

temas de hoy



Ignacio Martínez
Juan Luis Arsuaga
Amalur
Del átomo a la mente

Ignacio Martínez
Juan Luis Arsuaga

Amalur
Del átomo a la mente

Ilustraciones de Diego García-Bellido

El contenido de este libro no podrá ser reproducido, ni total ni parcialmente, sin el previo permiso escrito del editor. Todos los derechos reservados.

© Ignacio Martínez Mendizábal, 2002

© Juan Luis Arsuaga Ferreras, 2002

© Ediciones Temas de Hoy, S. A. (T.H.), 2002

Paseo de Recoletos, 4. 28001 Madrid

Diseño de portada: Rudesindo de la Fuente

Ilustraciones de cubierta: Biblioteca Histórica Marqués de Valdecilla, Oronoz y Jesús Tablate Miquis

Ilustraciones de interior: Diego García-Bellido

Primera edición: marzo de 2002

ISBN: 84-8460-191-9

Depósito legal: M.8.476-2002

Compuesto en EFCA, S.A.

Impreso y encuadernado en Artes Gráficas Huertas, S.A.

Printed in Spain-Impreso en España

ÍNDICE

Agradecimientos

Introducción

Capítulo I. La carta de Dios

Capítulo II. Darwin/Edipo

Capítulo III. Un poco de física y química

Capítulo IV. El origen de la vida

Capítulo V. Los devoradores de luz

Capítulo VI. Los imprescindibles hongos

Capítulo VII. Los primeros de *Nosotros*

Capítulo VIII. El reloj de la reina Cristina

Capítulo IX. Las maravillosas aventuras del barón de Munchausen

Capítulo X. ¿Libres o esclavos?

Capítulo XI. Gaia

Bibliografía

Índice onomástico

Índice temático

A nuestros profesores y a nuestros alumnos

La Tierra con razón adquirió el nombre De Madre, por haber sido criados Todos los seres por la misma Tierra.

Tito Lucrecio Caro,
De la naturaleza de las cosas.

«La Tierra posee la fuerza vital que es base del reino vegetal, que vigoriza el organismo humano mediando ciertas fórmulas o gestos mágicos y que asegura la conservación del ganado si se le ofrendan o sacrifican algunas reses.»

José Miguel de Barandiarán,
Mitología vasca.

AGRADECIMIENTOS

En la elaboración de este libro hemos tenido la fortuna de contar con las sugerencias y opiniones de un buen número de colegas, especialistas de distintos campos, que han enriquecido el texto y corregido inexactitudes. El capítulo «Un poco de física y química» ha sido revisado por Rosa González y Jesús Pérez-Gil, quien también ha corregido el capítulo «Los devoradores de luz». Carmen Roldán, Patricio Domínguez y Diego García-Bellido revisaron el capítulo «Los primeros de *Nosotros*» y Manuel Martín Loeches hizo lo propio con «El reloj de la reina Cristina». El capítulo «El origen de la vida» se ha visto muy beneficiado por las valiosas sugerencias y aportaciones de Juli G. Peretó y Federico Morán.

Nuestros compañeros Ana Gracia, Carlos Lorenzo y Nuria García hicieron una lectura crítica del manuscrito original y sus opiniones han mejorado sustancialmente el contenido de este libro. Carlos Lorenzo, además, ha colaborado en la realización de algunas de las figuras.

A María Victoria Romero y Pedro María Arsuaga les debemos el tiempo que nos han dedicado para proporcionarnos el imprescindible apoyo documental.

Mención aparte se merece el personal de la Biblioteca Histórica de la Universidad Complutense de Madrid, Marqués de Valdecilla, por su ayuda a la hora de localizar muchas de las ilustraciones que acompañan este texto.

Finalmente, también queremos expresar nuestro agradecimiento a Enrique Bernárdez y Ernest Yellowhair Toppah, director del Kiowa Tribal Museum, por haber recuperado unas palabras perdidas en el tiempo.

INTRODUCCIÓN

Este es un libro sobre la vida y fue concebido allí donde ésta muestra toda su grandeza: en un desierto. La palabra *desierto* evoca en nosotros el color amarillento de la arena de las dunas. Así, la Real Academia define desierto como «territorio arenoso o pedregoso que, por la falta casi total de lluvias, carece de vegetación o la tiene muy escasa». Pero desde el punto de vista de un biólogo sólo la ausencia o escasez de vegetación define realmente a un desierto. Porque allí donde las plantas no crecen los animales no medran. Y para un biólogo ésa es la esencia de un desierto: la ausencia o escasez de vida.

