extinciones. En cuanto a los cambios climáticos, no hay un enfriamiento especial hacia el fin del Pérmico; incluso son más importantes los cambios climáticos en el Carbonífero, cuando comienza el crecimiento del casquete de hielo de Gondwana, pero este acontecimiento climático no va acompañado de ninguna extinción. El episodio salino del Pérmico no debe de ser la causa de la extinción masiva, ya que la precede en más de diez millones de años. Por último, para apoyar la idea del impacto faltan las huellas geoquímicas típicas de los asteroides, que son el iridio y otros elementos metálicos del grupo del platino³⁸, muy raros en las rocas terrestres y relativamente abundantes en aquellos cuerpos.

³⁸ En noviembre de 2001, paleontólogos japoneses han detectado un importante enriquecimiento en hierro y níquel (elementos típicos de algunos meteoritos) en un nivel pérmico-triásico en China.

Como vemos, dos ideas han sobrevivido a este primer filtro: la erupción volcánica de las lavas de Siberia, y la anoxia. La primera tiene la ventaja de poder explicar una extinción rápida, y la desventaja de que sus efectos concretos no han sido calculados. En cuanto a la anoxia, sería muy eficaz en el medio oceánico, y probablemente también sobre los vertebrados continentales, seres de metabolismo complejo, y por ello sensibles a un descenso del oxígeno atmosférico; el problema es que se trata de un proceso puramente teórico, que todavía nadie ha podido demostrar que se diese en la realidad. Como vemos, no hay una sola hipótesis satisfactoria; y aunque David Raup sigue defendiendo la idea de una causa única (y se inclina por la del impacto), la mayoría de los paleontólogos sostiene que, puesto que el Pérmico puede definirse como la época en la que todo fue mal (clima inestable, demasiado vulcanismo, adiós a los mares someros, una geoquímica de pesadilla...), la extinción pérmica tiene que ser necesariamente un acontecimiento complejo. Incluso se ha propuesto una secuencia de catástrofes: regresión-vulcanismo-transgresión. Pero la rapidez de la extinción es un problema añadido: por ejemplo, los cambios en el nivel del mar, por rápidos que sean, requieren millones de años y, recordemos, todas las extinciones parecen haberse producido en menos de un millón de años.

Un nuevo dato ha venido a complicar, o quizás a simplificar, el tema: el hallazgo, exclusivamente en el sedimento del límite Pérmico-Triásico (y no en los superiores ni los inferiores), de gases nobles (helio y argón) con la distribución isotópica típica de los meteoritos, que es muy diferente a la de las rocas terrestres. Los gases se habrían conservado encerrados en grandes moléculas de carbono. Pero, ¿por qué helio y argón, pero no iridio?

¿Quizá el impactor fue un cometa en vez de un asteroide? Evidentemente, este único dato no va a resolver el problema de la mayor mortandad de la historia de la Tierra, tras la que, como se ha dicho, los pocos supervivientes llegaron al tiempo Triásico «como náufragos dispersos, arrojados a la playa de una isla deshabitada».

PANGEA NO AGUANTA MÁS

Ya sabemos que los supercontinentes no duran nada, pero la sucesión de los dos últimos ha sido bien diferente: mientras que la herencia de Rodinia fue la confusión (aún no sabemos qué camino siguió cada uno de sus hijos), la de Pangea, además de estar bien documentada, fue suculenta, ya que consistió en yacimientos gigantes de petróleo. La razón de esta positiva diferencia es doble: por una parte, en los últimos 200 millones de años, la época de la fragmentación del último supercontinente, la reconstrucción de las posiciones de los continentes no es problemática; por otra, el cambio radical de geografía que se produce con la rotura de una gran masa continental supone una interesante oportunidad para la vida. Ésta apenas se había desarrollado cuando Rodinia murió, pero al final de Pangea era ya una potencia política de peso en el destino del planeta, y aprovechó la ocasión.

Como una taza vieja que vuelve a romperse por los bordes mal pegados, Pangea volvió a fallar por las antiguas suturas. El profundo golfo que era el mar de Tethys, en cuyo fondo coexistían las antiguas fronteras de Gondwana y Laurasia, dio muestras de inestabilidad poco antes de los 200 millones de años (Triásico Final). Una profunda grieta comenzó a abrirse, separando Iberia del norte de África,

y por ella comenzaron a entrar las muy salinas aguas de la Panthalassa ecuatorial. Las sales que encontramos en el centro de la Península, en Marruecos, y en el fondo del Atlántico frente a las islas Canarias, dan testimonio de esta época en que el centro de Pangea se estaba convirtiendo en una especie de mar Rojo. La grieta continuó su propagación muy lentamente. Evidentemente, no tenía un plan bien trazado, porque la vemos dudar ante cada bifurcación del camino. Por el momento ha despreciado el futuro Atlántico norte (un mar, sin embargo, con grandes posibilidades, pero ¿quién podía saber eso en el Jurásico?) para dedicarse a excavar su surco entre Norteamérica y África (futuro Atlántico central, 175 m.a.). Vacila otra vez en la encrucijada que existe entre Norteamérica, Suramérica y África, pero se decide a separar los dos continentes americanos, excavando en el futuro golfo de México, donde se repetirá el depósito de sales. Allí se toma un respiro.

Mientras, Pangea parece un castillo de naipes en su fase final: al mismo tiempo que nace el Atlántico central, India y la Antártida comienzan su secesión respecto a África. Por un tiempo, la actividad de los bulldozers continentales se detiene. Cuando se reanuda, hace cien millones de años, es para acabar rápidamente el desmantelamiento de Pangea: se abre el Atlántico sur, separando (¡por primera vez en mil millones de años!) Suramérica de África; al mismo tiempo, Eurasia se aleja de Norteamérica (80 m.a.), y (~60 m.a.) Australia e India siguen caminos hacia el norte, alejándose de África y la Antártida, que también se separan entre sí. Panthalassa ha visto recortada su extensión con el nacimiento de dos nuevos océanos: el Atlántico, que recorre el planeta de polo a polo, y el Índico, un mar tropical. Pero los dos, como el Pacífico (el nombre de la nueva Panthalassa disminuida)

enlazan en el sur alrededor de la Antártida, y allí la rotación del planeta se encarga de que giren sin parar hacia el oeste: ha nacido la corriente circumpolar, un elemento decisivo en el clima de la era siguiente.

Además de los depósitos de sales, estos divorcios de la corteza han dejado profundas huellas en los nuevos continentes, algunas literalmente *desgarradoras*. En las fronteras entre continentes y océanos aparece un nuevo tipo de corteza, de menor grosor que la continental (por ejemplo, en Galicia sólo cinco kilómetros en vez de los 25 de la original), que parece formada por estiramiento de la original, y que nos dice que la separación no fue incruenta. Un aspecto de importancia es que, al adelgazarse, la corteza continental (que, por su baja densidad, funciona como un flotador de la litosfera) tiende a bajar. El mar del Norte, otro caso semejante, es un ejemplo excelente de este efecto: al hundirse, se acumularon en su fondo hasta 3.000 metros de sedimentos que, por el carácter relativamente cerrado de la cuenca, retuvieron gran cantidad de materia orgánica, y hoy son importantes yacimientos de petróleo y gas. Algo parecido sucedió en el golfo de México, también una zona marina restringida con fuerte sedimentación. Aquí las sales depositadas en la etapa «tipo mar Rojo» desempeñaron un papel decisivo, porque, debido a su carácter impermeable, la sal sirve como roca sellante del petróleo, que impide que éste escape a la superficie. Los yacimientos de Texas y Oklahoma son el resultado de esta serie de casualidades.

Las cicatrices del desmembramiento de Pangea no se limitan a los bordes continentales. Las grietas rompecontinentes no siempre resolvieron sus vacilaciones de forma neta: a veces tomaron el camino equivocado, para volver luego sobre sus pasos. Estas vías exploradas y

luego abandonadas se pueden reconocer porque los grandes ríos de la cuenca atlántica las han aprovechado para excavar sus valles, algo muy lógico puesto que se trataba de zonas fracturadas y por lo tanto más fáciles de erosionar. El Amazonas, el Río de la Plata, el San Lorenzo, el Níger, son todos, en un cierto sentido, «hijos de Pangea». Pero las montañas del Atlas también lo son. ¿Cómo se explica esto? Cuando la cicatriz abandonada es lo bastante profunda, la litosfera llega a separarse, en un ensayo avanzado de fragmentación continental que se limita a la fase «tipo *rift* africano» sin llegar a la fase «tipo mar Rojo», pero que es suficiente para que cantidades importantes de sedimentos se acumulen en el surco. Luego, los vaivenes de las nuevas placas cerrarán la cicatriz, y los sedimentos plegados darán lugar a una nueva cadena de montañas. Es razonable pensar que las islas Canarias se deben también a un proceso similar, ya que se levantan precisamente en la prolongación de esta misma zona de debilidad en la litosfera.

Y, ¿qué hay de los puntos calientes que, según vimos en el apartado «Los muchos *pulsos de la Tierra*», eran los artífices de la ruina de los continentes? Estos aparatos térmicos han dejado sus marcas en los restos de Pangea, en forma de lo que recientemente se han empezado a llamar Grandes Provincias Ígneas, acumulaciones de rocas magmáticas con extensiones continentales. Una de ellas, por ejemplo, abarca todas las orillas del Atlántico norte, desde Nueva York a Escocia, y los volcanes de Canarias podrían ser su herencia tardía; otra comprende los grandes derrames basálticos del Paraná en el sur del Brasil, Karroo en Namibia y Suráfrica, y los diques de Ferrar, en la Antártida; y una más está formada por los basaltos del Decán, en India. En general, las costas de

los hijos de Pangea exhiben con profusión dos tipos de huellas de la época de los desgarres: por una parte, evidencias de estiramiento mecánico, como en las cortezas adelgazadas; por otra, marcas térmicas como inyección de diques. Lo que significa que en una fracturación continental actúan dos tipos de procesos: uno térmico causado por puntos calientes que debilitan la litosfera, y otro mecánico que completa la rotura desencadenada por el primero. En la defunción del último supercontinente podemos encontrar rastros abundantes de unos y de otros. Siempre, como dijo Goethe («Sólo vemos lo que sabemos»), que sepamos lo que estamos buscando.

Tabla 3
Acontecimientos clave en la Tierra paleozoica
(550-250 m.a.)

Edad (m.a.)	Datos	Interpretación
530	Diez nuevos <i>filas</i> animales	El <i>big bang</i> de la biosfera
450-420	Tillitas en Gondwana	Glaciación del Ordovícico
430	Deformación en Europa y Norteamérica	Orogenia Caledónica
390	Primeros insectos	Invasión de los continentes
"	Primeros anfibios	"
360	Primeros árboles	"
340-240	Tillitas en Gondwana	Glaciación carbonífero-pérmica
"	Huevo amniótico	Vertebrados continentales
300	Polen y semillas	Vegetales en ambientes secos
"	Apalaches y Hercínides	Colisión Laurussia-Gondwana
"	Formación masiva de carbón	¿Clima + orogenia?
252	Muere >90% esp. marinas	¿?
250	Elevación de los Urales	Colisión Laurussia-Siberia

REVISIÓN DEL CAPÍTULO III.

p 153-154: El big bang de la vida y la revolución en genética

En 2005, el análisis [*Science* (310, 1910) 2005] de 12.060 aminoácidos para investigar la filogenia de 16 representantes de nueve fila animales permitió confirmar que el surgimiento de estos grupos había sido rápido, probablemente en dos episodios de divergencia múltiple cada uno de los cuales había durado pocos millones de años.

p 156: Anomalocaris y su boca como brocal de pozo

Puesto que discuto tanto si esta (para nosotros, seres con mandíbulas) extraña boca era evolutivamente perjudicial, creo que merece la pena que la veamos (*Figura 21*).

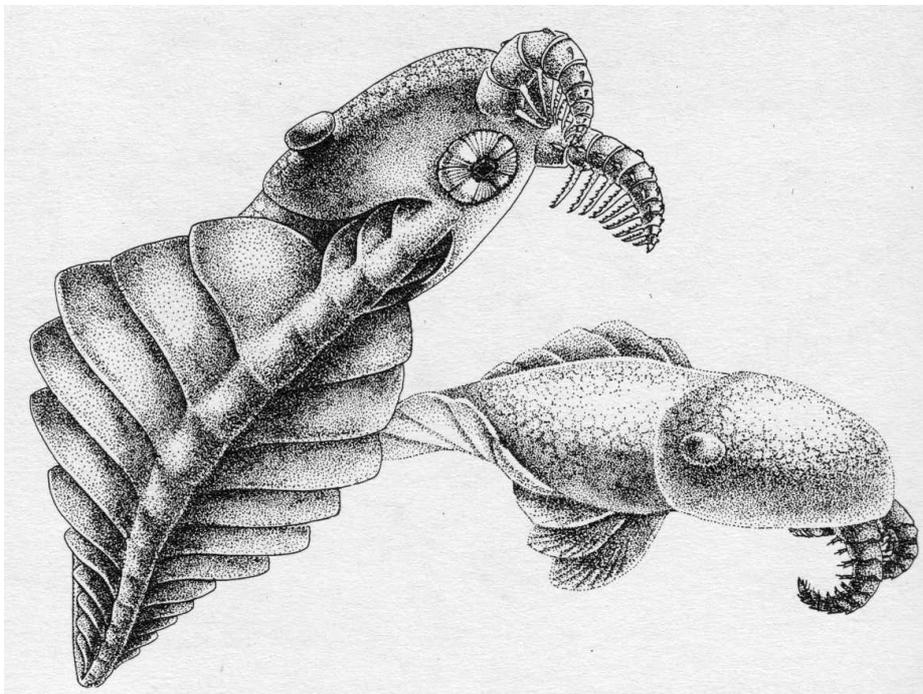


Fig. 21.

p 160-161: El baile de los continentes, en color

Ya es bastante problema reconocer los continentes actuales en reconstrucciones tan pequeñas como para tener que hacerlo además en tonos de gris. Por desgracia, la versión en color (*Figura 22*) debe leerse de abajo hacia arriba: la manía de los estratígrafos de que lo que está debajo es lo más antiguo.

La *Figura 23* es una ilustración más detallada de la dinámica de Gondwana hace 500 millones de años, o sea entre la primera y segunda viñetas de la figura anterior. El orógeno de Terra Australis, que abarcaba 18.000 km entre Colombia y Australia, sólo fue definido en 2005 [*EPSL* (60, 249) 2005].

Fig. 22.

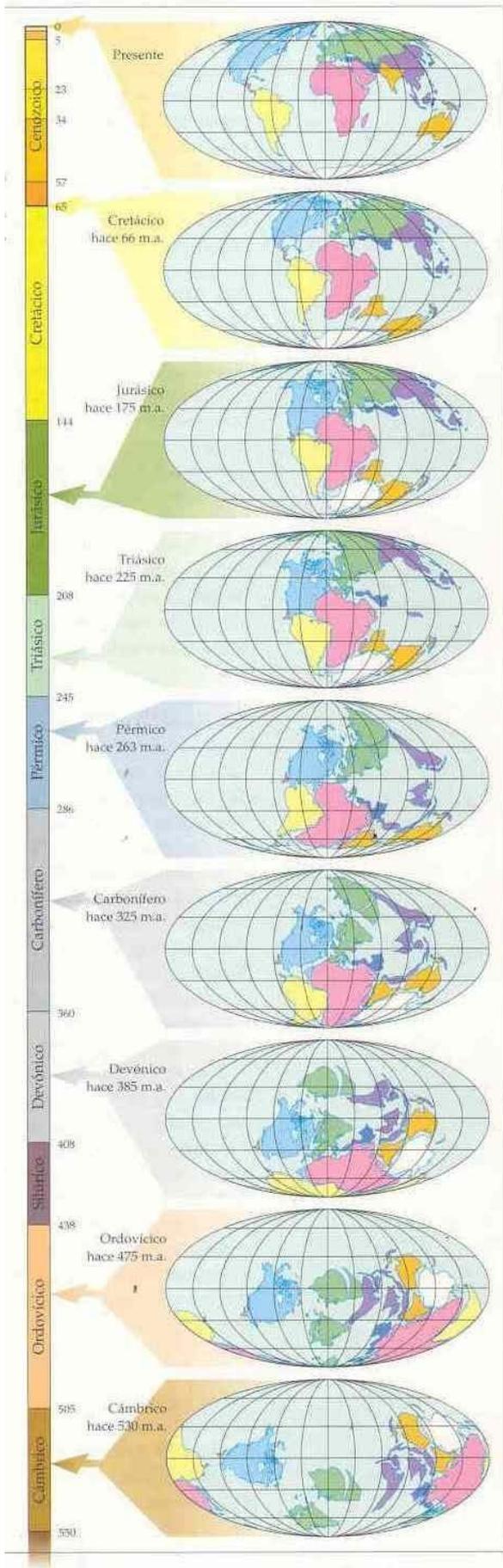
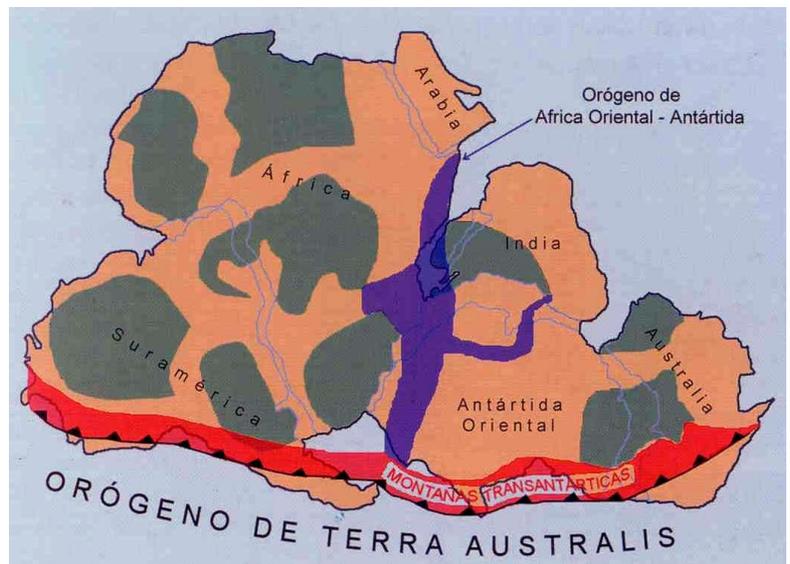


Fig.23.



p 164 [ver también la 271]: Las causas de la glaciación Neógena

Aunque digo que son una incógnita, la verdad es que sobre este tema hay quizá demasiadas ideas. La única que cito (la elevación de la meseta tibetana) sin duda contribuyó al enfriamiento de Eurasia al cortar el paso de los cálidos vientos monzónicos del Índico; y también al exponer a la meteorización una enorme cantidad de nuevas rocas. ¿Suficiente para explicar una glaciación que comenzó mucho después en la Antártida, y que sólo 10 millones de años más tarde llegó al hemisferio norte? Seguramente no. La teoría que goza de más apoyo hoy se basa en el aislamiento del continente antártico hace entre 35 y 30 millones de años, cuando se rompió la conexión con Suramérica. Esto permitió la aparición de una corriente marina que rodea al continente, la corriente circunantártica, que al impedir que llegase a él agua cálida de otros océanos, lo aisló térmicamente. Hace 34 Ma comienza a aparecer hielo en la Antártida, que hace 14 Ma estaba totalmente glaciada.

Sin embargo, en el hemisferio norte no hubo glaciares hasta hace 2,7 millones de años. La causa de este retraso es muy discutida: para algunos climatólogos también tiene que ver con los océanos, porque ésta es la edad aproximada de la elevación del istmo de Panamá (3,7 Ma, p 264), que, al cerrar la conexión Atlántico-Pacífico, podría haber causado el enfriamiento tanto de Eurasia como de Norteamérica.

p 167: ¿Cuatro o seis extinciones masivas?

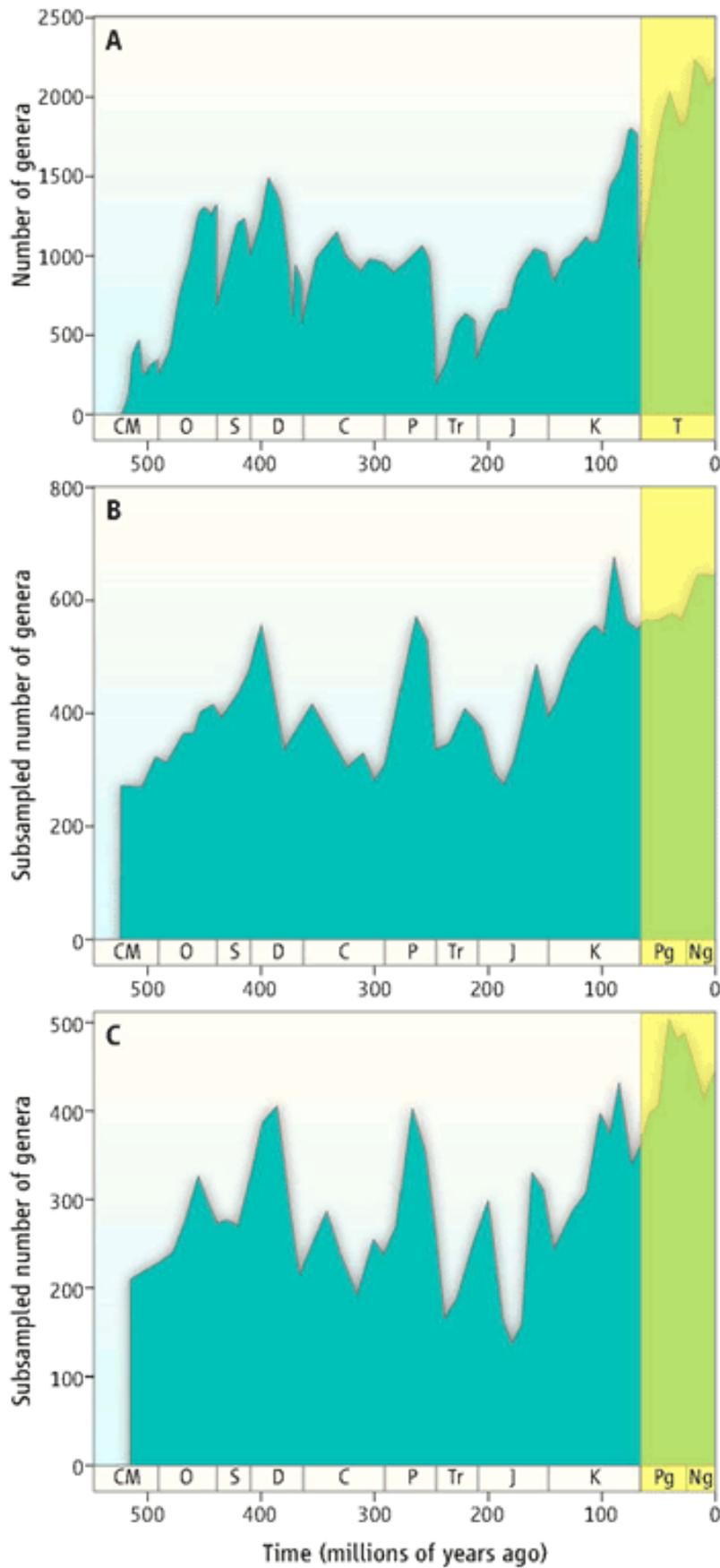
Quizá cinco. El problema es doble: uno, que el término “extinción masiva” no está definido con precisión; y dos, que realizar estadísticas fiables de los difuntos no es nada fácil, porque hay muchos posibles sesgos, de muestreo, regionales, por grupos, etc. Éste es el problema de fondo, como se ilustra en la [Figura 24](#) [[Science \(329, 1156\) 2010](#)] con tres estadísticas (de 1997, 2008 y 2010) bastante diferentes de la diversidad de seres vivos marinos desde el Cámbrico, y cuyos mínimos deberían corresponder a las extinciones masivas. Es interesante (aunque un poco deprimente) intentar encajar esos mínimos en una lista típica de las extinciones como la siguiente:

- 1 – Límite Ordovícico-Silúrico (444 Ma, † 85% especies)
- 2 – “ Devónico-Carbonífero (360 Ma, † 70%)
- 3 – “ Pérmico-Triásico (252 Ma, † 90% marinas, 70% terrestres)
- 4 – “ Triásico-Jurásico (210 Ma, † 76%)
- 5 - “ Cretácico-Paleoceno (65,5 Ma, † 47%)

p 186: Dimetrodon

Representado en la [Figura 25](#). No he encontrado ninguna ilustración interesante de sus famosos dientes.

Fig. 24.



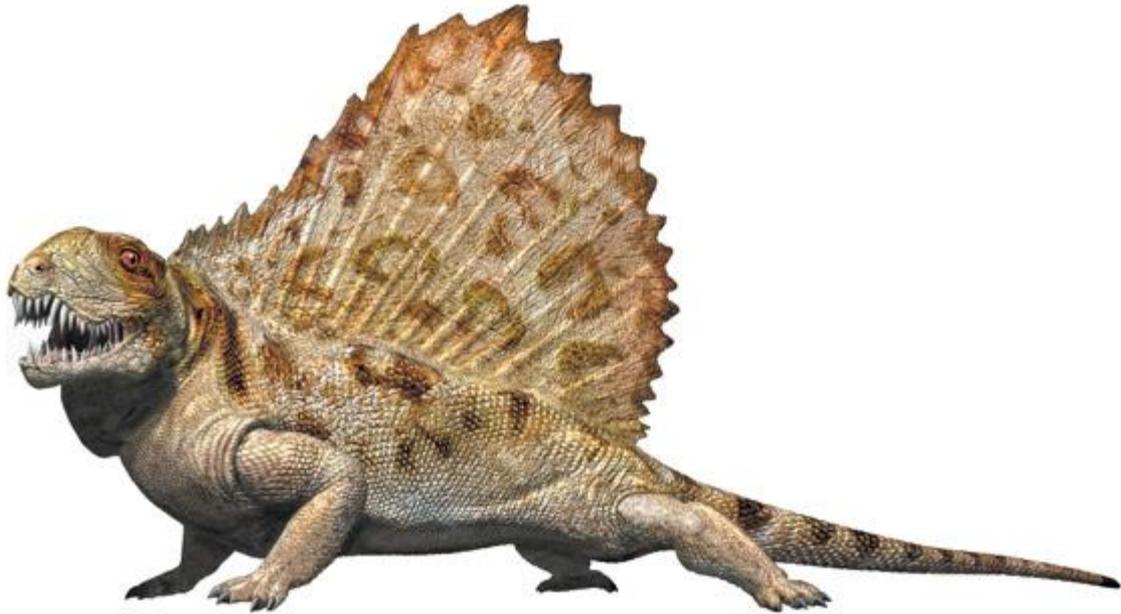


Fig. 25.

p 190: Misterios del clima en el Paleozoico

No sólo del Pérmico: durante la glaciación del Ordovícico-Silúrico (~451-438 Ma), un casquete polar apreciable en el Polo Sur coexistía con mares tropicales a 32-37°C [*Science* (331, 903) 2011], un contraste térmico probablemente incompatible con una circulación oceánica como la actual.

p 193: ¿Océanos o Poseidón?

Un colega de Granada me sugirió (de nuevo, de forma exquisitamente amable) que el dios griego del mar era Poseidón y no Océanos. Esto me ha obligado a bucear en la mitología. Parece que Océanos es un concepto con el que los antiguos griegos designaron al agua externa (¿río, mar?) que en su cosmología rodeaba al mundo habitado; después, como casi todos los temas de la Naturaleza en Grecia, el concepto se divinizó bajo la forma del titán (es decir, un dios menor) Okeanós, hermano y esposo de Tethys. Y éste es el precedente de Poseidón, ya un dios importante del panteón, que surgió más tarde, coincidiendo con el apogeo de Atenas como potencia naval.

p 196-201: La extinción del final del Pérmico

De las cinco hipótesis que enumero, sólo han sobrevivido dos: la anoxia y el vulcanismo, ambas conectadas. El vulcanismo (los basaltos de meseta de Siberia: 6,5 km³ de lava y cenizas, *Figura 26*) emitiría o liberaría de sedimentos [*EPSL* (277, 490) 2009] ingentes cantidades de gases reductores que causarían una disminución importante (desde 30 hasta 15% [*Science* (308, 337) 2005]) de la concentración de oxígeno en la atmósfera. Las regiones elevadas (en rojo en la *Figura 27*) serían inhabitables para vertebrados. Al disolverse en el mar, estos gases causarían anoxia en

la hidrosfera [*Science* (322, 359) 2008]. Parece que las condiciones ambientales se fueron deteriorando durante unos ocho millones de años antes de la extinción masiva, que coincide con el máximo de vulcanismo [*EPSL* (214, 75) 2003]. No ha podido probarse en cambio otro de los efectos negativos propuestos, la desaparición de la capa de ozono, [*Nature Geoscience* (1, 247) 2008].

En cambio, la hipótesis del impacto está hoy totalmente descartada, ya que no se han encontrado en el límite Pérmico-Triásico indicios geoquímicos que la apoyen. Un partidario de esta idea confesaba [*Science* (302, 1316) 2003] que, tras diez años de búsqueda infructuosa de estos indicios, “casi había echado a perder su carrera científica”.

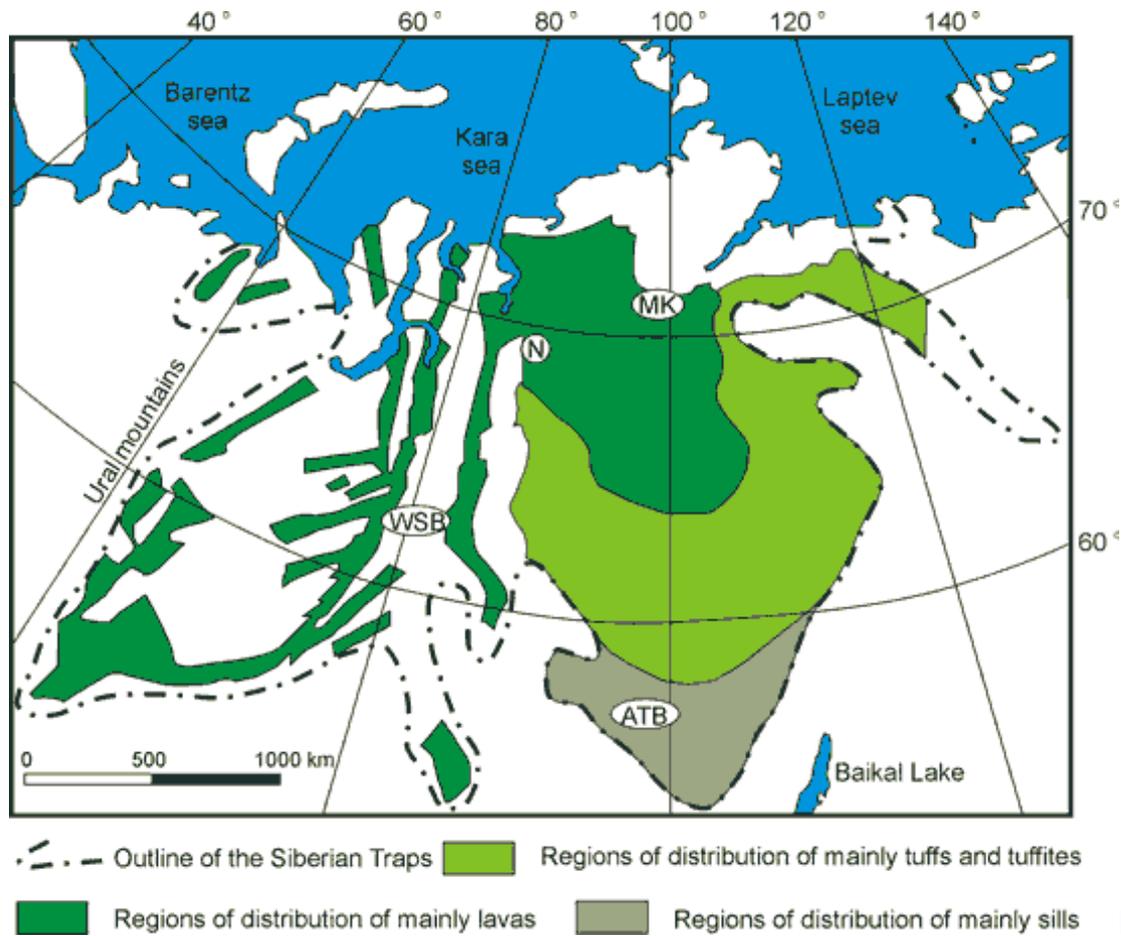


Fig. .26.

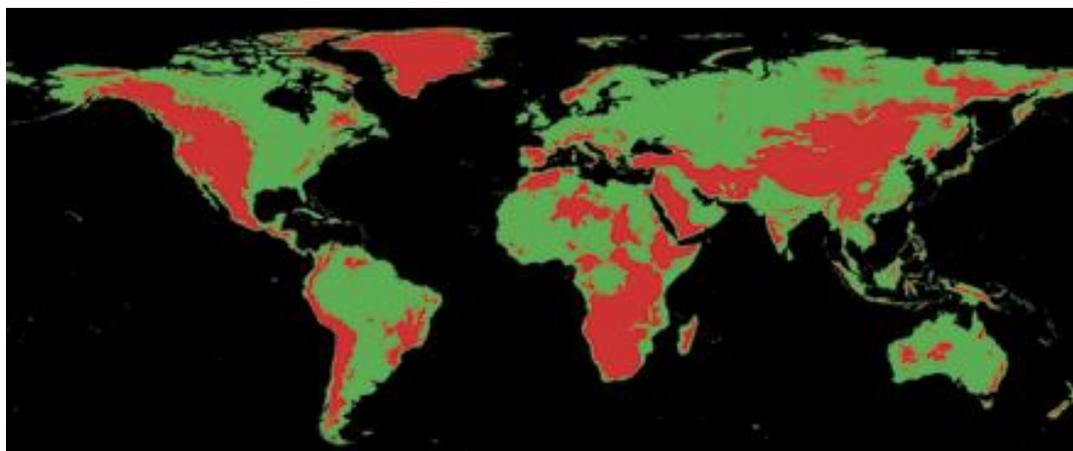


Fig. 27.

p 204: Las cicatrices de Pangea

En la **Figura 28** podemos ver en detalle una estructura generada al abrirse el Atlántico: un dique basáltico (zona hundida central) corta transversalmente los granitos del escudo brasileño en una idílica playa de la Isla de Santa Catarina, en el sur de Brasil.



Fig. 28.

El pasado reciente

PAZ EN LA TIERRA, GUERRA EN EL MAR

Si el viajero del tiempo pudiese retroceder doscientos cincuenta millones de años, lo más probable sería que al salir de su cápsula se encontrase entre un rebaño de animales parecidos a pequeños hipopótamos y, como ellos, de hábitos semiacuáticos. Pero a pesar de su porte poco gallardo, *Lystrosaurus* (que en otras descripciones se asemeja más a un cerdo bien alimentado) es un animal importante, casi heroico: de más de cincuenta géneros de reptiles tipo mamífero que existían en el Pérmico, él fue el único que logró llegar al Triásico. Este superviviente nato fue premiado por la evolución con una vida prolífica, larga y tranquila. Se han descubierto cientos de restos de *Lystrosaurus* en Suráfrica, India, Rusia, China y la Antártida; en este último continente, en 1969, significaron un espaldarazo para la recién aceptada tectónica de placas, ya que, por muy distinguido que hubiese sido el comportamiento evolutivo de este reptil, nadie podía imaginárselo cruzando océanos a nado. La pacífica vida de este herbívoro está documentada en el registro fósil, en el que coexiste con un solo carnívoro (otro reptil, *Proterosuchus*, una especie

de cocodrilo primitivo) muy poco abundante, lo que significa que *Lystrosaurus* apenas tenía enemigos naturales, y explica su proliferación. Con esta curiosa uniformidad, la Pangea del Triásico quizás se pareció a una granja porcina.

Esta buena armonía no reinaba en cambio en Panthalassa. Mientras que unos grupos de reptiles se habían hecho dueños de la tierra, otros estaban regresando al agua recién abandonada. Lo hacían, sin embargo, como a regañadientes, si juzgamos por la abundancia de formas de ambiente costero. Algunos se dedicaban al marisqueo, para lo que habían desarrollado dientes diferenciados, los delanteros como espátulas que usarían para arrancar las conchas que machacaban con los restantes, parecidos a martillos. Existió incluso un posible pescador de caña, que utilizaba su propio cuello, más largo que el resto de su cuerpo, como herramienta. Sólo al final del Triásico (hacia los 220 m.a.) hubo una diversificación («radiación» en la jerga evolucionista) importante de reptiles marinos. Es cierto que, una vez que se decidieron, hicieron su trabajo a conciencia, ya que fueron los dueños de los océanos durante más de 150 millones de años, a pesar de que su aparato respiratorio no «regresó», por lo que cargaron con la desventaja de tener que respirar en superficie. En ese sentido fueron los precursores de los grandes depredadores mamíferos oceánicos, como algunos cetáceos actuales. Los ictiosaurios (literalmente, peces-lagarto) adquirieron un diseño parecido al de los delfines, mientras que los plesiosaurios se han hecho populares a partir de la leyenda del monstruo del lago Ness, aparentemente modelado a semejanza de estos grandes lagartos acuáticos, uno de los cuales llegó a medir doce metros. A estos grupos se unieron

pronto grandes cocodrilos marinos, los primeros carnívoros de gran tamaño que existieron en la Tierra. La guerra en el mar estaba en marcha, y los peces (que también diseñaron los tipos modernos en el Triásico) no serán las únicas víctimas: los reptiles terminarán devorándose unos a otros, inaugurando las cadenas alimentarias complejas, en las que el carnívoro dominante se alimenta de otros carnívoros.

Desde el punto de vista evolutivo, es notable que los ictiosaurios, que aparecieron a principios del Triásico (245 m.a.) se extinguieran antes (90 m.a.) que ningún otro reptil marino. Sus características anatómicas parecen indicar que cazaban presas a gran profundidad: los ojos de uno de ellos, de un diámetro de 26 centímetros, eran los más grandes que ha poseído nunca un ser vivo. Se ha calculado que su apertura focal sería de 0,9, como la del gato: ¡un objetivo reflex de lujo, sólo que mucho más grande que toda una cámara fotográfica! No hay duda de que su poseedor necesitaba mucha vista para sus negocios, la pesca en aguas abisales. Los modelos anatómicos le atribuyen intervalos de veinte minutos entre dos inspiraciones, un caso espectacular de convergencia evolutiva con el cachalote, también un depredador abisal que necesita respirar en la atmósfera.

La irrupción de los grandes reptiles marinos es sólo una parte de lo que algunos paleontólogos llaman «revolución marina del Mesozoico». Desde hace unos cien millones de años, los nuevos océanos que se abren con la ruptura de Pangea se ven invadidos por nuevas faunas: peces modernos (del grupo de los teleósteos) de gran tamaño, crustáceos dotados de pinzas para abrir conchas, gasterópodos con dardos venenosos antipeces, o moluscos, los antepasados de la actual sepia, que inventaron

la propulsión a chorro y las defensas químicas (nubes de tinta) contra los depredadores. A esta guerra de todos contra todos, algunos moluscos respondieron produciendo conchas espinosas, o cada vez más macizas: al final del Cretácico (~70 m.a.), algunos ammonites habitaban conchas como ruedas de tractor. Otros moluscos, llamados rudistas, eligieron la vida en colonias, y construyeron arrecifes; la única vez en la historia de la biosfera en que los corales tuvieron competidores en su tarea de producir montañas vivas.

FIN DE LA TREGUA EN PANGEA

La oferta de empleo (en la jerga científica, nicho ecológico) para la Granja Pangea decía: «Se busca depredador eficaz, no importa tamaño. Esencial buena dentadura. Comida sana y abundante. Empleo garantizado durante cinco millones de años». Demasiado succulenta para que el puesto permaneciese vacante mucho tiempo. La Naturaleza premió a *Lystrosaurus* con una muerte tranquila, pero sus sucesores iban a sufrir tiempos revueltos. Los descendientes del discreto *Proterosuchus* evolucionan a toda velocidad: son los arcosaurios, los «lagartos dominantes», un apelativo que les hace honor. Teniendo en cuenta su rendimiento durante los siguientes 175 millones de años, hay que admitir que estos reptiles se hicieron con todas las ofertas de trabajo estimables durante el final de Pangea y en *todos* los continentes sucesivos: fueron los depredadores más temibles, pero también las presas más codiciadas, los carroñeros más eficaces, los dueños de la tierra y también del aire (aún siguen siéndolo, ya que su estirpe incluye

a las aves). Y no admitieron competidores: en todo este enorme lapso del tiempo de la Tierra el mamífero más grande que pudo evolucionar no pasó del tamaño de un gato.

Poco después de desaparecer *Lystrosaurus*, irrumpen en escena cocodrilos de buen tamaño, unos tres metros, dotados de una sana dentadura, como pide el anuncio, y que además esbozan un adelanto anatómico que será decisivo en los tiempos que vienen: la capacidad de moverse ocasionalmente sin reptar, habilidad que aumenta mucho la velocidad punta (como puede verse en las películas de Tarzán, los cocodrilos siguen practicando el mismo truco cuando se lanzan hacia la chica que nada desprevenida). Pronto surgen especies que pueden erguirse ocasionalmente sobre las patas traseras, el primer paso hacia la marcha bípeda.

Pero para ser más rápidos, los reptiles tienen que modificar por completo las articulaciones. La necesidad de esta reforma queda clara si hacemos un paralelismo: los reptiles primitivos caminaban colocando sus extremidades a los lados del cuerpo, como las personas cuando hacemos flexiones sobre el suelo, los temidos «fondos». Cualquiera que haya hecho fondos comprenderá que los primeros reptiles arrastrasen la barriga. Los cocodrilos han conseguido acercar sus patas a la vertical del cuerpo, y por eso sólo reptan ocasionalmente. Pero hace 240 millones de años, un grupo de arcosaurios desarrolló un tipo de fémur cuya cabeza esférica salía de un lateral, con lo cual la extremidad podía situarse verticalmente debajo del cuerpo. La innovación concedía tales ventajas evolutivas que apareció de forma independiente ¡hasta en diez grupos diferentes de arcosaurios! Y eso sin contar con que (afortuna-

damente) los reptiles de los que descendemos los mamíferos también la adoptaron. Para los que creen en la unidad de la biosfera, puede ser un pensamiento reconfortante saber que compartimos una innovación funcional casi perfecta con los dinosaurios y sus antepasados.

Algunos han comparado esta ruptura anatómica al invento de la ametralladora: se dice que esta arma decidió la primera guerra del siglo XX, la de Gran Bretaña contra los bóers surafricanos, pero también es cierto que poco después el artefacto se había generalizado, encendiendo la mecha de una feroz carrera de armamentos. Lo mismo sucedió en el Triásico Final. Los depredadores corrían más, y lo mismo tuvieron que hacer sus presas; unos para obtener comida, y los otros para no servir de ella. Una pregunta aparentemente ingenua puede hacernos aprender algo sobre la evolución: si se trataba de un adelanto tan decisivo, ¿por qué no apareció antes? Hay dos buenas razones para esta tardanza: en primer lugar, sólo los anfibios que se aventuraron en tierra necesitaban sostener el peso de su cuerpo. En segundo término, es la necesidad la que crea el órgano: fue el vacío ecológico de Pangea tras la gran extinción pérmica el que hizo útiles esta y otras mejoras anatómicas profundas.

Aunque los primeros arcosaurios que pueden clasificarse como dinosaurios aparecen en Suramérica hace 230 millones de años, el estreno triunfal de este grupo se produce tras una extinción menor sucedida en el Triásico Final (225 m.a.). Desaparecen casi todos los reptiles mamíferos, y eso supone aún más oportunidades para los arcosaurios emergentes, que empiezan a llenar todos los nichos ecológicos vacíos (herbívoros,

piscívoros, carnívoros, carroñeros, incluso caníbales) y en toda la gama de tamaños: mínimos, grandes y gigantescos.

¿ERAN TAN TERRIBLES LOS DINOSAURIOS?

La palabra *dinosaurio* significa «lagarto terrible». Su inventor, el naturalista y profesor de la Universidad de Oxford Richard Owen, la propuso en 1841, cuando solamente se conocían restos de tres de estos reptiles. Owen argumentó que, si las reconstrucciones eran certeras, todos ellos correspondían a bestias gigantescas. Por ejemplo, comparando los dientes de *Iguanodon* con los de las iguanas, calculaba que este dinosaurio podría medir entre 30 y 60 metros de largo. Datos posteriores permitieron comprobar lo incorrecto de esta extrapolación: *Iguanodon* no pasaba de los siete metros. Pero, exageradas o no, las noticias sobre estos gigantes del pasado captaron la fantasía del público inglés, sobre todo a partir de 1854, cuando, bajo la dirección de Owen, se construyeron cerca de Londres maquetas a tamaño natural de estos reptiles y de otros animales prehistóricos. Por entonces, *Iguanodon* había recobrado su tamaño real, pero la mecha ya estaba prendida. El hombre había descubierto un mundo anterior a él y dominado sin lugar a dudas por sus viejos rivales los reptiles. La exposición del Palacio de Cristal de Londres es el comienzo de una fascinación que llega sin interrupciones hasta los actuales dinos de peluche.

Naturalmente, si hemos convertido a los dinosaurios en animales de compañía, esto significa que nuestro concepto sobre ellos ha cambiado. De monstruos gigantescos represores de los pequeños mamíferos del Mesozoico

han pasado a convertirse en seres de comportamiento mucho más próximo. Al menos dos datos han influido en este cambio psicológico:

—El cuidado de las crías. Las cuidadosas puestas de huevos y la existencia en los nidos de restos de vegetales indican que al menos algunos dinosaurios incubaban los huevos y alimentaban a los individuos recién nacidos.

—Las huellas de los grandes dinosaurios herbívoros atestiguan que se trasladaban en grandes manadas; algunos paleontólogos aseguran poder reconocer que los individuos jóvenes viajaban en el interior del grupo, protegidos por los adultos, como hacen los elefantes.

Por si estas muestras de comportamiento maternal y social «tipo mamífero» fuesen pocas, Robert Bakker, del Museo de Dinosaurios de Wyoming (en quien se dice que está basado el protagonista de *Parque jurásico*), propone que los dinosaurios eran endotermos (o sea, de sangre caliente). Sus elementos de juicio son varios: por una parte, la densidad de conductos de Havers (los orificios de los vasos sanguíneos) en los huesos de dinosaurios no es muy diferente a la de los mamíferos; además, la proporción carnívoros/herbívoros entre los dinosaurios de un área es parecida (~10%) a la que se da en los mamíferos, y muy distinta a la típica de los reptiles (~40%). Esto significaría que hacía falta un gran número de presas para cada dinosaurio depredador, lo cual parece indicar un metabolismo muy activo, característico de los endotermos. Por último, sólo animales endotermos podrían disponer de la energía suficiente para desarrollar los hábitos de cacería que se han reconstruido en algunos dinosaurios.

Este último argumento nos lleva hasta una cuestión clave: ¿Eran realmente los dinosaurios capaces de una

actividad física prolongada, como la que por ejemplo deben realizar a veces los grandes felinos actuales para su alimentación? ¿Cuál era la velocidad punta de *Tyrannosaurus rex*³⁹? ¿Era realmente, con sus 14 metros de longitud, el depredador más poderoso de todos los tiempos, o tan sólo un carroñero? A pesar de los grandes avances producidos recientemente en la reconstrucción del comportamiento de los dinosaurios, ninguna de estas preguntas tiene una respuesta clara. Por ejemplo, hay varias fórmulas para calcular la velocidad de un animal extinguido, midiendo su zancada y la longitud de sus extremidades. Lo que es más complicado es averiguar la duración del galope, ya que esto requeriría una gran cantidad de huellas. Los resultados de los cálculos indican que algunos tipos de dinosaurios relativamente pequeños, como los celurosaurios (un grupo que incluye al ahora famoso *Velociraptor*), podían galopar a velocidades cercanas a los 50 km/hora. En cuanto al tiranosaurio, se han obtenido resultados muy erráticos, entre los 16 y los 65 km/hora.

Esta dispersión se explica por la escasez de esqueletos completos y de huellas, aunque en los últimos años ha habido varios descubrimientos importantes que han mejorado la fiabilidad de las reconstrucciones. La cifra más alta se corresponde con la velocidad punta de un caballo de carreras; pero los cálculos más recientes están cerca de la media de los anteriores, unos 40 km/hora, una prestación respetable que permitiría a los tiranosaurios dar caza a los grandes herbívoros (*Diplodocus*, ~11 km/hora),

³⁹ Rey tirano de los saurios. Todo ser vivo (o fósil) se designa con dos nombres en latín: el primero, con inicial mayúscula, para el género, y el segundo para la especie. Cuando el género es muy conocido, como en este caso, se suele adaptar a las lenguas modernas (aquí, tiranosaurio), perdiendo la mayúscula.

e incluso a los dinosaurios acorazados tipo rinoceronte, como *Triceratops*, que podían correr a unos 25 km/hora. Esta velocidad encaja con el descubrimiento muy reciente de uno de los antepasados del tiranosaurio, un celurosaurio de unos cinco metros de largo que aún conserva extremidades anteriores funcionales. Se confirma así la llamada «hipótesis tiranoraptor», según la cual *Tyrannosaurus* y *Velociraptor* son primos no muy lejanos.

Otra cosa es que el «rey tirano» estuviese muy dispuesto a enfrentarse a los cuernos de *Triceratops*. En los yacimientos de dinosaurios, los huesos de los indefensos hadrosaurios (dinosaurios herbívoros llamados comúnmente «de pico de pato») tienen doble número de huellas de mordeduras de tiranosaurios que los del dinosaurio cornúpeta; en cambio, los huesos de anquilosaurios, herbívoros completamente acorazados y revestidos de enormes espolones, no muestran ni una sola huella de dientes. En cuanto a sus hábitos de caza, la presencia en algunos yacimientos de tiranosaurios de huesos de muchos individuos parece indicar que, al menos ocasionalmente, éstos (como otros carnosaurios, según se denomina el grupo que incluye a los grandes carnívoros bípedos) vivían en manadas. Las mandíbulas de muchos de estos animales, especialmente las de los jóvenes, presentan frecuentes señales de lucha, lo que demuestra la dura estructura jerárquica de las manadas; pero además, algunos de los huesos de los animales que se han encontrado en estos grupos (bien es verdad que sólo un pequeño porcentaje) tienen marcas de dientes de otros tiranosaurios en partes vitales, por lo que hay que concluir que el gran depredador era un caníbal ocasional.

Al mismo tiempo, estos datos confirman que *Tyrannosaurus* era un cazador; si hubiese sido un carroñero,

habría muchos más restos de los propios tiranosaurios mordidos. Lo que nadie discute es que, como todo depredador, consumiese ocasionalmente presas ya muertas, que significan proteínas prácticamente gratuitas; algo muy interesante para un animal que debía economizar las carreras para disminuir el riesgo de caídas, ya que, por una parte, sus escuálidas patas anteriores no le servirían de ayuda para levantarse; por otra, porque cálculos del impacto de la caída (cinco toneladas desde una altura de hasta seis metros, la alzada del animal) han llevado a expertos en biomecánica a augurar que muchas caídas de tiranosaurios podrían ser mortales. Hemos aprendido muchas cosas sobre los grandes dinosaurios depredadores, y el balance actual es que, por muchos muñecos de peluche que fabriquemos, estos y otros dinosaurios grandes y pequeños siguen mereciendo el nombre de lagartos terribles.

LOS SECRETOS DE UN ÉXITO

El largo periodo de dominio de los continentes por parte de los dinosaurios siempre ha sido un motivo de curiosidad para los estudiosos de la historia de la Tierra, una curiosidad acentuada por la repentina desaparición de esta fauna. Varios factores pueden explicar este éxito evolutivo. En primer lugar, el clima del Mesozoico fue muy cálido, oscilando entre árido en el Triásico y húmedo en el Jurásico y Cretácico: sin duda un clima favorable para los reptiles, aunque no fuesen endotermos. Pero no sólo ayudaba el clima, sino también la geografía: en el Triásico, cuando surgieron los dinosaurios, las montañas Hercínicas y los Apalaches llevaban casi cien millones de

años erosionándose, por lo que ya no eran obstáculos para el tránsito de faunas con buenas capacidades locomotoras. Pangea fue como una autopista para los primeros dinosaurios, que además ni siquiera tuvieron que disputar a ningún rival el gran continente, ya que éste estaba vacío de especies que se pudiesen considerar avanzadas desde el punto de vista fisiológico o anatómico: al principio del Mesozoico, los dinosaurios, que ahora vemos como arcaicos, eran indudablemente la fauna «moderna».

Las modificaciones anatómicas que fueron surgiendo en el transcurso de la evolución de este grupo fueron profundas: por ejemplo, algunos herbívoros incorporaron un modelo distinto de cadera, dirigiendo hacia atrás los huesos de la pelvis para dejar más sitio a sus larguísimo intestinos. Como ésta es precisamente la geometría de la pelvis de las aves, se ha llamado ornitisquios (literalmente, «cadera de ave») a estos dinosaurios, entre los que se cuentan *Triceratops*, *Stegosaurus* y los hadrosaurios. Sin embargo, los mayores herbívoros, como *Diplodocus* y *Brachiosaurus*, no incorporaron esta modificación, lo que hace dudar de su eficacia. Y, muy paradójicamente, dinosaurios que mantenían la cadera reptiliana (y que por ello se conocen como saurisquios) fueron los antecesores de las aves. La moraleja es que, por sí misma, la innovación no garantiza una mejor adaptación.

Y, ¿qué hay del tamaño, el factor sin el cual los dinosaurios no serían las celebridades que son? La carrera hacia el cetro de los pesos pesados empezó muy rápidamente (a principios del Jurásico) pero, significativamente, culmina y acaba enseguida, al final de este periodo, con los mayores animales terrestres que han existido nunca. ¿Hasta qué punto un gran tamaño es una ventaja

evolutiva? Es evidente que si *Tyrannosaurus* ocupó la cúspide de la pirámide alimentaria fue debido a su gran tamaño; por el mismo motivo, los grandes herbívoros debían de ser difíciles de atacar. Además, un gran volumen significa mayor capacidad de mantener la temperatura corporal, lo que sería una alternativa a la costosa endotermia (un mamífero gasta el 80% de la energía que produce en mantener su temperatura; un reptil, sólo el 8%). Y desde luego, la capacidad de movimiento (y con ella, la de colonizar nuevos ambientes) es en parte proporcional al tamaño. En vista de todos estos datos positivos, ¿podrían haber crecido aún más los dinosaurios?

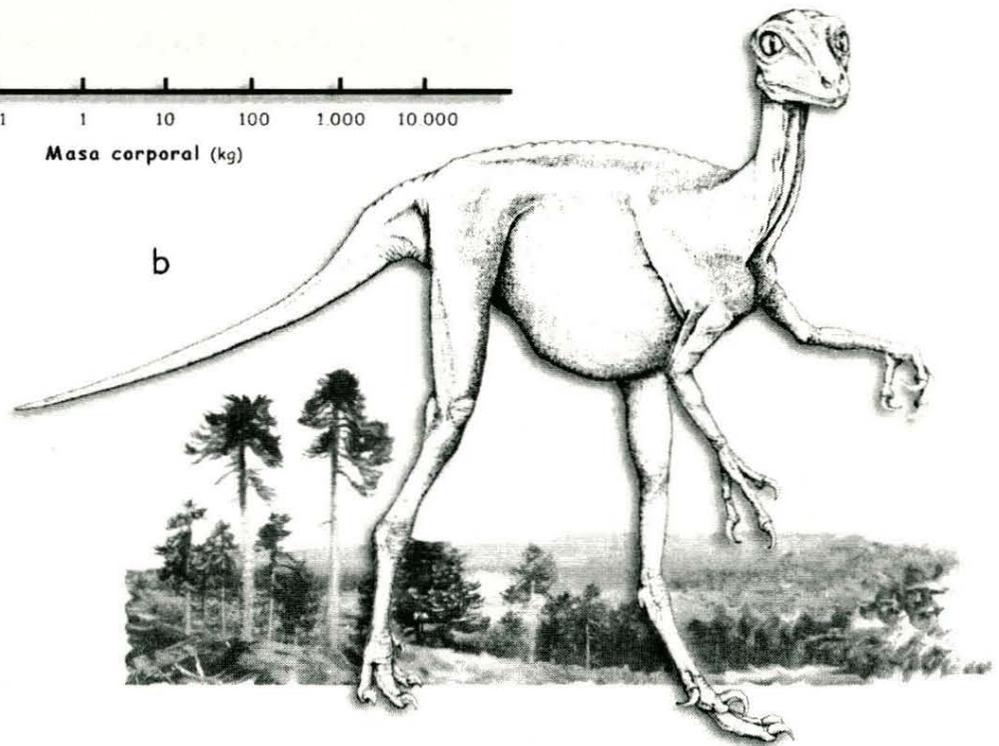
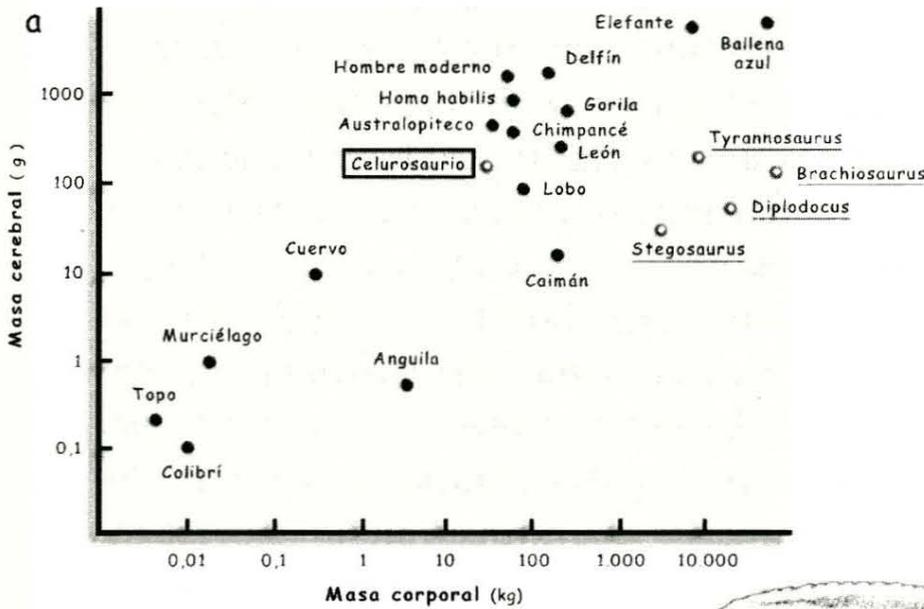
La biomecánica nos explica que hay un límite práctico al crecimiento animal. Cuando aumenta la longitud, el aumento de peso, por ser proporcional al volumen (o sea al cubo de la longitud), es mucho mayor. Las patas de un animal cuadrúpedo que pesase 140 toneladas tendrían que ser tan anchas que se tocarían unas con otras, lo que imposibilitaría su movimiento, de modo que éste es el límite absoluto del peso de un animal terrestre. Probablemente hay otro límite inferior, más práctico: un dinosaurio de más de cien toneladas no tendría tiempo material para ingerir todo el alimento que necesitara. Se ha calculado que *Brachiosaurus*, el dinosaurio más pesado que se ha podido reconstruir con ciertas garantías, podría pesar unas 75 toneladas. Más allá de *Brachiosaurus* reinan las bestias fabulosas de nombres espectaculares (*Supersaurus*, *Ultrasaurus*, *Seismosaurus*), de las que sólo conocemos fragmentos, pero cuyos descubridores extrapolan hasta tamaños del orden de los 30 metros. Extrapolaciones peligrosas, como podrían explicar Richard Owen y su iguanodonte de 60 metros. Se ha dicho que los paleontólogos especialistas en dinosaurios son, respecto al tamaño de

sus capturas, de la misma estirpe que los pescadores de caña. Pero el hecho de que *Brachiosaurus* viviese en el Jurásico, y que a lo largo de los 80 millones de años del Cretácico no surgiese ningún dinosaurio claramente mayor seguramente significa que la vía evolutiva consistente en adquirir seguridad térmica y física a cambio de tamaño había llegado ya a su final práctico.

Con estos leviatanes coexistieron dinosaurios enanos, como *Compsognathus*, que vivió en el Jurásico y tenía el tamaño de un pollo, lo cual desmonta el mito de que todos los dinosaurios eran gigantes. Tampoco es cierto que los grandes dinosaurios, como *Brachiosaurus* o *Diplodocus*, viviesen permanentemente en el agua para lograr sostener el peso de su cuerpo: tanto los sedimentos que los envuelven como la vegetación que les acompaña son claramente terrestres. Un tercer lugar común sobre los dinosaurios se refiere a su inteligencia: el dato más citado es que *Stegosaurus*, un herbívoro del Jurásico que medía de 4 a 6 metros y pesaba tonelada y media, tenía un cerebro del tamaño de una nuez. No debió de ser un genio, desde luego, pero probablemente fue un caso extremo (ver la Figura 16). Como veremos, algunos dinosaurios del Cretácico Final parecen haber sido, por el contrario, extremadamente hábiles.

LA SEGUNDA CONQUISTA DEL AIRE

La evolución trabajó febrilmente durante los diez millones de años que van desde 215 a 205, es decir, el final del Triásico. Además de originarse los primeros dinosaurios, uno de los escasos reptiles mamiferoides, parecido a la musaraña, se decidió a dar el salto evolutivo y cambiar el



16. a) Masas cerebrales de diversos animales en función de sus masas corporales. Los celurosaurios se proyectan en el campo de los mamíferos, destacándose claramente de los demás dinosaurios. b) Uno de los celurosaurios del final del Cretácico: sin duda un peligroso rival para los nuevos mamíferos. (En Russell, *Scientific American*, enero de 1982).

modelo reproductivo del huevo amniota por el de la gestación interna, inaugurando un linaje que nos parece ilustre porque pertenecemos a él. Pero las novedades no se agotaron aquí: algunos pequeños arcosaurios de hábitat costero hipertrofiaron la falange de su cuarto dedo y la utilizaron como soporte de una membrana con la que, después de los insectos del Carbonífero, invadieron por segunda vez el medio aéreo. Estas alas tenían un diseño muy distinto a las de las aves, ya que consistían en una membrana reforzada por miles de fibras de un material desconocido, seguramente queratina, que le aportaban resistencia y probablemente permitían al animal controlar el vuelo alterando su forma: de nuevo la innovación biológica, en este caso el ala de geometría variable, se adelanta en un buen puñado de millones de años al invento tecnológico.

Así, al mismo tiempo que algunos arcosaurios daban lugar a los dinosaurios, surgieron unos primos alados de éstos, los pterosaurios (literalmente, «lagartos con alas»), cuya estirpe reptiliana era muy evidente en su boca provista de dientes, en las garras prensiles y en la cola, muy larga en las especies iniciales. Sin embargo, otras características anatómicas, como huesos huecos y un esternón de gran tamaño que les servía de quilla, son típicas de las aves; y un fino recubrimiento piloso denota su endotermia. Los primeros pterosaurios eran del tamaño de gaviotas, pero pronto, igual que sus parientes dinosaurios, comenzaron a crecer, al tiempo que se despojaban de la cola y los dientes. En 1972 se encontraron restos de uno, *Quetzalcoatlus*, que quizá llegaba a quince metros de envergadura, el tamaño típico de una avioneta. Descartado que fuese piscívoro (demasiado lejos de la costa), se ha sugerido que este reptil se alimentaba de los

cadáveres de dinosaurios: quizá *Quetzalcoatlus* era el superbuitre del Cretácico.

Por otra parte, es dudoso que la batida de las alas de estos pterosaurios gigantes les proporcionase energía suficiente para sustentar su peso, por lo que se les imagina más como planeadores que batirían las alas sólo al despegar. No está claro tampoco el sistema de locomoción mientras estaban en el suelo: si la membrana alar llegaba, como en los murciélagos, hasta las patas traseras, los pterosaurios caminarían con grandes dificultades, casi arrastrándose; si no, podrían incluso correr, lo que facilitaría sus despegues. Para ello no hay ningún inconveniente anatómico: *Pteranodon*, un pterosaurio típico, tenía una envergadura de cinco metros y patas de 55 centímetros, una relación (9:1) muy parecida a la de grandes aves actuales, como el albatros gigante (3,20 metros y 40 centímetros, relación 8:1).

Sesenta millones de años después de las primeras incursiones aéreas de los vertebrados, en una costa selvática bordeada de arrecifes, al norte del mar de Tethys, en la zona que ahora es Alemania, había lagunas poco comunicadas con el mar abierto, y por lo tanto de aguas pobres en oxígeno. Aunque había poca vida en ellas, las tormentas ocasionales arrastraban a su fondo restos muertos que, precisamente por la anoxia, no se descomponían de inmediato. Ahora esas antiguas lagunas constituyen el famoso yacimiento fosilífero de Solnhofen, formado por unas calizas de grano especialmente fino. Por suerte para los paleontólogos del siglo XIX, esas calizas («litográficas») resultaron excelentes para su uso en imprenta, por lo que se establecieron en Solnhofen unas canteras muy activas. En 1860, cuando toda la Europa culta estaba enzarzada en el debate levantado el año anterior por Charles Darwin con

su *Origen de las especies*, los obreros encontraron, entre las calizas depositadas 150 millones de años antes, una solitaria pluma fósil. Pero al año siguiente lo que se halló fue el esqueleto íntegro de un animal del tamaño de una paloma y extrañas características: tenía alas con plumas como las de un ave, pero estaban acompañadas de una cola ósea, y su pico estaba lleno de dientes.

Ahora bien, uno de los puntos débiles del recién nacido evolucionismo era la ausencia en el registro fósil de formas de tránsito entre los distintos grupos de fósiles, los llamados «eslabones perdidos», que Darwin confiaba en que se encontrasen en el futuro. Así que *Archaeopteryx*⁴⁰ *lithographica*, como se denominó el fósil, se convirtió en la sensación del momento. Entra de nuevo en nuestra escena Richard Owen, el «inventor» de los dinosaurios, que por entonces había pasado a dirigir el Museo Británico de Historia Natural. A pesar de ser un antievolucionista convencido, Owen pujó por el fósil y lo adquirió para el Museo (donde aún se puede admirar). Allí fue estudiado por Thomas Henry Huxley, el paladín de Darwin, quien llegó a la conclusión de que era un dinosaurio evolucionado, y un excelente ejemplo de que todas las aves provenían de los dinosaurios. En 1870 intentó demostrar su hipótesis ante la Sociedad Geológica de Londres, presentando una lista de 35 rasgos que la extremidad trasera del avestruz compartía con la de *Megalosaurus*, un gran carnosaurio jurásico. Pero Huxley fracasó en su intento: ¿no se deberían los parecidos a la adaptación a la carrera de un ave que ya no podía volar? Además, ¿cómo podrían ser los dinosaurios, animales enormes que no podían volar, antepasados de las aves?

⁴⁰ Que se pronuncia «arqueópterix».

Solnhofen siguió produciendo fósiles, entre ellos otros cinco *Archaeopteryx*; pero también un esqueleto del más pequeño de los dinosaurios (60 centímetros) bautizado como *Compsognathus*, del grupo de los celurosaurios. Cuando se compararon los dos fósiles, se tuvo la certeza de que por fin se había hallado el eslabón perdido: sus extremidades eran idénticas. *Archaeopteryx*, y con él las aves, habían surgido de la especialización radical de un celurosaurio que se empeñó en varias transformaciones; entre ellas, utilizar la queratina no para fabricar escamas sino otro tipo de recubrimiento cutáneo más ligero y más eficaz como aislante térmico. En otras palabras, en transformar sus escamas en plumas. Las ventajas de escapar a los depredadores terrestres eran inmensas, y por tanto también lo era la presión evolutiva a favor del nuevo avance. Quizá por eso estas primeras plumas son ya completamente modernas e indistinguibles de las de las aves voladoras. Esto disipa las dudas de que realmente esta primera ave pudiese volar, aunque probablemente usaba sus garras para trepar a los árboles y, como los pterosaurios, alternaba el vuelo auténtico con el planeo.

En 1970, justo un siglo después de que T. H. Huxley fracasara en su intento de convencer a sus colegas, John Ostrom, un paleontólogo de la Universidad de Yale, revivía la vieja idea de que las aves proceden de los dinosaurios. Había estado estudiando la anatomía de otro celurosaurio, un temible carnicero llamado *Deinonychus* (literalmente, «garra terrible») caracterizado por tener una especie de guadaña en lugar del segundo dedo de sus extremidades traseras, y había encontrado enormes semejanzas entre él y las primeras aves. No deja de ser curioso que un grupo zoológico, el de los pájaros, que despierta nuestra simpatía instintiva (salvo en una histó-

rica película de Alfred Hitchcock, nunca han sido nuestros enemigos) provenga de algunos de los carnívoros más inquietantes que evolucionaron hacia el final del tiempo de los dinosaurios.

En su libro *Los dragones del Edén*, y al estudiar el problema del surgimiento de la inteligencia, Carl Sagan presenta un esquema (Figura 16) en el que se relacionan masa cerebral y masa corporal para algunos dinosaurios y también para animales actuales, incluido el hombre. Aparte de confirmarse la escasa brillantez de *Stegosaurus*, el dato más destacado del gráfico es la proyección de un celurosauro en una zona intermedia entre el lobo y el chimpancé: es decir, en el área reservada para mamíferos. ¿Significa esto que algunos de los últimos dinosaurios estaban a punto de alcanzar un nivel de inteligencia superior? Ésta es una pregunta a la que nunca podremos responder, pero que abona el campo de la contingencia que con tanto ardor defienden Stephen Jay Gould y otros científicos. Los celurosauros no parecen haber tenido malos genes; quizá sí mala suerte.

EL ÁRBOL DEL PAN EN GROENLANDIA

En 1883, el botánico alemán Otto Heer participó en una expedición a la costa oeste de Groenlandia. Allí, a una latitud de 65° Norte y en un ambiente glacial, encontró sedimentos depositados en las márgenes de un río que corrió hace cien millones de años; y, en el interior de los sedimentos, abundantes restos de plantas fósiles. Una de ellas tenía una hoja tan característica que el asombrado científico tuvo que admitirlo: *Artocarpus incisa*, el «árbol del pan» de los trópicos de Asia y Oceanía, había vivido

en Groenlandia durante el Cretácico Inicial. Éste fue el principio de una serie de hallazgos que delatan un clima excepcionalmente cálido durante todo el Jurásico, el Cretácico y el principio del Cenozoico, y especialmente entre 110 y 70 millones de años.

La lista de pruebas es larga, e incluye bosques de edad cretácica en la isla Alexander (Antártida, 70° Sur) y otros de la misma época en la isla Ellesmere (Canadá, 80° Norte); en las islas Spitzbergen (Ártico, 77° Norte) se han hallado dinosaurios variados: *Stegosaurus* en los estratos triásicos y hadrosaurios y carnosaurios en los cretácicos; y, también en Ellesmere, tres grupos de reptiles (entre ellos cocodrilos y grandes ofidios, como un antepasado de la boa) que no se encuentran hoy más que en el cinturón tropical, es decir entre 25° Norte y 25° Sur. Es importante subrayar que esta anomalía paleoclimática no está causada por la distinta latitud de los continentes en el Mesozoico, puesto que la mayoría de las áreas citadas ya estaban aproximadamente en su latitud actual; en todo caso, incluso corrigiendo las latitudes para la geografía del Cretácico, queda claro que esta distribución de fauna y flora sería inviable con un clima como el actual. En otras palabras: durante buena parte del Mesozoico y el principio del Cenozoico, el planeta Tierra fue como un gran invernadero.

Otro dato que refuerza esta conclusión es la gran cantidad de rocas negras (ricas en materia orgánica) depositadas en el mar profundo en el Cretácico. Apparentemente no había bacterias que descompusieran la materia orgánica, lo que significa que apenas había oxígeno (sin el cual tampoco pueden vivir la mayoría de las bacterias) en los fondos marinos; una situación bien distinta de la actual, ya que hoy la corriente de fondo antártica, for-

mada por agua muy fría (y por ello densa) que se origina en las orillas de este continente, se encarga de oxigenar los fondos de todos los océanos. Esos fangos oscuros significan que en el Cretácico la Antártida tenía un clima muy suave: se ha calculado que el mar podría estar a unos aceptables 10-15 °C. Por lo tanto, el agua circundante no se enfriaría y no se formaría una corriente de fondo, con lo que el agua profunda de todos los océanos sería templada y pobre en oxígeno. En efecto, el agua del fondo del Atlántico en esta época estaba a unos 16-17 °C, frente a los 1,5 °C actuales: el invernadero alcanzaba hasta los lugares más fríos y hostiles para la vida, como son las profundidades abisales.

Frente a estos datos que apoyan la idea de unos polos de clima tropical, otros argumentan a favor de un clima polar solamente templado, o incluso estacionalmente frío: por ejemplo, la fauna australiana de dinosaurios cretácicos, que vivieron a unos 75° Sur, está formada casi exclusivamente por ejemplares enanos (por ejemplo, *Allosaurus*, un carnosaurio de cuatro metros, en vez de los diez normales), un rasgo típico de climas fríos. Hay también datos de temperaturas en latitudes elevadas que encajan mejor en un clima fresco; probablemente el interior de los continentes era frío en invierno. Lo que nadie discute es la ausencia de casquetes glaciares a lo largo de todo el Mesozoico. Pero, suponiendo que los polos disfrutasen de un clima tropical, un hecho a tener en cuenta a la hora de explicar la distribución de fauna y flora es la irregular insolación de las latitudes altas. Muchos de los animales y vegetales citados vivían dentro de los círculos polares, y por lo tanto tendrían que ingeniárselas para soportar varios meses de oscuridad continuada. Se ha propuesto que los dinosaurios podrían haber ad-

quirido hábitos migratorios, como algunos rumiantes actuales de latitudes altas, pero la propuesta ofrece pocas garantías y demasiadas dificultades.

¿Cómo puede averiguarse si el agua estaba buena para un baño en la Antártida? Recurriendo a los isótopos, igual que cuando rastreamos las huellas de la vida en los sedimentos. Los organismos marinos que construyen conchas de carbonato cálcico (CaCO_3), como son la mayoría de los moluscos, incorporan tanto el isótopo ligero de oxígeno, de masa 16, como el pesado, de masa 18. Lo hacen, sin embargo, en proporciones que varían con la temperatura del agua, y aquí tenemos nuestro termómetro. Supongamos una época fría, con casquetes glaciares. Los continentes estarán mucho más fríos que el mar, que es siempre un gran depósito de energía térmica. Por tanto, habrá un fuerte contraste de temperaturas entre tierra y agua, lo que provocará una elevada evaporación. El oxígeno ligero se evapora, como es lógico, más fácilmente que el pesado, por lo cual las precipitaciones, que hacen engrosar los casquetes de hielo, estarán enriquecidas en ^{16}O . Se genera así un gran almacén de oxígeno ligero en los continentes, con lo que el agua oceánica (y por lo tanto también las conchas marinas, que están en equilibrio con ella) queda enriquecida en ^{18}O . En resumen, a más oxígeno pesado, clima más frío, y viceversa. Ésta es la teoría. En la práctica, la fiabilidad de los datos está limitada por la alteración química de los fósiles; además, el aragonito y la calcita (dos minerales de carbonato cálcico presentes en los fósiles) suelen dar resultados discordantes, y las ecuaciones que llevan a las paleotemperaturas incluyen constantes de valor discutido, por lo que los isótopos de oxígeno constituyen sólo una orientación general sobre el clima del pasado.

Pero, puesto que está basado en datos tan diversos, nadie discute el invernadero cretácico. Es muy probable además que este clima excepcional fuese la causa de los grandes cambios que se produjeron en la vegetación a lo largo del Mesozoico, y especialmente en el Cretácico: hasta hace unos 120 millones de años, los bosques eran sólo de coníferas, los antecesores de los actuales pinos y abetos. A partir de esa época comienzan a proliferar muy rápidamente las plantas con flores (angiospermas). Sus ventajas son evidentes: la semilla no está desnuda sino oculta en el interior de la flor, al abrigo de la desecación, de infecciones y de pájaros demasiado curiosos. Al mismo tiempo, las hierbas comienzan a hacer la competencia a los helechos, hasta entonces la vegetación baja más típica. La radiación fue especialmente desenfrenada entre los 90 y los 70 millones de años: surgieron cincuenta familias nuevas de angiospermas, y la perspectiva atestigua la eficacia de la innovación: hoy existen 550 especies de coníferas frente a unas 250.000 de plantas con flores.

Mucho se ha especulado sobre las causas de este «gran verano» de finales del Mesozoico y principios del Cenozoico. Las principales ideas son:

- Un aumento de la energía radiada por el Sol.
- Un cambio en la posición del eje de rotación terrestre, con oblicuidad cercana a cero grados durante el periodo de invernadero.
- La situación de los continentes, que favorecería la distribución global de calor por las corrientes oceánicas.
- Una aceleración de la actividad interna de la Tierra: más vulcanismo supondría más cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera, lo que resultaría en un efecto invernadero más efectivo.

El principal inconveniente de la primera hipótesis es que, si la radiación solar hubiese sido mayor, el ecuador tendría que haber estado mucho más caliente que los polos. Sin embargo, los datos de isótopos de oxígeno apuntan hacia temperaturas homogéneas en todo el planeta, al menos durante el clímax térmico. Por otra parte, se desconocen los mecanismos por los cuales el Sol podría cambiar tan bruscamente de régimen energético. Algo parecido sucede con la segunda idea: como vimos en el capítulo segundo, los cambios bruscos en la oblicuidad del eje de giro de la Tierra que son permitidos por la física del caos estarían (en teoría) inhibidos por la acción estabilizadora de la Luna. No obstante, cambios de 15 a 20°, quizá desencadenados por avalanchas en el manto, se han propuesto recientemente para distintos momentos del Cretácico Final, aunque los datos no convencen a la mayoría de los geofísicos. Además, el problema paleoclimático no quedaría resuelto aunque la Tierra cambiase su inclinación: incluso con oblicuidad cero (que eliminaría las largas noches polares), un sol rasante en los polos llevaría más bien a un invierno perpetuo en ambos, justo lo contrario de lo que se observa.

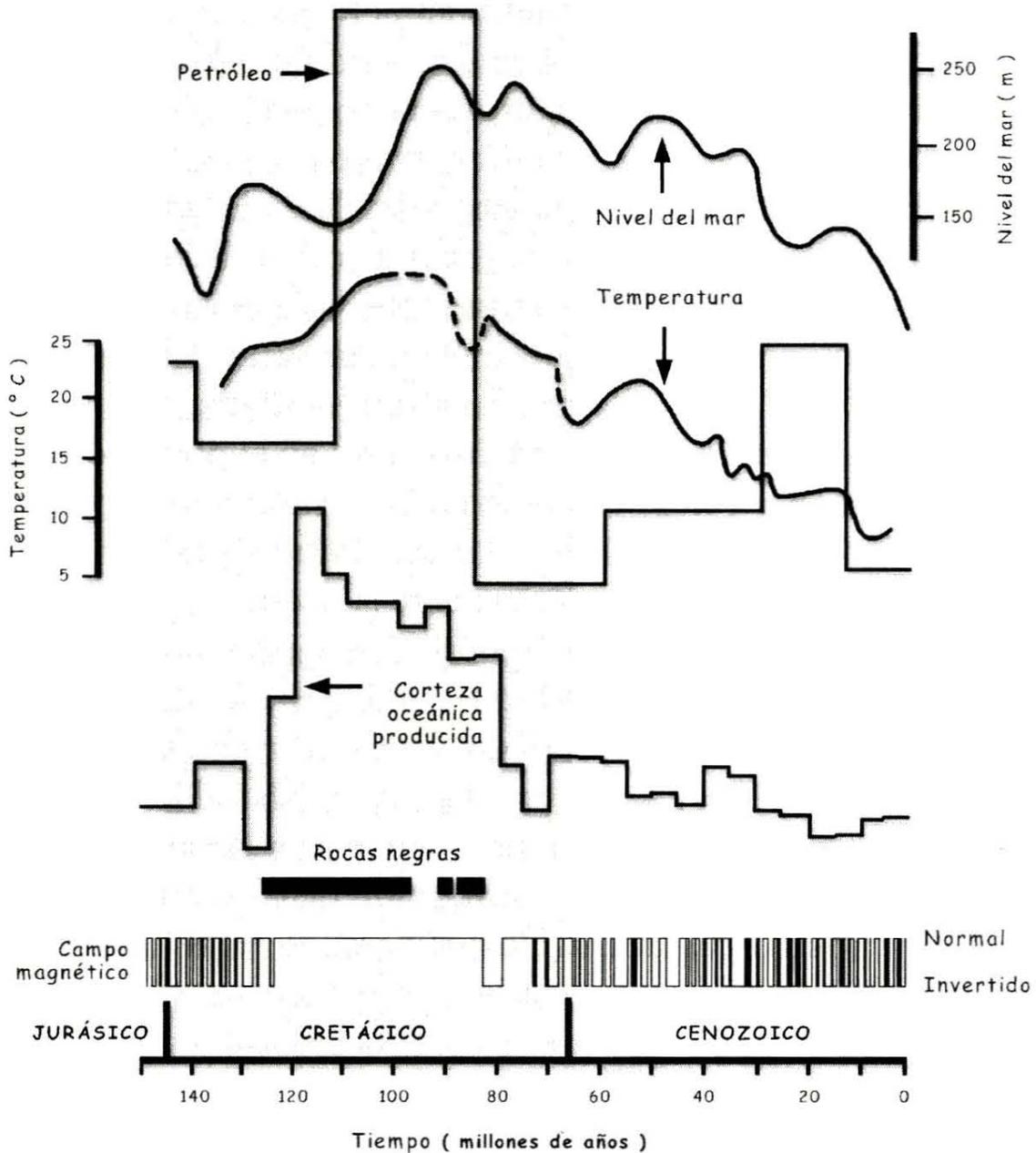
Desde que se aceptó la idea de la movilidad continental, la distribución de continentes y océanos ha sido una de las hipótesis clásicas para explicar el clima del Cretácico. En esa época (ver la Figura 11h), el Atlántico central se había abierto lo suficiente como para permitir una circulación oceánica completa a lo largo del ecuador, un sistema perfecto para distribuir por todo el planeta el calor de la zona intertropical. La mayoría de los yacimientos gigantes de petróleo (golfo Pérsico, Libia, Maracaibo, golfo de México), que se formaron en el Cretácico, se sitúan sistemáticamente a lo largo de este corredor marino, que debía bullir de plancton. Pero existen

al menos dos argumentos contra esta hipótesis: el primero es que, sobre todo en el Cretácico Inicial, el Atlántico norte aún no se había abierto, con lo cual el calentamiento del océano Ártico solamente podría haberse producido a través del Pacífico. El segundo es que, con una menor diferencia de temperaturas entre el ecuador y los polos, los vientos (y, con ellos, las corrientes oceánicas) serían más débiles. En resumen, esta hipótesis parece funcionar para explicar un clima polar fresco, pero es insuficiente para climas polares tropicales.