Desde esta perspectiva, hay más desiertos además de los desiertos *amarillos*. No sólo la falta de lluvias, o la naturaleza arenosa o pedregosa del suelo, pueden limitar el crecimiento de las plantas. El desierto más extenso de nuestro planeta es de color *azul*. Se trata del mar abierto. A pesar del tópico de que el mar es un auténtico vergel, la despensa futura de la humanidad, el propio color de los océanos delata su auténtica naturaleza. El color de la vida es el *verde*, no el azul.

La gran mayoría de los seres vivos de nuestro planeta depende para subsistir de la capacidad de determinados organismos (básicamente las plantas y un conjunto heterogéneo de microorganismos que incluye a algas unicelulares, bacterias y cianobacterias) de convertir el agua y el dióxido de carbono en materia orgánica. Para ello utilizan la energía de la luz solar en un proceso conocido como *fotosíntesis*, cuya clave está en una molécula llamada *clorofila* (en realidad, hay varios tipos de clorofilas), que es de color verde. Si los océanos de nuestro planeta

bulleran de vida su color debería ser verde, el verde de los organismos fotosintetizadores, el verde de la clorofila.

El color azul del mar es el de la ausencia de la vida, es otro color del desierto. Un desierto que no es pedregoso ni arenoso, y en el que la vegetación no está ausente por la escasez de las lluvias. Aparentemente, el mar es un lugar idóneo para el crecimiento vegetal: hay una ilimitada cantidad de agua, de dióxido de carbono y de luz solar. ¿Qué impide, entonces, el crecimiento de las plantas en el océano? La respuesta está en las sales minerales. Todos los agricultores, jardineros y propietarios de macetas del mundo saben que para que las plantas crezcan no es suficiente con que tengan luz y agua. Para que la tierra y el agua sean fértiles es necesario que contengan nitrógeno, fósforo y azufre, entre otras sales minerales. El uso de fertilizantes se justifica, precisamente, por la necesidad de reponer estos nutrientes químicos en los campos de labranza o en los jardines. Sin ellos, los vegetales no pueden sintetizar la mayor parte de las sustancias que necesitan para vivir.

La vida de los organismos fotosintéticos está confinada a una estrecha capa en la superficie oceánica. La luz solar se extingue con rapidez al atravesar el agua y a una profundidad de alrededor de cien metros impera la oscuridad, donde la fotosíntesis no es posible. Al mar llegan anualmente miles de toneladas de sales minerales, acarreadas por los ríos, que las arrancan de las rocas de los continentes. Parte de ellas quedan disueltas en el agua marina, confiriéndole su peculiar sabor salado, pero lo cierto es que la mayoría se deposita en el barro que cubre los profundos fondos oceánicos, a miles de metros de la soleada superficie.

Con la cantidad de nutrientes que queda disuelta en el agua sólo pueden vivir unos pocos organismos en la zo-

na iluminada, una tenue y dispersa película verde que no puede cubrir el color azul del océano, ni sustentar la vida animal. Por supuesto, hay lugares donde el mar es verde, donde los organismos fotosintetizadores proporcionan la base para una floreciente vida animal. En algunas regiones, existen corrientes submarinas ascendentes que arrastran hacia la superficie los nutrientes atrapados en el fondo. En otras partes, son los ríos que inundan sus desembocaduras de sales minerales. En todos estos lugares el mar es verde y bulle de vida animal, pero estos oasis representan sólo una pequeña fracción del total de la superficie oceánica. Es precisamente en estos parajes donde se concentran las actividades pesqueras del ser humano. Fuera de ellos, en la mayor parte del mar, no es posible pescar por la sencilla razón de que no hay peces. Se trata del mayor desierto del planeta: el desierto azul.

Existen en nuestro mundo otras regiones que tampoco aparecen cubiertas por el manto verde de la vida, se trata de las regiones polares y las cimas de las altas montañas: los desiertos *blancos*. Aquí el factor que impide la vida vegetal es el frío extremo. Las plantas no pueden vivir allí donde el agua está congelada. En esas condiciones la savia no puede circular y, por si no fuera bastante, el suelo mineral se encuentra fuera de su alcance, cubierto de una espesa capa de impenetrable hielo, que en extensas zonas de Groenlandia o de la Antártida puede alcanzar varios kilómetros de espesor.

Amarillo, azul y blanco son los colores de los desiertos que pueden distinguirse en nuestro mundo desde el espacio exterior. Pero aún queda un cuarto tipo de desierto que no es visible desde el aire: los fondos oceánicos y el interior de las cuevas, los desiertos *negros*. La ausencia de luz es su denominador común y la causa de su esteri-

lidad: sin luz no hay fotosíntesis. Las plantas no pueden crecer en la oscuridad absoluta y eterna de las grutas o de los abismos oceánicos. Podría pensarse que la falta de luz es el más fatal de los obstáculos para la vida, pero esto no es cierto. En determinadas regiones de los fondos marinos existen prósperos ecosistemas compuestos por bacterias e invertebrados que no encuentran su fuente de energía en la luz solar, sino en una especie de *maná* químico que surge de pequeños volcanes submarinos llamados fumarolas. De sus bocas ardientes surge un chorro de agua hirviente rica en compuestos minerales que determinadas bacterias utilizan como fuente de energía. Y éstas, a su vez, son el pasto de los invertebrados que habitan en las proximidades de las fumarolas.