La posibilidad de conectar los sucesos de la superficie del planeta con su mecánica interna ha sido una idea muy frecuentada últimamente: vimos un ejemplo de este tipo de planteamientos en el capítulo segundo, al exponer la idea del ciclo del supercontinente, que pretende explicar tanto las orogenias como las glaciaciones. A principios de la década de 1990, el oceanógrafo norteamericano Roger Larson propuso que, hace 120 millones de años y por algún motivo que reconoció no saber explicar, el núcleo terrestre había experimentado un notable máximo térmico. Este calor se habría transmitido al manto, donde habría formado una gran columna ascendente de material a alta temperatura⁴¹, un enorme penacho térmico que, en su trayecto, habría cedido calor al manto, disminuyendo su viscosidad y por lo tanto facilitando su circulación. Esta agitación del manto se habría transmitido a la litosfera, acelerando las placas y activando la creación de corteza oceánica en las dorsales. Al llegar a la superficie (en el centro del Pacífico), el material caliente habría provocado una larga época de intenso vulcanismo submarino.

⁴¹ Una *superplume*, término traducido incorrectamente por «superpluma» (ver nota número 14).

EL PASADO RECIENTE



17. Algunos datos significativos de la Tierra en el Cretácico y el Cenozoico. La abundancia de petróleo y rocas negras, las altas temperaturas y nivel del mar, y la elevada producción de corteza oceánica coinciden, durante el primero de estos periodos, con un intervalo en el que el campo magnético no cambió de polaridad. Se sospecha que este último hecho es la causa de los otros, pero la relación no ha podido probarse. Los datos de nivel del mar están referidos al nivel actual. Simplificado de Larson, *Geology*, 19 (1991).

Algunos elementos contenidos en el magma, como azufre, nitrógeno o fósforo, que son nutrientes biológicos, habrían pasado al océano, provocando una explosión de plancton; y el dióxido de carbono y otros gases de invernadero emitidos se habrían concentrado en la atmósfera, cambiando el clima. En suma, un impecable efecto dominó que serviría para explicar procesos sólo en apariencia inconexos, una pulsación gigantesca que surge del mismo núcleo del planeta y llegaría en forma de clima benigno hasta los cocodrilos que tomaban el sol en el polo Norte (Figura 17): tan elegante como un buen silogismo, probablemente la teoría de Roger Larson es la más bella propuesta realizada hasta la fecha sobre la Tierra.

«Es como si escribiese poesía épica, pero quizá está descubriendo relaciones fundamentales», ha dicho un colega. No todos están de acuerdo con su hipótesis, pero algunos datos parecen encajar: para explicar el invernadero, los paleoclimatólogos necesitan que la atmósfera del Cretácico tuviese una concentración de CO_2 entre dos y doce veces la actual. Cálculos basados en relaciones isotópicas de sedimentos marinos cretácicos han obtenido precisamente una concentración entre cuatro y doce veces la actual. Asimismo, múltiples indicios de corrosión en estos mismos sedimentos podrían indicar abundancia de ácido carbónico, que se forma a partir del CO_2 . Sin embargo, queda por explicar el desencadenante. Kent Condie, el hombre de las avalanchas en el manto, piensa que una de ellas, de entidad modesta, pudo ser la causa. Su idea es que quizá esta inyección de material frío alteró la pauta circulatoria del núcleo: como puede verse en la Figura 17, durante 35 millones de años (entre 118 y 83 m.a.) dejó de haber inversiones de polaridad. El problema es que no sabemos por qué hay inversiones, ni menos

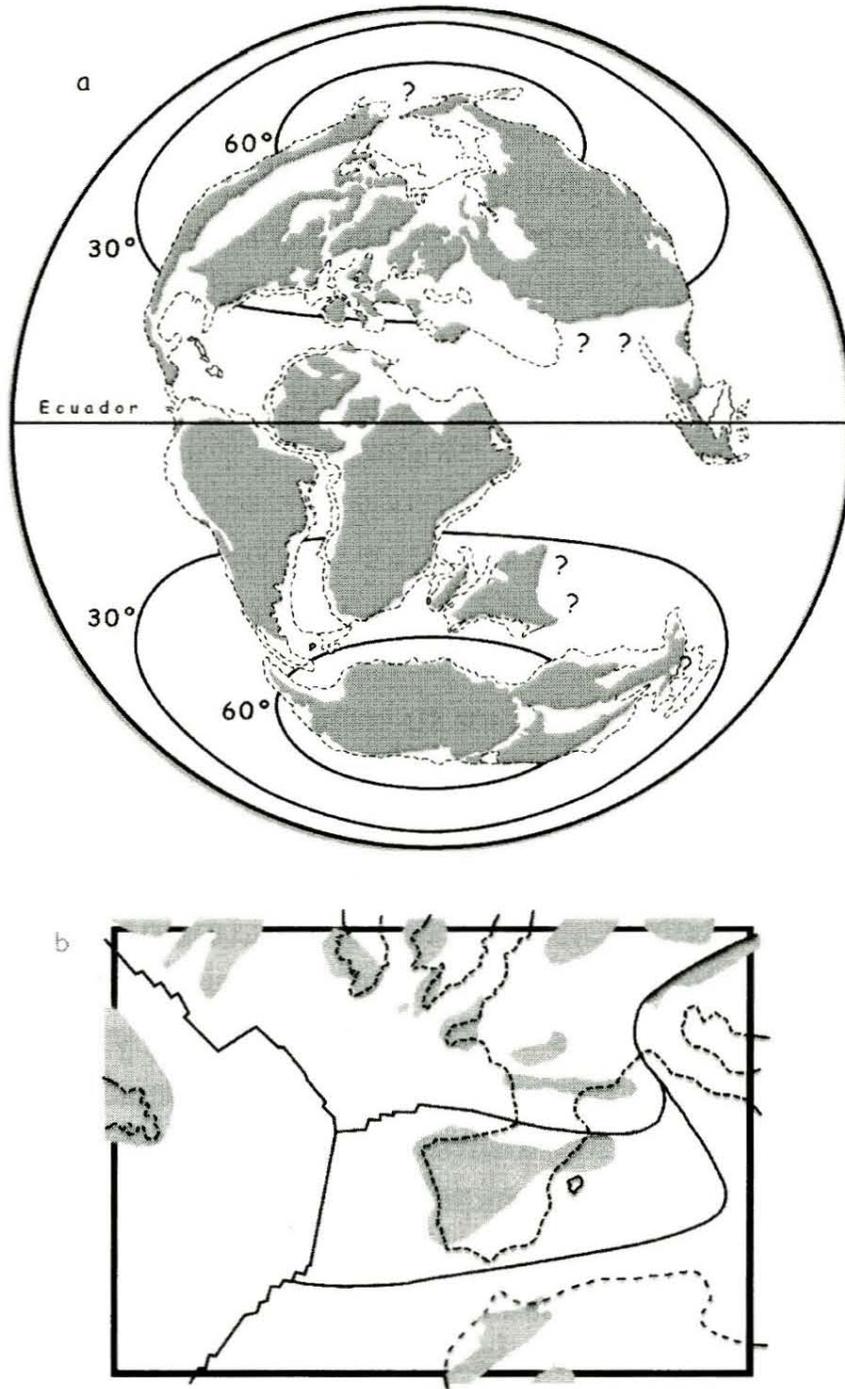
aún por qué deja de haberlas: aún no hemos aprendido a hablar el magnético lenguaje del núcleo de la Tierra.

En resumen, podría ser que el invernadero del final del Mesozoico, al igual que la Tierra Blanca del final del Proterozoico, tuviese su origen en las turbulencias del interior del planeta. Por el momento, ambas hipótesis son sólo respuestas sugestivas pero claramente incompletas. El trabajo de descifrado de los climas extremos de la Tierra no ha hecho más que empezar.

INUNDACIÓN

Como una persona que, en su tercera edad, volviese a tener aspecto infantil, a mediados del Cretácico la Tierra volvió a parecerse al planeta marino del Arcaico (Figura 18). El nivel de los océanos subió más de 200 metros, y casi la mitad de la superficie de los continentes quedó cubierta por mares someros: Norteamérica, África y Australia fueron partidas en dos por las aguas, y Europa se convirtió en un archipiélago. Esta curiosa situación se prolongó durante treinta millones de años. Hoy, en algunas zonas de esos continentes se conservan grandes masas de sales, que precipitaron cuando el agua comenzó a retirarse; y buena parte de los fósiles que encontramos en cualquier excursión pertenecen a rocas marinas depositadas en los continentes durante la inundación. La geografía de la Tierra sufrió un vuelco brusco: en parte por la deriva continental y en parte por esta transgresión, la mayor de la historia geológica, la Pangea casi intacta del Jurásico se transformó en una docena de continentes-islas.

Sin duda, la vida tuvo que adaptarse a esta nueva situación. Al menos cinco familias de mamíferos surgieron



18. La inundación del Cretácico. a) El mundo hace cien millones de años: un planeta oceánico. b) La zona de la península Ibérica hace 80 millones de años. Las líneas gruesas son los bordes de las placas litosféricas: Iberia formaba una pequeña placa independiente.

en esta época, lo que indicaba muy poco respeto por los lagartos terribles. En un mundo terrestre tan fragmentado, es evidente que los grandes depredadores no podían llegar a todas partes. Una prueba espectacular de ello nos la proporciona *Dravidosaurus*, un miembro de la familia de los estegosaurios que vivió tranquilo hasta el final del Cretácico en la India (su nombre evoca las lenguas del sur de este país) mientras ésta navegaba como una balsa a través del recién abierto océano Índico, y cuando en el resto de los continentes todos sus primos ya habían fallecido en circunstancias sospechosas a lo largo del Jurásico. Parece ser que, por algún motivo, ningún gran depredador abordó esta balsa en particular, lo cual nos devuelve al debate sobre los motores de la evolución. Puesto que, como vimos en la Figura 16, los estegosaurios no se distinguían por sus cualidades intelectuales, la supervivencia de alguno de ellos podría ser, como en este caso, algo puramente casual. David Raup diría que, aunque no tenía muy buenos genes, *Dravidosaurus* tuvo bastante suerte, que le supuso una supervivencia adicional de 80 millones de años.

Sin un marco teórico suficiente, la generación de geólogos anteriores al movilismo nunca pudo explicar esta enorme variación del nivel del mar, sobre todo teniendo en cuenta que se producía en un tiempo sin glaciaciones. Hoy sabemos que, igual que en el caso del invernadero cretácico, hay que culpar a los movimientos internos de la Tierra de esta geografía anómala. Estimuladas por el hiperactivo manto, las dorsales, las fábricas de corteza oceánica, estuvieron funcionando a pleno rendimiento entre 120 y 80 millones de años (como en la Figura 17). Esto, sumado al vulcanismo submarino del penacho térmico, supuso una gran cantidad de nuevo material volcánico en el fondo marino. Ante esta situación, los océanos

cretácicos se desbordaron sobre los continentes igual que una bañera llena se desbordaría si arrojásemos en ella unos cuantos pedruscos. Un ejemplo más de interacciones sorprendentes entre los sistemas terrestres.

¡CATÁSTROFE!

Corría el año 1830 cuando Charles Lyell, un abogado escocés, comenzó a publicar su obra en tres tomos *Principios de Geología*. El libro conoció un éxito inmediato y duradero: hubo once ediciones en vida del autor (cuidadosamente espaciadas, decían los maliciosos, para asegurar el negocio) que le valieron a Lyell el título de fundador de la geología moderna. En el diario de su viaje alrededor del mundo, Darwin cuenta cómo buscaba afanosamente los tomos que le faltaban en las librerías inglesas de Buenos Aires. Gran argumentador, como buen abogado, Lyell se reconocía deudor de Hutton, sobre todo en su filosofía gradualista: no hay sobresaltos en la Tierra, que funciona como una máquina bien engrasada. Resulta interesante ahora destacar una de las ideas contenidas en una edición de los *Principios*, escrita en pleno entusiasmo victoriano hacia los dinosaurios, y que hoy nos parece peregrina: según Lyell, la vida en la Tierra es un reflejo perfecto del clima, de forma que si, por ejemplo, volviese el invernadero cretácico, volverían los dinosaurios. Darwin aún no había hecho pública su teoría de la evolución, en la que cada periodo geológico tenía su fauna y flora específicas, pero Lyell la husmeaba en el ambiente, y la consideraba enemiga de sus propias ideas sobre un planeta que no cambiaba.

Al final de su vida científica, el abogado escocés tuvo que rendirse a la evidencia de que la vida en la Tierra

había evolucionado. Incluso se dedicó a estudiar los fósiles de los terrenos más recientes, los cenozoicos, e ideó un método estadístico para averiguar su edad. El sistema estaba basado en una observación sencilla y eficaz: cuanto más antiguo un terreno, más diferentes eran los fósiles que contenía comparados con la fauna actual. Remontándose en el tiempo cenozoico, concluyó que en el último periodo de esta era había un 90% de especies comunes con las actuales; en el anterior, un 50%; en el anterior a éste, como un 20%, y en el que formaba la base del Cenozoico, tan sólo un 3%. Sin embargo, el método naufragó al llegar al Mesozoico: las faunas de éste se parecían entre sí, pero no tenían ni un solo elemento común con las cenozoicas. Ello a pesar de que entre las capas más antiguas del Cenozoico y las más recientes del Mesozoico, descubiertas hacía poco en los Países Bajos, cerca de la ciudad de Maastricht, no parecía haber movimientos tectónicos. Aparentemente, Mesozoico y Cenozoico eran una sola cosa, pero la vida había cambiado por completo al pasar de una a otra era. Para Lyell, la única solución fue imaginar una fuerte erosión que hubiese eliminado los estratos que habían contenido los fósiles de tránsito. La redacción de esta idea, sin embargo, indica que el propio autor no estaba demasiado convencido de ella:

«Allí aparece, pues, un abismo mayor entre los restos orgánicos de las capas del Eoceno [el Cenozoico más antiguo] y las de Maastricht, que el que existe entre las del Eoceno y los estratos recientes; pues hay algunas conchas recientes que vivieron en las formaciones del Eoceno, mientras que no hay fósiles eocénicos en el grupo Secundario [Mesozoico] más reciente. No es improbable que la gran diferencia en los restos fósiles indique que entre ellos ha transcurrido un intervalo importante de tiempo».

Ahora sugeriremos a nuestro viajero del tiempo un pequeño salto, algo casi imperceptible para alguien acostumbrado a moverse a lo largo de los eones: sólo desde el siglo XIX hasta 1977. Un tiempo corto que sin embargo ha visto cambios radicales. Los científicos que estudian la Tierra ya no trabajan aislados en sus gabinetes, sino en equipos multidisciplinarios que viajan por todo el mundo. Walter Alvarez, un geólogo de la Universidad de Berkeley con antepasados asturianos, estaba integrado en un grupo internacional que estudia precisamente los estratos que dejaron perplejo a Charles Lyell. Su objetivo era datar con precisión cada estrato en el tránsito Mesozoico-Cenozoico, para averiguar la velocidad de formación de las rocas sedimentarias en un mar situado donde ahora están los montes Apeninos, en Italia. El padre de Walter, Luis (un Nobel de física que había trabajado en bombas nucleares) le sugirió medir la cantidad de iridio, un elemento relativamente fácil de analizar, en los sedimentos. Casi todo el iridio (un metal precioso parecido al platino) que hay en la Tierra está enterrado en el núcleo; el muy escaso que hay en la superficie proviene de polvo meteorítico; como se supone que éste cae de manera constante, cuanto más iridio contenga un estrato, más tiempo habrá tardado en depositarse.

Walter estuvo de acuerdo, y envió muestras de la zona a dos químicos de Berkeley. Cuando los Alvarez vieron los resultados, quedaron sorprendidos porque la concentración de iridio, que era normal tanto en los estratos del Mesozoico como en los del Cenozoico (ambos formados por caliza) saltaba a un máximo, cien veces mayor, en una capa de arcilla de un centímetro de grosor situada justo en el límite. Era evidente que la lluvia normal de polvo cósmico no podía ser la culpable de la acumulación de tanto

iridio, pero la alternativa era demasiado escandalosa, y durante un año entero el equipo estuvo discutiendo, sugiriendo y rechazando ideas. O bien la sedimentación había cesado casi por completo durante largo tiempo, en el transcurso del cual el antiguo mar sólo había recibido *polvo de estrellas* (que, al no diluirse con sedimentos normales, aparecía superconcentrado)... o bien una enorme cantidad de material meteorítico había caído en un instante sobre la zona. Por fin, en 1979, se decidieron por la única solución que había pasado el filtro. En junio de 1980, la revista *Science* publicaba la propuesta de un equipo compuesto por dos químicos, un físico y un geólogo de California, según la cual un asteroide del tamaño de una montaña había chocado contra la Tierra, causando, mediante un complejo efecto dominó, la extinción masiva del final del Mesozoico. La gran controversia científica sobre la Tierra que dominaría el final del siglo XX quedaba abierta.

LAS HUELLAS

El revuelo que se formó puede calibrarse teniendo en cuenta los antecedentes: esta extinción en particular había sido detectada (aunque a regañadientes) por el padre mismo de la geología moderna, de manera que los geólogos, y más específicamente los paleontólogos, llevaban siglo y medio cavilando sobre ella. Según un recuento reciente, habían propuesto más de ochenta hipótesis para explicarla. Ahora, un equipo en el que no había ningún paleontólogo proponía, sin estudiar un solo fósil, una solución que no tenía nada que ver con la geología. Todos los recelos que David Raup enumeraba cuando discutía las extinciones se activaron de forma automática. Citando de nuevo a Lyell:

«Oímos hablar del súbito aniquilamiento de linajes completos de animales y plantas, y otras hipótesis en las que vemos revivir el antiguo espíritu de la especulación [...] En nuestro intento de desentrañar estas complejas cuestiones, adoptaremos un enfoque totalmente distinto, restringiéndonos a lo conocido o a lo posible».

El capítulo anterior acababa con la cita de un proverbio que se atribuye a Goethe: solamente podemos ver lo que conocemos. Y ésta fue la principal defensa del grupo de los Alvarez: los paleontólogos no eran culpables de no haber visto las huellas de un impacto asteroidal porque no estaban entrenados para distinguirlas. En realidad, nadie (ni geólogos, ni físicos, ni químicos, aunque quizá sí un grupo formado por todos ellos) estaba entrenado para distinguir impactos asteroidales que habían tenido lugar hacía decenas de millones de años, un tiempo suficiente para que la erosión y la sedimentación destruyesen el cráter. De forma que los Alvarez comenzaban proponiendo un ejercicio de aritmética, y otro de fe. El primero era algo así como la cuenta de la vieja, aunque extrapolada a la era espacial: como habían analizado una cantidad de iridio equivalente a 60-100 nanogramos (milmillonésimas de gramo) de iridio por centímetro cuadrado, la superficie total de la Tierra tuvo que recibir de 300.000 a 500.000 toneladas de iridio. Suponiendo un asteroide de densidad y concentración de iridio típicas (4 g/cm^3 y $0,1 \text{ g/Tm}$, respectivamente), éste debería tener unos diez kilómetros de diámetro. A continuación venía el ejercicio de fe: esta montaña de materia planetaria chocando contra la Tierra a unos 15-20 km/s debería producir un cráter de entre 180 y 200 kilómetros de diámetro, es decir, el mayor del planeta (la famosa estructura de Vredefort, cuya discusión comentamos en el capítulo segundo, sólo

alcanza los 140). En 65 millones de años, el cráter podría haber subducido, o haber sido cubierto de sedimentos. Pero existir, había existido, aunque no lo viésemos.

Recordemos que (como vimos en el capítulo primero) al atravesar la atmósfera, un cuerpo tan grande crea una especie de túnel en el aire. En el impacto, el asteroide y la zona del blanco se volatilizan, se funden, se fragmentan. Una parte de los gases y partículas fundidas y sólidas generadas aprovecha el agujero en la atmósfera para escapar a la estratosfera y colocarse en órbitas estables; la mayoría del material, sin embargo, es proyectada en trayectorias balísticas y caerá como una lluvia de misiles ardientes por todo el planeta⁴²; por último, el material expulsado del borde del cráter avanzará a ras de suelo a lo largo de centenares de kilómetros como un telón de roca triturada. En caso de que el impacto hubiese sido sobre el mar, se generarían tsunamis (olas formadas por una conmoción oceánica que arrasan las costas con muros de agua) de varios kilómetros de altura. El mayor efecto ambiental lo producirían los gases y el polvo que llegasen a la estratosfera, donde permanecerían durante meses opacando la luz solar. Algunos modelos meteorológicos preveían una oscuridad total durante uno a dos meses, y luz insuficiente para la fotosíntesis a lo largo de un año, lo que provocaría una caída de las temperaturas de unos 20 °C durante meses. Las consecuencias biológicas serían importantes: tanto las angiospermas como el fitoplancton entrarían en crisis, arrastrando a los animales herbí-

⁴² La diferencia con los meteoritos (que, como se explicó en el capítulo primero, llegan fríos a la Tierra) es que, mientras que aquéllos atraviesan la atmósfera prácticamente en vertical, la trayectoria balística de los eyecta les hace viajar mucho más tiempo a través de aire denso, lo que eleva su temperatura, como le sucede al transbordador espacial.

voros y al zooplancton y, en el siguiente escalón de la cadena alimentaria, a los carnívoros terrestres y marinos.

Estas osadas profecías desataron una fiebre investigadora como no se había conocido en las ciencias de la Tierra desde los tiempos de la primera tectónica de placas. Al cabo de veinte años, la polémica aún no se ha apagado; pero al abrigo de ella, el límite entre Mesozoico y Cenozoico se ha convertido en el momento mejor estudiado de la historia del planeta. Las primeras exploraciones resultaron muy esperanzadoras para el equipo de los Alvarez, ya que pronto se confirmó que el nivel rico en iridio en el tránsito Mesozoico-Cenozoico era universal (hoy existen cerca de 200 máximos de iridio analizados) y, como en Italia, estaba universalmente empobrecido en carbonatos y formado por arcilla concentrada (de ahí el apelativo de «arcilla del límite»). Pero el estrato-límite era una caja de sorpresas: acompañando al iridio se hallaron esférulas de 1 mm de diámetro semejantes a las «gotas» de vidrio producidas en los impactos y denominadas tectitas. Algunas contenían minerales ricos en níquel que sólo se podían formar en el tránsito atmosférico de un meteorito. Acompañándolos, había granos de cuarzo con microfracturas, que denotan presiones por encima de 90.000 atmósferas, y (ocasionalmente) también una forma de cuarzo de muy alta presión, la stishovita, que requiere presiones superiores a 220.000 atmósferas; ni unos ni otros se han encontrado nunca salvo en cráteres de impacto. Por último, mezclada con la arcilla se encontró entre un 1 y un 2% de materia carbonosa, claramente terrestre, que se interpretó como hollín procedente de incendios. La extrapolación de la cantidad de hollín llevó a grandes cifras de bosques quemados, entre un 10 y un 25% de la superficie del planeta. Glenn Izett,

un investigador del Servicio Geológico de Estados Unidos, abrumado por la acumulación de datos extraños en un espacio tan reducido, tomó la costumbre de llamar «nivel mágico» al estrato del límite. Sus reflexiones personales reflejan la excitación, un poco *religiosa*, de aquellos años: «Al principio yo era un escéptico. Lo que me convenció fue la aparición repentina de todos aquellos minerales fracturados, justo en el límite. En el estrato mismo, ves por todas partes granos [de cuarzo] con esas estructuras; y, sólo uno o dos milímetros más abajo, no ves ni uno. Es algo asombroso».

Un avance puramente teórico fue la idea de que la enorme energía del impacto habría provocado la combinación con el oxígeno (es decir, la combustión) del normalmente inerte nitrógeno atmosférico. Se habrían formado así elevadas concentraciones de NO_2 y, con el agua, HNO_3 , ácido nítrico: la lluvia habría tenido $\text{pH} \sim 1$ durante una larga temporada, y este chaparrón ácido habría disuelto el plancton calcáreo que vive en los mares someros como un asesino el cadáver de su víctima. Esta catástrofe química sería la explicación de por qué en el límite la cantidad de carbonato descendía en picado. A su vez, al descomponerse, el carbonato liberaba CO_2 , que junto con el NO_2 y el vapor de agua crearon un importante efecto invernadero. Así que, tras la congelación de las tinieblas iniciales habría habido una época más larga de temperaturas muy elevadas. Una huella de la lluvia ácida podía ser el incremento de ^{87}Sr , delator de un aumento de la erosión en los continentes.

Otro de los investigadores que se involucró de lleno en esta persecución de vellocinos científicos fue Kenneth Hsü, el hombre de Strangelove. Catastrofista acérrimo, inicialmente propuso su propia hipótesis sobre la

extinción, protagonizada por un cometa del que se desprendían nubes de cianuro que envenenaba al plancton. Más tarde retiró prudentemente esta idea y tomó parte en varias campañas oceanográficas con el objetivo de confirmar en los fondos oceánicos los descubrimientos continentales. En una de ellas, en el Atlántico sur, encontró por fin lo que buscaba. Allí, la arcilla del límite era como el sueño del catastrofista más entusiasta (que es, probablemente, el propio Hsü): para empezar, un nítido máximo de iridio, seguido de un buen mínimo de carbonatos; y, como plato fuerte, un espléndido mínimo de carbono 13. Es decir, un «océano Strangelove», la huella de la mortandad en masa del plancton calcáreo.

Después de todos estos éxitos parciales, y a finales de la década de los ochenta, la situación bélica podía resumirse así: en el frente geológico, la situación era interesante para los partidarios del impacto... de no haber sido porque el cráter seguía sin aparecer. Varios candidatos (en Estados Unidos, en el océano Índico) habían sido rechazados por no dar la talla, y la cosa no pintaba muy bien, porque un cráter de 200 kilómetros no se encuentra todos los días: de hecho, hasta ese momento no se había encontrado ninguno tan grande. Una salida a este atolladero era que el cráter estuviese cubierto por el mar, y enmascarado por sedimentos; pero los cuarzos son minerales típicos de rocas continentales, como el granito. En cuanto al frente paleontológico, una gran mayoría de los especialistas rechazaba que el impacto, si es que se había producido, fuese la causa de las extinciones. En este tema, el punto clave era averiguar si la desaparición de los grupos extinguidos había sido gradual o repentina, si aquéllos estaban o no en declive durante el Cretácico Final. Pero no era fácil llegar a un acuerdo ni siquiera en esto. En el caso de los dino-

saurios, porque la fosilización de los animales terrestres es difícil, sobre todo para los de gran tamaño; y un concepto estadístico como es la abundancia relativa sólo puede apoyarse en grandes números. Lo curioso es que los paleontólogos no se ponían de acuerdo tampoco en cuanto a la buena salud de los microfósiles (que se cuentan por millones); pero en general, en los tratados de paleontología reinaba la idea de que la mayor parte de los grupos que habían perecido al final del Cretácico, dinosaurios, ammonites o foraminíferos (plancton calcáreo) estaba en decadencia. Quizá la excepción más clara era el «máximo de helechos» (*fern spike*) que se encontraba en el límite, sobre todo en sus afloramientos norteamericanos: mientras que en el último nivel cretácico la proporción de helechos a plantas con flor era de ~20%, en el límite mismo pasaba bruscamente (en milímetros de sedimento) al 99%: las angiospermas prácticamente desaparecían, para reaparecer después poco a poco.

A estas alturas de la batalla, la oposición gradualista comenzó a contraatacar. En 1983, el volcán Kilauea había entrado en erupción, arrojando lavas que contenían una cierta cantidad de iridio, un total de tres gramos; posteriormente, se detectaron también trazas del metal en los volcanes de la isla Reunión. Aunque en los dos casos la concentración era menos de una milésima parte de la existente en los meteoritos, los opuestos a la hipótesis del impacto se agarraron a ella como a un clavo ardiendo. Coincidió además con este momento la datación de los basaltos del Decán (oeste de la India), un gran volumen de rocas volcánicas emitidas en menos de un millón de años, y precisamente a caballo de la frontera entre Mesozoico y Cenozoico. Teniendo en cuenta que tanto Hawai como la Reunión como el Decán son volcanes

procedentes de puntos calientes, se propuso que el iridio que veíamos en el límite no provenía del espacio sino del núcleo terrestre (donde hunden sus raíces los puntos calientes), y en concreto de la erupción del Decán. Algunos geólogos incluso propusieron que los cuarzos con microfracturas podían formarse en erupciones volcánicas muy explosivas.

Al poco tiempo se demostró que estos ataques al «nivel mágico» carecían de fundamento. En primer lugar, por algún motivo que nadie entiende, los basaltos del Decán tienen una cantidad de iridio muy próxima a cero, de forma que, por muy voluminosos que sean, es imposible que hayan depositado 500.000 toneladas de iridio sobre la superficie del planeta. Más aún: el «nivel mágico» fue encontrado poco después en sedimentos intercalados entre los basaltos, lo que demostraba que se trataba de dos fenómenos diferenciados. Uno (el vulcanismo) comenzó casi medio millón de años antes de la crisis; el otro (la lluvia de iridio) coincide exactamente con ella. Por otra parte, los partidarios de la hipótesis volcánica no pudieron presentar un solo ejemplo claro de cuarzos con microfracturas que estuviesen asociados a erupciones. Con estos datos, uno se pregunta cómo la hipótesis volcánica ha podido ser presentada durante tanto tiempo como una alternativa válida al impacto asteroidal para explicar las características del límite. Según los catastrofistas, su único mérito ha sido el de intentar mantener la extinción en un marco clásico, es decir, terrestre y gradualista. Quizá tengan razón, ya que muy recientemente oceanógrafos norteamericanos han insistido con una hipótesis híbrida: las ondas de choque del impacto habrían desencadenado la formación de magma en las antípodas, dando lugar al vulcanismo del Decán.

Sin embargo, por muy amigo que sea uno de los volcanes, la propuesta viola una de las reglas básicas del razonamiento científico, según la cual la causa debe ser anterior al efecto, y no medio millón de años posterior.

UNA DE DETECTIVES

En 1978, un geofísico mexicano y otro norteamericano que trabajaban para Pemex (la empresa estatal mexicana de petróleos) descubrieron, mitad en tierra y mitad sumergida, pero en los dos casos cubierta por más de mil metros de sedimentos, una gran estructura circular en la costa de la península de Yucatán. En 1981 anunciaron su descubrimiento en un congreso, sugiriendo varias posibilidades de explicación, entre ellas un cráter de impacto; pero el secreto que siempre guardan las compañías petroleras sobre sus datos les impidió ser muy precisos. Sin embargo, un periodista local que escuchó la idea estaba al tanto del debate sobre la extinción de los dinosaurios, y convirtió la reseña en una gran pregunta: ¿Y si el cráter tan buscado estuviese precisamente en México? Pero la idea pareció puro sensacionalismo, y la historia se olvidó.

Diez años después, Alan Hildebrand, un geólogo de la Universidad de Arizona, llegó a Haití (sin duda un país con un excelente nivel de magia) persiguiendo precisamente niveles mágicos. Encontró que el estrato con tectitas y cuarzos de impacto no tenía uno o dos centímetros de grosor como en el resto del mundo, sino medio metro. Hildebrand concluyó que el impacto tenía que haberse producido en el área del Caribe. Alguien le habló de la gran estructura circular descubierta por Pemex, y le informó de que la empresa había hecho profundos

sondeos en la zona: quizá en los testigos (los cilindros de roca que se extraen de los sondeos) hubiese datos interesantes. Pemex no puso ningún inconveniente, salvo uno: el almacén que contenía las muestras se había incendiado, y los testigos se habían perdido. Además, en el área no se habían detectado indicios de petróleo, por lo que no volverían a hacerse sondeos. Hildebrand dio el tema por acabado y regresó a Estados Unidos. La casualidad intervino: en 1990, en otro congreso, trabó una conversación casual con el viejo periodista, que había investigado por su cuenta y sabía que, antes del incendio, se habían enviado algunas muestras a un geólogo de Nueva Orleans. Esta vez sí hubo suerte: cuando Hildebrand pudo ver las muestras, supo que había encontrado lo que todo el mundo andaba buscando hacía más de diez años. En el límite entre el Mesozoico y el Cenozoico, la roca era una brecha, es decir una mezcla caótica de fragmentos de todos los tamaños; bajo ella había una gran masa de vidrio, es decir roca fundida y enfriada rápidamente. Esta secuencia de brechas y vidrio es muy típica de los cráteres de impacto: el vidrio representa las rocas fundidas en el impacto, y las brechas el relleno de la cavidad con residuos; además, el vidrio es muy fácil de fechar. El resultado de la datación fue de $64,98 \pm 0,05$ millones de años. *Science* se apresuró a publicar el trabajo, en el que el equipo de Hildebrand anunciaba que el cráter de Chicxulub (el nombre de un pequeño pueblo de pescadores en la costa de Yucatán), con sus 180 kilómetros de diámetro, era la prueba de que una gran catástrofe había cerrado la era mesozoica.

A partir del descubrimiento de Yucatán, las investigaciones tomaron un carácter regional. Como el impacto había tenido lugar en el borde del continente, tenía

que haber producido tsunamis de varios kilómetros de altura. Pronto hubo resultados: en un gran arco de 3.000 kilómetros, desde Veracruz a Cuba, pasando por el sur de Estados Unidos (o sea, en lo que hace 65 millones de años había sido la línea de costa, Figura 19), se localizaron unos niveles muy distintos en el límite: aunque contenían el «*kit* de impacto» habitual (iridio, tectitas y



19. Puntos (triángulos) cercanos al cráter de Chicxulub (círculo) donde se han localizado sedimentos de alta energía depositados por tsunamis gigantes. La línea continua marca la situación de la costa en el momento del impacto; la de trazos, la actual.

cuarzo fracturado), no eran arcillas, sino arenas gruesas en un estrato de hasta tres metros de espesor, con abundantes restos de plantas y señales de haber sido depositadas rápidamente y por corrientes muy enérgicas. Sin embargo, estos depósitos resultaron controvertidos: para algunos sedimentólogos, no eran producto de un tsunami sino de corrientes de turbidez, los flujos densos que descienden por los taludes continentales a favor de la gravedad.

Después de años de debate, un prestigioso grupo de sedimentólogos decidió intentar resolver el tema definitivamente, con las rocas como testigos. Así que, en febrero de 1994, organizó una expedición, codirigida por un partidario del impacto y por un gradualista, a uno de los lugares representativos, en el norte de México: un duelo científico. Las rocas hablaron: las arenas habían sido depositadas por una corriente que había fluido alternativamente en sentidos opuestos. Los tsunamis arrasan la costa y luego refluyen hacia el mar; pero las corrientes de turbidez sólo pueden ir talud abajo. En una antigua playa del norte de México, el impacto ganó aquel día una batalla. El cronista de la revista *Science* comparó la excursión a la que, exactamente dos siglos antes, James Hutton y sus discípulos habían hecho a la costa escocesa para descubrir el Tiempo Profundo: en las dos, los sabuesos de la Tierra habían aprendido a entender una historia contada por las rocas mismas. Sólo que los geólogos actuales habían refinado sus sistemas de traducción, y ahora podían formular preguntas sutiles sobre direcciones de corriente y microfracturas.

Otro duelo parecido estaba teniendo lugar simultáneamente en un congreso, en Houston, Estados Unidos. Cuatro micropaleontólogos especialistas en foraminíferos

(un grupo de plancton calcáreo que casi desapareció en el Cretácico) presentaron los resultados de un experimento a ciegas: habían recibido seis muestras *sin etiqueta* de sedimentos que abarcaban el tránsito Mesozoico-Cenozoico, para que clasificasen los foraminíferos presentes en ellas. Las muestras procedían de una serie de estratos de Túnez sobre los que había habido largas discusiones: por los gradualistas, Gerta Keller (Universidad de Princeton) proponía que un tercio de los foraminíferos desaparecía antes del límite (y por tanto que la extinción del grupo era gradual), cosa que negaban los catastrofistas, representados por Jan Smit (Universidad Libre de Amsterdam). El muestreo se hizo por las primeras espadas de cada bando, bajo la estricta vigilancia del árbitro del combate, un sedimentólogo de la Universidad de Miami. Una gran expectación rodeó la presentación de los resultados, los cuales, como suele suceder en las elecciones políticas, fueron considerados triunfales por todos los contendientes. Keller subrayó el hecho de que ninguno de los cuatro especialistas hubiese encontrado todas las especies de foraminíferos en la última muestra del Cretácico, pero Smit contraatacó: incluso contando sólo las especies identificadas por al menos dos especialistas, todas llegaban al límite (Figura 20) y, por lo tanto, la extinción había sido brusca. Esto significaba, para la gran mayoría de los congresistas, que la extinción que Charles Lyell había detectado era, además de importante, súbita; también, que los trabajos individuales debían ceder paso a los equipos. «Por fin, la paleontología ha entrado en el siglo XX», dijo uno de ellos.

Por estas mismas fechas comenzaron a presentarse datos sobre otros tipos de fósiles. A principios de los años ochenta se daba como segura la extinción gradual



20. Distribución de organismos planctónicos en el Cretácico Final y el inicio del Cenozoico en El-Kef, Túnez. Cada barra (cuyo grosor es proporcional a la abundancia de fósiles) representa una especie.

de los ammonites a lo largo del Cretácico Final. Sin embargo, en 1991 llegó un desmentido: se habían encontrado al menos 22 especies (nueve en Zumaya, Guipúzcoa) de ammonites hasta el mismo nivel del límite, e incluso habían surgido especies nuevas justo antes de la extinción (que ahora, naturalmente, se interpretaba como repentina). En cuanto a los dinosaurios, algunos paleontólogos siempre han discutido su supuesto declive, pues sostienen que está basado exclusivamente en los datos de yacimientos norteamericanos: en definitiva, no ven tal declive (y sí más bien un relevo) en los europeos, y aseguran que los yacimientos de Mongolia indican un aumento de la diversidad al final del Cretácico. Un factor a tener en cuenta a la hora de evaluar la rapidez de una extinción es el llamado «efecto Signor-Lipps», por el

nombre de los paleontólogos que lo propusieron. Se trata de algo tan simple como esto: no es fácil hallar precisamente los últimos restos que un ser vivo dejó antes de extinguirse, de forma que, a no ser que busquemos con sumo cuidado y tengamos muy buena suerte, lo normal será que certifiquemos su defunción antes de tiempo. Y, cuanto más raro sea el fósil (los dinosaurios serían el caso más crítico), tanto más fácil es que anticipemos su desaparición.

El último aspecto de interés sobre las extinciones se refiere a las víctimas y a los supervivientes: ¿por qué unos perecen mientras otros se salvan? Según Éric Buffetaut, un paleontólogo de vertebrados de la Universidad de París, la fauna que se alimentaba de materia orgánica en descomposición aguantó mucho mejor la crisis ambiental. Eso comprende a muchas comunidades de agua dulce (pequeños invertebrados, peces, anfibios, tortugas y cocodrilos), pero también a otras terrestres, como los lagartos y pequeños mamíferos que se alimentan de insectos (los cuales sobrevivían a base del humus). En cambio, las especies apoyadas en cadenas alimentarias basadas en la producción primaria (plantas o fitoplanc-ton) fueron barridas, especialmente los gigantes que requerían grandes cantidades de alimento: pesar más de 25 kilos fue duramente penalizado por la evolución en uno de sus momentos de crisis.

Mientras tanto, la compañía Pemex ha comenzado a rentabilizar los sondeos de Chicxulub: aunque la zona del cráter es estéril, a unos 150 kilómetros, el campo Cantarell está produciendo más de un millón de barriles de petróleo cada día. Las rocas que almacenan el oro negro son brechas, se cree que producidas en una avalancha submarina desencadenada por el impacto. El mismo

que, quizá, exterminó a los lagartos terribles al final del Mesozoico, y con seguridad inyectó savia nueva en la geología del final del siglo XX.

DESPUÉS DE LA REVOLUCIÓN

Veinte años después de la publicación del artículo de los Alvarez, la situación se ha calmado un tanto. También los paleontólogos han aceptado que hubo un impacto, y que probablemente éste provocó una importante crisis medioambiental; pero, en cuanto a la extinción, la mayoría apoya la tesis del «golpe de gracia»: la fauna cretácica estaba a punto de ser relevada cuando cayó un asteroide que precipitó la situación. Se trata de una postura bastante razonable: si examinamos de nuevo la Figura 17, veremos que el largo verano cretácico, el verano de los dinosaurios, estaba tocando a su fin. El nivel del mar descendía de forma pausada pero continua, y también lo hacían las temperaturas, probablemente como una consecuencia de lo anterior (la continentalización favorece climas extremos).

Pero podemos preguntarnos: ¿fue eso suficiente? Tanto el nivel del mar como el clima siguieron durante el principio del Cenozoico en valores como mínimo iguales a los del Jurásico, una época cálida también dominada por los grandes reptiles. ¿Por qué no hubo un otoño para la vida mesozoica? Para muchos, la hipótesis más lógica es que el verano fue sustituido sin transición por el invierno del impacto. Una mayoría de científicos de la Tierra opina hoy que el drástico relevo de la vida (quizá el 75% de todas las especies de plantas y animales) que constató con sorpresa Charles Lyell nunca se hubiese producido (o lo hubiese hecho en otra época,

y de una forma muy distinta) de no haber sido por la llegada del intruso. ¿Mala suerte? Para los reptiles, sin duda; a los mamíferos nos tocó la lotería cósmica. Y, como dice Walter Alvarez, las catástrofes evitan que la evolución se quede atascada.

Un retoño imprevisto de este debate llegó hasta el ruedo de la política. Los mismos meteorólogos que construyeron los modelos del invierno de los dinosaurios advirtieron que las consecuencias climáticas de una guerra termonuclear masiva serían muy semejantes. Con el nombre de «invierno nuclear», y con la colaboración de Carl Sagan, la idea fue presentada ante conferencias internacionales y ante los estados mayores de los ejércitos más importantes. Es difícil evaluar cuál fue su influencia en el final de la Guerra Fría, pero alguna debió de tener. Alexei Leonov, un general y astronauta ruso, cuenta: «Carl Sagan vino a Moscú e informó al Comité Central sobre el invierno nuclear. Cuando se fue, una docena de generales del Estado Mayor se miraron unos a otros y dijeron: “Bueno, se acabó, ¿no?”». La carrera de armamento nuclear ya no tiene sentido. No podemos seguir con esto. La amenaza de represalias masivas ha dejado de ser creíble. Pone en peligro demasiadas cosas importantes».

Y mientras las aguas de la polémica se van aquietando, un grupo de científicos planetarios acaba de encontrar un nuevo sistema (el isótopo de helio de masa 3) para sustituir al iridio como medidor de la velocidad de sedimentación. Su primer resultado indica que el «nivel mágico» se depositó en sólo unos 10.000 años, lo que implicaría una extinción rápida. La historia, que empezó de forma casual cuando un físico curioso buscaba un reloj para la sedimentación, vuelve a comenzar.

LA VENGANZA DE LOS MAMÍFEROS

El final del Mesozoico se ha comparado a la caída del Imperio Romano: después de un largo periodo de dominio de un grupo sobre el que hay mucha información, la historia se dispersa en docenas de pequeñas historias complejas y difíciles de reconstruir. De igual manera, la dispersión definitiva de Pangea supuso la especialización de la biosfera, con cada continente desempeñando un papel distinto. La gran diferencia es que los reptiles no fueron expulsados del poder por otro grupo: la vieja hipótesis de la competencia triunfante de los mamíferos no se sostiene. Antes al contrario, como ya vimos (Figura 16), los reptiles estaban poniendo a punto modelos perfeccionados de cazamamíferos que hubiesen dado mucha guerra a nuestros antepasados. Es más, ahora tenemos pruebas de que el relevo no tuvo causas biológicas: si hubiese sido así, el registro fósil reflejaría una gran radiación evolutiva de mamíferos a partir de la desaparición de los dinosaurios, cosa que no sucede. Los relojes moleculares (comparación de secuencias de genes⁴³ de animales emparentados, que indican la antigüedad de su último ancestro común) nos dicen, por el contrario, que al menos cinco órdenes de mamíferos surgieron a lo largo del Cretácico, aunque ninguno alcanzó mucha importancia: el mamífero mesozoico típico

⁴³ Se utiliza para ello el llamado ADN mitocondrial (ADNmt). Las mitocondrias (órganos productores de energía en la célula) tienen su propio ADN, el cual, a diferencia del del núcleo, se hereda solamente de la madre, y por lo tanto no se recombina al dividirse la célula, como hace el resto del material genético. De esta forma, las secuencias de ADNmt sólo varían cuando sufren mutaciones; si suponemos que éstas se producen a un ritmo constante, la divergencia entre las secuencias de dos especies será una medida del tiempo transcurrido desde que evolucionaron a partir de un ancestro común.

era un merodeador nocturno de la envergadura de un ratón. Obligados a esconderse en aquel mundo de gigantes, es posible que estas sabandijas desarrollasen oído y olfato más agudos (lo que requeriría un sistema nervioso más eficiente), y articulaciones más flexibles que les permitiesen trepar. Pero sin duda los pequeños intrusos no hubiesen pasado de esta presencia discreta de no mediar la catástrofe del final del Cretácico.

Sí es cierto que, comparados con los reptiles, los mamíferos presentan un conjunto de mejoras anatómicas:

—Temperatura constante (salvando la discusión sobre el carácter endotermo de algunos dinosaurios).

—Piel aislada con pelo, un sistema más ligero que las escamas (aunque menos protector).

—Viviparismo. Los huevos son una presa fácil, o bien requieren mucho cuidado parental.

—Lactancia, que resuelve el dilema de las madres entre el cuidado del nido y la alimentación de la prole.

—Cráneo más grande respecto al cuerpo, adecuado para albergar el centro de un sistema nervioso potente.

—Dientes complejos y especializados, que permiten una alimentación más variada: los mamíferos son los primeros omnívoros.

—Oído avanzado, por modificación de algunos huesos de la mandíbula.

En resumen, los mamíferos eran independientes (hasta cierto punto) del clima, podían permitirse una alimentación oportunista, y tenían más opciones de dejar descendencia. No está de más preguntarse por qué, siendo tales maravillas evolutivas, no consiguieron desbancar a los reptiles. Quizá todo radique en los veinte millones de años de ventaja que estos últimos habían cobrado en el Triásico, un tiempo suficiente para adaptarse con éxito

a los ambientes continentales; un poco como esas marcas de coches clásicas que copan una cuota de mercado de las que modelos más modernos no siempre son capaces de desalojarlas. En todo caso, estas mejoras sirvieron a los mamíferos para adaptarse a múltiples papeles tras la desaparición de los grandes reptiles.

Contemplada en perspectiva, esta sustitución encierra una buena dosis de ironía. Los mamíferos descienden de un grupo de reptiles triásicos que fue desbancado, casi extinguido, por la competencia de los arcosaurios, que enseguida darían origen a los dinosaurios. Pero este linaje residual de reptiles mamíferoides, reducido a la mínima expresión evolutiva, resistió casi 150 millones de años de sometimiento para hacerse finalmente con el reino. Si bien es cierto que lo lograron a favor de una contingencia, de la cual se libraron precisamente a causa de su carácter subordinado: fue la imposibilidad de crecer, debido al dominio de los grandes reptiles, lo que les libró de sobrepasar el umbral maldito (25 kilos) que hace 65 millones de años significó una condena a muerte.

NACEN LAS GRANDES MONTAÑAS

Los dinosaurios habitaron un mundo bastante plano. De las grandes cadenas de montañas actuales, sólo las Rocosas y los Andes habían comenzado a crecer en el Mesozoico; el Himalaya y los Alpes surgieron en un planeta que ya había visto perecer a los grandes reptiles. Estos cuatro orógenos forman, en realidad, dos únicos sistemas de relieve: uno norte-sur, desde Alaska a Patagonia, y el otro este-oeste, desde los Pirineos y el Atlas hasta Indochina. Cuando se creía en orogénias universales, se

decía que todos estos relieves se habían formado en la llamada «orogenia alpina», aunque era evidente el absurdo de imponer a todas las cadenas el nombre de la más pequeña de ellas. Hoy se reconoce que lo único que tienen en común estos cuatro sistemas es que surgen de las interacciones de los fragmentos en los que se disgregó Pangea. El sistema Rocosas-Andes, por el movimiento hacia el oeste de los continentes americanos, y el conjunto Alpes-Himalaya por colisión contra Eurasia de bloques como la península Ibérica, Arabia o la India.

Al moverse Norteamérica y Suramérica hacia el oeste, el fondo del océano Pacífico comenzó a subducir bajo ambos continentes. La subducción bajo el borde occidental de Norteamérica comenzó en el Triásico Inicial (~240 m.a.), y continuó a lo largo del resto del Mesozoico y el principio del Cenozoico. Se ha calculado que más de 10.000 kilómetros de corteza oceánica han desaparecido bajo el continente norteamericano, o bien han chocado contra él. Uno de los resultados de esta interacción ha quedado impreso en el borde oeste del continente, adornado con docenas de terrenos alóctonos recogidos en su carrera a través del Pacífico: muchos de ellos aún llevan puestos restos de corales, señal de que en sus mejores tiempos fueron atolones en un mar tropical.

Desde el Cretácico, esta subducción comienza a dejar sus huellas en el borde del continente en forma de un arco magmático, una cadena de volcanes y plutones. Es interesante ver cómo esta línea de fuego va migrando hacia el este: hace 100 millones de años estaba en California, hace 70 en Nevada, y hace 60 en Colorado. Esta migración, que también se ha detectado en los Andes, significa que la zona de producción de magmas, bien abajo en la zona de subducción (ver la Figura 3), está

siendo «pisada» por el avance del continente hacia el oeste, el cual, por lo tanto, recibe los magmas cada vez más en su interior. El movimiento del continente fue especialmente rápido entre 75 y 40 millones de años, y probablemente a causa de ello su borde empezó a plegarse y romperse en esta época. La corteza continental, que el calor del magmatismo había hecho muy plástica, también se comprimió, aumentando de grosor: estaban naciendo las Rocosas.

Hace 30 millones de años, el avance avasallador de Norteamérica hacia el oeste lleva al continente encima de la dorsal, la fábrica del fondo oceánico del Pacífico, y aquí tenemos la clave de buena parte de la espectacular geología del oeste del continente: los géiseres y volcanes de Yellowstone son la evidencia de la dorsal intentando perforar el continente; el golfo de California es otro sector de la dorsal, cuya actividad productiva de corteza oceánica casi ha conseguido separar del continente la península de California; y la falla de San Andreas es una gran fractura que enlaza dos segmentos de dorsal. La intensa actividad térmica ha permitido el engrosamiento de la corteza hasta los 70 kilómetros bajo la meseta del Colorado. La corteza continental es ligera, de forma que cuanto más gruesa, más se eleva (igual que flotaríamos más altos con dos colchones de playa que con uno solo): la elevación aumentó la pendiente de los ríos de la zona, y con ella su capacidad de erosión. El resultado es uno de los paisajes más bellos del mundo: el Gran Cañón del río Colorado.

Los Andes tienen una historia parecida a la de sus hermanas las Rocosas: las dos cordilleras son hijas de la subducción. La diferencia más visible es que los Andes están al borde mismo del Pacífico, mientras que las Ro-

cosas son una cadena interior. La causa es probablemente que el fondo del Pacífico norte era más accidentado que el del Pacífico sur, lo que significó el choque de más terrenos alóctonos contra el borde de Norteamérica. La historia de los Andes empieza en el Jurásico (~190 m.a.), cuando la subducción produce centenares de plutones en el borde occidental de Suramérica, lo que los geólogos de la región llaman el Batolito Granítico Andino (un batolito es un conjunto de plutones). Esta etapa de magmatismo intenso termina hacia los 100 millones de años con una fortísima compresión cuya causa concreta se desconoce. Algunos apuntan su coincidencia aproximada en el tiempo con el superepisodio magmático que propone Roger Larson para el centro del Pacífico; pero la verdad es que nadie sabe cómo convertir una columna ascendente de material caliente en una fuerza de compresión contra un continente.

Durante los últimos cien millones de años de su historia, en los Andes se instala un arco magmático que migra hacia el este, igual que el norteamericano, y por iguales motivos: por eso los grandes volcanes activos, como el Cotopaxi (Ecuador) o el Lascar (Chile) están lejos de la costa, entre 200 y 300 kilómetros. Una peculiaridad andina es que la compresión de la corteza ha producido, en los Andes centrales (Bolivia y norte de Argentina), la corteza continental más gruesa del mundo (75 km), y por lo tanto una gran meseta elevada (4.000 metros de media), que se llama Altiplano en Bolivia y Puna en Argentina. Es el equivalente de la meseta del Colorado, pero mucho más alta y extensa. Además, está situada en uno de los lugares más secos del planeta (el desierto de Atacama), por lo que no ha habido ningún río Colorado que la erosione. Las muy escasas lluvias se

han depositado en lagos efímeros, en los que han precipitado sales aportadas por los volcanes: son los salares.

Las dos Américas fueron continentes separados hasta hace 13 millones de años. En esa época, la subducción comenzó bajo lo que enseguida iba a convertirse en el istmo centroamericano. Primero fue solamente un arco de islas, que no logró interrumpir totalmente la circulación entre el Atlántico y el Pacífico. Después, hace nueve millones de años, se registra el primer intercambio de fauna entre los dos continentes (sin duda algún buen nadador); y hace exactamente 3.700.000 años el istmo está completo, con lo que comienza lo que en los libros de historia de la Tierra se suele conocer pomposamente con el nombre de El Gran Intercambio Terrestre Americano. Los grandes carnívoros norteamericanos hicieron estragos en Suramérica, que carecía de ellos.

El cinturón Alpes-Himalaya es una compleja cadena de colisión: el mar de Tethys se cerró como una gran tenaza que tuviese su bisagra en la península Ibérica y su extremo en Indochina. Las piezas que se movieron fueron fragmentos de corteza continental situados en el borde sur del antiguo océano. Iberia (la actual península), antes contigua a la costa atlántica francesa, giró hasta su posición actual entre 100 y 55 millones de años para formar los Pirineos. La placa Adriática (actual península Itálica) embistió contra Centroeuropa hace 45 millones de años: la elevación de los Alpes centrales no acabó hasta hace cinco. Hace veinte nació el mar Rojo, separando Arabia de África y lanzándola contra el actual Irán: así se formaron los montes Zagros, en este último país.

Pero la actuación estelar en esta escuadrilla de placas kamikazes correspondió sin duda a la India: se separó de África y la Antártida hace cien millones de años

para emprender la aventura de cruzar sin escalas la parte más ancha del mar de Tethys, una dura travesía de más de 7.000 kilómetros. Naturalmente, no viajaba sola (aunque lo parezca en un mapa paleogeográfico como el de la Figura 11h), sino transportada por el fondo oceánico, como un pasajero que subiese pegado a una escalera mecánica: por detrás, la escalera surge del mecanismo, igual que el fondo oceánico surge de la dorsal; por delante, la escalera es engullida, de la misma forma en que el fondo oceánico subduce. Si no hubiese subducción, los continentes no podrían aproximarse, ya que no pueden despegarse del fondo oceánico, igual que nuestro pasajero pegado a la escalera no puede subirla andando. Hace unos 67 millones de años, la India alcanzó su objetivo (una media impresionante, más de veinte centímetros al año), comenzando un lento choque contra el centro de Asia, el Tíbet actual.

De alguna forma, el choque no ha terminado aún, porque la dorsal que hay tras la India sigue produciendo corteza oceánica. Sin embargo, la colisión significa que la porción de corteza oceánica que había entre los dos continentes se ha agotado. Como, a causa de su baja densidad, éstos no pueden subducir (o pueden en muy pequeña cuantía), si la escalera sigue funcionando, su parte delantera se romperá y habrá un terrible amontonamiento de escalones rotos en la parte frontal. Algo así ha sido la formación del Himalaya: después de la colisión, la India ha continuado siendo empujada hacia el norte, lo que ha comprimido la corteza con una fuerza colosal, hasta hacerla interpenetrarse con la del centro de Asia. Así, por un mecanismo parecido al del Altiplano de Bolivia, ha nacido la meseta tibetana, con un espesor de corteza de unos 70 kilómetros, una elevación media

de cinco kilómetros y una extensión equivalente a la de Europa. Al mismo tiempo, los sedimentos marinos del fondo del Tethys se plegaron y rompieron en la colisión, cabalgando sobre ellos mismos. Toda esta masa deformada se levantó a hombros de su gruesa corteza, pero este proceso se tomó su tiempo: por los sedimentos que los ríos llevan hasta el golfo de Bengala, sabemos que el Himalaya sólo alcanzó alturas semejantes a la actual desde hace algo más de veinte millones de años, y quizá sólo llegó a ser el «techo del mundo» desde hace un millón de años. Tal vez los primeros homínidos asiáticos fueron testigos de este levantamiento.

Y la dorsal sigue empujando: toda Asia central está sometida a tensión. De vez en cuando, ésta sobrepasa la resistencia de las rocas, y una falla salta. Así se producen los terribles terremotos de la India y de China, ecos finales de la última gran embestida entre continentes que registra la historia del planeta.

LA TIERRA SE CONGELA

Las llanuras de Europa central están sembradas de grandes bloques (llamados «erráticos»), que desde el siglo XVIII habían llamado la atención de los naturalistas. Las hipótesis sobre ellos eran tan erráticas como los bloques mismos: restos de una inundación (probablemente el Diluvio), rocas arrojadas por los volcanes, meteoritos... Curiosamente, fueron alpinistas y guías de montaña quienes comenzaron, a base de sentido común, a apuntar en otra dirección. En 1829, Ignace Venetz, un ingeniero suizo, propuso que los bloques eran restos abandonados por una inmensa capa de hielo que había cubierto el cen-

tro del continente y luego se había retirado, dejando los glaciares de los Alpes como recuerdo. Estas ideas fueron recibidas con incredulidad: nadie podía entender que el ambiente de la Tierra pudiese cambiar tanto como para que Europa hubiese tenido un clima polar. Uno de los más encarnizados oponentes de la hipótesis del manto de hielo era otro suizo, Louis Agassiz, un joven profesor de zoología de la Universidad de Neuchâtel que se había especializado en peces fósiles. En vista de que aquellas estrafalarias nociones iban extendiéndose, Agassiz terminó por acceder a acompañar a Venetz a la montaña con el fin de convencerle de lo absurdo de su idea. Como el viajero del tiempo seguramente ha imaginado, volvió de la excursión, sin embargo, convertido en un entusiasta de la hipótesis del hielo continental.

Lo que sigue es parte de la leyenda académica, quizá no rigurosamente cierta, pero sin duda una bonita historia. Al día siguiente de su vuelta de los Alpes, Agassiz debía pronunciar una lección magistral sobre sus peces fósiles ante la docta Société Helvétique des Sciences Naturelles. El converso rehízo febrilmente su discurso la noche anterior, y sorprendió a su auditorio con una encendida defensa de la hipótesis del casquete glaciar, desarrollando por primera vez la idea de que la Tierra había atravesado una Edad de Hielo. El *Discours de Neuchâtel*, como se ha llamado históricamente la conferencia que Agassiz pronunció una noche de julio de 1837, barrió los prejuicios de los naturalistas suizos sobre los climas del pasado; a la larga, los de todo el mundo. Fue uno de los primeros golpes asestados al gradualismo, al demostrar que el clima de la Tierra había oscilado de forma brutal.

Sin embargo, la historia tiene un final amargo. El enorme prestigio que consiguió Agassiz hizo que las

universidades extranjeras se disputasen sus servicios. Aceptó una oferta de la de Harvard, y allí le sorprendió la revolución darwinista, la cual, siendo un creacionista⁴⁴ convencido, nunca aceptó. En 1865 viajó a Brasil para buscar pruebas de que la glaciación que él había demostrado para el hemisferio Norte había sido en realidad una catástrofe climática universal que había aniquilado toda la vida en el planeta hasta la siguiente creación. Decidido a encontrar los restos de una glaciación reciente, interpretó cualquier roca granítica como un bloque errático, y la lisura de los famosos «panes de azúcar» como una prueba de la erosión de los glaciares: el sabio lema que intentaba inculcar a sus alumnos («Estudia la naturaleza, no los libros») no le salvó del error. En sus años finales, y aunque se quedó solo defendiendo la glaciación universal, Agassiz, que gracias a un admirable trabajo de divulgación se había convertido en uno de los naturalistas más respetados del mundo, nunca se retractó de sus ideas.

Hacia el final del siglo XIX, las posibles explicaciones de las épocas glaciales comenzaron a menudear. En 1899, el geomorfólogo norteamericano Thomas Chamberlin propuso la primera hipótesis moderna, al sugerir que la edad de hielo era un resultado colateral de la elevación de las cadenas alpinas. Argumentaba que las rocas recién expuestas al ataque de los agentes superficiales consumirían cantidades extra de CO₂, lo que rebajaría el efecto invernadero y desembocaría en una glaciación. Casi un siglo después, los modelos de ordenador más

⁴⁴ La creencia aceptada en los ambientes cultos de la Europa del siglo XIX era que cada especie animal y vegetal había aparecido sobre la Tierra por un acto creativo especial de Dios. Fue esta sociedad la que se escandalizó del darwinismo.

avanzados sobre el clima (denominados en la jerga de los climatólogos «modelos de circulación general») concuerdan en que Chamberlin no andaba totalmente descaminado: si en los modelos se suprimen los relieves alpinos, el clima reciente cambia por completo, haciéndose más suave. La versión moderna de la «hipótesis orogénica» de las glaciaciones incluye el enfriamiento de los continentes al quedar aislados por las montañas de la humedad oceánica (se concede una importancia especial a la elevación de la meseta tibetana), y algunas precisiones sobre el consumo acelerado de CO_2 , que sería favorecido por la concentración de las lluvias en las montañas, y por las fuertes pendientes, en las que las frecuentes avalanchas ayudarían a renovar las rocas expuestas a la meteorización.

Para comprobar esta y otras hipótesis sobre la última glaciación debemos aprender algo de su desarrollo. Los primeros glaciares aparecen, en las montañas antárticas, hace unos 38 a 36 millones de años. Sólo dos millones de años después, la Tierra se enfría bruscamente, como queda registrado en el crecimiento de los glaciares, el establecimiento de una plataforma de hielo de agua salada en torno a la Antártida, y en la severa extinción de fauna del fondo marino, lo que indica que las corrientes frías profundas han comenzado a circular. La temperatura sigue su descenso en picado: hace 25 millones de años se registran los primeros glaciares antárticos a nivel del mar, y con ellos los primeros icebergs, que al fundirse llenan de bloques de roca los fondos de los mares cercanos. Sin embargo, todavía quedan bosques en la Antártida. Un auténtico casquete glaciar parecido al actual se establece hace sólo quince millones de años. Inmediatamente se registra otro descenso brusco de temperaturas,

suficiente para que se formen grandes extensiones de hielo marino en todos los océanos a latitudes relativamente bajas: si hubiese habido habitantes en Galicia, se hubiesen distraído viendo pasar los icebergs. La Tierra, cubierta de blanco en buena parte, refleja cada vez más calor solar, y por lo tanto sigue enfriándose; pero hace tan sólo tres millones de años que comienzan a formarse los casquetes glaciares del hemisferio Norte, que cubrieron la mitad de Norteamérica y de Europa durante el último millón de años. Por ser tan tardía en el norte, esta glaciación se conoció tradicionalmente como cuaternaria (periodo que abarca los últimos 1,6 millones de años), pero ya recibe el nombre, más adecuado, de neógena (el Neógeno comprende los últimos 23 millones de años).

Si intentamos comprobar hasta qué punto la hipótesis orogénica es correcta, deberemos comparar estas fechas con las de la elevación de los relieves. Sin embargo, obtendremos un resultado ambiguo: en la época de los primeros hielos, algunas cadenas alpinas se habían levantado ya (caso de los Pirineos), pero otras (como el Himalaya) no lo harían hasta mucho después. Además, la glaciación comenzó en el hemisferio Sur, y sólo al final se propagó hasta el Norte, mientras que casi todas las montañas alpinas están situadas en este último.

Otro grupo de hipótesis propone que la glaciación neógena fue el resultado de cambios en la circulación oceánica. Los primeros glaciares de montaña en la Antártida coinciden con el cierre de la corriente ecuatorial que con tanta eficacia había repartido el calor de los trópicos por el resto del planeta en el Cretácico y el principio del Cenozoico. Sin embargo, la brusca caída, hace 34 millones de años, de las temperaturas de los océanos que rodean a la Antártida no tiene una explicación con-

vincente, ya que el paso de Drake, que conectó Atlántico y Pacífico completando la corriente circumantártica, no se abrió hasta los 30-25 millones de años. Sí parece que este acontecimiento oceánico pudo impulsar la glaciación, al aislar la Antártida del resto del planeta, impidiendo que le llegase calor desde el resto de los océanos. También el establecimiento del casquete hace quince millones de años tiene una buena razón oceánica, porque coincide con la separación de Groenlandia y Norteamérica. Esto supuso la apertura de una comunicación entre los océanos Ártico (que aún no era un mar helado como hoy) y Atlántico, desde donde bajó hasta la Antártida una corriente de agua calentada en el ecuador, cuya evaporación proporcionó la humedad necesaria para el crecimiento del casquete antártico.

La correlación entre concentración atmosférica de CO_2 y temperatura no es sólo teórica, sino que se ha comprobado en el hielo obtenido en un sondeo antártico (denominado «Vostok» por estar cerca de la base rusa de este nombre). La cantidad de CO_2 del aire se mide en las burbujas del hielo, y la proporción de los isótopos de oxígeno nos da la temperatura. Las dos variables suben o bajan en paralelo, pero se puede observar que las bajadas y subidas de temperatura preceden a las bajadas y subidas de la concentración de anhídrido carbónico, una relación que sólo recientemente se ha podido explicar. Los periodos glaciales son épocas de fuerte contraste térmico entre aguas superficiales y profundas. Cuando estas últimas llegan a la superficie (lo que en oceanografía se llama un «afloramiento»), lo hacen muy cargadas de sustancias nutritivas, que no han sido consumidas por la escasísima fauna profunda. Tal situación permite la proliferación de gran cantidad de plancton; como buena parte del planct-

ton es vegetal (fitoplancton), el consumo de CO_2 se dispara, lo que hace bajar la concentración de este gas en el mar, y después en la atmósfera haciendo disminuir el efecto invernadero. Los datos del Vostok, que cubren ya cerca de 200.000 años, confirman que nuestro temor ante el efecto invernadero artificial, que se basa en la influencia del CO_2 en el clima, tiene una sólida base científica.

Los bloques erráticos que llamaron la atención a Venetz y Agassiz son los detritos del último avance del hielo, producido hace unos 18.000 años y denominado Würm en Europa. El Würm es el último de los periodos de frío extremo que se producen en un periodo frío más largo denominado periodo glacial (entre 110.000 y 11.000 años), que, a su vez, está flanqueado por dos periodos interglaciales: el llamado Eemiense, entre 140.000 y 110.000 años, y el Holoceno, los últimos 11.000 años. A principios de este siglo, el astrónomo yugoslavo Milutin Milankovitch propuso que la alternancia de periodos glaciales e interglaciales se debía a las variaciones de la geometría de la órbita terrestre, hipótesis que han confirmado las investigaciones posteriores. Se da así la paradoja de que entendemos detalles importantes de una glaciación, como son sus alternancias climáticas, pero no entendemos los mecanismos de la glaciación misma.

Por otra parte, tanto el periodo glacial como los interglaciales muestran continuos máximos y mínimos. Éste es el descubrimiento más importante realizado a través de los sondeos en el hielo: el clima es un sistema de fuerte inestabilidad, algo que ya se sabía con respecto a los periodos glaciales, pero que se ha podido reconocer también, con preocupación, en los interglaciales. En el interglacial Eemiense se produjeron en pocas décadas descensos *de la temperatura media de la Tierra de hasta 14°C*. Pasar

de un clima como el actual a un clima polar en el transcurso de una vida humana no debe de ser una experiencia agradable. Estos intervalos fríos, además, tuvieron duraciones erráticas, desde 70 años hasta varios milenios. No se ha organizado aún una hipótesis sostenible de la causa de estas pequeñas catástrofes climáticas. Se sospecha que tienen relación con la circulación oceánica, pero no se entiende bien cómo ésta puede explicar variaciones tan repentinas: la impresión es que, durante una glaciación, el sistema climático tiene dos estados estables, el glacial y el interglacial, y que bastan pequeñas desviaciones del equilibrio para pasar de uno al otro. Es el efecto mariposa aplicado no a la meteorología sino a la climatología, que al fin y al cabo no es más que meteorología a muy largo plazo. Los climatólogos están empezando a sospechar que la estabilidad del clima durante los últimos 11.000 años (el presente interglacial) puede ser una casualidad. Una casualidad que ha permitido al hombre moderno extenderse por el planeta con una facilidad que quizá sea engañosa. Los sondeos a través del hielo nos han traído una advertencia desde el pasado cercano.

El Würm es la Edad de Hielo de la geología clásica, y la que más podemos imaginarnos, con nuestros antecesores (y también los osos) viviendo en cavernas para protegerse del frío. Duró desde los 25.000 hasta los 16.000 años, tiempo durante el cual una costra de hielo de hasta dos kilómetros de espesor cubrió Norteamérica y Europa, lo que supuso, como contrapartida, un descenso del nivel del mar de entre 150 y 200 metros. Al sur de los casquetes se extendía una gran llanura de desagüe glacial, y más aún hacia el sur, bosques de tipo tundra. Los bosques templados estarían confinados a Florida y el norte de África. Esto no significa que en Centroeuropa nuestros antepasados

prehistóricos tuviesen un hábitat como los actuales esquimales: si el hielo llegaba tan al sur no era porque hiciese demasiado frío, sino porque, como cualquier material plástico, fluye bajo su propio peso. Lo que sucedía era que las zonas climáticas se habían comprimido hacia el ecuador: la lluvia que ahora cae en la cuenca mediterránea caía entonces sobre el Sáhara, como atestiguan las pinturas rupestres de animales de sabana que se encuentran en pleno desierto como recuerdo de un clima más húmedo. También las aguas subterráneas fósiles que hoy se explotan en Libia o en California son una herencia de este clima lluvioso; pero, en general, los continentes eran lugares mucho más secos que ahora, porque la evaporación (y con ella la lluvia) es mucho menor en mares más fríos.

Hace unos 14.000 años, los glaciares comenzaron a fundirse muy rápidamente, y hace 7.000 habían desaparecido por completo de las latitudes medias de Norteamérica y Eurasia, salvo de las montañas más altas. El hielo, que se había acumulado durante 100.000 años, desapareció en sólo 7.000. Sabemos que volverá, pero los especialistas en el clima aún no han conseguido averiguar cuándo. Esta indeterminación es típica de las hipótesis sobre las glaciaciones. Se han propuesto docenas de ellas, lo que quiere decir que ninguna es totalmente satisfactoria: pueden explicar algunos de los rasgos, pero, más de siglo y medio después de Louis Agassiz, aún seguimos intentando entender las edades de hielo.

NIÁGARA EN EL MEDITERRÁNEO

A finales del siglo XIX, cuando perforaban pozos en busca de agua subterránea en el sur de Francia, los prospectores

encontraron, a 200 metros de profundidad, un enorme desfiladero excavado en granito y relleno de grava. Hubiese podido pasar por el cauce de un antiguo río, si no hubiese sido porque su fondo estaba 300 metros por debajo del nivel del Mediterráneo. No hace falta ser un especialista en ríos para saber que éstos siempre desembocan al nivel del mar, el llamado «nivel de base» del río. ¿Cómo había conseguido este río antiguo desembocar mucho más abajo del nivel del Mediterráneo? El enigma quedó en suspenso, pero los datos fueron recuperados medio siglo después: con técnicas de sondeo avanzadas se pudo confirmar que en efecto se trataba de un valle ahora cubierto por sedimentos más recientes. El antiguo barranco, tan sólo un poco *mayor* que el Cañón del Colorado, tenía un curso de casi 200 kilómetros y desembocaba en el mismo lugar que el actual Ródano, cuyo delta había cubierto el antiguo cauce con 900 metros de sedimentos. El misterio, por lo tanto, no se había resuelto sino que se había enconado: el antiguo río podía haber desembocado 300 metros por debajo del *actual* nivel de base en un momento en que el nivel del mar fuese más bajo; pero nunca, en toda la historia de la Tierra, ha habido una época en la que el nivel de los mares fuese 900 metros más bajo que el actual.

Casi al mismo tiempo, pero en el otro extremo del Mediterráneo, sucedían acontecimientos políticos que están relacionados con esta historia. El presidente egipcio Gamal Abdel Nasser había encontrado en la Unión Soviética la ayuda que Occidente le había negado para construir una gran presa en Asuán. Cuando los ingenieros soviéticos hicieron sondeos en el valle del Nilo buscando roca firme en la que asentar los cimientos de la obra, encontraron bajo el río... una profunda garganta

rellena de sedimentos, cuyo fondo quedaba 200 metros por debajo del nivel del mar. Asuán está a más de mil kilómetros de la costa, de forma que este curso invisible sí que dejaba pequeño al Gran Cañón norteamericano; pero su profundidad final nunca se ha podido averiguar, porque nunca se han realizado en el delta del Nilo sondeos de suficiente longitud. En cualquier caso, los datos sobre antiguas gargantas sumergidas que desembocaban por debajo del nivel del Mediterráneo se sucedieron: en Libia, en Argelia, en Israel, en Siria. En paralelo, los oceanógrafos empezaron a localizar cañones submarinos (es decir, valles bajo el mar) en la prolongación de muchos ríos que desembocaban en el Mediterráneo. Los cañones eran largos, y con frecuencia llegaban hasta profundidades de más de 2.000 metros. Aunque en general los cañones submarinos son excavados por corrientes de turbidez, los mediterráneos tenían unos perfiles más típicos de valles labrados por ríos.

En 1961, los oceanógrafos embarcados en un crucero científico descubrieron algo más en el Mediterráneo: utilizando un nuevo instrumento que lanzaba potentes señales acústicas y recogía el eco, localizaron abundantes estructuras en forma de cúpula, de varios kilómetros de diámetro y hasta mil metros de espesor. Los geofísicos dijeron que las cúpulas se parecían a domos de sal, y sus colegas les creyeron, porque si hay una estructura que un geofísico marino está acostumbrado a identificar, ésa es un domo de sal. La «culpa» la tienen las propiedades de este material, que es muy plástico y de baja densidad, por lo que tiende a deformarse y a subir perforando las capas superiores: de ahí las cúpulas. Es también muy impermeable, por lo que cierra el paso a cualquier fluido que intente escapar: ésa es la causa de que con frecuencia

haya yacimientos de petróleo refugiados en los costados de las cúpulas, y éstos, a su vez, son el motivo de que las cúpulas no pasen desapercibidas.

Sin embargo, estas cúpulas mediterráneas estaban situadas en un lugar que no les correspondía: normalmente, la sal se deposita cuando se evaporan cuerpos de agua muy reducidos (como en las salinas), por lo que solemos encontrarla entre sedimentos costeros. En cambio, encontrar sal en el fondo marino a 2.000 metros de profundidad era algo demasiado extraño: las sales son tan solubles que sólo precipitan cuando casi toda el agua en que estaban disueltas se ha evaporado, lo que no puede suceder en pleno mar. ¿Eran realmente domos de sal las estructuras en cúpula? Si lo eran, ¿de dónde provenía una cantidad de sal que rondaba el millón de kilómetros cúbicos? La única forma de salir de dudas era perforar sondeos en el fondo marino, para averiguar la composición del material que formaba las cúpulas. Éste fue el objetivo de una nueva campaña, que realizó en 1970 el buque oceanográfico *Glomar Challenger* con una dotación de veinte científicos bajo la dirección de nuestro viejo amigo Kenneth Hsü, con quien ya nos hemos tropezado dos veces. El primer sondeo, perforado a unos 160 kilómetros al sureste de Barcelona, llevó hasta la cubierta del barco excelentes muestras de yeso y anhidrita, dos sales que sólo se forman por precipitación en lagos de zonas muy áridas: la hipótesis de las sales se había confirmado sin ninguna duda. Ahora sólo quedaba encontrar una buena explicación para su presencia, porque evidentemente el Mediterráneo, con sus 4.000 millones de metros cúbicos de agua, no es un pequeño lago.

Acompañando a las sales, el equipo de Hsü encontró gravas. Las gravas no son del todo extrañas en los grandes

fondos marinos, adonde pueden llegar transportadas precisamente por las corrientes de turbidez; pero, en esos casos, están compuestas por materiales continentales (como granito o rocas metamórficas, o minerales resistentes, como el cuarzo). Las gravas del sondeo sólo contenían fragmentos de basalto y de sedimentos marinos endurecidos. Como el basalto es la roca típica de la corteza oceánica, parecía como si las gravas proviniesen de la erosión del mismo fondo del Mediterráneo. Sin embargo, y salvo casos excepcionales, los fondos marinos son lugares de sedimentación, y no de erosión, al contrario de lo que sucede en las zonas emergidas, siempre sometidas a erosión. ¿Entonces?

A Kenneth Hsü le encanta la famosa frase que Sherlock Holmes espetaba a la menor ocasión al sufrido Watson: «Es una vieja máxima mía que, cuando se descarta lo imposible, lo que quede, aunque parezca improbable, debe ser la verdad». Un tanto simplista, pero funcionó en esta ocasión. El razonamiento del científico chino fue que, como la precipitación de sales en un mar abierto es un imposible físico-químico, la situación del Mediterráneo en la época de la formación de aquéllas tuvo que ser completamente distinta a la actual. Sumando al nuevo descubrimiento los enigmas pendientes de los valles enterrados y los cañones submarinos, Kenneth Hsü llegó a la conclusión de que, en algún momento de su historia, el Mediterráneo había sufrido una catástrofe climática, desecándose total o casi totalmente. ¿Cuándo, exactamente? Al pedir a los paleontólogos de a bordo que datasen los microfósiles recogidos, para averiguar la edad del desastre, Hsü se encontró con una agradable sorpresa: los sedimentos anteriores y posteriores tenían una fauna de aguas profundas, aunque completamente

distinta entre sí. Una enorme renovación biológica había coincidido con el depósito de la sal, sucedido hacia unos 5,5 millones de años.

El mar Mediterráneo nació hace 20 millones de años, cuando la colisión de Arabia y Asia creó los montes Zagros y encerró un resto del antiguo mar de Tethys entre Iberia y Egipto. Pero el extremo oeste siempre había estado abierto, por lo que el Mediterráneo era una especie de golfo del Atlántico. Sin embargo, hace unos seis millones de años África avanzó hacia el norte, y poco después tomó contacto con Iberia en Gibraltar. La cadena Bética se elevó, y el Mediterráneo se convirtió en un mar cerrado. El bajo nivel del mar debido al crecimiento del casquete antártico fue sin duda un factor favorable. Hsü calculó que en esta zona la lluvia y los aportes de los ríos sólo suman el 10% de la evaporación, por lo que, sin el continuo aporte de agua del Atlántico, el Mediterráneo se desecaría en sólo mil años. Así que, hace cinco millones de años, los acontecimientos habían condenado al mar de los griegos a convertirse temporalmente en un mar Muerto, con su fauna obligada a emigrar o exterminada. Cuando la desecación se completó (o, a lo más, cuando quedasen unas pocas charcas en las que precipitaban las últimas sales), el nivel de base era 3.000 metros más bajo que el actual, y la red fluvial excavó en toda la cuenca y su periferia profundos valles hoy en parte enterrados por sedimentos posteriores, y en parte anegados por el retorno de las aguas mediterráneas. Porque el episodio habría terminado de una forma tan catastrófica como había comenzado, con la rotura del istmo de Gibraltar y las aguas del Atlántico rellenando la cuenca en una formidable cascada.