Pero en las cavernas no hay fumarolas que reemplacen el papel vital de la luz del sol. ¿Puede también aquí prosperar la vida? Por increíble que parezca, la respuesta es que sí. Cuando, cada verano, removemos la arcilla que envuelve los huesos humanos enterrados, hace más de 350.000 años, en la Sima de los Huesos de la Cueva Mayor de la Sierra de Atapuerca, a veces nos topamos con unos diminutos artrópodos ciegos de color blanco que viven en la oscuridad de la cueva. Su alimento lo encuentran en cualquier partícula de materia orgánica que, por el medio que sea, llegue hasta su profundo hogar. Y si al finalizar una campaña de excavación olvidamos un pequeño fragmento de madera en la cueva, al volver al siguiente año lo encontramos cubierto por un blanco sudario: hongos que medran en la madera abandonada.

La visión de estos tenaces habitantes de la oscuridad siempre nos ha impresionado hondamente, son el testimonio de la extraordinaria capacidad de los seres vivos para adaptarse y cubrir cualquier fisura y recoveco de

nuestro planeta. En la famosa película de Steven Spielberg *Parque Jurásico* se establece un duelo de personalidades entre un paleontólogo, el doctor Alan Grant, y un matemático, el doctor Ian Malcolm. Por descontado que nuestras simpatías están del lado del paleontólogo, pero hay en la película una frase del matemático que resume nuestros sentimientos al contemplar a esos moradores de las tinieblas: «La vida se abre camino.»

Esta fascinación por el fenómeno de la vida guía nuestras investigaciones. Nuestro interés va más allá del conocimiento de nuestros antepasados más o menos directos. Como paleontólogos, lo que nos interesa es el propio fenómeno de la vida: su origen, evolución y diversificación.

Las tres maravillas

Además de tener la suerte de poder acercarnos al estudio de la vida desde nuestras investigaciones en el campo de la evolución humana, tenemos otro privilegio, quizá aún mayor. Ambos somos profesores. Durante muchos años hemos tenido la ocasión de intercambiar ideas y experiencias sobre la docencia de la biología y de la paleontología, desde la enseñanza secundaria hasta la universitaria. Y nuestros alumnos nos han prestado, y nos prestan, ojos siempre nuevos ante los viejos problemas.

Estamos tan acostumbrados a vivir rodeados de los prodigios de nuestra civilización tecnológica, que nuestra capacidad de asombro está entumecida. Sin embargo, para los ojos de un niño de cuatro años, nuestro mundo está repleto de cosas extraordinarias e increíbles (tales como las escaleras mecánicas, los mandos a distancia, o los coches teledirigidos). Y si permanecemos impasibles

ante los *milagros* de la tecnología, mucho más desapercibidas aún nos pasan las maravillas del mundo natural. Sin embargo, cada día de clase nosotros asistimos a la manifestación de un triple prodigio.

En primer lugar, no deja de maravillarnos el hecho asombroso de que la naturaleza se rija por leyes. Esto, que parece tan obvio, no tendría por qué ser así. Nuestro Universo podría ser caótico y sus fenómenos responder a causas diferentes en cada ocasión. Aunque, si ésa fuera su naturaleza, nosotros no estaríamos aquí para darnos cuenta de ello. Pero aun más sorprendente resulta el hecho de que muchas de esas leyes sean extraordinariamente simples. Por ejemplo, la atracción recíproca que sufren los cuerpos debido a sus masas (la conocida acción de la gravedad), que determina sucesos tan dispares como las mareas o los movimientos y trayectorias de los astros, se describe mediante una simple ecuación matemática que no ofrece complicación alguna. Piensen por un momento que las cosas podrían ser de otro modo, en un Universo diferente del nuestro, y que la órbita de cada planeta podría responder a causas distintas de las que determinarían las de los otros cuerpos celestes. O imagine que la gravitación fuera un fenómeno tan intrincado que precisase de complejísimas ecuaciones para ser descrito. Si es capaz de vislumbrar esas alternativas, compartirá con nosotros la maravilla de la propia existencia y la simplicidad de las leyes naturales.