Entra en acción otro de nuestros conocidos: Robert Dietz, el oceanógrafo que lo sabía todo sobre cráteres de impacto, no está de acuerdo con que el Mediterráneo se haya evaporado. Su principal argumento es que la desecación de todo este mar sólo daría lugar a una capa de sal de 60 metros, y para lograr toda la sal detectada (recorremos, nada menos que mil metros) sería necesario evaporar un mar de 50 kilómetros de profundidad. Por otra parte, ¿no indican los grandes valles enterrados una gran erosión, y por lo tanto un clima muy húmedo? ¿Cómo compaginar este hecho con la aridez extrema requerida para evaporar todo un mar? Tampoco le parece, por motivos diversos, que el relleno de la cuenca haya sucedido a través de Gibraltar. Y acusa, aunque elegantemente, a los promotores de la hipótesis de hacer una ciencia sensacionalista, a la medida de la prensa de gran tirada: «Me ha perturbado la reciente y repetida promoción que los medios de comunicación han concedido al modelo de la cuenca profunda [mediterránea] desecada». Hsü no tarda en responder. En un artículo que titula dramáticamente «La posteridad juzgará», escribe: «La gran atención de los medios de comunicación al modelo de la desecación del Mediterráneo no se debe a que esta idea sea poética, bella o imaginativa [...] El valor del modelo reside en su capacidad de explicar muchos datos increíbles del mundo mediterráneo».

También en este caso el tiempo ha dado la mayor parte de la razón al catastrofista doctor Hsü, aunque (como sucede a casi todas las hipótesis que intentan explicar procesos complejos) siguen quedando puntos oscuros. El principal se refiere a la primera objeción de Dietz. En efecto, parece como si el Mediterráneo se hubiese desecado y rellenado del orden de diez veces, y no

se entiende muy bien la facilidad con la cual la puerta de este mar muerto se abría y se cerraba, por Gibraltar o por otro punto. La segunda objeción no es tan importante, ya que en climas áridos las lluvias muy violentas, aunque espaciadas, pueden producir una intensa erosión. La datación ha sido refinada, y se ha precisado que el acontecimiento tuvo dos fases: una previa entre 5,75 y 5,6 millones de años, en la que el nivel del mar bajó sólo ligeramente y se depositaron sales en lagos costeros; y la central, de 5,6 a 5,3 millones de años, en la que tuvo lugar la desecación catastrófica, con un rápido y brutal (1.500 metros) descenso del nivel del mar, depósito de las evaporitas y erosión de los cañones. Dietz tenía razón, en cambio, en el tema de Gibraltar, donde no hay huellas de la gigantesca erosión que la gran catarata de relleno habría producido. Pero en 1996 se descubrió un cañón submarino de 200 metros de profundidad y 300 kilómetros de largo que no estaba en prolongación de ningún río terrestre: se le ha bautizado como la Garganta de Valencia, porque está situado entre Levante y las Baleares, en la prolongación de la cadena Bética, que hace unos cinco millones de años aún no se había levantado, sino que estaba semisumergida. El agua del Atlántico que relleno repetidamente el Mediterráneo no entró en éste por Gibraltar, sino por un estrecho pasillo entre Huelva y Alicante. Un cálculo del caudal que excavó esta garganta sugiere que cada relleno se pudo producir en sólo 50 años. Al final, parece que la gran catarata que empequeñeció a las de Niágara y que fue tan celebrada por los medios de comunicación en busca de titulares, existió realmente.

Esta pirueta de la Tierra ha podido tener un efecto global: la retención en el Mediterráneo de una cantidad

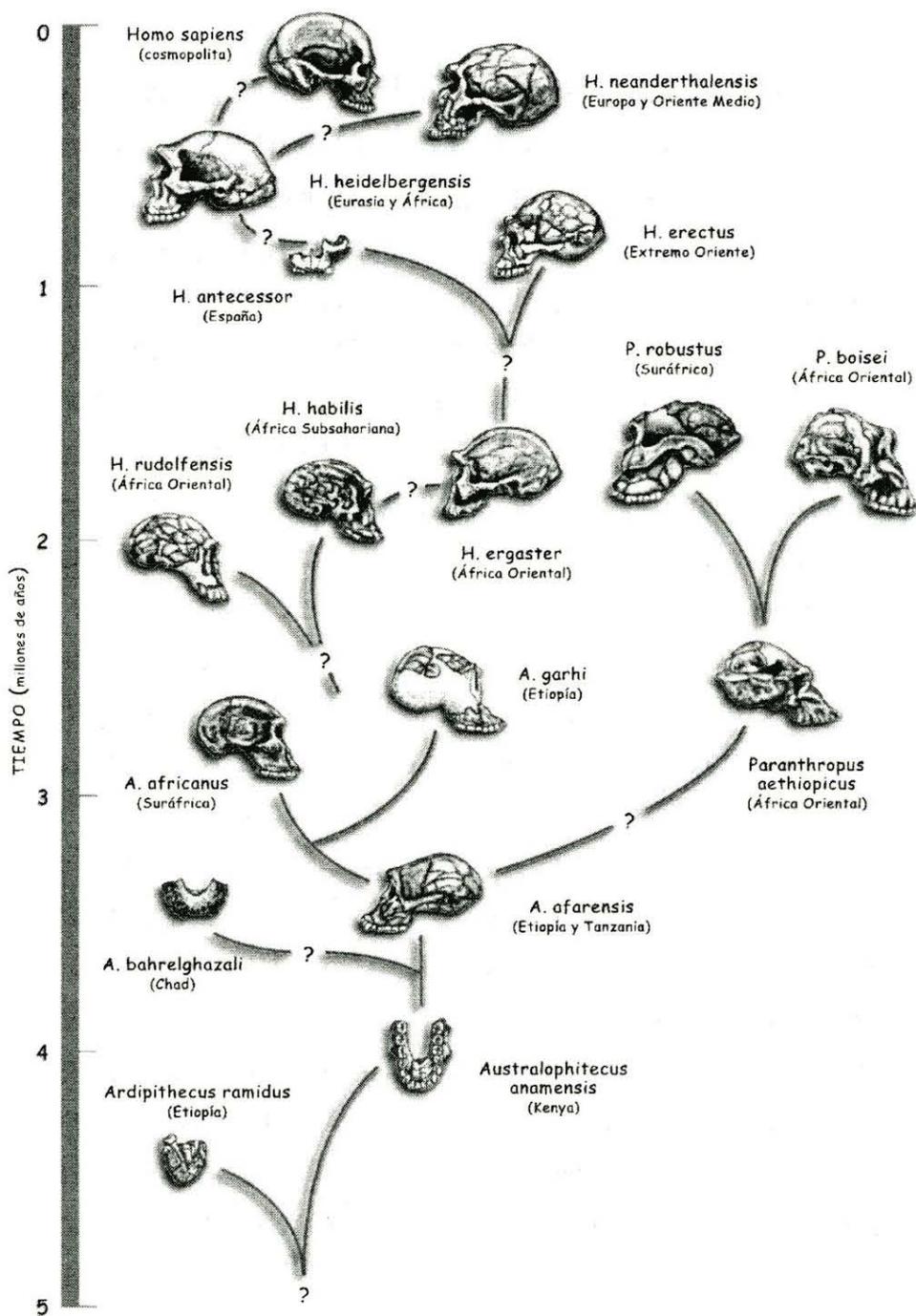
tan grande de sal rebajó, hasta en un 6%, la salinidad del océano mundial. Como el agua dulce se congela más fácilmente que la salada, la formación acelerada de hielo marino que se produce en esta época podría deberse al episodio mediterráneo. A su vez, estas plataformas de hielo rechazan más calor solar, de forma que es muy posible que este acontecimiento fuese la causa última del avance de la glaciación en el hemisferio Norte. Un buen ejemplo de la amplificación de los pequeños efectos que deberíamos tener presente a la hora de discutir el sutil equilibrio climático.

LA CONQUISTA DEL ESTE

En 1758, en la décima edición de su obra fundamental, *Systema Naturae*, Linneo remató su orgía clasificatoria del mundo vivo definiendo los órdenes en los que se dividen los mamíferos. Uno de ellos era el de los primates (del latín, significa «el primero de la lista»), que incluía a los simios y al hombre, el famoso *Homo sapiens*. En los dos siglos y medio transcurridos desde que nos autodefinimos, hemos llegado a saber algunas cosas sobre nosotros mismos: por ejemplo, que el hombre surgió en África y que era un viajero incansable. Sobre este segundo punto trataremos un poco más adelante. El primero es un concepto relativamente reciente: durante el siglo XIX y la primera mitad del XX, los antropólogos estaban convencidos, tanto por ideas preconcebidas de corte racista como por los primeros hallazgos (mandíbula de Mauer en Alemania, hombres de Cromañón en Francia y de Neanderthal en ambos países) de que el hombre se había originado en Europa.

Hemos conseguido rastrear nuestros orígenes hasta hace unos cuatro millones de años. En los años setenta, con música de los Beatles en su campamento de Hadar (Etiopía), el equipo del antropólogo Donald Johanson encontraba el esqueleto casi íntegro de un homínido que podía describirse como un hombre con cabeza de mono (un chimpancé bípedo, en otra versión) y que había vivido hacía tres millones de años. Era una hembra, «Lucy», nuestra abuela peluda, bautizada científicamente *Australopithecus afarensis*. Lucy era una mujer pequeña: medía poco más de un metro y pesaba treinta kilos. En 1978, un miembro del equipo de la antropóloga Mary Leakey descubrió, en un estrato de cenizas volcánicas compactadas en Laetoli, en Tanzania, una concavidad que le recordó a una huella humana. Era la pisada de un homínido, el principio de un rastro de 27 metros dejado por tres miembros de un grupo (¿una familia?) de *afarensis*. Hace casi cuatro millones de años, la pequeña banda recorrió una llanura en la que un volcán en actividad y un chaparrón repentino formaron una perfecta arcilla de modelar. ¿Buscaban comida, o quizás huían del volcán? Nunca lo sabremos, pero las huellas de Laetoli nos traen una imagen increíblemente vívida de nuestros antepasados mejor conocidos. Al cabo de un cuarto de siglo del hallazgo de Lucy, los paleoantropólogos están de acuerdo en que *afarensis*, una especie que parece durar un millón de años (entre 4 y 3 m.a.) pertenece al tronco del árbol genealógico homínido (Figura 21).

La búsqueda de fósiles aún más antiguos ha seguido dando resultados: ahora conocemos otros australopitecos que datan de 4,4 millones de años, y es previsible que en el futuro lleguemos a tener retratos de nuestros



21. Una propuesta de árbol genealógico para el hombre. Desde el *Ardipithecus* hasta *Homo sapiens*, las 17 especies fósiles halladas nos permiten hacernos una idea general sobre nuestros antepasados; pero los nueve signos de interrogación nos advierten de que nuestro linaje aún está lleno de dudas. La competencia fue fiera: por ejemplo, hace dos millones de años, hasta cuatro homínidos distintos convivieron en África Oriental. (En Tattersall, *Scientific American*, enero de 2000).

tatarabuelos de hace ocho o diez millones de años. La cuna es, desde luego, África Oriental, y en concreto las áreas cercanas al valle del Rift, una gran fosa tectónica de casi 3.000 kilómetros de largo que recorre de norte a sur esa parte del continente. Esta región, hoy ocupada por Etiopía, Kenia y Tanzania, parece haber sido la base de operaciones desde la cual los homínidos partieron a conquistar el resto de África primero, después el planeta, y por último el Sistema Solar. ¿Qué tiene de especial esta zona de la Tierra para que en ella surgiese la especie que iba a cambiar el mundo? Esta misma pregunta se hacía el paleontólogo francés Yves Coppens cuando, en 1982, en el descanso de un congreso, entró en una biblioteca universitaria y buscó un atlas.

Alfred Wegener había comenzado a gestar su idea de la deriva continental al contemplar en un mapamundi, allá por 1910, la forma de las costas atlánticas, y Coppens también vio, en un mapa de África que incluía la distribución de los primates, algo que le llamó la atención: el chimpancé y el gorila viven en las selvas tropicales, siempre al oeste del valle del Rift, mientras que todos los homínidos fósiles se han encontrado exclusivamente al este de la gran grieta. A estas alturas, los biólogos moleculares habían demostrado con sus relojes de genes lo que Darwin y sus contemporáneos solamente intuyeron: los grandes simios (y, en concreto, los chimpancés) son primos cercanos de *Homo sapiens*, es decir, comparten un antepasado común relativamente próximo en el tiempo. La divergencia se había producido hacía unos diez millones de años, y Coppens tuvo una intuición: si la edad del valle del Rift coincidía... En revistas de tectónica, cuya existencia había desconocido hasta entonces, encontró el dato que buscaba: el *rift*

había surgido hace ocho millones de años, cuando las corrientes del manto terrestre intentaron dividir África en dos partes desiguales. Entonces el paleontólogo estuvo seguro de que la causa de la divergencia de simios y homínidos era geográfica.

Hemos visto antes (al intentar explicar el tórrido clima de hace cien millones de años, por ejemplo) cómo los fenómenos geológicos profundos tienen con frecuencia efectos en la superficie. De ser cierta la idea que germinó en la mente de Yves Coppens, es probable que la formación de esta gran cicatriz africana haya cambiado la historia del mundo al propiciar la aparición de *Homo sapiens*. La hipótesis era simple: antes de la formación del valle, África ecuatorial era, desde el punto de vista faunístico, una provincia homogénea habitada por el antecesor común de homínidos y simios. Hace ocho millones de años, las fuerzas internas de la Tierra estiraron la corteza en el sector oriental, provocando su rotura y el hundimiento de algunos bloques, como teclas de piano pulsadas. A su vez, este colapso fue compensado con la elevación de los bordes: en algunas zonas, el desnivel superó los 2.400 metros. Esta barrera topográfica alteró la circulación atmosférica: el aire húmedo del Atlántico siguió dejando lluvias abundantes en todo el ecuador africano al oeste del valle, mientras que en la parte este se desarrolló un clima monzónico, con estaciones secas, y la selva se convirtió pronto en una sabana abierta. Los primates del oeste carecieron de estímulos para evolucionar, mientras que los del este tuvieron que adaptarse a un ambiente totalmente nuevo: de esta adaptación nacieron los homínidos. Cuando años después Coppens fue invitado a Nueva York a dar una conferencia sobre su hipótesis, decidió llamarla, en honor de sus anfitriones,

«East Side Story»⁴⁵, la historia de cómo, cuándo y por qué el linaje del hombre surgió en el borde oriental de un valle africano.

HUMANOS

El siguiente capítulo de la historia nos obliga a ampliar ligeramente el campo de visión: *afarensis* vagabundea por las sabanas del continente y se establece en algunas de ellas. Al cabo de un tiempo, estos grupos se aislarán y darán lugar a nuevas especies de homínidos. Así se originó, en la actual Suráfrica, *Australopithecus africanus* (3 a 2,5 m.a.), que parece una versión ligeramente avanzada de *afarensis*, con rasgos faciales menos simiescos, y a quien cabe el honor de haber sido el primer homínido descubierto en África. Su definidor no fue un antropólogo sino un médico, el surafricano Raymond Dart, quien se atrevió, nada menos que en 1925 y en pleno *apartheid*, a desafiar la opinión unánime de los científicos de su época sobre el origen europeo del hombre. Contemporáneos a *africanus*, pero no tan viajeros (puesto que se originaron en el mismo valle del Rift) son los *Paranthropus* o australopitecos «robustos» (en contraste con *africanus*, de formas más delicadas, a los que se suele llamar «gráciles»). *Paranthropus* era un tipo completamente distinto de homínido, con un cráneo dotado, como el del gorila, de grandes salientes óseos destinados a la inserción de potentes músculos muy adecuados para la masticación de tubérculos.

⁴⁵ Homenaje a *West Side Story*, un musical de Broadway que trasponía a Nueva York la historia de Romeo y Julieta, y cuya versión cinematográfica, realizada en 1961, se convirtió en un hito de la historia del cine.

Hace dos millones de años, los *Paranthropus* no sólo se mantenían al este del valle, sino que se habían extendido a Suráfrica. Pero además, los *afarensis* habían seguido evolucionando: tanto, que hacia esta época dejaron de ser *Australopithecus* para convertirse en «hombres» (empleo aquí esta palabra con el sentido de pertenencia al género *Homo*). Ahora bien, ¿cómo definir la humanidad a partir de unos cuantos huesos? El problema no es trivial, sobre todo teniendo en cuenta que los cambios anatómicos son sutiles: sólo los especialistas pueden distinguir (y no sin discusiones) el cráneo de un australopiteco grácil del de un hombre. Aunque hay una clara diferencia entre la capacidad craneal de los simios actuales (~600 centímetros cúbicos) y la del hombre moderno (>1.300), esta distancia se estrecha más y más a medida que nos remontamos en el tiempo, de manera que los primeros hombres tienen volúmenes cerebrales que se solapan con los simiescos. Por otra parte, no es del todo convincente el criterio de la fabricación de herramientas, porque se encuentran piedras talladas no sólo asociadas a los restos de *Homo*, sino también a los australopitecos robustos de la misma edad. El criterio actual es incluir un fósil en el género *Homo* cuando presenta una batería de caracteres tanto anatómicos como culturales considerados «humanos». Entre los primeros están una cara más bien pequeña y con tendencia vertical, molares reducidos y nariz prominente; entre los segundos, el encontrar herramientas asociadas a los fósiles. El lenguaje sería un elemento decisivo, pero es difícil identificarlo en el registro, aunque los antropólogos consideran que la caza organizada requiere el uso de algún tipo de lenguaje.

De esta forma tan complicada reconocemos como humanos a nuestros antepasados. Pero la presencia de

indicios de cultura en paralelo a los cambios anatómicos significa que la evolución ha cambiado de ritmo, haciéndose no sólo más rápida, sino también más diversa. Hace dos millones de años, en el valle del Rift coexistieron hasta cuatro especies diferentes de homínidos: tres «hombres» y un *Paranthropus*, un pequeño *big bang* de la evolución homínida. De ellos, los más importantes son *Homo habilis* y *Homo ergaster* («trabajador»). Los fósiles de *habilis*, que tienen edades de entre 2,3 y 1,8 millones de años, se llamaron así por encontrarse asociados regularmente a guijarros toscamente trabajados para sacarles filo. Los antropólogos se han preguntado para qué querría un instrumento cortante un homínido que se alimentaba de frutas; probablemente *habilis* era un carroñero ocasional. Pero sus aptitudes no son sólo procedimentales, sino también anatómicas: aunque es contemporáneo de *africanus*, casi duplica su capacidad craneal. *Homo ergaster* es ligeramente posterior (1,9 a 1,3 m.a.) a *habilis* y muy probablemente evolucionó a partir de poblaciones de aquél. Quizá *ergaster* fue el primer «mono desnudo», ya que no parece lógico que nuestro sistema de refrigeración por glándulas sudoríparas surgiese de la noche a la mañana. Se le puede considerar como el primer homínido de «diseño» moderno, y exhibe rasgos que aparecerán enseguida más nítidos en *Homo erectus*, uno de los grandes protagonistas de la evolución humana.

VIAJES

Homo ergaster se reveló muy pronto como un soberbio andarín: nadie le vio salir de su cuna en África, pero hace 1,8 millones de años ya había llegado a China y Java.

¿Cuál fue el motivo de nuestros antepasados para emprender migraciones que les llevaron a todos los continentes del Viejo Mundo a lo largo de un millón de años? Podríamos responder a esta pregunta de forma simple: también migran las aves buscando climas favorables, e incluso algunos mamíferos en busca de mejores pastos. Sin embargo, los movimientos de los homínidos (como se llama al grupo de primates que comprende a *Homo sapiens* y a sus antecesores directos) no se parecen a los bien organizados viajes estacionales de ida y vuelta de las aves o los herbívoros, sino más bien al correteo nervioso de las hormigas en busca de alimento. Algunos antropólogos sospechan que los actuales problemas del hombre con su medio ambiente son sólo el final de esta incesante búsqueda de recursos «más allá del horizonte» que comenzó en África hace un poco menos de dos millones de años.

Al llegar a Extremo Oriente, *Homo ergaster* se había convertido en *Homo erectus* («hombre erguido»), al que en un primer momento se llamó *Pithecanthropus* (literalmente, «hombre-mono»). Fue el homínido más longevo, ya que los últimos *erectus* no desaparecieron de Indonesia y Australia hasta hace 40.000 años, y alguno puede incluso haber perdurado hasta los 10.000. Pero no sólo es el modelo más duradero, sino también el que más anécdotas ha acumulado sobre sus huesos. Comenzando por su nombre antiguo, escasamente adecuado, ya que no tenía nada de «mono», sino que se trataba de un hombre moderno: como ha dicho un antropólogo, si un *erectus* viajase hasta el presente y subiese a un autobús, el conductor quizá le miraría de reojo; pero si lo intentase un *Homo habilis*, pararía el vehículo y llamaría urgentemente al zoo. El anecdotario de los hallazgos de este

homínido incluye insólitas peripecias: el primer descubridor de *Pithecanthropus* fue de tal manera ridiculizado que, en venganza, tuvo el cráneo guardado durante treinta años en una caja fuerte, sin verlo ni enseñárselo a nadie; por su parte, los restos hallados en China (el *Sinanthropus*) fueron robados por los japoneses en la Segunda Guerra Mundial, y luego desaparecieron para siempre. Uno de sus descubridores, Pierre Teilhard de Chardin, un jesuita antropólogo y filósofo, estaba de tal forma orgulloso de su hombre fósil que se apresuró a descalificar los primeros hallazgos africanos: «el *ramo* Australopiteco es un grupo marginal, cerrado; [...] quizá haya de incluirse en el *brote* de la especie humana, pero a título de ensayo abortado». Por último: si la denominación de pitecántropo era inadecuada, la actual es aún más penosa, ya que la postura bípeda a la que se refiere la palabra *erectus* se había conseguido al menos cuatro millones de años antes.

Pero *erectus* es importante por muchas razones. A lo largo de su evolución, su capacidad craneal aumentó de 800 a 1.100 cm³, fue el primer cazador organizado (y por tanto, también el primer homínido carnívoro), descubrió el fuego y fabricó herramientas de manera sistemática. También fue el primero que vivió en campamentos estables aunque, paradójicamente, nunca perdió los hábitos viajeros de su padre el *Homo ergaster*. En este punto se plantea, sin embargo, uno de los enigmas de la evolución homínida: mientras que *ergaster* llegó desde África a Extremo Oriente en sólo 100.000 años, su camino hacia Europa parece, por algún motivo desconocido, mucho más arduo; otra posibilidad es que encontrara posadas más acogedoras, ya que tardó más de un millón de años en recorrerlo. Los restos europeos más

antiguos de un descendiente de *ergaster* son los del *Homo antecessor* hallado en la Gran Dolina de Atapuerca (Burgos) a partir de 1994. Tenía un rostro vertical, fabricaba instrumentos toscos y era caníbal, aunque no se sabe si ocasional o sistemático. Pero su característica crucial es su antigüedad, de al menos 780.000 años, que hace de *antecessor* el primer europeo, por el momento. El enigma es: ¿dónde están los homínidos que marcan la migración desde África hasta Europa? La distribución de los fósiles indica sin lugar a dudas que la invasión no se produjo por Gibraltar, sino desde el este; por lo tanto, esta oleada migratoria tuvo que atravesar todo el continente para llegar hasta la península Ibérica; y, en un área tan bien explorada desde el punto de vista geológico, tendrían que haber aparecido ya algunos restos.

Este pequeño misterio forma parte de la gran discusión actual sobre la evolución humana. Las hipótesis que compiten son dos: la «multirregional» y la «africana» (que los anglosajones vuelven a denominar, con una imagen cinematográfica, *Out of Africa*⁴⁶). Según la primera, los descendientes de *Homo ergaster* se extendieron por todo el Viejo Mundo hace aproximadamente un millón de años, pero adquiriendo características «regionales» que darían lugar a las razas del hombre moderno: la idea básica es que *Homo sapiens* es una especie de origen cosmopolita. La hipótesis africana propone que, si bien *ergaster* colonizó toda Eurasia y África, fue tan sólo en este último continente donde evolucionó a *Homo sapiens*, que luego se extendió al resto. Así pues, de África habrían salido no una sino dos oleadas migratorias: la de

⁴⁶ «Lejos de África», película dirigida por Sidney Pollack en 1985 que en España se tituló *Memorias de África*.

ergaster hace dos millones de años y la de *sapiens* hace algo más de 100.000. El problema es que no hay datos decisivos en favor de ninguna de las dos ideas. Cuando, en 1987, se hicieron pruebas multirraciales de biología molecular, se concluyó que parte del material genético de cualquier persona de cualquier raza parecía tener el mismo origen, un ancestro africano que la prensa popular se apresuró a denominar «Eva» y que habría vivido hace entre 200.000 y 130.000 años. El espaldarazo al modelo africano parecía definitivo, pero luego han surgido muchas dudas sobre el calibrado de los relojes moleculares. En concreto, la suposición de que las mutaciones se acumulan a un ritmo continuo no ofrece muchas garantías: algunos científicos recuerdan su sospechoso parecido con la hipótesis de que el iridio se acumulaba a velocidad constante en los sedimentos marinos, que los Alvarez hicieron saltar en pedazos con su hipótesis del impacto asteroidal. En estos momentos hay una cierta mayoría de paleoantropólogos a favor de la hipótesis africana, pero el tema no está resuelto. La discusión, además, no es solamente académica sino que tiene una vertiente ideológica: algunos defensores de la hipótesis africana han acusado a sus adversarios de racistas por oponerse a la idea de que las diferencias raciales son muy recientes, y por lo tanto superficiales. Éstos contraatacan argumentando que la hipótesis africana requiere que los descendientes de Eva colonizasen toda Eurasia sin *ningún* cruce con los otros homínidos; lo cual, dicen no sin razón, no ha sucedido en ningún ejemplo histórico de conquista.

La copa de nuestro árbol genealógico comprende otras tres especies. *Homo heidelbergensis* pobló todo el Viejo Mundo entre 500.000 y 150.000 años. Toma su nombre de la localidad alemana cerca de la que se en-

contró, en 1907, su primer resto, un enorme maxilar (la «mandíbula de Mauer»), del que se dijo de todo, incluso que era un hueso de un cosaco de los ejércitos napoleónicos. Se trata de individuos de gran capacidad craneal, hasta 1.400 cm³ (la media del hombre moderno es de 1.375 cm³), pero de cráneo bastante más robusto que el de *Homo sapiens*. Igual sucede con *Homo neanderthalensis*, que parece una especie derivada de la anterior que surge en Europa y Oriente Próximo hace 150.000 años, dotado de huesos macizos y potente musculatura. Las investigaciones más recientes indican que los neandertales no eran los seres brutales que muchos imaginan: inventaron los vestidos para sobrevivir a los periodos glaciales y crearon una cultura (llamada musteriense) relativamente avanzada. Algunos de los neandertales de Oriente Próximo (y también el esqueleto de un niño hallado recientemente en Portugal) parecen tener rasgos en cierto modo híbridos con *Homo sapiens*; pero tanto ellos como las poblaciones de neandertales típicos comienzan a desaparecer hace 40.000 años; desde hace 30.000, pasan a enriquecer la galería de los homínidos fósiles.

Mucho se ha escrito (tanto desde el punto de vista científico como en la ficción) sobre el papel que *sapiens* desempeñó en la extinción de los neandertales, y aún hoy, las opiniones de los expertos siguen encontradas. El contacto se ha comparado con un «encuentro en la tercera fase», pero entre alienígenas del mismo planeta: salvo en algunas películas, la cultura más atrasada siempre sale perdiendo. De todos modos, los especialistas subrayan que ambos homínidos coexistieron durante algunos miles de años: «No fue una guerra relámpago», dice el arqueólogo Steve Kuhn, de la Universidad de Arizona. Por el contrario, parece como si este largo contacto hubiese

estimulado a las dos especies, que produjeron durante el periodo en el que coexistieron mejores herramientas de piedra y ornamentos más refinados. Los partidarios de la hibridación sugieren que, después de todo, quizá los neandertales no se extinguieron sino que se diluyeron en las poblaciones, mucho más abundantes, de *sapiens*. Sin embargo, los estudios de genética molecular no han detectado genes neandertalenses en el hombre moderno; el problema es que parece probado que partes del ADN mitocondrial pueden desaparecer en los descendientes, con lo que estamos de nuevo en la indeterminación. Según recientes investigaciones, el último de los neandertales vivió en algún lugar de Iberia, arrinconado por la expansión de *sapiens*, hace 28.000 años. Nadie ha podido demostrar que dicha expansión fuese cruenta; lo que sí es indiscutible es que, habiendo sido nombrado heredero único de todo el planeta, el hombre moderno se dedicó, casi inmediatamente, a hacer la guerra contra sí mismo.

LOS MOTORES DE LA EVOLUCIÓN HOMÍNIDA

Los homínidos fósiles son excelentes ejemplos de equilibrio intermitente en la evolución, pero también de evolución acelerada. Exceptuando *Homo erectus*, las especies de homínidos atraviesan el escenario como cometas. Por eso es el momento de preguntarnos cuál fue el eficiente motor que en poco más de cuatro millones de años convirtió un peludo primate en la especie dominante en el planeta. Cuando se aborda esta cuestión desde una perspectiva histórica se puede apreciar una interesante evolución de las ideas sobre este tema. Por ejemplo, Charles

Darwin concedió una gran importancia evolutiva a la posibilidad de liberar las manos de las tareas locomotoras, con lo que aquéllas podrían dedicarse a manejar herramientas, y específicamente las armas defensivas que le eran vitales en su competencia con los grandes depredadores de la sabana. Esta interpretación literal de la «lucha por la vida» fue la que recogió Stanley Kubrick en el preámbulo de su película *2001: una odisea espacial*.

A principios del siglo XX, con el darwinismo en retroceso (antes de que los genéticos viniesen a rescatarlo), se pensó que el aumento rápido de la masa encefálica, y no la capacidad defensiva, era la clave de la hominización. Más tarde, en los años cincuenta, en un periodo de gran avance industrial, se puso de nuevo el énfasis en el hombre como fabricante de herramientas. En los sesenta, la época de las ideologías de la comunicación (como la «aldea global» de McLuhan), se hizo hincapié en que la capacidad de utilizar un lenguaje sería el auténtico trampolín de la evolución homínida. En los setenta, la base de muchas teorías sobre el origen del hombre fue la imagen de la cooperación decisiva de la mujer recolectora: era la época de mayor expansión del movimiento feminista. Por último, en el fin de siglo, con la mujer incorporada en masa al mundo del trabajo, cunde la idea de que el impulso decisivo para la hominización se consiguió cuando *Homo erectus* se organizó en una estructura dual de caza (el hombre) y recolección (la mujer), en la que compartían los alimentos obtenidos por cada uno en campamentos estables.

Esto no significa que se deban descartar estas hipótesis sucesivas a favor de la última, sino que el origen del hombre es un tema con una fuerte carga ideológica, y por tanto muy permeable a las ideas dominantes en cada

etapa social. La progresión hacia el nivel humano ha sido un proceso complejo además de rápido, cuyo primer desencadenante fue con mucha probabilidad la postura bípeda, adquirida por algún antepasado de *Australopithecus afarensis* hace ocho o diez millones de años. Pero, ¿por qué algunos australopitecos comenzaron a caminar sobre dos patas? La hipótesis más verosímil sigue siendo que un cambio climático convirtiese en sabana parte del bosque: la postura bípeda es una forma más eficiente de recoger alimento en este tipo de entorno. De forma que, volviendo a la idea de Coppens, podríamos concluir que el culpable último de que estemos aquí es la energía liberada por ese motor térmico que es la Tierra, una energía capaz de cambiar el paisaje hasta hacerlo irreconocible; y con él, el clima y la vida.

MARTE EN EL OESTE

En lo más lejano del noroeste de Estados Unidos existe un área conocida como *channeled scablands* (literalmente, «costras acanaladas»), del tamaño aproximado de Aragón y adornada por un extraño paisaje: una topografía plana cortada por profundos valles como tajos en el duro basalto, y huellas diversas de que el agua no se conformó con circular por su fondo, sino que inundó también las divisorias, para lo cual tendría que haber alcanzado alturas de hasta 300 metros. Bloques de hasta cinco metros de diámetro sin ninguna huella glaciaria se encuentran entre los valles, y enormes agujeros como los que se forman al pie de las cataratas adornan la base de algunos escarpes. En 1923, el geólogo norteamericano Harlen Bretz propuso que esta topografía tan especial

era el resultado de la erosión causada por la liberación catastrófica de una enorme cantidad de agua de deshielo, aunque no podía precisar la causa de la catástrofe. En un cálculo preliminar, Bretz estimaba el caudal del flujo en 1,9 millones de metros cúbicos por segundo, pero avanzaba también que la cifra era un mínimo, y expresaba su convicción de que cálculos más precisos la elevarían notablemente.

Las ideas de Bretz fueron muy mal recibidas, y no es difícil imaginar por qué. Sólo hacia 1840, tras el *Discours de Neuchâtel* de Agassiz, habían podido librarse los naturalistas de las ideas de raíz bíblica sobre el Diluvio Universal y la gigantesca inundación que provocó. Sin embargo, como las viejas ideas no son fáciles de desarraigarse, diluvios más o menos universales habían seguido apareciendo como propuestas pseudocientíficas hasta principios del siglo XX: una experiencia demasiado próxima como para que los geólogos norteamericanos admitiesen siquiera la posibilidad de una inundación catastrófica que pudiese anegar una región entera. En 1927, la Sociedad Geológica de Washington (el estado donde se hallan los *scablands*) organizó un congreso para discutir el tema, en el que todos los asistentes se unieron contra las ideas de Bretz. Uno de los participantes pidió que se hicieran «todos los esfuerzos necesarios para explicar las *scablands* sin recurrir a una suposición tan violenta». Toda una cruzada científica, pero que olvidaba algunas normas científicas básicas, como la de conocer aquello de lo que se habla: muchos de los adversarios de la hipótesis catastrofista confesaban que no habían estado nunca en el terreno sobre el que discutían.

Una persona que sospechaba algo de lo que podía haber sucedido era James Pardee, un joven geólogo del

Servicio Geológico que no sólo conocía los *scablands* sino también el vecino estado de Montana, donde había estudiado un lago de desagüe glacial, el Missoula (hoy desecado), que se había formado en la última retirada del casquete glaciar que cubrió buena parte de Norteamérica hasta hace unos 8.000 años. ¡Pardee conocía la causa que Bretz no había podido encontrar! Pero, en un informe interno, había propuesto una idea no demasiado distinta de la de Bretz, y su jefe lo había rechazado como catastrofista. Así que Pardee no intervino en el coloquio, del que Bretz salió rechazado, pero no vencido. El misterio de los *scablands* se había convertido en un tema de moda en la geología norteamericana, y varios geomorfólogos comenzaron a estudiarlo desde un punto de vista gradualista; aunque quizá sería mejor decir con anteojeras gradualistas.

En 1940, en otra reunión científica, los revisionistas presentaron sus conclusiones, y esta vez Pardee sí habló, demostrando que el lago Missoula se había drenado en cuestión de horas, probablemente a causa de la rotura de la barrera de hielo que lo cerraba. El resultado habría sido la formación de un muro de agua de varios cientos de metros de altura que se movió a gran velocidad hacia la región de los *scablands*, la avanzadilla de una inundación catastrófica provocada por los 2.000 kilómetros cúbicos de agua que contenía el lago. Fue el triunfo de Bretz, que en 1952, ya cerca de los setenta, aún pudo hacer una última campaña de campo para resolver los problemas que quedaban pendientes, y publicar varios artículos, hoy convertidos en clásicos, sobre la dificultad de las nuevas ideas científicas para abrirse paso cuando van contra principios muy arraigados. El caudal definitivo se calculó en 10 millones de metros cúbicos por segundo.

En 1965, tras realizar una excursión al lugar de los hechos, un grupo internacional de geomorfólogos telegrafió a Bretz (que ya no estaba para excursiones): «Ahora, todos somos catastrofistas».

Por fin, en 1973, el geólogo de la NASA Harold Masursky, al describir los paisajes de Marte que la sonda *Mariner 9* descubría por primera vez para los ojos de los terrestres, dijo que estaban viendo en otro planeta lo mismo que Harlen Bretz había visto en un extraño rincón de la Tierra justo medio siglo antes: las huellas de unas increíbles, catastróficas inundaciones. En efecto, buena parte de Marte está surcada por cauces secos de una magnitud descomunal: sus desembocaduras tienen decenas de kilómetros de ancho. Y en los cursos de estos *amazonas* marcianos la topografía es igual que la de las *channeled scablands*.

EL DRYAS RECIENTE Y LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO: MENSAJES DEL PASADO CERCANO

El lago Missoula fue uno más de los lagos de desagüe glacial que se formaron desde hace 18.000 años, cuando los casquetes de hielo comenzaron a retroceder. Hace unos 11.000 años, cuando la fusión de los glaciares estaba anunciando el final del último periodo glacial, un enorme lago, al que se ha dado el nombre del naturalista suizo Agassiz, se formó hacia el centro de Canadá. El río Misisipí drenaba el lago Agassiz hacia el golfo de México hasta que el retroceso del hielo brindó al agua del lago una salida más fácil, a través del río San Lorenzo, hasta el Atlántico norte. La llegada a éste de una gran cantidad de agua dulce rebajó la densidad del agua atlántica...

y cien años después el hielo no sólo había detenido su retroceso, sino que estaba avanzando de nuevo sobre Europa. Éstos son los datos, pero ¿cuál es su conexión? La mayoría de los climatólogos están de acuerdo en que la clave final del clima está en los océanos. En el Atlántico norte se genera una corriente de agua fría profunda que baja por el Atlántico sur hasta el Índico y luego el Pacífico, donde se calienta y vuelve como corriente de superficie. Este flujo es el gran distribuidor de calor en todos los continentes, salvo la Antártida, aislada de él por la corriente Circumantártica. Pero si el agua del Atlántico norte perdiese salinidad, perdería también densidad, con lo que no podría hundirse, la circulación oceánica mundial se interrumpiría y el planeta se enfriaría.

Ésta es la mejor explicación que tenemos para el brusco enfriamiento del clima de la Tierra durante mil años, alrededor de los 11.000, llamado Dryas reciente por la flor ártica *Dryas octopetala*, que acompañaba el avance de los glaciares. Este repunte del frío fue muy corto, ya que en esta época los datos orbitales de la Tierra implicaban un máximo de energía solar captada, lo que (siguiendo el calendario previsto por Milankovitch) acabó de forma inapelable con el último periodo glacial. En los siguientes 11.000 años no hemos tenido grandes sobresaltos climáticos: las civilizaciones que se han sucedido en los últimos milenios se han beneficiado de este anormalmente largo clima interglacial; aun así, ha habido algunos altibajos dignos de mención, como por ejemplo la llamada Pequeña Edad de Hielo, sucedida entre 1450 y 1850, cuatro largos siglos durante los cuales la temperatura media bajó 1,5 °C, nada serio si lo comparamos con los 7 a 10 °C que es el descenso típico en un periodo glacial. Y, sin embargo, las consecuencias fueron

importantes: por ejemplo, supuso el final de la colonia islandesa en Groenlandia (establecida en un periodo cálido entre 800 y 1200), ya que provocó la destrucción de su agricultura, y los viajes a Europa quedaron interrumpidos por un mar helado incluso en verano. En la misma Islandia, al igual que en buena parte de Inglaterra, los cereales no se pudieron cultivar, y el hambre fue generalizada en Europa. Los registros climáticos de otras partes del mundo denotan una crisis climática global: el nivel del lago Malawi, entre este país, Tanzania y Mozambique, bajó cien metros, lo que significa que la pluviosidad en la zona cayó hasta la mitad de la actual, en una sequía que empequeñece los recientes dramas subsaharianos. Parece evidente que, como en los periodos glaciales, las zonas climáticas se estrecharon hacia el ecuador, con lo que las áreas de selva pasaron a tener climas áridos. Cuando vemos hermosos valles que parecen recién abandonados por los glaciares, en el Parque de Yosemite o en los Alpes centrales, estamos contemplando la huella de la Pequeña Edad de Hielo.

No todos los efectos de este último periodo frío fueron negativos: a principios del siglo XIX, las praderas de Norteamérica eran más húmedas que en la actualidad. Las caravanas de colonos que invadieron estos grandes espacios lo hicieron atraídas por historias que hablaban de una tierra siempre fértil; desgraciadamente, hacia 1850 el clima cambió y los colonos tuvieron que adaptarse a una tierra semidesértica (la que vemos en las películas del Oeste). No tenemos ninguna explicación sólida sobre las causas de la Pequeña Edad de Hielo, ni sobre su brusco final. El hallazgo de que este último periodo frío coincidió con un mínimo de manchas solares y del flujo de partículas solares sobre la Tierra es

interesante, pero no decisivo: no sabemos cómo la actividad solar se refleja en el clima. Se ha sugerido que influye en la circulación de las masas de aire caliente, pero éste es un terreno incierto, en el cual, sin embargo, habrá que hacer progresos en el futuro inmediato, ya que muchas cosas dependen de nuestra comprensión del clima.