La segunda circunstancia asombrosa que suele pasar desapercibida es la extraordinaria capacidad del cerebro humano para conocer y comprender la naturaleza. Desde lo infinitamente pequeño, hasta lo inimaginablemente grande, las personas hemos sido capaces de penetrar en los secretos más recónditos de nuestro Universo. Somos capaces de conocer, con un comfortable nivel de

certeza, acontecimientos que tuvieron lugar hace miles de millones de años, o que se producen a miles de millones de kilómetros de distancia. Hemos *domesticado* el fuego, la electricidad y, hasta cierto punto, la energía del átomo. Nuestro conocimiento sobre algunos de los secretos fundamentales de la vida es tan profundo que sentimos vértigo e inquietud ante nuestra capacidad para manipularlos. ¿No les resulta sorprendente? Y todos esos descubrimientos los han llevado a cabo personas, no máquinas, ni ordenadores potentísimos. El progreso en el conocimiento científico es, quizá, la aventura intelectual (y, a veces, también aventura a secas) más apasionante y deslumbrante del ser humano.

Y por si esto fuera poco, la práctica de la docencia constituye, en sí misma, un *milagro*, la tercera de las maravillas. Si resulta sorprendente que la naturaleza esté constreñida por leyes, si es impresionante que seamos capaces de aprehenderlas, ¿qué decir del hecho de que podamos transmitírnoslas los unos a los otros, sin más ayuda (en la mayoría de las ocasiones) que una pizarra y una tiza? La mente humana está dotada de un instrumento extraordinario, el lenguaje, que nos faculta para comunicarnos cualquier tipo de información. Este instrumento no sólo incluye las distintas lenguas, sino también el idioma de la naturaleza, que hemos sido igualmente capaces de aprender: las matemáticas. Y junto con este instrumento tan valioso, los seres humanos contamos con una enorme capacidad de aprendizaje, que nos permite comprender y asimilar aquello que nuestros mayores descubrieron antes que nosotros.

Nuestra intención en este libro es la de trasladar este triple prodigio fuera de las aulas. Para ello hemos seleccionado aquellos aspectos del conocimiento sobre la vida que a nosotros nos parecen más fascinantes. Sin du-

da, ha quedado fuera de las páginas de este libro un buen número de otros temas, también apasionantes. Pero hemos preferido profundizar sólo en algunos de ellos antes que extendernos superficialmente en muchos. También hemos incluido, en todos los capítulos, una pequeña parte de la historia de algunos descubrimientos junto con nuestra visión sobre ciertos aspectos de la personalidad de sus protagonistas. Y hemos realizado el mayor esfuerzo para explicar todas las cuestiones de la manera más clara posible, intentando evitar la excesiva simplificación. Quizá éste no resulte un libro fácil, pero esperamos que sí sea asequible.

En el primer capítulo hemos recogido una breve historia del desarrollo de la ciencia moderna, desde el Barroco hasta nuestros días. En el segundo capítulo se sigue exponiendo la historia de las ideas y tiene un protagonista por derecho propio. Se trata, como no podía ser menos, de Darwin, el padre de la moderna biología. A nuestro juicio, la capital aportación que hizo Darwin a nuestro mejor conocimiento de la materia viva lo hace acreedor a esta distinción. Los capítulos del cuarto al séptimo los hemos dedicado a aquellos aspectos de los seres vivos que más llaman nuestra atención: el origen de la vida, el proceso de la fotosíntesis, las relaciones de los hongos con otros organismos, y la aparición y diversificación de los animales hasta los primeros vertebrados. No nos hemos olvidado del tercer capítulo, pero éste, que se refiere a cuestiones del ámbito de la física y de la química, se merece un comentario aparte.

Para poder entender la sutileza de los procesos biológicos fundamentales de la vida, es imprescindible conocer algunas propiedades físicas y químicas de la materia que constituye a los seres vivos. Quizá deberíamos incluir la recomendación de que si usted no es amante de la física

y la química se salte este capítulo. Pero más bien le aconsejamos lo contrario. El fenómeno de la vida no puede ser comprendido y valorado sin conocer su base físico-química. La propia existencia de los seres vivos supone un (aparente) desafío a algunas de las leyes básicas de la física y muchos de los procesos biológicos representan soluciones asombrosas a intrincados problemas químicos. Pero, además, el conocimiento de las propiedades físicas y químicas de la materia es, por sí mismo, apasionante.

En los siguientes capítulos, del séptimo en adelante, nos hemos ocupado de la naturaleza y el origen de algo muy difícil de definir pero que todos los humanos tenemos: la *mente*. La nuestra es una visión biológica del problema y, por ello, partimos de la descripción del sistema nervioso central y del análisis del comportamiento de los animales para abordar el espinosísimo tema de las bases biológicas de nuestro propio comportamiento.

No deje de visitar, al final del libro, el apartado de bibliografía. Una parte sustancial de lo tratado en este libro la hemos aprendido en otros libros, con los que estamos en deuda. Allí puede encontrar el monto de esa deuda. Y si alguno de los temas le ha interesado especialmente, también hallará espléndidas lecturas para profundizar más.