¿Cuáles serían las consecuencias de otra pequeña edad de hielo en nuestra nave sobrecargada? Podríamos pensar que nuestra tecnología nos libraría de los problemas de un mundo en el que los icebergs invadieran los mares hoy templados y las lluvias cambiaran de latitud; sin embargo, olvidamos que la tecnología moderna no está al alcance de buena parte de los habitantes del planeta, y que en cualquier caso se basa en recursos que no son inagotables. Cuatrocientos (o seiscientos, o tres mil) inviernos muy duros son una perspectiva temible. La tecnología, además, podría no entrar en esta disyuntiva como solución, sino como parte del problema. Si el calentamiento global prosigue (la temperatura media aumentó 1 °C en el último siglo), una de las consecuencias más inmediatas sería la desestabilización de los casquetes glaciares: el Antártico lleva un tiempo emitiendo icebergs de tamaño desusado pero, según las ideas dominantes sobre el efecto del agua dulce en el Atlántico norte, la fusión del de Groenlandia sería mucho más peligrosa, ya que podría alterar la circulación en el océano global. El calentamiento producido por el uso de combustibles fósiles podría ser, paradójicamente, el causante de una edad de hielo bastante más seria que la larga época gélida que padeció Europa durante toda la edad moderna. Un buen tema para reflexionar, ahora que todavía estamos a tiempo.

Tabla 4
*Acontecimientos clave en la Tierra meso- y cenozoica
 (250 m.a. hasta hoy)*

Edad (m.a.)	Datos	Interpretación
250	Reptiles mamiferoides	Supervivientes del Pérmico
"	Primeros arcosaurios	Comienza el dominio reptiliano
240	Fémur antireptación	Los reptiles apuntan al bipedismo
230	Primeros dinosaurios	Culminación de los reptiles
220	Ictiosaurios, teleósteos	Revolución marina mesozoica
210	Primeros mamíferos	De los últimos terápsidos
200	Dispersión de Pangea	Se abre el Atlántico central
160	India se separa de África	Origen del océano Índico
150	Primeras aves	Tercera invasión del medio aéreo
130	Primeras flores	El mayor cambio en la vegetación
"	Clima de invernadero	
110-70	60% del petróleo conocido	¿Efectos del calor del manto?
"	El mar sube >200 metros	
100	Compresión de los Andes	Avance de Suramérica hacia el oeste
100-75	Elevación de las Rocosas	Avance de Norteamérica hacia el oeste
67	Colisión India-Asia	Comienza a formarse el Himalaya
65	Últimos dinosaurios	¿Por la colisión de un asteroide?
55	Iberia choca con Francia	Origen de los Pirineos
45-5	Italia choca con Europa	Se forman los Alpes
20	Separación África-Arabia	Nacen los mares Rojo y Mediterráneo
15	Casquete antártico	¿?
"	Groenlandia se separa de Norteamérica	El Atlántico, totalmente abierto
5,7-5,3	Se deseca el Mediterráneo	Crisis tectónico-climática

Edad (m.a.)	Datos	Interpretación
4-3,5	<i>Australopithecus afarensis</i>	La base de la evolución homínida
3,7	Norteamérica se une con Suramérica	Cierre del istmo centroamericano
3	Glaciares en el hemisferio Norte	La glaciación se hace global
~2	Género <i>Homo</i>	La evolución se hace cultural
1	Máxima elevación del Himalaya	La India sigue empujando
0,2-0,1	<i>Homo sapiens</i>	¿Última migración africana?

REVISIÓN DEL CAPÍTULO IV.

p 207: El secreto de *Lystrosaurus*

¿Fue casual el éxito evolutivo de este simpático antepasado? Algunos paleontólogos así lo creen, pero otros han subrayado [*Science* (301, 1168) 2003] su tórax en tonel protegido por gruesas costillas como un indicio anatómico de un organismo adaptado a hacer inspiraciones profundas para aprovechar el escaso oxígeno del final del Pérmico; al fin y al cabo, lo mismo que debemos hacer cuando subimos a demasiada altura.

p 208: *Tanystropheus*, el pescador de caña

Añado la **Figura 29** para que todo el mundo pueda imaginarse a este extraño bicho triásico.



Fig. 29.

p 208: *Nessie* probablemente no ha existido nunca...

...y por eso, al final de la página, habría debido escribir “supuestamente” y no “aparentemente”.

p 209: Los ojos de *Ophthalmosaurus* (**Figura 30**)

Con 23 centímetros de diámetro, fueron los mayores (respecto al tamaño corporal) diseñados a lo largo de toda la evolución. Otros ictiosaurios llegaron a los 26 centímetros, sin duda un excelente instrumento para la pesca en medios abisales.

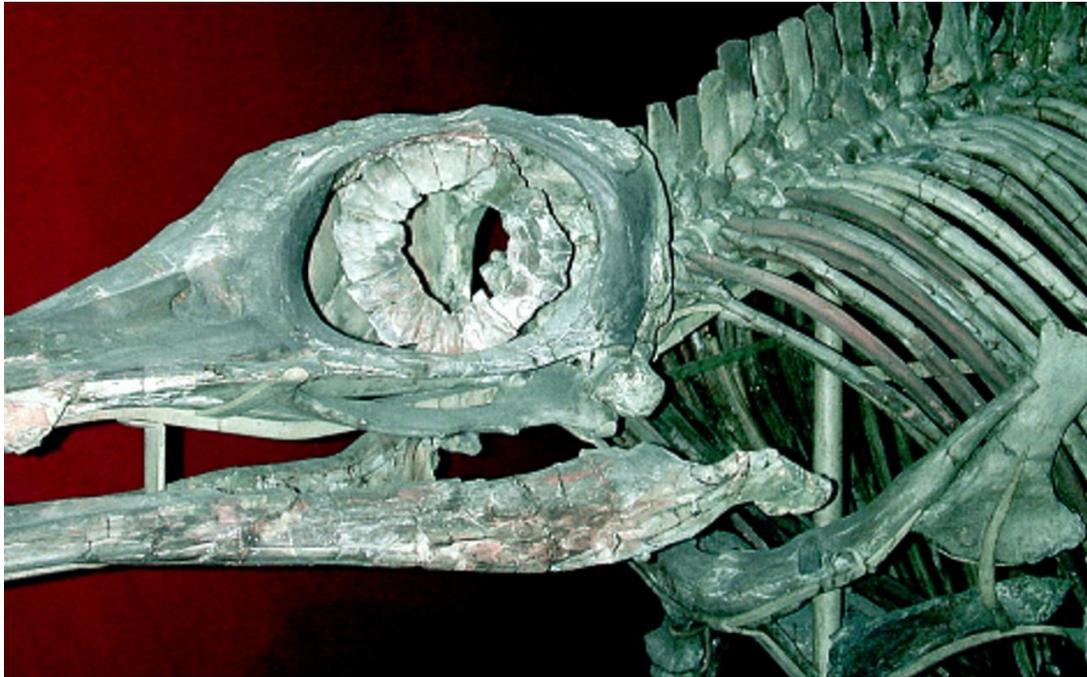


Fig. 30.

p 210: Los ammonites gigantes

Por si alguien no se creía lo de las ruedas de tractor, me he traído a *Pachydiscus seppenradensis* (**Figura 31**), hallado en el oeste de Alemania y que con sus 170 cm de diámetro es el mayor ammonites encontrado hasta ahora en el mundo.



Fig. 31.

p 211: Los mamíferos sólo hacemos fondos porque queremos

Como puede verse en la conocida **Figura 32**, la disposición de las extremidades mejoró desde los lagartos (izquierda) a los cocodrilos (centro), y especialmente en los mamíferos y dinosaurios (derecha).

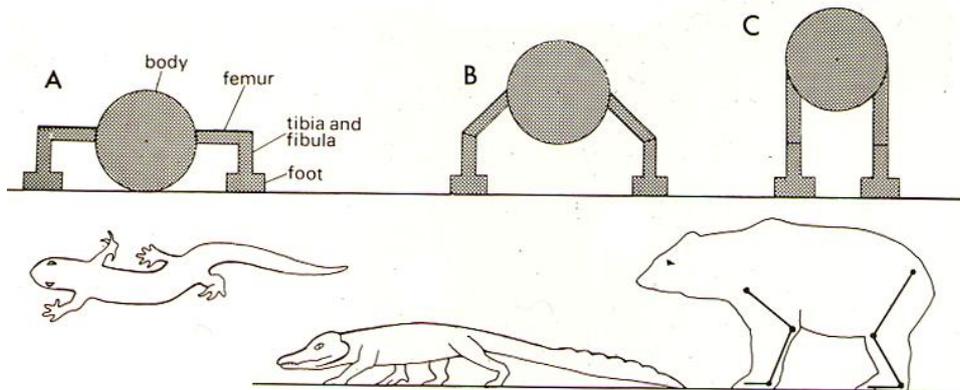


Fig. 32.

p 212: No fue una extinción menor...

...la del Triásico Final, como escribo en esta página; al contrario, como dije en la nota a la página 167, es una de las cinco grandes. Y el Triásico no acaba en -225 Ma, como pongo aquí, sino en -210 Ma.

p 214: La temperatura de los dinosaurios

Un estudio reciente [[Science, \(332, 1585\) 2011](#)] sobre saurópodos (los mayores dinosaurios) ha logrado determinar, midiendo los isótopos de carbono y oxígeno en el apatito de sus dientes, que su temperatura corporal era de 36 a 38°C, o sea prácticamente igual a la de los modernos mamíferos, y muy diferente a la de los cocodrilos (26 a 30°C). ¿Significa esto necesariamente endotermia? Casi: los autores no descartan totalmente la alternativa de la *gigantotermia*, es decir una temperatura corporal que guardase proporción con el tamaño. La solución definitiva: analizar dientes de saurópodos juveniles.

p 218-219: El gigantismo de los saurópodos

Pesos de hasta 80 toneladas, longitudes y alturas de más de 40 y 17 metros... Sin estos datos, *Diplodocus* y sus parientes no serían las celebridades que son. Un paleontólogo alemán y un veterinario suizo han propuesto [[Science \(322, 200\) 2008](#), y **Figura 33**] una elaborada hipótesis para explicar estos récords mediante una serie muy ingeniosa de innovaciones evolutivas. Los saurópodos tenían estómagos poderosos, por lo que no necesitaban masticar la comida, lo cual les liberaba de la necesidad de grandes mandíbulas: sus cabezas relativamente pequeñas podían entonces ser sostenidas por larguísimos cuellos, lo que les daba acceso a alimentos fuera del alcance de otros herbívoros. La desventaja potencial de pulmones tan alejados de la ventilación la resolvieron con sacos aéreos en las vértebras, al estilo de las aves. Además, un peso

muy bajo (~10 kg) al nacer y una meteórica tasa de crecimiento (madurez sexual en la segunda década, tamaño adulto en la tercera) reducían al mínimo el tiempo de vulnerabilidad. Pero este crecimiento inusitado, de 10 hasta 80.000 kg, implica un metabolismo basal muy intenso, que en animales tan grandes hubiese llevado a problemas de hipertermia. Los autores sugieren solventar esta dificultad con una sugerencia previa de otros paleontólogos: un metabolismo de ritmo flexible, que decrecería en los adultos. *Se non è vero, è ben trovato.*

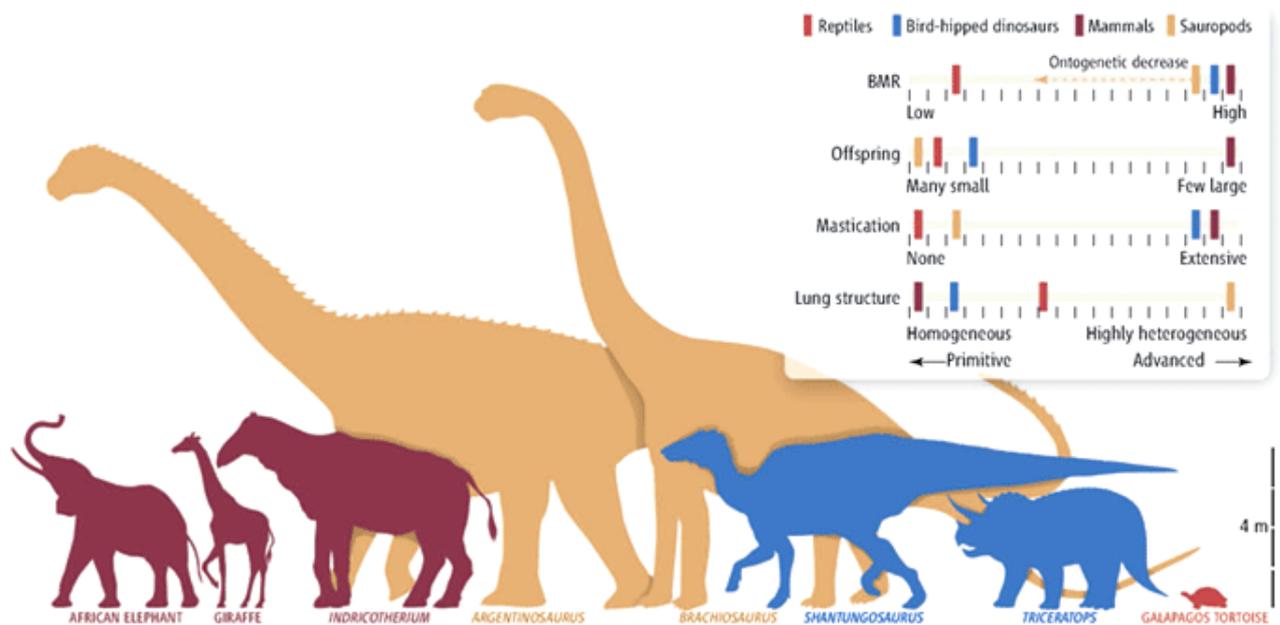


Fig. 33.

p 228: Sobre clima y tamaño corporal

Daniel Climent, de Alicante, me dice que, al contrario de lo que propongo aquí, en climas fríos los animales tienden a evolucionar hacia mayores volúmenes corporales. Parece lógico, supongo que es cierto y no tengo argumentos para discutirlo. También es verdad que los saurópodos gigantes del Jurásico disfrutaron de un clima tropical, pero todo el planeta lo tenía entonces. Quizá el menor tamaño de los dinosaurios cretácicos de Tasmania tenga una causa no climática.

p 230 [y de nuevo en la p 247]: No sólo las angiospermas tienen flores

Otra de mi amigo Climent. Donde escribí “plantas con flores (angiospermas)” debí haber escrito “plantas con frutos (angiospermas)”.

p 233: El periodo climático de moda

No es el tiempo presente, sino el tránsito Paleoceno-Eoceno (56 Ma). En la Figura 17 del libro se distingue muy bien, como un máximo (posterior al máximo cretácico) en la curva de temperaturas. El clima se estaba enfriando desde el final del Cretácico cuando vuelve a calentarse bruscamente: la temperatura media subió 6°C en 20.000 años. La

mejor explicación propuesta hasta hoy para este repunte térmico es que la subducción bajo el sur de Asia del fondo del mar de Tethys (que como mar tropical debió albergar grandes volúmenes de sedimentos carbonatados) liberó ingentes cantidades de CO₂ a la atmósfera [*Storms of my grandchildren*, Hansen, 150-153, 2009 y *Figura 34*].

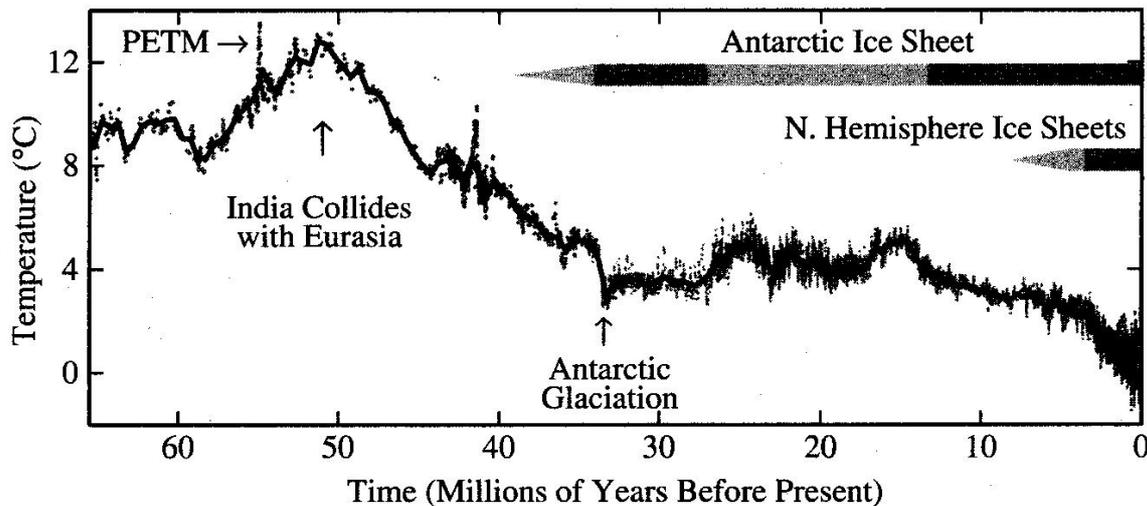


Fig. 34.

Lo que ha puesto de moda este periodo es la similitud con las variaciones actuales del clima. La gran diferencia entre los dos procesos es su velocidad: en el invernadero P-E el aumento de temperatura fue de 0,025°C por siglo; en el actual, de 1 a 4°C por siglo, o sea de 40 a 160 veces más rápido.

p 240: El equipo de los Alvarez...

...no era internacional (eran todos americanos) sino interdisciplinar. Éste sí que fue un *lapsus calami*.

p 244-249: La batalla del final del Cretácico

No ha terminado, y llevamos 31 años. En 2010, para conmemorar el 30º aniversario de la publicación del artículo histórico del grupo de los Alvarez, la revista *Science*, donde apareció, solicitó a un grupo de 41 investigadores del Mesozoico que hiciesen un resumen [*Science* (327, 1214) 2010] y una puesta al día: ¿Cuál era el *status científico* de la idea tres décadas después? Bueno, pues como en esas películas de reuniones familiares que terminan como el rosario de la aurora, se armó la marimorena. No entre los 41 (menos mal) sino entre ellos y los excluidos [*Science* (328, 973) 2010]. Por una parte, ilustres paleontólogos de vertebrados (entre ellos, Jack Horner, *el de Parque Jurásico*) pusieron el grito en el cielo en vista de que ningún especialista en este tema había sido invitado a participar. Por otra, los adversarios de la idea, que estaban hibernando, pero no muertos, contraatacaron con argumentos conocidos (la decadencia de la biosfera previa al impacto reducía a éste al papel de sepulturero) y otros reforzados: en ninguna de las otras grandes extinciones se ha podido hallar ninguna huella fiable de ningún impacto, y sí en varias de ellas coincidencia con vulcanismo masivo; y muchos otros impactos no han provocado ninguna crisis importante en la biosfera. ¿Por qué estos partidarios de los fuegos artificiales no se rinden y atienden de

una vez a los basaltos del Decán? Los 41 no cedieron ni un ápice. Negaron la supuesta decadencia de grupos previa al impacto y apuntaron que tampoco todas las erupciones volcánicas masivas han provocado extinciones. Insistieron en que lo que diferencia al asteroide de Chicxulub de otros impactores fue que cayó en una zona con enormes depósitos de carbonatos y sulfatos que, volatilizados, se convirtieron en agentes de una gran crisis ambiental.

¿Qué cosas habría que cambiar sobre este tema en una hipotética segunda edición del libro? Varias, aunque ninguna esencial. La mayor, que la acidificación de los océanos no se atribuye a ácido nítrico de origen atmosférico, sino a sulfúrico de procedencia sedimentaria (los sulfatos). Dos, que el hollín contenido en el *nivel mágico* no es universal [*Geology* (36-355) 2008], lo que significa que probablemente los incendios se circunscribieron a la zona del Golfo de México. Y tres, que los puntos donde se ha analizado el depósito del límite (el cual, por cierto, ya no se llama K/T sino K/Pg [de Paleógeno]) han pasado de 200 a más de 350 (*Figura 35*; las ilustraciones de detalle representan (a) una brecha de impacto de un sondeo realizado en el cráter; (b) plantas terrestres arrastradas hasta la plataforma continental por el tsunami en el yacimiento de El Mimbral, México; y (c) un megaripple, firmado también por el tsunami en el mismo yacimiento).

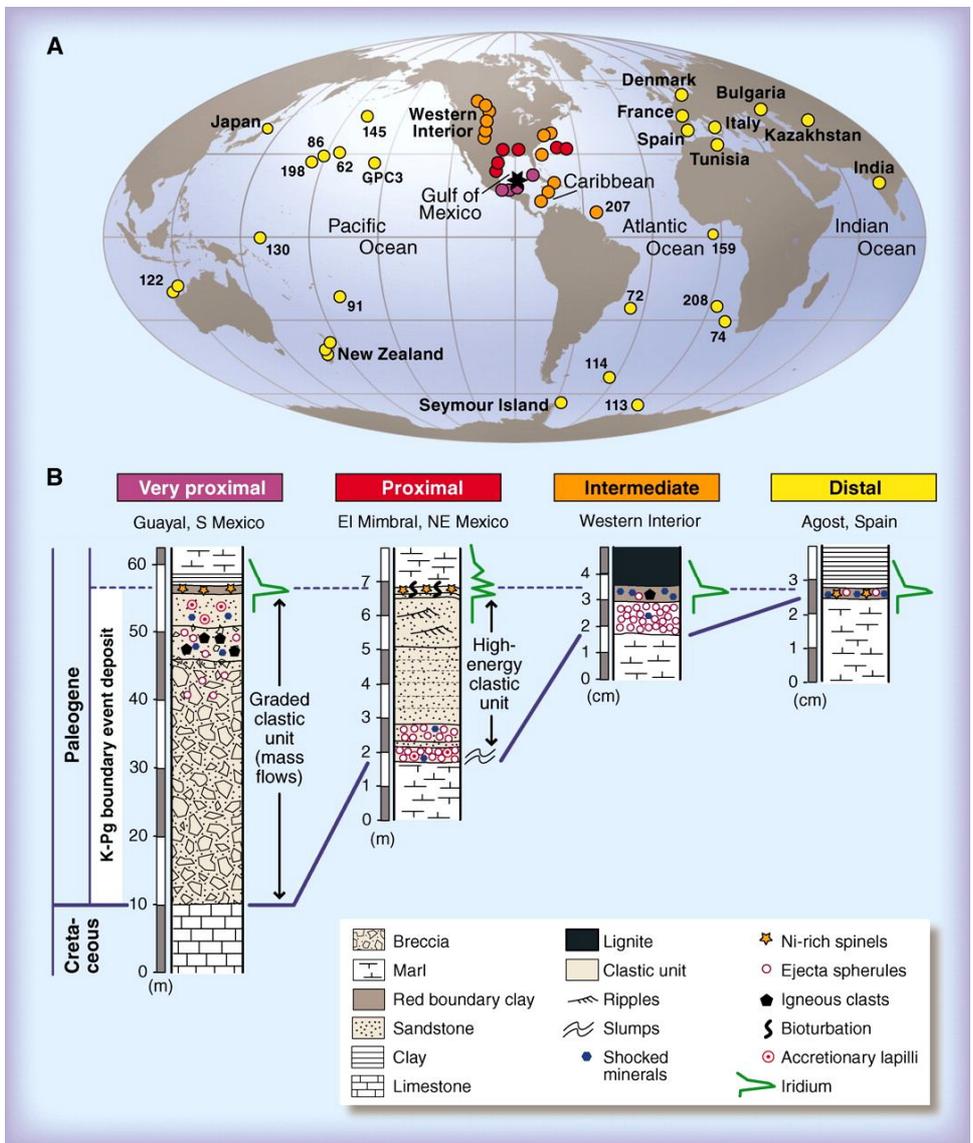


Fig. 35.

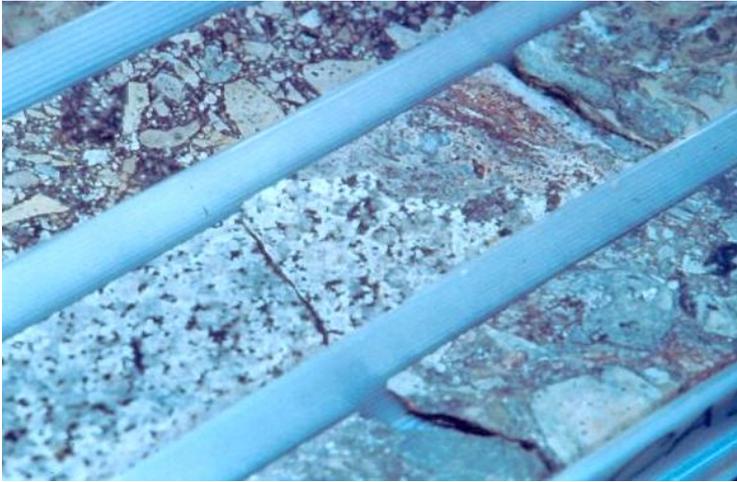


Fig. 35 a.



Fig. 35 b.



Fig. 35 c.

p 263-264: Los salares

Como éste de Uyuni, en Bolivia (*Figura 36*).



Fig. 36.

p 268-271: La glaciación Neógena

La hipótesis orogénica para esta glaciación se encuentra con el obstáculo de que las fechas de la colisión himaláyica son tremendamente erráticas: dos artículos publicados en 2011 proporcionan edades de ~70-65, y de >53,7 Ma. Faltaban entre 20 y 30 millones de años para que los glaciares comenzasen a aparecer tímidamente en el continente del sur, pero es cierto que el establecimiento de relaciones causales entre los sistemas terrestres no es algo simple (por eso, entre otras cosas, estamos metidos en el lío climático actual).

La datación de la apertura del Paso de Drake (el estrecho entre Suramérica y la Antártida) no es 30-25 Ma, como escribí en la p 271, sino ~35 Ma, lo que permite atribuir a este cambio paleogeográfico el papel principal (no se sabe si exclusivo) en el desencadenamiento de la glaciación en la Antártida.

p 273: En la tundra no hay árboles...

...como me recuerda benévolamente Daniel Climent. Debía haber escrito "taiga".

p 279-280: El relleno del Mar Mediterráneo

Se realizó, contra lo que propuse en estas páginas, a través de Gibraltar, y no por el sur y sureste español. La demostración se ha producido mediante sondeos marinos en la zona [*Nature* (462, 778) 2009], que han revelado la existencia de dos grandes surcos de 200 km de longitud (*Figura 37*), las huellas de una corriente unas mil veces más caudalosa que el actual Amazonas. A este ritmo, el relleno pudo hacerse en meses o pocos años.

Por una vez, Robert Dietz no tenía razón.

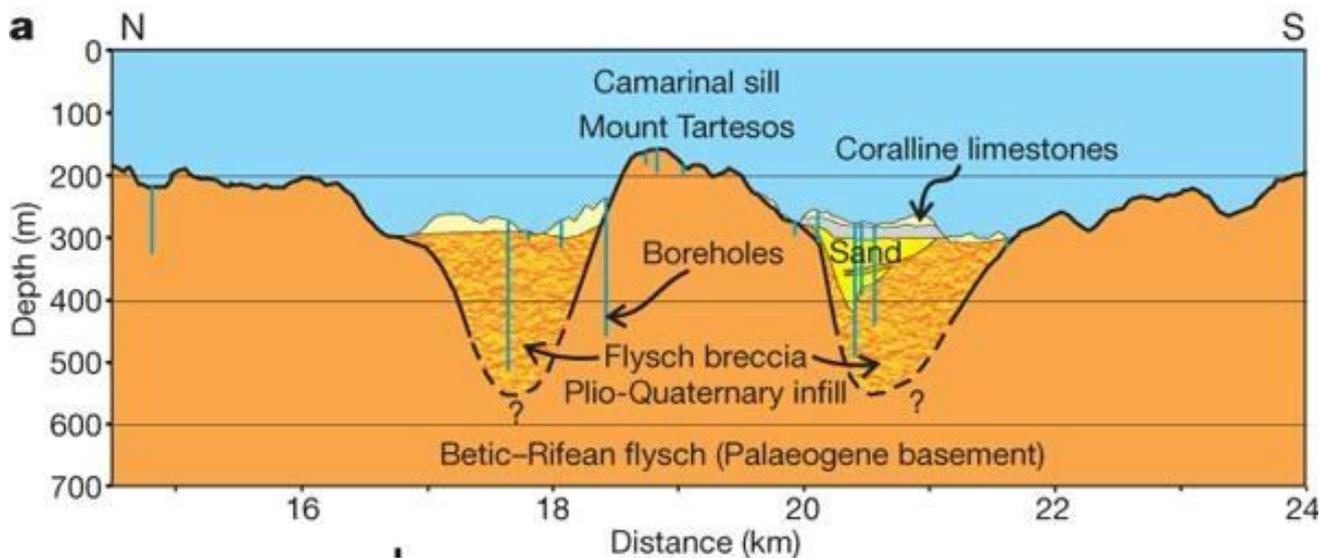


Fig. 37.

p 284-295: El origen del hombre

Desde 2001 se han producido en este tema importantes avances sobre dos líneas de trabajo: la Paleoantropología y el análisis genético de material fósil, o Paleogenética. En el primer campo, tenemos que contar con *Ardipithecus ramidus* (Etiopía, 4,4 Ma [*Science* (326, 1598) 2009]), con *Australopithecus sediba* (República Sudafricana, 2 Ma [*Science* (332, 534) 2011]), con ¿*Homo ergaster*? (Dmanisi, Georgia, 1,8 Ma [*Science* (288, 1019) 2000], que desbanca por mucho a *Homo antecessor* como europeo más antiguo) e incluso con los neandertalenses de Denisova (Siberia), que están dando mucho juego porque poseen una huella genética específica [*Nature* (468, 1044) 2010]. Unos y otros obligan a revisar un árbol genealógico como el que planteaba en la página 284. Sobre esta figura tengo ahora una objeción de fondo: ¿Por qué, si admitimos toda clase de trasvases e hibridaciones en el árbol de la vida (p 138-141) no se ha propuesto ninguna para *nuestro* árbol? Tengo la sospecha de que, como en tantas otras cosas, nos seguimos considerando subconscientemente como algo aparte del resto de la biosfera. Porque además, y éste es el otro avance importante, las hibridaciones se han demostrado: compartimos hasta un 8% de material genético con los neandertalenses [*Science* (331, 392) 2011].

La hipótesis *Out of Africa* se confirma: hubo básicamente dos oleadas migratorias de homínidos desde este continente. La primera, hace ~2 Ma, se extendió por Eurasia (**Figura 38**), evolucionando al hacerlo a *Homo erectus* y en último término a *Homo neanderthalensis*. La segunda, hace 60.000-50.000 años, estaba ya formada por *Homo sapiens*, que se hibridaron con algunas de las poblaciones euroasiáticas y reemplazaron al resto. No está claro en este momento si los nuevos hallazgos (*Ardipithecus*, *A. sediba*) son o no nuestros ancestros, o ramas laterales. El árbol de los homínidos también se parece cada vez más a un arbusto; por eso se empiezan a plantear estructuras evolutivas menos comprometidas, como la de la **Figura 39**.

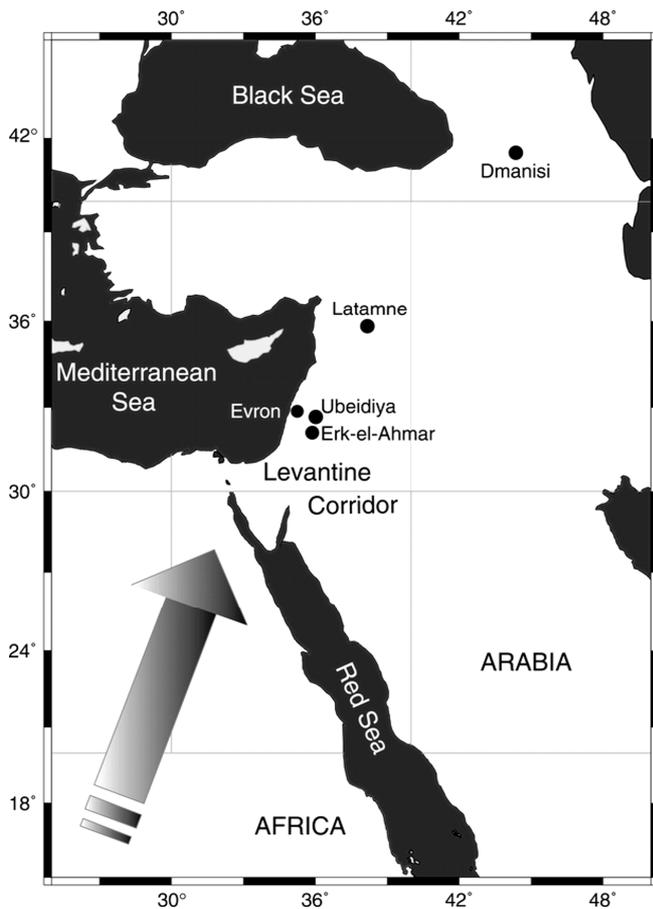


Fig. 38.

KNOWN HUMAN ANCESTORS

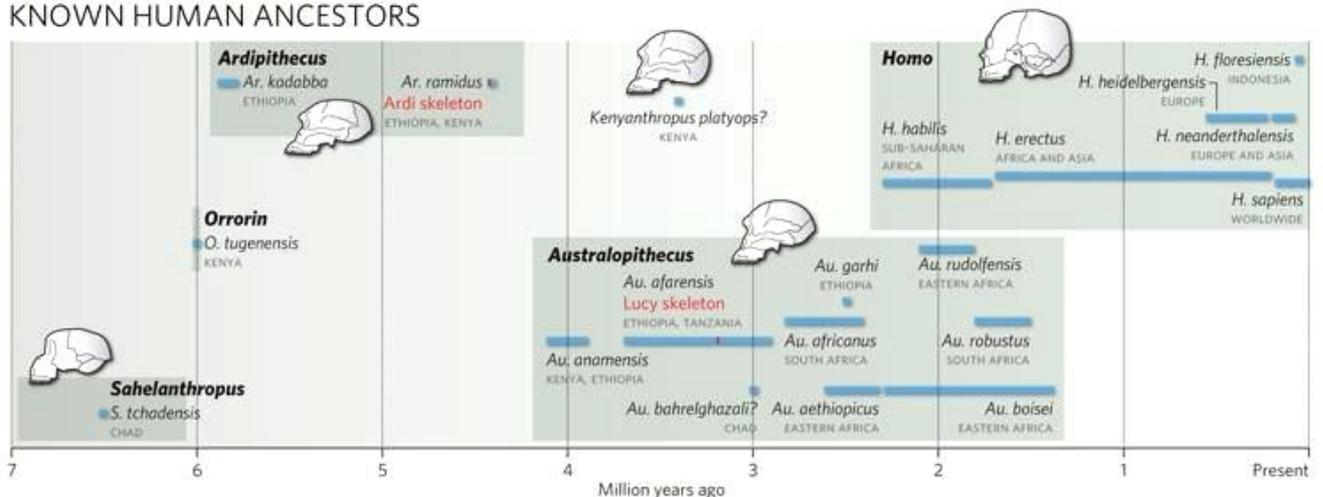


Fig. 39.

p 302: Los mínimos de actividad solar y la Pequeña Edad de Hielo

¿Son causa y efecto? Cuando superponemos (como en la **Figura 40**) los mínimos de actividad solar (de Spörer [1450-1540], Maunder [1645-1715] y Dalton [1790-1820]) y este periodo frío (1450-1850) nos encontramos con una situación ambigua, que comprende tanto los dichos periodos como otros con actividad solar casi normal. Por el contrario, hay multitud de datos que relacionan con precisión el clima con la composición de la atmósfera.



Fig. 40.

Un presente global

A BORDO DE UN MUNDO INQUIETO

El de 1975 fue un invierno frío en el norte de China: las temperaturas nocturnas bajaron con frecuencia de los -20°C . Pero el 3 de febrero, las autoridades locales, siguiendo el consejo de los sismólogos, decidieron evacuar la ciudad de Haicheng: más de un millón de personas comenzaron a abandonar sus viviendas para acampar al aire libre. Esa noche, el termómetro marcó -24°C . La evacuación se completó al día siguiente a las dos de la tarde. A las 19.36, un intenso terremoto cuyo foco estaba a sólo 12 kilómetros de profundidad sacudió Haicheng, destruyendo la mitad de sus edificios, nueve de cada diez en las zonas más dañadas. Murieron 250 miembros de los equipos de vigilancia, pero, de no ser por la evacuación, las víctimas hubiesen sido cientos de miles.

Esta historia aparece hoy en todos los libros de sismología como el mayor éxito en la predicción de terremotos. El problema es que después de 1975 se han producido en todo el mundo (incluyendo a China) catástrofes sísmicas que han causado decenas de miles de víctimas y que no se han podido prever. En Haicheng se combinaron varios factores favorables. Algunos años an-

tes se había producido una serie de terremotos en la región, con los focos sísmicos acercándose ominosamente a la ciudad: a 600 kilómetros en 1967, a 400 en 1969... En junio de 1974, los sismólogos detectaron en algunas zonas de la región hinchamientos centimétricos del suelo, un precursor sísmico muy característico, y predijeron un seísmo de magnitud media a alta en un plazo de uno a dos años. A principios de febrero de 1975, una serie de temblores fue identificada correctamente como el preludio del terremoto previsto, lo que desencadenó la decisión de evacuar.

La situación se repitió al año siguiente en la misma zona: esta vez la población sometida a prueba fue la de Tangshan, una ciudad del mismo tamaño que Haicheng y situada a 400 kilómetros de ella, en dirección a Beijing. Tangshan, como la mayor parte de China, estaba situada también en una zona sísmica: cuatro terremotos de cierta consideración se habían producido desde 1966, pero nunca uno de gran magnitud, por lo cual las construcciones no habían sido reforzadas contra los terremotos. Sin embargo, el 28 de julio de 1976, sin ninguna clase de aviso, un temblor aún más intenso que el de Haicheng y de foco muy somero sacudió la tierra, prácticamente debajo mismo de la ciudad. Las vibraciones fueron tan brutales que el suelo se deformó como si fuese un líquido. De los 350 edificios altos que había en la ciudad, 117 se derrumbaron por completo, y otros 80 parcialmente: las fotografías muestran los pisos de cemento amontonados unos sobre otros, como si las paredes se hubiesen evaporado. Veinte puentes se desplomaron o quedaron inutilizables, siete trenes descarrilaron, y hubo que demoler con explosivos cuatro altos hornos porque, sin agua ni electricidad, el acero que contenían se solidificó.

Las autoridades declararon 240.000 muertos, pero estimaciones extraoficiales cifraron las víctimas en un número tres veces mayor. Tangshan ha sido reconstruida en el mismo lugar.

Estas dos impresionantes historias sirven para enlazar el tema de los riesgos naturales con la historia de la Tierra que hemos contado en los capítulos previos. Los riesgos existen porque vivimos en un planeta que aún guarda en su interior una cantidad importante de energía: los 4.570 millones de años de su historia no han sido suficientes para calmar su furia y, aunque su juventud ya esté lejos, sigue siendo un lugar complicado para vivir. Es curioso pensar que las propiedades que hacen a la Tierra apta para mantener la vida son las mismas que la convierten en peligrosa. La Luna, por ejemplo, es un cuerpo seguro, aunque muerto. La diferencia con la Tierra es esencialmente de tamaño: los cuerpos más grandes pierden más lentamente su energía interna, por igual razón que la sopa se enfría más despacio en la olla que en el plato. Pero mayor tamaño también significa mayor campo gravitatorio, y por lo tanto capacidad de retener una atmósfera, algo indispensable para la vida. Así que podemos imaginar que cualquier planeta con una biosfera a bordo debe ser también un lugar cuyos habitantes tienen que elegir con cuidado el sitio donde viven. De esta forma, el estudio de los riesgos se puede considerar una continuación de la historia de un planeta con las condiciones adecuadas para producir una biosfera. Desde el punto de vista humano, los riesgos naturales son el presente de la historia de la Tierra.

Como vimos en el capítulo anterior, la corteza de China está sometida a una presión constante debido al continuado empuje que el centro de Asia sufre desde el

Himalaya. Esta deformación causa fallas, y el movimiento de los bloques en las fallas provoca a su vez vibraciones (ondas sísmicas) que se propagan a través de las rocas. La tarea de los sismólogos que se dedican a prever terremotos se resume en averiguar, de entre los miles de fallas de una región, cuál va a moverse, cuándo y con qué energía. Afortunadamente, cuentan con una batería de ayudantes, los cambios en las propiedades del terreno llamados precursores sísmicos; desgraciadamente, los precursores parecen actuar de forma caprichosa, ahora aparece, ahora no. Por supuesto que llamamos capricho de estos sistemas naturales a lo que no son otra cosa que nuestras limitaciones a la hora de comprenderlos: los científicos aún no han conseguido averiguar qué propiedades del terreno determinan cuándo un precursor actuará o no.