Por último, no busque muchos fósiles humanos en las páginas de este libro. Por una vez, les hemos retirado el protagonismo a esos *viejos* amigos nuestros.

CAPÍTULO I

La carta de Dios

Un mundo en orden

El camino de regreso desde la Sima de los Huesos finaliza en una pronunciada pendiente formada por un cono de bloques. En todo lo alto del talud el suelo casi alcanza a tocar el techo. Si así hubiera llegado a suceder la Cueva Mayor y todas sus galerías no habrían sido descubiertas.

Es frecuente que los aportes de materiales cieguen las entradas de las cuevas y las incomuniquen del resto del sistema kárstico. Los yacimientos que se están excavando en la Trinchera del Ferrocarril de Atapuerca son de ese tipo: bocas de cueva colmatadas por muchas toneladas de sedimento. Una de ellas es la famosa Gran Dolina, con fósiles humanos de hace 800.000 años, los primeros pobladores conocidos de Europa; otra de las cuevas (llamada Sima del Elefante), la que tiene fósiles más antiguos de animales (de hace más de un millón de años), fue una de las entradas, hoy cegada, al sistema de cavidades de la Cueva Mayor.

Una vez que se supera el estrangulamiento se sale a una gran sala, conocida como el Portalón. El Portalón está situado, a su vez, al pie de una gran fisura o grieta de la ladera de la montaña, que pasa desapercibida hasta que se está literalmente encima. Por eso es un lugar ideal para refugiarse, fresco cuando el calor es insopor-

table fuera, y cálido en los meses más fríos. Se tiene constancia de que la gente del Neolítico y la de la Edad del Bronce habitó el lugar y es posible que también se ocupara en el Paleolítico. Las excavaciones en curso lo dirán algún día. Del Portalón parte otro largo conducto, llamado la Galería del Sílex, que fue utilizado con fines funerarios por los hombres neolíticos y de la Edad del Bronce.

Para salir a la ladera se sube por una empinada pero corta rampa encajada entre paredes, que no deja extenderse a la vista hasta que se llega arriba del todo. El camino desde la Sima de los Huesos es largo y fatigoso (en total se supera un desnivel de 60 metros) pero el paisaje que se ofrece a nuestra vista después de tanta oscuridad es deslumbrador.

En primer plano están las faldas de roca caliza de la Sierra de Atapuerca, cubiertas de un bosque de encinas y quejigos. En la primavera y en el verano estos últimos apenas se distinguen de las primeras; pero en el otoño y el invierno sus hojas se marchitan, a diferencia de las de las encinas, aunque no lleguen a perderlas del todo, y su perfil es inconfundible. Al fondo se divisa la vega del río Arlanzón, que está limitada por un cortado. Hay allí numerosas huertas. El curso del río se adivina por la orla de chopos y de fresnos que lo recorre. Entre el río y las calizas se extienden los campos de cereal, las rubias cebadas y los dorados trigos. El suelo es blando y está cubierto por depósitos de guijos escalonados. Aquí y allá se ven manchas de robles melojos (o rebollos), que un día ocuparon todo el terreno hoy labrado.

Mirando en la dirección del río, hacia el sur, se ven los coches que pasan por la carretera, atravesando el pueblo de Ibeas de Juarros, y, muy a lo lejos, se divisan dos grandes colinas, al pie de las cuales está Covarrubias. Al

oeste se extiende la gran llanura castellana, y a lo largo del río Arlanzón se estira la ciudad de Burgos; se distinguen bien, en los días claros, las agujas de su catedral. Pero el paisaje está dominado por las altas cumbres de la Sierra de la Demanda, al este, con el pico de San Millán destacando por encima de los demás. En la última glaciación, la Sierra de la Demanda albergó pequeños glaciares en sus recuencos.

El paisaje que contemplaban los agricultores y ganaderos neolíticos y de la Edad del Bronce no debía ser muy diferente del actual, aunque sin duda el melojar se extendía mucho más; nosotros mismos lo hemos visto retroceder en los últimos años. Las gentes del Neolítico fueron, no obstante, las primeras que abrieron claros en el bosque para apacentar sus ganados y cultivar sus granos. El hacha, el fuego y los dientes de las bestias domésticas fueron sus aliados. Tampoco existían entonces las grandes concentraciones urbanas, ni, claro está, los automóviles.

Los hombres del Pleistoceno medio que hace 350.000 años se asomaban al exterior de la Cueva Mayor veían sin embargo correr el agua mucho más cerca; a lo largo de los milenios el río ha ido excavando su cauce en los terrenos blandos y alejándose de las duras calizas de la Sierra. En sus diversas fases de encajamiento el Arlanzón depositó las llanuras de cantos que hoy están convertidas en campos de cultivo. Por otro lado, en los tiempos paleolíticos el impacto del hombre en los ecosistemas era incomparablemente menor.

En el suave crepúsculo de un día de finales de julio, un viento manso mueve las mieses y el paisaje produce una grata sensación de armonía y placidez.

Esa impresión de estar ante un cuadro, perfecto, acabado, es la que expresan los versos de todos los poetas que han cantado la serena belleza de la naturaleza. Cada cosa parece estar en su sitio, cumplir un destino. Nos invade la paz que proporciona el orden.

Y esa idea, la de que la naturaleza está ordenada, se ha empleado como una prueba de la existencia de un Gran Arquitecto del Cosmos. La propia palabra *cosmos* significa orden en griego. El estudio del cosmos, concebido como un todo ordenado, cuyo funcionamiento y naturaleza podían comprenderse mediante la razón, fue el interés del que surgió la filosofía griega; averiguar cuál era el origen —*arjé*— del mundo fue el primer interrogante que se plantearon los filósofos.

La belleza plástica de la naturaleza impresiona con fuerza al hombre sensible, pero de todos modos no deja de ser una emoción subjetiva, que sólo existe mientras haya alguien con sensibilidad para percibirla. La belleza necesita de un espectador para existir, y parece que nuestra especie ha desarrollado un sentido del que carecen los demás animales: el sentido del «buen gusto», que nos proporciona los placeres estéticos.

En cambio el orden es una realidad objetiva, independiente del espectador, y por lo tanto impresiona la mente de los pensadores inquietos, de los filósofos, los amantes de la verdad. El amor a la verdad, junto con el amor a la belleza, son las dos cualidades que distinguen, por encima de todas las demás, al ser humano.

Por eso Santo Tomás de Aquino (1225-1274), en su obra más famosa, la *Suma teológica*, presentaba el orden del mundo como la quinta prueba *racional* de la existencia de Dios. Es la prueba del designio (o de la *teleología*): puesto que la naturaleza constituye un sistema ar-

monioso, en el que cada elemento se dirige al cumplimiento de su función, tiene que tener por fuerza un artifice. Santo Tomás vivió en el siglo XIII, pero en los manuales escolares de religión el orden de la naturaleza sigue apareciendo como un argumento incontestable a favor de la necesidad de un Ordenador.

Pero ¿dónde está el orden en el paisaje que se contempla desde la boca de la Cueva Mayor y cuál es el designio? El valle por el que discurre el río Arlanzón ha sido labrado por el correr de las aguas a lo largo de cientos de miles de años. El agua no ha seguido para ello más que dos reglas: la de la pendiente general del terreno y la de la dureza del sustrato. Todas las aguas de la cuenca del Duero fluyen hacia el Atlántico, porque la meseta está inclinada hacia el oeste de un tiempo a esta parte. Antes era una cuenca cerrada, donde se fueron acumulando los sedimentos que procedían del lavado de las montañas que la rodeaban por completo. El río ha tajado esos sedimentos porque son más blandos que las calizas de la Sierra de Atapuerca, y por eso el Arlanzón se ha ido alejando de ella. Los cantos que transporta y deposita en el flanco de la Sierra de Atapuerca vienen de muy lejos, desde otra sierra, la de la Demanda, ya que los sedimentos blandos no proporcionan rocas que puedan ser redondeadas y convertidas en guijarros.

En definitiva, el valle no fue diseñado para que por él corriera el río, sino que es el resultado de las leyes de la física que determinan el fluir de las aguas, del mismo modo que las rocas pulidas de las altas montañas no se hicieron para que por ellas resbalara mejor el hielo, sino que fueron los glaciares los que las desgastaron. Tampoco los cantos son redondeados para que puedan ser arrastrados con más facilidad por el fondo de los ríos: fue el propio arrastre lo que los redondeó.

Detrás de la impresión estética del paisaje no hay intención, sino leyes. Las cumbres de las montañas no tienen tampoco esos airoso picachos para competir en gracia con las agujas de las torres de la catedral, sino que son el resultado de la erosión. Y si es la erosión la que modela el paisaje, es decir, la escultora, otras fuerzas, éstas internas, crean el relieve al levantar las montañas. La sensación de orden desaparece así, se borra, al comprender los mecanismos que realmente han dado lugar a lo que vemos. Subyace, eso sí, el orden de las leyes naturales, que verdaderamente puede emocionar al matemático, pero difícilmente al poeta, ya que el orden vuela hacia la mente, no hacia el corazón. Desde los descubrimientos de científicos como Copérnico y Galileo, el Universo se nos presenta como una máquina regida por leyes matemáticas, mucho más frías e impersonales que un rojo atardecer.