Los precursores sísmicos más fáciles de detectar son las elevaciones del terreno, la variación en el nivel de los pozos, los cambios en las propiedades eléctricas y magnéticas del suelo y los aumentos en el número de pequeños temblores (microseísmos). Todos están relacionados con la deformación del terreno ante un esfuerzo que empieza a vencerle: el suelo se agrieta, lo que significa que se vuelve poroso y con ello su volumen aumenta. El agua invade estas grietas, con lo que disminuye su nivel en los pozos y, al mismo tiempo, cambian las propiedades físicas del terreno. El aumento en el número de microseísmos delata la aceleración de las deformaciones, y preludia el terremoto. Esto si todo va bien, como en el seísmo de Haicheng. En los casos tipo Tangshan, los precursores no hacen acto de presencia, o lo hacen de forma demasiado débil para ser detectados en una vigilancia rutinaria. Se habló mucho de que los sismólogos chinos

habían empleado los informes sobre comportamientos atípicos de animales como precursores sísmicos. No hay nada esotérico en ello, porque es sabido que algunos animales tienen sentidos, como el olfato, más agudos que los humanos. La deformación del terreno puede proporcionar vías de escape a gases que sean imperceptibles para el hombre pero que alertan a algunos animales de que algo va mal; además, la deformación del terreno puede expulsar de sus madrigueras a fauna diversa, como reptiles o roedores.

Un tema extracientífico, pero de gran interés, que se planteó en relación con el terremoto de Haicheng fueron los problemas de las evacuaciones en el contexto sociopolítico de cada país. Por ejemplo, en países con sistemas políticos democráticos sería imposible evacuar una gran ciudad en 24 horas. Varias alarmas sísmicas en California han terminado ante los tribunales, con los científicos acusados de la caída del valor de las propiedades inmobiliarias. Estos problemas se añaden a la actual incapacidad de los científicos para predecir con precisión el momento y la energía de un seísmo.

O de una erupción volcánica: también en este tema hay algunos ejemplos interesantes. Los volcanes son, a su manera, tan caprichosos como las fallas. Lo cierto es que, en demasiadas ocasiones, los vulcanólogos pueden levantar acta de que un volcán está atravesando una crisis eruptiva, pero sólo ofrecer ideas aproximadas sobre cómo acabará ésta. Precisamente el no poder identificar correctamente el tipo de erupción que estaba atravesando el monte St. Helens⁴⁷ llevó a los vulcanólogos del

⁴⁷ Que no debe traducirse por «monte Santa Helena», ya que St. Helens era el apellido de un diplomático y viajero británico, que bautizó el volcán en el siglo XIX.

Servicio Geológico de Estados Unidos a un relativo fracaso durante una erupción de este volcán, situado en el noroeste de Estados Unidos, en 1980. Se trata de un volcán bien estudiado, que a lo largo de varios siglos ha alternado erupciones explosivas pero no peligrosas, con otras en las que emite nubes ardientes, suspensiones ultradensas que viajan a alta velocidad y tienen un gran potencial destructivo. En marzo de 1980 empezó a sentirse en el área del St. Helens un temblor continuo, una señal típica de que el magma se está acercando a la superficie; unos días después se inició una espectacular pero inofensiva erupción con altas columnas de piroclastos (fragmentos de magma que los gases lanzan por el aire).

Por precaución, los vulcanólogos hicieron evacuar parcialmente las inmediaciones del volcán, aunque un campamento maderero siguió en actividad; la falsa alarma producida unos años antes en un volcán vecino, evacuado inútilmente durante un año, hizo que las precauciones no se extremasen. El 18 de mayo de 1980, un pequeño seísmo hizo que el flanco norte del St. Helens se derrumbase. Se produjo entonces un catastrófico efecto dominó: el magma, que estaba muy cerca de la superficie, se desgasificó violentamente, como una botella de champán que se abre tras ser agitada, y una nube ardiente a 800 °C surgió de la boca, moviéndose hacia el norte a más de cien kilómetros por hora. Hubo 61 muertos, entre madereros, periodistas y vulcanólogos. El mapa de las zonas peligrosas (mapa de riesgo) no coincidió en absoluto con la realidad: un observador hubiese podido contemplar indemne el espectáculo desde el mismo pie del volcán (aunque es probable que hubiese fallecido de un ataque cardíaco)... si se hubiese colocado al sur de éste, mientras que hubo víctimas que esta-

ban a trece kilómetros al norte del volcán, y algunas de sus nubes ardientes llegaron a 28 kilómetros de distancia. Lo irónico es que existía un precedente exacto de una erupción tan asimétrica, la del Bezymianny, en Siberia, que también sufrió un colapso lateral en 1956; pero todo el mundo consideraba que una erupción como aquélla era irrepetible.

Lo contrario, un mapa de riesgo totalmente acertado precediendo a una erupción previsible (por repetida), sucedió en el volcán Nevado del Ruiz, en Colombia, en 1985. El 13 de noviembre, una pequeña erupción fundió parte del glaciar que coronaba el volcán, y el agua de la fusión formó un torrente de fango que sepultó la pequeña ciudad de Armero, situada a 50 kilómetros aguas abajo del volcán, en la que se ahogaron 20.000 de sus 29.000 habitantes. En esta catástrofe, la ironía estuvo en que los vulcanólogos colombianos acababan de editar un mapa de riesgo donde preveían con gran precisión los tipos, alcance y magnitud del peligro. Pero además, la zona había sido devastada por coladas de fango aún mayores otras dos veces en tiempos históricos (1595 y 1845), antes de la fundación de Armero; de hecho, la ciudad estaba construida sobre los depósitos de esta última avalancha. De forma que no hubo ninguna sorpresa, pero en este caso las autoridades no quisieron arriesgarse a evacuar la población, ante el riesgo de una falsa alarma.

Como Tangshan, Armero ya se ha reconstruido, también sobre los restos de la anterior ciudad. Como Managua, destruida repetidamente por seísmos, o como el puerto de El Callao, cerca de Lima, devastado una y otra vez por tsunamis. ¿Es que *Homo sapiens* es incapaz de aprender nada de los avisos de la Tierra? La realidad es que la elección de los asentamientos de la población

obedece a la lógica de lo cotidiano, no de lo excepcional. Nuestros antepasados se establecieron junto a los recursos primarios: agua y suelo cultivable. Las inundaciones de los ríos no les hicieron buscar otro lugar, sino intentar domesticar los ríos mediante su encauzamiento. El problema es que aún no hemos aprendido a domesticar los volcanes ni las fallas. En todo caso, vivimos en un mundo superpoblado donde la gente ya no puede elegir libremente dónde vivir, como sucedía hace unos siglos: si alguien evacuase un lugar por peligroso, otros menos conscientes o más desesperados ocuparían inmediatamente su sitio.

La enumeración de los riesgos naturales no se agota con los terremotos y los volcanes. El sistema caótico que es la atmósfera experimenta con frecuencia máximos de energía que llamamos «gotas frías» y ciclones. Las inundaciones no son sus únicas consecuencias, porque los deslizamientos de tierra también suelen seguir a las lluvias intensas. Otras situaciones son difíciles de clasificar; por ejemplo, los ya descritos tsunamis pueden ser desencadenados por la caída de un asteroide, pero también, con más frecuencia, por la explosión de una isla volcánica (como la de Krakatoa, en 1836), o por deformaciones del fondo marino causadas a su vez por terremotos: un sistema en cascada que puede terminar con cientos o miles de ahogados en las zonas costeras. Los deslizamientos pueden tener otras causas además de la lluvia. En 1970, en Perú, un pequeño seísmo causó la peor avalancha de la historia moderna, al desestabilizar la cumbre del Nevado Huascarán, que se precipitó sobre la ciudad de Yungai sepultando a 80.000 personas.

En ninguna de estas catástrofes hubo un desencadenante humano, aunque sí ocupación imprudente de lu-

gares peligrosos, como son los valles en las zonas de alta montaña. Otras veces, las avalanchas han sido provocadas por la deforestación que se realiza para ganar tierras agrícolas. En estos casos entramos en otra categoría de acontecimientos, con el hombre actuando como culpable además de hacerlo como víctima.

LA HUELLA DEL HOMBRE

En su *Theory of the Earth*, James Hutton, además de proclamar la antigüedad de la Tierra y proponer que en ella los cambios se compensaban, dando un sistema inmutable en su conjunto, introdujo ideas sobre la relación entre el hombre y el planeta que hoy nos parecen alarmantes, como cuando escribía «la Tierra es un mundo peculiarmente adaptado al propósito del hombre, el cual determina su producción a su gusto». Hutton no puede evitar que salga aquí a relucir su vena de terrateniente; también, seguramente, el punto de vista de un ilustrado, en la época en que la mejora de rendimientos se veía como un objetivo básico para crear riqueza, lo que en poco tiempo desembocaría en la Revolución Industrial.

Hoy, al cabo de dos siglos de creación de mercancías a costa de un serio expolio del planeta, vemos las cosas de un modo bastante distinto. La Tierra no es una finca creada para el hombre, al fin y al cabo uno de sus más recientes inquilinos: la biosfera en su conjunto tiene derechos que no pueden depender sólo de nuestras necesidades. Estas ideas surgen de una cierta ética de la Naturaleza, pero también del hecho de que, aunque sólo muy recientemente (tanto que, para algunos, ya es demasiado tarde), hemos comenzado a darnos cuenta de lo peligro-

so que es para nosotros mismos el tomar al planeta como un conjunto de recursos dispuestos para nuestra comodidad. Desde el tiempo de Hutton, hemos deforestado millones de kilómetros cuadrados, hemos cambiado la composición de la atmósfera (el doble de metano y un 25% más de CO₂ en el aire), hemos multiplicado la circulación de elementos tan peligrosos como el arsénico o el mercurio, y hemos sintetizado y producido a escala industrial más de 70.000 compuestos químicos, de los que nadie sabe cuántos son nocivos.

Sería un error, de todas formas, atribuir a la civilización moderna la culpa exclusiva del abuso de los recursos. Desde el periodo, hace algo más de 100.000 años, en que el hombre empieza su rápida colonización del planeta, se suceden las extinciones bruscas, sobre todo de animales de gran tamaño. Desde el principio se sospechó que *Homo sapiens*, un cazador demasiado hábil, era el culpable de estas muertes masivas, pero las pruebas de esta «sobrecaza» siempre habían sido indirectas. Por ejemplo, el mamut se extinguió en Siberia y en Norteamérica prácticamente al mismo tiempo (hace 11.000 años) en que comienzan a encontrarse campamentos humanos en esos continentes; todos los campamentos contienen huesos de mamut, ocasionalmente con puntas de flecha clavadas. Otros animales desaparecen de Norteamérica hacia las mismas fechas, y en general se puede estudiar una oleada de extinciones que desciende hacia el sur de las Américas a medida que el ser humano las invade. Las islas, cuya fecha de colonización por el hombre se puede datar con más precisión, proporcionan pruebas adicionales contra el acusado. En Nueva Caledonia se han identificado diez especies de vertebrados extinguidas en los últimos 2.000 años, coincidiendo con la llegada de los

melanesios. En Nueva Zelanda, más de treinta especies de vertebrados han desaparecido desde la llegada de los maoríes en el año 900, y registros semejantes existen para otras islas del Pacífico y el Mediterráneo.

La hipótesis de la sobrecaza, propuesta en 1967, no ha sido aceptada sin discusión. Su principal competidora ha sido la hipótesis climática, apoyada en la coincidencia de las extinciones con el periodo frío Dryas reciente. Sin embargo, los restantes datos no encajan bien: por una parte, los mamuts y muchos otros mamíferos habían sobrevivido felizmente a más de veinte periodos glaciales más extremos que el Dryas. Además, en las extinciones de hace 11.000 años perecen tanto animales de medios cálidos como de ambientes fríos, que tendrían que haber sido capaces de adaptarse al empeoramiento climático. La prueba definitiva contra el hombre prehistórico ha llegado en 2001, cuando un grupo de biólogos de la Universidad de California elaboró un modelo de ordenador que alimentó con todas las variables conocidas de los cazadores y de sus presas. Cuando los cazadores virtuales invadían un territorio virgen, incluso las bandas más sedentarias y de técnicas de caza menos eficientes precipitaban las extinciones masivas; especialmente rápidas eran las de los animales grandes, cuyas lentas tasas de crecimiento y largos periodos de gestación hacían imposible la recuperación de las poblaciones diezmadas.

Parece que los aborígenes australianos, otros maestros de las extinciones (55 especies eliminadas en unos pocos miles de años), utilizaron más las técnicas indirectas, y en concreto el incendio de los bosques para facilitar tanto la caza como el viaje a través del continente. Esta destrucción de los ecosistemas originales, más la acción

de los depredadores que acompañan al hombre (perros, gatos y ratas), debió de ser tan letal como la caza misma. La confirmación de la hipótesis de la sobrecaza tiene un mensaje para el hombre actual: a pesar de su técnica rudimentaria, los cazadores primitivos tuvieron una enorme capacidad de alteración ambiental. Y lo más importante: no tenían ni la menor idea de la destrucción que estaban ocasionando. Como decían los Beatles en su canción *Nowhere man*: «¿No se parece un poco a ti y a mí?».

Hoy sabemos que el hombre primitivo era un aprendiz, aunque adelantado, de «Homo faber», el homínido con una fe ciega en la tecnología protagonista de la novela de este título del suizo Max Frisch. La búsqueda de recursos comienza por la caza y la recolección, pero hace 10.000 años el hombre descubre la agricultura, con lo que sus necesidades se diversifican: ya no se trata sólo de alimentarse, sino también de obtener agua, suelo cultivable y energía. Entre esta revolución y los males medioambientales que afligen al hombre moderno sólo media un suspiro. Cientos de millones de personas carecen de agua potable en sus viviendas, mientras el agotamiento o contaminación (en países marítimos de clima árido, salinización) de acuíferos⁴⁸ es un problema crónico en la mayor parte del mundo; en otras, el hombre está utilizando acuíferos fósiles formados en el último avance de los hielos, hace 20.000 años, que son irre recuperables. El preciado y precioso suelo vegetal, que tarda miles de años en formarse, se ha revelado incompatible con la sed de madera y suelo cultivable del hombre civilizado: la deforestación (un millón de kilómetros cuadrados cada década) ha dejado sin protección al suelo,

⁴⁸ Agua contenida en los poros de las rocas, a cierta profundidad.

que se escurre hacia el mar ante nuestros ojos (siete kilos de suelo perdidos por cada kilo de alimento producido), al tiempo que los desiertos recuperan terreno.

El problema de la energía merece un tratamiento especial. Los primeros agentes energéticos utilizados, el viento y las corrientes fluviales, siguen de actualidad. La construcción de presas fue como una fiebre entre 1900 y 1940, cedió sólo con la Segunda Guerra Mundial y repuntó en 1950: las sequías, una característica inevitable del clima, se volvieron dramáticas cuando la población siguió creciendo exponencialmente, por lo que se siguen proyectando presas a pesar de que todos los emplazamientos lógicos están ya ocupados: sólo en China se están construyendo actualmente 250. Las presas sirven para producir energía, para retener el agua para riego, y para impedir las crecidas de los ríos. ¿Por qué, entonces, la Unión Europea anunció en 1994 que no volvería a financiar embalses para regadíos, y por qué en Estados Unidos hay planes para destruir algunas presas? Porque no todo son beneficios: al embalsar los ríos, se impide que los sedimentos lleguen a la desembocadura, lo que significa la muerte para los humedales de los deltas. Los embalses también hacen disminuir (hasta un 50%) la diversidad vegetal en las riberas, y entorpecen los ciclos biológicos de los peces; además, se llenan de sedimentos (los que no llegan a la desembocadura), por lo que aumenta la erosión aguas abajo (como el agua no lleva sedimentos, tiene más energía para erosionar). En general, tienen una vida media corta, un siglo por término medio; al cabo de este tiempo se han llenado de fango y ya no pueden embalsar más agua; en algún caso extremo, esta colmatación de lodo se ha producido en un solo año.

Siempre son, por tanto, trampas de sedimentos que desestabilizan los deltas de sus ríos, como ha sucedido en el Nilo tras la construcción de la presa de Asuán; en los peores casos, son trampas mortales, como la de Vaiont, en los Alpes italianos. En 1963, con la presa llena hasta el rebosadero, una avalancha cayó en su vaso: la ola formada saltó por encima de la coronación de la presa y arrasó el valle aguas abajo: hubo 3.000 ahogados. El análisis posterior reveló lo peligroso del emplazamiento elegido. El valle estaba marcado por múltiples huellas de avalanchas anteriores, y tanto las fortísimas pendientes como la disposición en cuenco de las capas y el tipo de roca (arcillas y una caliza muy cavernosa, y por tanto con gran capacidad de cargarse de agua y resbalar) hubiesen hablado, si les hubiesen dejado, contra el proyecto. Fue, además, una catástrofe anunciada: durante la semana anterior, bajo fuertes lluvias, la roca se estaba deslizando entre 20 y 40 centímetros por día, y los animales (aquí más sabios que los humanos) huyeron de la zona de la catástrofe, en la que murieron todos los técnicos de la presa. ¿Por qué se construyó ésta? La economía, como casi siempre, es la respuesta: Vaiont proporcionaba una gran cantidad de energía a una región deprimida.

Pero, al menos, las centrales hidroeléctricas situadas en la mayoría de las presas producen energía limpia; todo lo contrario sucede en las centrales térmicas, que usan derivados del carbón y el petróleo (lignito y fuel-oil, generalmente) con cantidades variables pero en general importantes de óxidos de azufre, y que son una peligrosa fuente de contaminación atmosférica: la lluvia ácida que esteriliza lagos y destruye bosques, el mal de la piedra que acaba con nuestra historia, y el efecto invernadero artificial que parece estar cambiando ya el clima, tienen

su origen parcial aquí (y el resto en nuestros automóviles, aviones y fábricas). Bueno, además de todo esto, las centrales térmicas producen energía. Junto a ellas, las nucleares son una especie de hermanitas de la caridad... si todo va bien y la central no revienta, y si alguna vez alguien tiene una idea brillante sobre qué hacer con los residuos nucleares, que siguen siendo peligrosos durante cientos o miles de años.

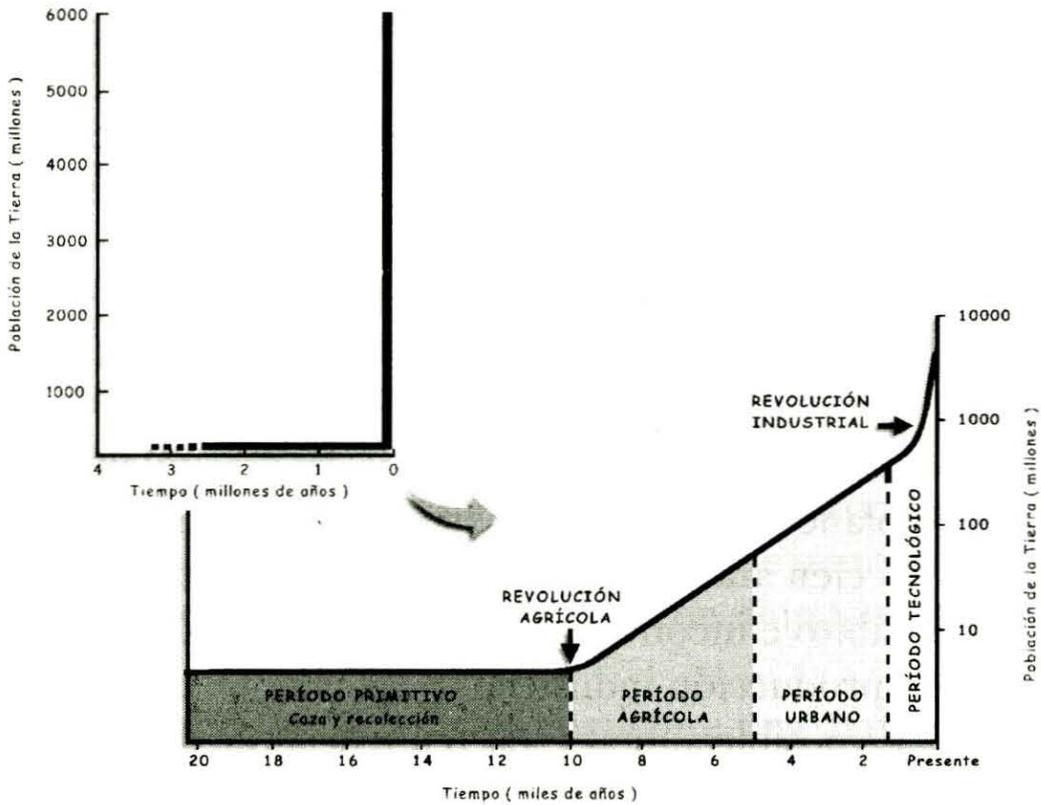
Pero no hay que olvidar que los mucho menos célebres residuos químicos (los de las incineradoras, por ejemplo, que contienen compuestos tan poco agradables como la dioxina) son peligrosos *eternamente*. Lo nuclear tiene una bien ganada mala fama, pero lo químico no tiene aún la mala fama que se merece. Por ejemplo, al «genio» que inventó los clorofluorocarbonos (CFCs) nadie le ha propuesto aún para el Nobel de Química, y sin embargo su idea era brillante: fabriquemos un compuesto absolutamente inerte, que por lo tanto será absolutamente seguro. Así, sin enzarzarse con ninguna otra molécula, los CFCs subieron a los cielos, donde los potentes rayos ultravioleta sí fueron capaces de romper las moléculas irrompibles, liberando el cloro, un elemento que cataliza la reacción de destrucción de ozono. Así conseguimos el famoso agujero, una de las «maravillas» de la técnica moderna. Este tema motivó uno de los primeros acuerdos internacionales de protección del medio ambiente, un Convenio firmado en Viena en 1985 para abandonar la producción de CFCs, que fue revisado en términos cada vez más estrictos en cuatro reuniones entre 1987 y 1992. Como resultado de tanta reunión, las industrias han sustituido sólo los productos para los que tenían un repuesto fácil, pero siguen fabricando otros de recambio complicado, que diversos países siguen usan-

do. Por ejemplo, España ha resuelto seguir usando en fumigados agrícolas el metilbromuro, un compuesto que está en la lista de sustancias destructoras del ozono. El resultado de este tipo de conductas es que en septiembre de 2001, los científicos que vigilan el agujero comunicaron que el tamaño de éste alcanzó un tamaño récord, 28 millones de kilómetros cuadrados, una superficie como la de África.

El telón de fondo de estos problemas es el crecimiento exponencial de la población: hace 10.000 años, cuando *Homo sapiens* era recolector y cazador, los habitantes del planeta eran tan sólo entre cinco y diez millones. Pero, tras la Revolución Agrícola, la población humana se disparó: hacia el año cero ya era de 800 millones, con un periodo de duplicación de 1.500 años, que ha permitido llegar a 6.000 millones con tiempos de duplicación de 35 a 40 años (Figura 22).

LOS LÍMITES DE LA TIERRA

Cada año, cada ciudadano norteamericano gasta una media de 16 toneladas de minerales y combustibles fósiles. Al multiplicar esta cifra por la población de Estados Unidos (270 millones) se obtiene una cantidad de toneladas evidentemente excesiva. Peor aún: en todo el mundo desarrollado el consumo crece a una media comparable al crecimiento económico, en torno al 3%. Esta cifra parece inocente, pero no lo es: significa que dentro de sólo 23 años consumiremos *el doble* que ahora. Y lo mismo sucede con el resto de los recursos, con las consecuencias previsibles: destrucción de las reservas de pesca, talas (y quemas) desmesuradas, o extracción cada vez



22. La evolución de la población humana, en dos escalas distintas de tiempo. En el gráfico de la izquierda, considerada desde el origen de los homínidos: el codo de la curva coincide con la Revolución Industrial. La otra gráfica representa sólo los últimos 20.000 años, lo que permite apreciar que el aumento de población comenzó con la Revolución Agrícola de hace 10.000 años. En esta representación, la escala vertical es logarítmica, lo que disimula su aumento vertiginoso.

mayor de agua subterránea. Estos últimos recursos llevan la tranquilizadora etiqueta de renovables, pero sólo lo son hasta un cierto límite: superado éste, pasan a ser tan agotables como el petróleo o el cobre.

A principios de la década de 1970, un grupo de educadores, economistas e industriales conocido como Club de Roma hizo elaborar un complejo modelo en el que se definían varios futuros posibles para el hombre y la Tierra. El estudio dio origen a un libro, titulado *Los límites*

del crecimiento, que desató una dura polémica. Algunos titulares de prensa fueron: «Un ordenador mira al futuro y tiembla: un estudio vislumbra el desastre para el año 2100». «Los científicos advierten sobre la catástrofe global». Las conclusiones eran tres:

«1. Si las actuales tendencias de crecimiento en la población mundial, industrialización, contaminación, producción de alimentos, y explotación de recursos continúan sin modificaciones, los límites del crecimiento en nuestro planeta se alcanzarán en algún momento de los próximos cien años. El resultado más probable será un declive súbito e incontrolable tanto de la población como de la producción industrial.

»2. Es posible alterar estas tendencias de crecimiento y establecer unas condiciones de estabilidad económica y ecológica que puedan ser sostenidas en el futuro. El estado del equilibrio global puede ser diseñado de tal forma que las necesidades materiales básicas de cada persona sean satisfechas y que todos, mujeres y hombres, tengan igualdad de oportunidades para realizar su potencial humano individual.

»3. Si la población del mundo decidiera encaminarse en este segundo sentido y no en el primero, cuanto antes inicie esfuerzos para lograrlo, mayores serán sus posibilidades de éxito».

La solución del Club de Roma al problema del futuro se llamó «Crecimiento Cero»: una congelación de la demografía, pero también de la producción industrial. Para evitar el colapso, el mundo debería dedicarse, según el informe, a redistribuir la riqueza ya lograda. Veinte años después, este intento privado de prever el futuro fue sucedido por otro oficial: en 1983, la Asamblea General de las Naciones Unidas creó la Comisión Mundial

sobre Medio Ambiente y Desarrollo, presidida por la noruega Gro Harlem Brundtland. Tras más de tres años de trabajo, la comisión emitió un informe, *Nuestro futuro común*, más conocido como Informe Brundtland, en el que, contra el concepto de Crecimiento Cero del Club de Roma, proponían el de Desarrollo Sostenible, definido como «el progreso social y económico que resuelva las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus propias necesidades». O sea, solidaridad intra e intergeneracional. Las medidas concretas que había que poner en marcha de forma inmediata para lograr un mundo sostenible eran:

—Erradicar la pobreza mediante una ayuda inmediata y masiva al Tercer Mundo, que incluiría la condonación de la deuda externa, pero también una inyección económica gigantesca, a la que se dedicaría el crecimiento de la economía mundial hasta el año 2000, y que sería, como media, del 4% anual. Esto significaría multiplicar el volumen de la economía entre cinco y diez veces en cincuenta años.

—La supresión de la pobreza traería consigo automáticamente una disminución de la natalidad en el Tercer Mundo, como ha sucedido a lo largo del siglo XX en los países en los que ha mejorado el nivel de vida.

—La protección de la producción agrícola del Tercer Mundo y un estricto ahorro de energía en el mundo desarrollado, cuya industria deberá asumir el coste de la contaminación, y cuyos ministerios de Medio Ambiente deberán tener el mismo peso político que los de Economía.

El concepto de Desarrollo Sostenible no sólo se ha convertido en doctrina obligada en las reuniones inter-

nacionales sobre medio ambiente y desarrollo, sino también en el modelo económico oficial de las Naciones Unidas. Sin embargo, las inversiones económicas masivas que el plan requería (y que en el Informe Brundtland se sugería obtener de los gastos militares, que ascienden a 2.700 millones de dólares al día, entre todos los países) nunca se materializaron. Los habitantes del Tercer Mundo siguen siendo tan pobres como eran, y nadie ha hecho ningún esfuerzo serio por convencer a los de los países desarrollados de que si no consumen cada vez menos, en vez de más, el futuro es inviable no sólo para el Tercer Mundo, sino también para el Primero. Consejos que chocarían, además, con la convicción, profundamente arraigada en el subconsciente del hombre moderno, de que la tecnología, inventada o por inventar, solucionará cualquier problema, como ha sucedido en el pasado.

Es curioso, por lo tanto, que el concepto haya invadido el área del modelo rival, el *neomalthusiano*⁴⁹ Club de Roma. En una actualización de 1991 (*Más allá de los límites del crecimiento*), defienden que «una sociedad sostenible es aún técnica y económicamente posible». Las dos grandes utopías sociales de final del siglo XX han terminado por unirse, un final absolutamente lógico, dado que las dos cuestionan el modelo económico vigente, que propone un desarrollo sin pausa al que sólo se coloca el adjetivo «sostenible» en las conferencias sobre medio ambiente. Las grandes diferencias entre las dos corrientes son, por una parte, que los «sostenibles» defienden un crecimiento masivo e inmediato: aunque sea por una

⁴⁹ De Robert Malthus, sociólogo inglés, autor, en 1798, de *Ensayo sobre el principio de la población*, en el que defendía la limitación del crecimiento demográfico como el medio idóneo de conservar unos recursos también limitados.

buena causa, la evolución es la misma que proponen los industrialistas. Además, ¿cómo obligar a un país a licenciar a su ejército y dedicar su presupuesto militar a los pobres? La otra diferencia es el tono con el que encarar el futuro: mientras que los «sostenibles» hablan (aunque en un tono más bien desmayado) de esperanza, los «romanos» exhiben una lúcida desesperación. En el capítulo de conclusiones, *Más allá de los límites...* contiene el siguiente diagnóstico: «La utilización por el hombre de muchos recursos esenciales y la generación de muchos tipos de contaminantes han sobrepasado ya las tasas que son físicamente sostenibles. Sin reducciones significativas en los flujos de materiales y energía, habrá en las décadas venideras una incontrolable disminución de la producción de alimentos, energía y producción industrial *per cápita*». No hace falta insistir demasiado en que la tendencia real del consumo es muy distinta a la deseable. Por ejemplo, entre 1999 y 2000, la demanda de combustibles en España creció un 6,9%, a pesar de los altos precios; si mantuviésemos ese ritmo, nuestras necesidades de combustibles se duplicarían en sólo diez años. Y como ésa es la pauta general, algunos analistas han llegado a la sorprendente conclusión de que el discutido pero ya confirmado calentamiento de la Tierra no llegará a ser peligroso... porque los combustibles fósiles se agotarán antes, en algún momento de la segunda mitad del siglo XXI.

Por su parte, la demografía muestra una cierta desaceleración del crecimiento: quizá sólo seamos 8.000 millones, y no 10.000, en el 2050. ¿Será suficiente? En 1983, habitantes de Assam, un estado de la India fronterizo con Bangladesh, atacaron a emigrantes bengalíes acusándoles de robarles las tierras, y mataron a 1.600 en

un solo incidente. El ejército intervino, pero las matanzas se repiten periódicamente. No nos hemos ganado el apelativo de *sapiens* que nos diera Linneo en 1758; precisamente el mismo año en que, en una Europa convulsionada por las guerras, nacía Friedrich von Schiller. En una de sus últimas obras, el dramaturgo alemán corrigió la clasificación del naturalista sueco al hacer pronunciar a uno de sus personajes una terrible sentencia sobre el comportamiento del hombre: «Contra la estupidez humana, los propios dioses luchan en vano».

REVISIÓN DEL CAPÍTULO V.

p 313: La catástrofe del Ruiz

Éste (**Figura 41**) fue el mapa de riesgo (*de peligro*, dicen los vulcanólogos colombianos) elaborado por profesores y alumnos de la Universidad de Caldas. Algunos de ellos se encontraban en Armero cuando, confirmando sus predicciones, llegó el lahar.

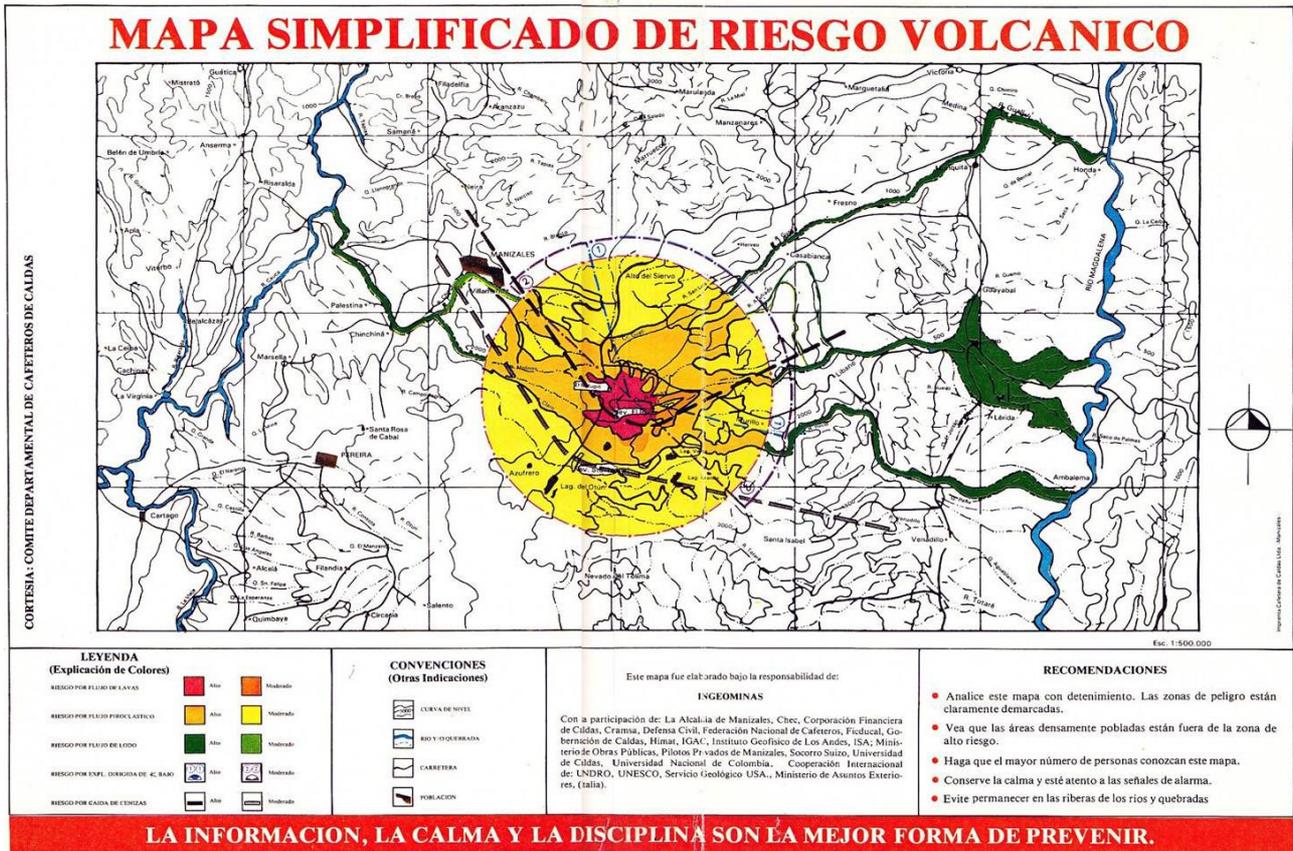


Fig. 41.

p 319: La destrucción de presas

Ya se está llevando a cabo (unas cincuenta al año) en Estados Unidos.

p 322-323: ¿Un nuevo periodo geológico?

Se ha propuesto [*Nature* (473, 133) 2011] que el tiempo desde la dispersión de *Homo sapiens* por todo el planeta (o desde que empezó a llenarlo de residuos, o desde que hizo detonar artefactos nucleares) sea denominado *Época Antropocena*. El principal argumento a favor es simple: el hombre es ya un agente modificador del relieve, de la atmósfera, de la hidrosfera y de la biosfera (**Figura 42**) más importante que muchos procesos geológicos. Contra esto, se argumenta que, siendo ello innegable, el espesor de

sedimentos de esta época (o sea, lo que hace que un periodo sea identificable en el registro geológico) será de 0 a pocos centímetros: parecido al límite K/Pg. Por eso, se ha contrapropuesto que se clasifiquen estos depósitos como el periodo que cierra la extinción masiva del Holoceno.

La Comisión Internacional de Estratigrafía debatirá la propuesta.

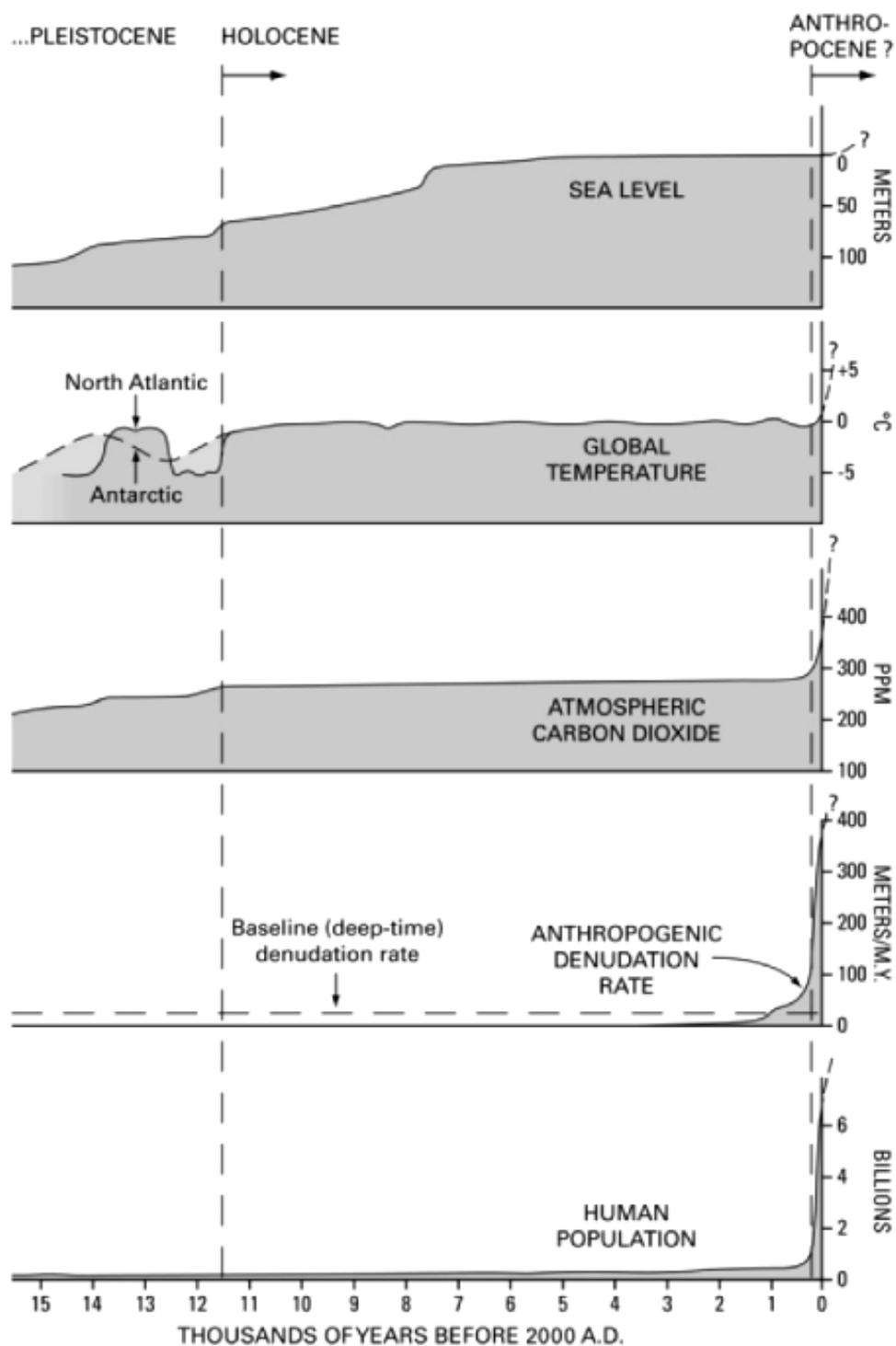


Fig. 42.

p 323-324: El Club de Roma, hoy

Está de moda rabiosa. Las teorías del decrecimiento o desindustrialización están empezando a arraigar. Bill McKibben, uno de los ecologistas más influyentes de EE.UU, le dedica casi por completo un artículo reciente [*Sci Am* (302-4, 45) 2010].

p 325: ¿Tercer Mundo?

Incorrecto (no sólo políticamente, sino también gramaticalmente, porque ya no hay Segundo): ahora hay que decir “países en vías de desarrollo” (no sé si habría que añadir “sostenible”).