En el paisaje de la Sierra de Atapuerca del año 2002 hay muchas máquinas creadas por el hombre. Estos objetos artificiales sí responden a un plan y tienen una función que cumplir. El tractor ha sido diseñado para las tareas agrícolas, y el coche para el transporte. Cada una de sus partes fue concebida para algo en concreto y tiene asignado un cometido, una utilidad. Realiza, en definitiva, una prestación: los faros iluminan, el motor impulsa, las ruedas giran, el parachoques absorbe los golpes, etc. Las herramientas que fabrica el ser humano son objetos con un plan y con una finalidad; objetos dotados de un proyecto, como decía el premio Nobel Jacques Monod (1910-1976), o también objetos *teleológicos* (es decir, orientados a un fin), utilizando una palabra más filosófica. Ya el hacha de piedra del hombre prehistórico de Atapuerca era un objeto dotado de un proyecto; cuando los investigadores nos enfrentamos al estudio de una piedra

tallada nos preguntamos: ¿para qué servía?, ¿con qué propósito fue confeccionada?

Falta aún un componente esencial del paisaje por analizar, y es el componente vivo. Vemos plantas y vemos animales. Como las máquinas construidas por el hombre, también se componen de estructuras que realizan prestaciones. Las raíces de las plantas, los vasos, las hojas, están al servicio de la nutrición; las flores son órganos reproductores; las semillas darán lugar a nuevas plantas (lo son ya de hecho) y también se rodean de mecanismos que facilitan la dispersión: unas por el viento, otras en el estómago o en la piel de los animales. Nada se deja al azar.

El aguilucho que sobrevuela los campos a poca altura tiene una enorme superficie alar para poder flotar sobre las mieses con el mínimo gasto de energía; su pico, sus garras, son las de una rapaz; todos los sistemas y órganos de su cuerpo cumplen alguna función, todos tienen una utilidad, que es la de producir una determinada prestación. Todo parece calculado al milímetro, con una minuciosidad extrema, lo mismo en un mamífero, que en un ave, un insecto o cualquier otro tipo de animal. También el zoólogo se pregunta cuando analiza las estructuras de un animal: ¿para qué sirven?, y la pregunta está tan justificada ante un ojo como ante una máquina fotográfica. Las estructuras de los seres vivos son adaptativas, están ajustadas a su función, de la misma manera que se adaptan las herramientas al uso que se les quiere dar. Ésa es una diferencia radical entre el mundo de la biología y el de la geología: las formas del relieve no cumplen ninguna función, no están adaptadas: una montaña no está dotada de un proyecto. No cabe preguntarse ante un valle: ¿para qué sirve?

Colin Pittendrigh propuso que para distinguirlos de los objetos teleológicos que produce el hombre (como la cámara de fotos), los aparatos de los seres vivos (como el ojo) sean denominados aparatos *teleonómicos*. Esta correspondencia exacta entre los objetos dotados de un propósito que nosotros hacemos y los objetos dotados de un propósito del mundo orgánico se extiende más allá de la utilidad, porque en ambos casos se fabrican de acuerdo con unos planos que existían antes que los propios objetos. En los seres vivientes la información que determina lo que van a ser está en los genes; todas y cada una de las células de su cuerpo tienen un juego completo. Los seres vivientes se autoensamblan, en vez de ser contruidos por la mano humana. Y por supuesto, aunque sus elementos constituyentes tengan propósito, en el sentido de que realizan prestaciones, los individuos como tales no lo tienen: no llevan a cabo ninguna prestación y se limitan a sobrevivir y reproducirse, cada uno en su ambiente y a su manera. Para poder llegar a hacerlo necesitan ser eficaces y por eso (que no *para eso*) han aparecido en él transcurso de la evolución las adaptaciones. Tan sólo los animales domésticos y las plantas cultivadas presentan rasgos que podríamos adjetivar propiamente de teleológicos; la lana de las ovejas, las enormes ubres de las vacas lecheras y la espiga cargada de grano del trigo han sido seleccionadas precisamente con el propósito de servir al hombre.

El Libro de la Naturaleza

«El mundo es la carta que Dios le escribió a la humanidad», reza una frase atribuida a Platón (hacia 427-347 a. de C.). La idea no es exclusiva del mundo griego. En la Biblia (*Isaías*, 34, 4) se lee que el firmamento es un libro

escrito por Dios; San Agustín llegó incluso a asegurar que en algún punto del Universo se encuentra la *firma* divina —en una novela titulada *Contacto*, el famoso astrofísico y divulgador Carl Sagan (1934-1996) la sitúa en el número pi; ya saben: 3,1416... etc., etc., etc., y es después de muchos, muchos, etcéteras, en un lugar al que todavía nadie ha llegado, donde se encontraría esa firma.