El futuro

EL ENIGMA DEL CLIMA

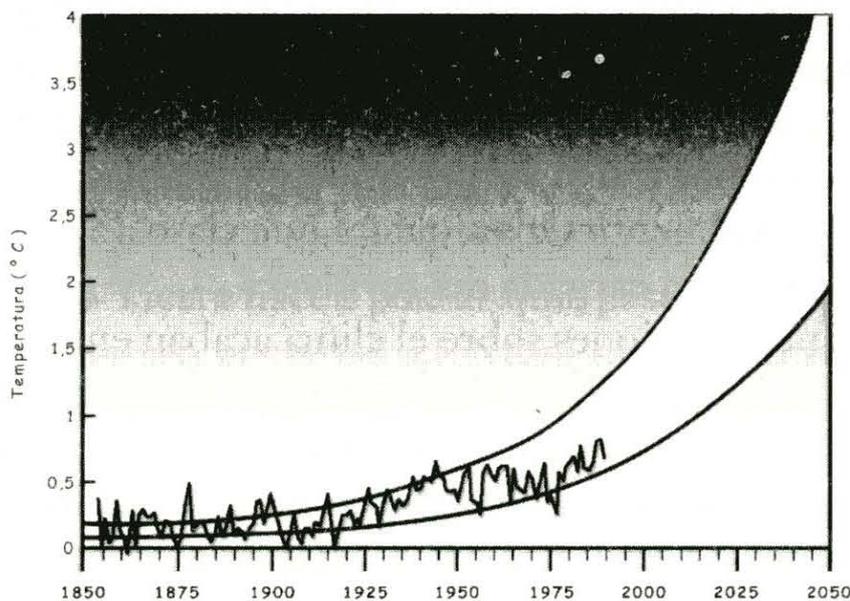
Durante varios siglos, hacia el final del tercer milenio antes de nuestra era, un pueblo que se llamaba a sí mismo acadio dominó Mesopotamia desde las fuentes del Tigris y el Éufrates hasta el golfo Pérsico. Los arqueólogos han encontrado huellas de que esta refinada civilización se derrumbó rápidamente hacia el año 2200 a.C. ¿Cuál fue la causa de este final repentino? Sondeos en el cercano golfo de Omán han revelado el incremento, en esta época, de sedimentos transportados por el viento desde Mesopotamia, lo que apoya la idea de que fue un aumento brusco pero persistente de la aridez lo que causó la decadencia y desaparición de este imperio. La pregunta que nos podemos hacer hoy es: ¿cómo sobrellevaría nuestra civilización tecnológica un cambio climático de esta envergadura?

El futuro comienza en el pasado. Las lecciones de la historia, que los científicos que estudian la Tierra ayudan a descifrar, nos sirven de pauta para intentar prever lo que el sistema climático nos tiene reservado. Por ejemplo, ¿cómo sería el clima a finales del siglo XXI si, por culpa del uso masivo de combustibles fósiles, la cantidad

de CO₂ en la atmósfera aumentase hasta el doble de la actual? Los grandes ordenadores nos dan una respuesta aproximada de las condiciones de este invernadero generado por el hombre: la temperatura media del planeta aumentaría entre 1,5 y 5,8 °C. Este calentamiento es semejante al que tuvo lugar desde el final del último periodo glacial, hace 18.000 años; pero sucedería entre diez y cien veces más deprisa. No hay nada parecido en la historia del hombre, y por tanto sus consecuencias no son muy seguras, pero entre ellas hay que contar con pérdidas importantes en la mayoría de los ecosistemas (por ejemplo, los bosques, entre ellos el bosque mediterráneo del sur de España), que no podrían adaptarse a tal choque térmico; cambios en el patrón de precipitaciones (en general, un clima más inestable, con temporales e inundaciones más frecuentes), aumento de la evaporación, y por lo tanto de la aridez (25% menos de humedad en el suelo hacia 2050); fusión de los glaciares con la consiguiente elevación (de 0,2 a 1,5 metros) del nivel del mar y salinización de acuíferos costeros; y muerte masiva de los corales (¿desaparición de los arrecifes en 2050?).

Pero una cosa son los modelos de ordenador (incluso de superordenador), y otra la realidad. ¿Hay datos que apoyen la idea de que este apocalipsis térmico está ya en marcha? Ésta no es una pregunta fácil de responder, ya que estamos en un periodo interglacial, y por tanto la Tierra lleva 18.000 años calentándose, lógicamente sin ninguna ayuda humana. Distinguir un posible calentamiento debido a los gases de invernadero sobre este fondo de evolución climática es una tarea complicada. Lo que sí es indiscutible es que el clima se ha calentado aún más al dar comienzo la actividad industrial: los años más fríos de la última década son más cálidos que casi todos los de hace

un siglo (Figura 23). Los dos efectos se superponen: por ejemplo, el borde del casquete de hielo de la Antártida occidental ha retrocedido 1.300 kilómetros desde el final del último periodo glacial, pero ¿son demasiado grandes los icebergs que en los últimos años se desprenden del casquete? ¿Es natural o «artificial» la elevación del nivel del mar (2 mm/año) medida recientemente? La comprobación, hecha a partir de registros antiguos, de que el agua oceánica profunda también se ha calentado durante el último siglo ha consolidado la idea de que existe un efecto invernadero causado por la actividad del hombre superpuesto al calentamiento postglacial. Actualmente, la comunidad científica está convencida de que la causa de que el clima mundial se haya hecho más cálido durante el último siglo es la actividad industrial.



23. El calentamiento global, y su proyección hacia el futuro. Los científicos ya no discuten que la elevación de las temperaturas en el último siglo se debe a la actividad humana. La banda entre las dos curvas representa el rango de incertidumbre de los modelos climáticos obtenidos por los superordenadores. (En Karl et al., *Scientific American*, marzo de 1997).

Bien, y ¿qué hacemos ahora? La rapidez con la que podrían suceder los temibles cambios que pronostican los climatólogos es un factor decisivo para evaluar nuestras posibles respuestas. En este campo, las noticias tampoco son buenas: por lo que estamos averiguando del sistema climático (a través del estudio del hielo fósil, como vimos en el capítulo anterior), cambios de este tipo se pueden producir en pocas décadas, o incluso, en los casos más drásticos, en pocos años. El clima parece tener varios estados de equilibrio (invernadero, glacial, interglacial), y también la capacidad de pasar de uno a otro de forma casi instantánea. El gran problema es que aún no sabemos cuál es el desencadenante preciso de estas alteraciones; por eso, al proseguir con nuestra escalada en la quema de combustibles fósiles, los habitantes de este planeta estamos, como ha dicho el climatólogo Wallace Broecker (el colega del doctor Hsü), «llevando a cabo sigilosamente un gigantesco experimento medioambiental, jugando a la ruleta rusa con el clima, esperando que el futuro no nos traiga sorpresas desagradables; pero sin que nadie realmente sepa siquiera qué clase de proyectil hay en la cámara cargada del revólver».

Las negociaciones sobre el clima acaban en compromisos teóricos que después ningún país cumple, en parte por desacuerdos científicos (por ejemplo: ¿absorben los bosques CO₂ de manera eficaz? Si fuese así, los países boscosos no tendrían por qué rebajar las emisiones) y, en el fondo, por la negativa generalizada a renunciar al crecimiento industrial. En este ambiente de desconcierto, la nota irónica la pone el pronóstico (ya comentado en el capítulo anterior) según el cual no debemos preocuparnos de ningún invernadero antrópico, ya que el petróleo se habrá acabado mucho antes del año 2100. Esta ciudad

alegre y confiada sigue, por lo tanto, sin ponerse de acuerdo en si debe hacer algo sobre el clima futuro; y, en caso positivo, qué hacer. El bando industrialista insiste en que el invernadero antrópico es una hipótesis no comprobada, por lo que sería absurdo emprender medidas contra unos efectos que quizá no se produzcan nunca. En la trinchera opuesta, la opinión ecologista presiona para rebajar las emisiones de CO₂, con lo que, de paso, se reservaría parte del petróleo para las generaciones futuras. Y una minoría, en la idea de que el clima es un sistema demasiado complejo y peligroso para dejarlo al cuidado de la Madre Naturaleza, propone medidas de ingeniería planetaria semejantes a las que se barajan en la terraformación de Marte: por ejemplo, inyectar en la atmósfera polvo para reflejar más radiación solar. Por el momento, estas ideas no han tenido una acogida demasiado calurosa: si el clima es impredecible, las contramedidas lo serían más aún, y podrían ser perjudiciales, o bien (aun no siéndolo) ser culpadas de cualquier evolución desagradable del sistema.

Mirando hacia un futuro más lejano, los datos orbitales de la Tierra hacen pensar que, pase lo que pase con el invernadero artificial, el actual periodo interglacial debe de estar tocando a su fin, ya que ha durado bastante más de la media, que es de unos 12.000 años. Según estos cálculos, un nuevo periodo glacial nos alcanzará dentro de un máximo de 4.000 años, quizá mucho antes. Luego, la Tierra se sumirá en un largo invierno de 100.000 años. ¿Podría una civilización futura hacer frente a esta situación? En este caso, la intervención de ingeniería planetaria se contempla mucho más benévola; primero, porque éste no es un problema acuciante; y segundo, porque nadie discute que los hielos

volverán a invadir las latitudes medias de la Tierra, y no parece que el hombre vaya a aceptar sin lucha el compartir con ellos un planeta superpoblado. Así que es imaginable que, dentro de unos milenios (o quizá tan sólo unos siglos), la especie humana estará peleando por su supervivencia mediante el diseño y emisión dosificada a la atmósfera de los hoy tan denostados gases de invernadero. Si logrará o no suprimir los siguientes periodos glaciales, es una pregunta para los científicos del futuro; pero el análisis del clima del pasado no invita al optimismo: las glaciaciones duran un promedio de cincuenta millones de años, y no es fácil aceptar que un sistema natural se pueda desviar de su camino por tan largo tiempo. En este contexto, es evidente que el comprender por qué la Tierra se hiela periódicamente sería una ayuda significativa; por ello, es seguro que la climatología será una de las ciencias de la Tierra más mimada durante los siguientes milenios.

CUANDO LOS MUNDOS CHOCAN

El 1 de febrero de 1994, la fricción con la atmósfera hizo explotar un asteroide de unos 30 metros sobre el océano Pacífico, liberando una energía equivalente a la de varias bombas atómicas como la que destruyó a Hiroshima. Contado así, este hecho parece increíble. ¿Cómo es que nadie se enteró de este acontecimiento? La respuesta es que la explosión, que sucedió a 21 kilómetros de altura, sólo fue registrada por los satélites espías militares, y su energía se disipó sin causar daño. Si hubiese sido un poco mayor (por encima de 50 metros), hubiese explotado cerca de la superficie, y entonces sí habría salido en los

periódicos, como sucedió con el que en 1908 se desintegró a ocho kilómetros de altura sobre Tunguska, en Siberia. Se trataba de un asteroide de roca de unos sesenta metros: la explosión liberó una energía de quince megatones, la de una bomba de hidrógeno de alta potencia, y destruyó un área de 2.000 kilómetros cuadrados, por suerte deshabitada.

Nuestros datos sobre los asteroides y sus órbitas nos permiten calcular que colisiones como la de Tunguska ocurren una vez por milenio; explosiones de un megatón de potencia, una vez por siglo, y las de tipo Hiroshima, todos los años. Sólo los asteroides mayores de cien metros (la longitud típica de un campo de fútbol) pueden alcanzar la superficie sin explotar antes, aunque casi siempre se fragmentan en la atmósfera, y por eso encontramos meteoritos pequeños. Por encima de este umbral empezamos a entrar en una zona peligrosa. Un asteroide de quince kilómetros, como el de Chicxulub, liberó una energía de más de *cien millones de megatones*, pero incluso uno de dos kilómetros produciría una catástrofe global, con cientos de millones de muertos y un enfriamiento drástico y persistente como el de un invierno nuclear. La estadística nos tranquiliza: la Tierra sólo sufre una colisión de estas características cada tres o cuatro millones de años. Pero también es cierto que solamente conocemos las órbitas de una pequeña parte de los millones de asteroides que hay en el Sistema Solar.

Las colisiones asteroidales han formado parte del pasado de la Tierra, y desde luego formarán parte de su futuro. Si el asteroide que impactó contra la Tierra al final del Cretácico (-65 m.a.) cayese ahora, destruiría la civilización, al menos en su versión actual. Como la probabilidad de un impacto así es de una vez por cada cien

millones de años, esto significa que si el hombre puede esquivar el riesgo de autodestrucción y también salir vivo de la glaciación actual, tendrá que enfrentarse, más tarde o más temprano, con la amenaza del impacto de un asteroide. Carl Sagan fue el primer científico en proponer que el control del espacio próximo a su planeta era el reto que distinguía a las civilizaciones de larga duración: esto significa que, en la última parte del siglo XX, el riesgo de impactos se ha convertido en un tema serio. Aunque haya sido la industria cinematográfica la que mejor haya aprovechado la idea, pequeños grupos de astrónomos (como el Proyecto Spacewatch, en Arizona) han comenzado, primero por su cuenta y más tarde con financiación oficial o privada, a escrutar las órbitas de los asteroides, a fin de poder distinguir algún posible intruso. En 1994, Spacewatch realizó mediciones precisas de las órbitas de 77.000 asteroides y cometas.

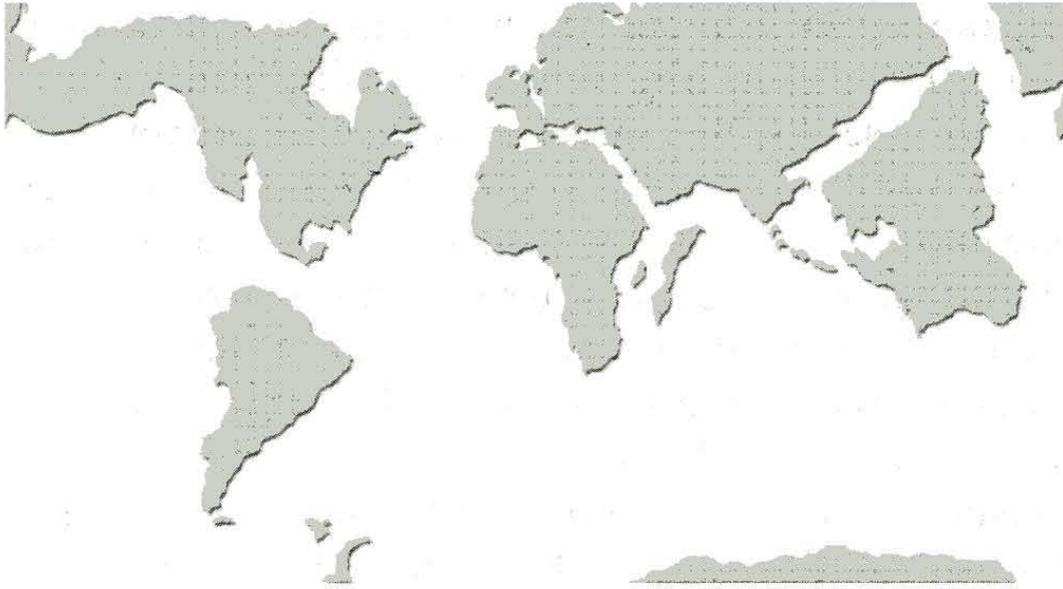
El problema de qué hacer si se distingue un objeto potencialmente peligroso cobró actualidad el 12 de marzo de 1998, cuando uno de estos grupos emitió un comunicado de prensa según el cual la trayectoria del asteroide 1997XF11, de un diámetro estimado en un kilómetro, podría llevarle a colisionar con la Tierra en 2028. Sólo horas después de que la noticia hubiese saltado a los titulares de los periódicos, otros astrónomos anunciaron una revisión de los cálculos, con mejores datos, según los cuales el asteroide pasaría a 950.000 kilómetros del planeta, una distancia que implica un riesgo de colisión prácticamente nulo. El comunicado y su desmentido desencadenaron una tormenta entre los científicos. Los alarmistas defendieron su proceder, argumentando que ello llevaría a una concienciación del público sobre los riesgos astronómicos, pero la mayoría recordó el cuento

del lobo, y advirtió que, si el incidente se repetía, el tema de las colisiones perdería toda credibilidad.

¿Y si se descubre un asteroide que realmente vaya a colisionar con la Tierra? Si el hecho nos da un plazo de, digamos, cinco años, lo mejor es que nos vayamos diciendo adiós unos a otros, lamentando no haber comenzado antes la búsqueda. Si la alarma salta con diez años de antelación, nuestras probabilidades son pequeñas; sólo si tenemos por delante unos cincuenta años se podría organizar una defensa seria. El esquema básico implicaría usar un cohete para interceptar al asteroide, deflektándolo mediante una explosión cercana, pero diseñada de forma que no convierta al asteroide en una lluvia de objetos menores. Descritas así, tales soluciones parecen más ficción que ciencia, pero los astrónomos se toman el asunto muy en serio. En 1999, una reunión sobre este tema, ya mencionada al principio de este libro, congregó en la ciudad de Turín a un centenar de especialistas en asteroides. De allí salió una clasificación de los riesgos, conocida como Escala de Torino (el nombre italiano de la ciudad), que divide en diez categorías, desde acontecimientos sin importancia hasta colisiones seguras de consecuencias globales, las agresiones que nuestro planeta puede sufrir por parte de su entorno cósmico.

LOS EXTRAÑOS CONTINENTES

En comparación con estas previsiones de corte catastrofista, especular sobre la futura posición de los continentes es un relajado ejercicio académico. La Figura 24 es un mapamundi que intenta imaginar cómo será la geografía dentro de 150 millones de años. Está construido



24. La geografía del futuro: la Tierra podría presentar este aspecto dentro de 150 millones de años.

teniendo en cuenta los procesos básicos de la tectónica de placas, y esencialmente en la apertura y cierre de los océanos que prevé el Ciclo de Wilson: el Atlántico norte, más antiguo que el sur, habría comenzado ya a cerrarse, mientras que este último seguiría ensanchándose, lo que produce la separación de las dos Américas. La colisión de Australia con Asia habría fundido en uno solo los océanos Índico y Pacífico. África, Asia y Norteamérica, por el contrario, se podrían fragmentar a partir de *rifts*. Un viajero del tiempo que se desplazase hasta este futuro tendría dificultades para reconocer algunos continentes.

Si seguimos más allá, la evolución de los continentes y océanos se vuelve menos previsible. Si es cierto que cada 500 millones de años se forma un supercontinente, una nueva Pangea se reuniría dentro de unos 300 millones de años, para fragmentarse casi enseguida. ¿Hasta cuándo durará este vaivén? Como vimos, las placas litosféricas se mueven impulsadas por la convección del

manto, que a su vez se alimenta del calor del núcleo; por lo tanto, el baile seguirá mientras el depósito de energía que es el interior de la Tierra se mantenga a una temperatura suficiente. La predicción más arriesgada que se ha planteado hasta ahora ha sido la de Henry Pollack, un geofísico de la Universidad de Chicago. Según Pollack, el límite de caducidad de la tectónica de placas se sitúa alrededor de los 2.000 millones de años en el futuro, cuando la temperatura interna habrá descendido tanto que el manto dejará de moverse, y la configuración de los continentes en ese momento se volverá definitiva. También cesará la producción de magmas. Sin continentes móviles, ni nuevas cadenas de montañas, ni seísmos, ni erupciones volcánicas, la Tierra será un lugar muy distinto del que conocemos ahora: los continentes serán inmensas llanuras, y los ríos apenas transportarán sedimentos. Si la tectónica de placas ha podido ser el estimulante de la evolución, parece lógico que una Tierra estática sea también un planeta estancado desde el punto de vista biológico. De todas formas, la vida se encontrará con otros problemas más graves antes de llegar a esa lejana época.

EL FIN DE LA TIERRA

La ciencia moderna siempre ha sabido que el destino final de la Tierra es acabar destruida por la misma estrella que le proporciona la vida. El Sol aumenta su luminosidad en un 1% cada cien millones de años. Para algunos climatólogos, este incremento hará que dentro de mil millones de años la temperatura de la Tierra se eleve tanto que los océanos comiencen a evaporarse masivamente;

otros argumentan que la evaporación provocará mayor nubosidad, la cual elevará la cantidad de calor solar rechazada, aliviando así un poco el horno. Pero el final será sólo cuestión de tiempo: los océanos tardarían unos mil millones de años en evaporarse, lo que daría una fecha de 2.000 millones de años para el final de la vida en el planeta. Es curioso, aunque parece casual, que esta fecha coincida con la de la muerte geológica de la Tierra. Si no se tratase de enormes macrosistemas poco propicios para el sentimentalismo, podríamos pensar en uno de esos matrimonios de ancianos en los que la muerte de un cónyuge desencadena, al poco tiempo y sin que medien causas fisiológicas definidas, la del otro.

Dentro de 2.000 millones de años, la Tierra estará rodeada por una enorme masa de vapor de agua, con una presión atmosférica de 300 atmósferas. El actual Venus, con una presión de 90 atmósferas, será un paraíso al lado de la Tierra futura. Y sus desgracias no acabarán aquí, ya que, al cabo de otros 3.000 millones de años (o sea, en +5.000 m.a.), el hidrógeno existente en el núcleo del Sol se agotará, y nuestra estrella comenzará a consumir el hidrógeno de sus capas exteriores. Éstas se calentarán y expandirán, haciendo que la estrella se hinche y se convierta en una gigante roja, con un diámetro entre 100 y 400 veces mayor que el actual. Hasta ahora se creía que esta expansión haría que el Sol creciese hasta la órbita de Venus, e incluso de la Tierra, y que podría englobar a los tres planetas interiores, pero un nuevo argumento hace dudoso este final para nuestro planeta. En esta fase, con sus capas externas alejadas y muy calientes, el Sol emitirá un viento solar masivo que podría hacerle perder hasta el 40% de su masa. Como consecuencia, ejercerá una

atracción mucho menor sobre los planetas, que se alejarían, salvándose de la quema en el horno solar. Sin embargo, el calor recibido será tan grande que la superficie terrestre se volverá incandescente, y en último término se fundirá. Al cabo de 10.000 millones de años de evolución, este planeta terminará como probablemente empezó: con su superficie cubierta por un océano de magma. La diferencia es que ahora, en vez del débil Sol inicial, una estrella enorme llenará el cielo; aparte de este detalle, la historia previsible de la Tierra está dotada de una bella simetría.

El final de la Tierra es también, lógicamente, el final de este libro. No es obligatoriamente el final del hombre. Desde su cuna africana ha recorrido todo el planeta, continentes y océanos, selvas y polos, alturas y profundidades, y recientemente salió de su cuna para poner un tímido pie en el cuerpo planetario vecino. En la presente generación se prepara para saltos mayores, ya fuera de la vecindad de la Tierra. La historia del planeta, que hemos estado descifrando, nos dice que una especie puede durar entre 1 y 10 millones de años. Teniendo en cuenta que sólo 10.000 años separan las hachas de sílex de los microchips de silicio, está claro que los avances tecnológicos que podrían alcanzarse en un tiempo tan vasto son inimaginables. Dos futuros distintos se abren ante *Homo sapiens*: o bien se autodestruye, o destruye en guerras los recursos del planeta, o bien se convierte en una especie multiplanetaria, que viviría tanto en otros mundos como en ciudades espaciales.

En este contexto, parece adecuado terminar este viaje en el tiempo citando una vez más a uno de los grandes gurús de la exploración científica del espacio. En un artículo de 1972 sobre la evolución de la atmósfera terrestre,

Carl Sagan discurrió sobre posibles remedios para la fase futura de calentamiento terrestre: «Es difícil imaginar lo que podríamos hacer para impedir este efecto invernadero, incluso disponiendo de una tecnología muy avanzada, pero en esa misma época la temperatura global de Marte será muy parecida a la de la Tierra actual. Si quedan organismos inteligentes en nuestro planeta en ese tiempo remoto, quizá pudiesen aprovechar esta coincidencia». Como siempre, Sagan sugiriendo senderos que llevan más allá...

REVISIÓN DEL CAPÍTULO VI.

p 329-331: El clima del futuro inmediato

Las dos causas básicas de la alternancia glacial-interglacial son el cabeceo del eje de giro y la precesión de la órbita terrestre, siendo (dada la pequeña excentricidad de nuestra órbita) el primero el más importante. En estos momentos la variación de los dos parámetros llevaría a la Tierra a un nuevo periodo glacial que cerraría el interglacial Holoceno de los últimos 11.000 años. Esto podría suceder en unos 8.000 años, cuando la inclinación del eje será mínima (22,1°). Sin embargo, los dos efectos están desfasados, por lo que en ese momento la precesión ya no será favorable: el próximo periodo glacial podría no presentarse hasta dentro de 30.000 años.

Éstos son los cálculos de los astrónomos. Los científicos atmosféricos tienen otros muy distintos: la tendencia actual de la atmósfera a enfriarse (que puede calcularse, en términos de energía, en unos 0,2 a 0,4 w/m²) está contrarrestada por la tendencia al calentamiento generada por los gases de invernadero y los aerosoles, que en total producen ~3 w/m² (**Figura 43**), o sea unas diez veces más. Según los parámetros astronómicos, los glaciares tendrían que estar creciendo, pero como sabemos están fundiéndose, y muy rápidamente.

Así que no habrá nuevos periodos glaciales hasta que la mayor parte de esos gases no haya desaparecido de la atmósfera. ¡En sólo 150 años, *Homo sapiens* ha conseguido desorganizar el mundo de relojería que descubrió Newton! Podéis encontrar documentación sobre este tema en un libro escalofriante, "*Storms of my grandchildren*", de James Hansen [que yo sepa, no está traducido].

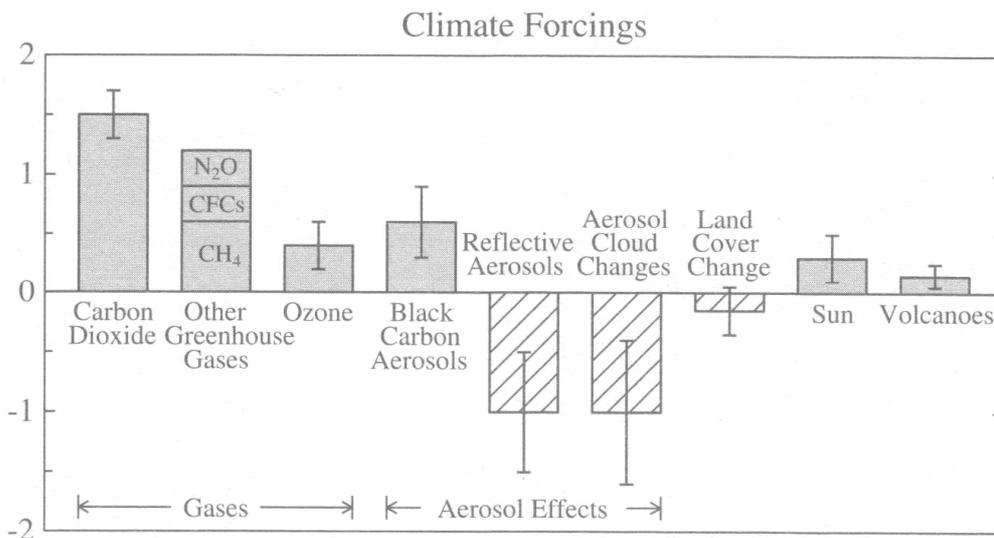


Fig. 43.

p 331: El calentamiento del agua profunda

Es la línea azul en la **Figura 44**; la roja es la media del calentamiento del agua superficial, para la cual hay muchos más datos.

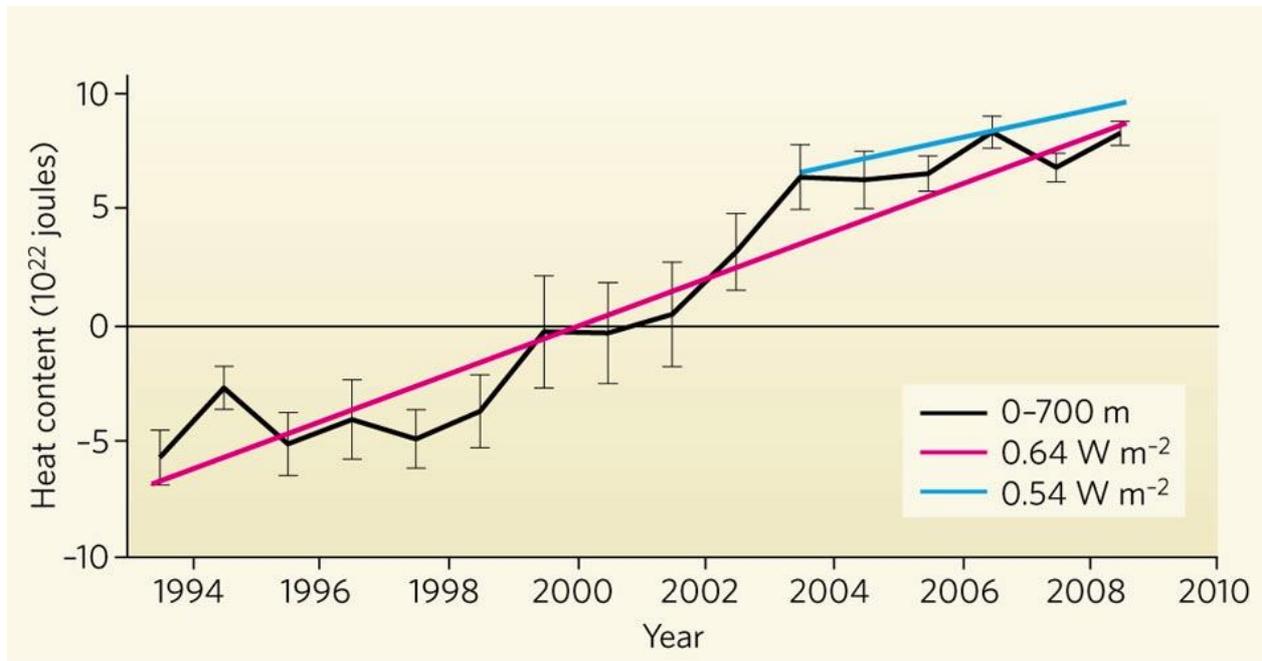


Fig. 44.

p 337: La Escala de Torino

Es tan bonita que le doy la última figura (*Figura 45*) de esta inacabable revisión.

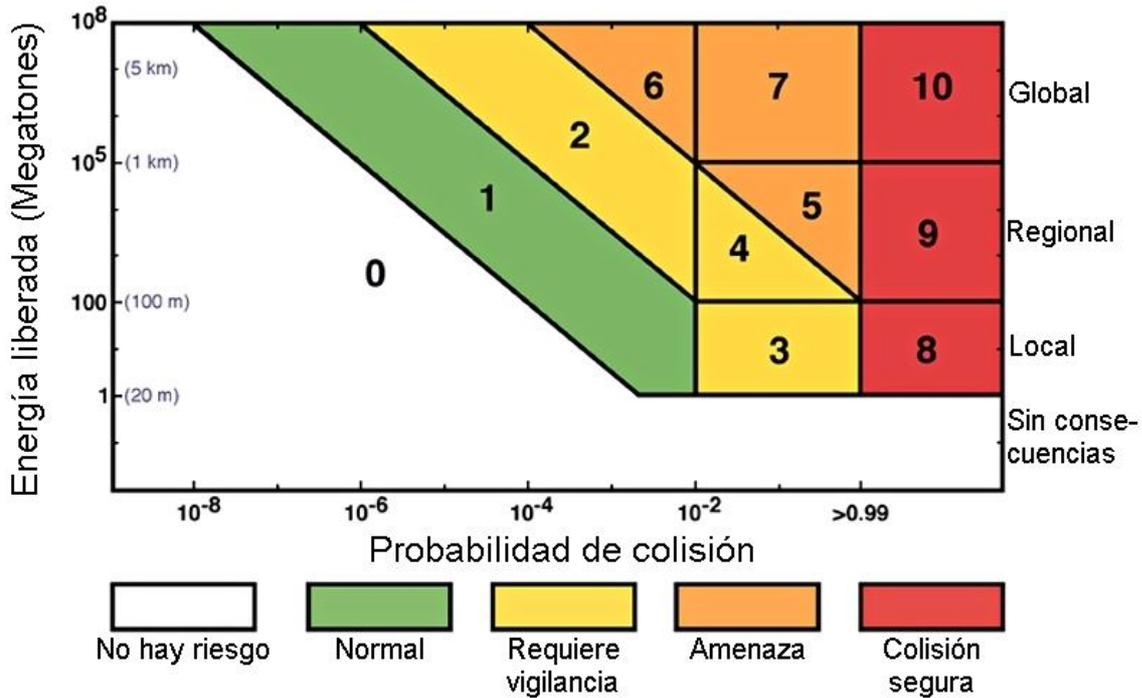


Fig. 45.

p 345: Geografía

William Hartmann vive en Arizona, pero no nació allí sino en Pennsylvania.

Apuntes biográficos de algunos de los investigadores citados en el libro

Walter Alvarez

«Mi padre me puso un nombre que empezaba con W para poder firmar siempre los artículos por delante de mí», cuenta con sorna este geólogo refiriéndose a su padre Luis, un físico atómico. Un trabajo encabezado por ambos provocó la última conmoción en ciencias de la Tierra, al proponer una causa extraterrestre para la extinción del Cretácico.

Christopher Chyba

Discípulo aventajado de Carl Sagan, Chyba trabaja en el Instituto SETI, donde ausculta el cielo en busca de señales codificadas de otras civilizaciones. También dirige el Comité de Exploración del Sistema Solar de la NASA, y ha trabajado como asesor de la Presidencia de Estados Unidos en temas de política medioambiental (aunque, dado el egoísmo que caracteriza a la política norteamericana en este campo, éste es un mérito dudoso).

Yves Coppens

Este doctor por la Sorbona buscó restos de nuestros antepasados en Chad y Etiopía durante diez años; pero sólo mucho después cristalizó esta experiencia en una

gran síntesis, la idea de que fueron los cambios en la geografía los desencadenantes de la acelerada evolución humana.

Ian Dalziel

El prototipo de geólogo cosmopolita: ha estudiado cadenas de montañas antiguas (como la Caledónica, el orógeno de Grenville o las montañas Transantárticas) y modernas (como los Andes) a través de todo el mundo. Por lo tanto, su capacidad de establecer conexiones entre lugares distantes es inmejorable. De esta capacidad surgió Rodinia, la gran estrella de la paleogeografía de los años noventa.

Christian de Duve

En 1974, este científico belga recibió el premio Nobel por sus descubrimientos sobre el funcionamiento de la célula. Ha escrito un libro (*Polvo vital: la vida como un imperativo cósmico*) a caballo entre la ciencia y la filosofía.

Robert Dietz

Este experto en batiscafos ha sido durante toda su carrera científica un productor de ideas originales, tanto dentro como fuera de su campo de especialidad. Fue uno de los padres de la tectónica de placas, pero estudió también geología planetaria, que le ayudó a entender los grandes cráteres de impacto terrestres.

Stephen Jay Gould

Con libros como *El pulgar del panda* o *La sonrisa del flamenco*, contruidos con artículos sueltos en los que explora los recovecos de la evolución, este ameno paleon-

tólogo neoyorquino se ha convertido en uno de los maestros actuales de la divulgación científica.

William Hartmann

Este polifacético nativo de Arizona igual pergeña una hipótesis científica, que pinta un cuadro sobre colisiones planetarias que escribe una novela de ciencia-ficción. Es el mayor especialista en datación de superficies planetarias.

Paul Hoffman

Uno de los *enfants terribles* de la geología actual, Hoffman (cuyo físico es exacto al de don Quijote, aunque en guisa de geólogo de campo) está revolucionando con sus ideas el campo de la historia de la Tierra. Su hipótesis de la Tierra Blanca parece solamente el principio de un asalto en toda regla a los enigmas de los climas del pasado.

Kenneth Hsü

Vivió en su infancia los tiempos revueltos de la guerra chino-japonesa, lo que le convirtió en un apasionado de la historia (y en concreto, en un experto en la guerra civil española). Emigró a Estados Unidos, y por fin recaló en Suiza; pero su campo de trabajo abarca todo el planeta, continentes y océanos por igual.

Roger Larson

Geólogo continental convertido en oceanógrafo, ha dirigido más de diez campañas en el océano Pacífico. Comenzó a sospechar que algo extraño había sucedido en el Cretácico al comprobar que el centro de su océano preferido estaba tapizado por una cantidad gigantesca de

rocas volcánicas de esta edad: de aquí surgió la «superpluma». En sus ratos libres se dedica a navegar.

James Lovelock

Quizá el único científico vivo de importancia que no trabaja en una universidad o un centro de investigación. Lovelock, famoso por haber ideado la teoría Gaia, vive del dinero que le dan las patentes que crea en su granja de la campiña inglesa.

Lynn Margulis

«¿Algún biólogo *auténtico* entre el público? ¿Sí? Entonces, creo que tendremos pelea». Para esta bióloga heterodoxa, ésta es una forma típica de empezar una conferencia. Una de las grandes inteligencias científicas actuales, sería interesante saber si apoya la teoría Gaia por convicción o por su afición a llevar la contraria al resto del mundo.

Christopher McKay

Este apóstol de la exploración tripulada de Marte es una figura habitual de los programas de divulgación científica sobre el espacio. Prototipo del científico-aventurero y aficionado a los climas rigurosos (los más parecidos a Marte), es corriente verle acampando en el Ártico o buceando en un lago bajo el hielo de la Antártida.

Minik Rossing

Este geólogo groenlandés trabaja en el Museo de Historia Natural de Copenhague, pero no ha perdido sus raíces: todos los años viaja a su tierra para desentrañar los secretos de los primeros seres vivos y del ambiente en el que surgieron. Es un partidario decidido de la tectónica de placas en el Arcaico.

Carl Sagan

A los diez años, Carl quedó asombrado cuando supo que la astronomía, que devoraba en la biblioteca pública de su humilde barrio de Nueva York, era también una profesión con la que podría ganarse la vida. En 1979 pidió a su universidad un año sabático para realizar un programa de televisión, *Cosmos*, que determinó la vocación científica de millones de personas. Probablemente el mejor comunicador de ciencia que ha existido nunca.

Jan Smit

Este sedimentólogo de hábitos tranquilos (pero gran devorador de mariscos) ha trabajado desde hace años en España: descubrió una fuerte anomalía de iridio en la zona de Murcia y se hizo uno de los partidarios más firmes de la hipótesis de los Alvarez sobre el impacto. Sus debates con Gerta Keller sobre las causas de la extinción cretácica se han convertido en clásicos.

Harold Urey

El ejemplo perfecto de cómo un científico puede cambiar de especialidad y seguir haciendo ciencia de alto nivel. Urey fue el descubridor del deuterio (por lo cual recibió el Nobel de Química en 1934), pero luego se interesó por el Sistema Solar. En 1952, su libro *The planets* fue el pistoletazo de salida para las Ciencias Planetarias.

John Tuzo Wilson

Quizá este tectónico canadiense fuese el último gran geólogo clásico: se jactaba de no haber utilizado jamás una sola ecuación en sus artículos, entre los que se cuentan los que aportaron las primeras ideas sobre los puntos calientes y las fallas transformantes.

Bibliografía

- Anguita, F.: *Origen e historia de la Tierra*. Editorial Rueda, Madrid, 1989.
- Arsuaga, J. L.: *Homínidos: el origen del hombre*. Planetario de Madrid, 2001.
- Dalziel, I. W.: «La Tierra antes de Pangea». *Investigación y Ciencia*, marzo de 1995.
- De Duve, C.: «El origen de las células eucariotas». *Investigación y Ciencia*, junio de 1996.
- Doolittle, W. F.: «El nuevo árbol de la vida». *Investigación y Ciencia*, abril de 2000.
- Erwin, D. H.: «La mayor extinción biológica conocida». *Investigación y Ciencia*, septiembre de 1996.
- Gould, S. J.: *La vida maravillosa*. Editorial Crítica, Barcelona, 1991.
- Gould, S. J. (editor): *El libro de la vida*. Editorial Crítica, Barcelona, 1993.
- Hoffman, P. E. y Schrag, D. P.: «La Tierra, una bola de nieve». *Investigación y Ciencia*, marzo de 2000.
- Hsü, K.: *La gran extinción*. Antoni Bosch Editor, Barcelona, 1986.
- Karl, T. R. y otros: «El clima que viene». *Investigación y Ciencia*, julio de 1997.

- Knoll, A. H.: «El final del eón proterozoico». *Investigación y Ciencia*, diciembre de 1991.
- Larson, R. L.: «La superpluma del Cretácico medio». *Investigación y Ciencia*, abril de 1995.
- Murphy, J. B. y Nance, R. D.: «Las cordilleras de plegamiento y el ciclo supercontinental». *Investigación y Ciencia*, junio de 1992.
- Tattersall, I.: «Homínidos contemporáneos». *Investigación y Ciencia*, marzo de 2000.
- Taylor, S. R. y McLennan, S. M.: «La evolución de la corteza continental». *Investigación y Ciencia*, marzo de 1996.