Pero esa carta —o ese libro— se ha leído de diferentes maneras a lo largo de la historia de Occidente. La llamada Revolución Científica del siglo XVII, que dio lugar al nacimiento de la física y de la química modernas, y sobre todo produjo el *método científico* que aún usamos, consistió precisamente en hacer una lectura de la carta de Dios totalmente diferente a la de Aristóteles (hacia 384-322 a. de C.) y a la de la filosofía medieval escolástica, la de Santo Tomás y otros autores, que se estudiaba en las universidades medievales y renacentistas.

Para Aristóteles los movimientos de la naturaleza se producen porque las cosas tienden hacia su lugar natural, donde al llegar permanecen en reposo. Una piedra cae, o las llamas se elevan, porque su lugar es, respectivamente, la Tierra y el cielo. El agua es otro elemento pesado, como la Tierra, y el aire, en cambio, tiende a ascender como el fuego. Esta explicación sirve para los movimientos *naturales* de las cosas, que son necesariamente en línea recta. El hombre puede violentar la naturaleza e imprimir a una piedra un movimiento ascendente, o paralelo a la superficie de la Tierra, pero éstos son movimientos artificiales, forzados.

Podemos encontrar trazas del pensamiento aristotélico acerca de la diferente naturaleza de los elementos en un bellísimo soneto de Lope de Vega (1562-1635), a nuestro juicio uno de los más hondos y emocionantes poemas

de la lengua castellana. Se titula «A un caballero, llevando su dama a enterrar él mismo» y dice así:

*Al hombro el cielo, aunque su Sol sin lumbre,
Y en eclipse mortal las más hermosas
Estrellas, nieve ya las puras rosas,
Y el cielo, Tierra en desigual costumbre.*

*Tierra, forzosamente pesadumbre,
Y así no Atlante, a las heladas losas
Que esperan ya sus prendas lastimosas,
Sísifo sois por otra incierta cumbre.*

*Suplícoos me digáis, si Amor se atreve,
¿cuándo pesó con más pesar, Fernando,
o siendo fuego o convertida en nieve?*

*Mas el fuego no pesa, que exhalando
La materia a su centro es carga leve:
La nieve es agua y pesará llorando.*

El gran poeta juega aquí con los dos significados de *pesar*, el físico y el sentimental. En el primer cuarteto describe al caballero transportando al hombro el cuerpo sin vida (el *Sol sin lumbre*) de su amada (el *cielo*), cuyos ojos se han cerrado (*en eclipse mortal las más hermosas estrellas*) y cuyas mejillas han perdido el color (*nieve ya las puras rosas*). Es decir, el cielo se ha convertido en Tierra. En el segundo cuarteto se le dice al caballero que no es el gigante Atlas o Atlante, sobre cuyos hombros apoyaba la Tierra según la mitología clásica, sino el desdichado Sísifo, condenado por Zeus a empujar una y otra vez un peñasco monte arriba. En el primer terceto se compara el peso de la dama en vida, cuando era fuego, con el de su cadáver, helado como la nieve. Y en el im-

presionante terceto final Lope alude a la idea aristotélica de que el fuego no pesa y asciende la cielo, mientras que el agua es materia que tiende hacia el centro. El último verso, en el que se combinan los dos significados del verbo pesar es, simplemente, inolvidable.

El Fénix de los ingenios había aprendido con los jesuitas de Madrid en los estudios de San Isidro (creados en 1545) y en la Universidad de Alcalá, adquiriendo, por lo que se ve, una sólida formación clásica (los Estudios de San Isidro se convirtieron en 1603 en el Colegio Imperial de Madrid y en 1624 obtuvieron el rango de universidad; un año después pasaron a llamarse Reales Estudios de San Isidro y, finalmente, acabarían fusionándose con la Universidad de Alcalá y los reales colegios de Medicina y Cirugía y de Farmacia en la actual Universidad Complutense de Madrid).

En resumen, el pensamiento aristotélico interpretaba los movimientos de las cosas como la realización de las potencialidades de sus elementos constituyentes, es decir, como si se cumplieran unas aspiraciones o deseos que tienen los cuerpos. En otras palabras, los cuerpos eran tratados como si tuvieran voluntad, como si fueran seres vivos con intenciones. El modelo para la física y la química de Aristóteles era la biología. Este tipo de pensamiento se denomina teleológico, que como hemos visto quiere decir «orientado hacia un fin», ya que ésa es la clave para interpretar el comportamiento de la totalidad de la naturaleza: como tanto los objetos inanimados como los seres animados aspiran a alcanzar el estado de plenitud, no hay diferencia sustancial entre las explicaciones que se dan para unos y para otros.

Contra esa visión *animista*, aparentemente muy lógica, de la física y de la química es contra la que se rebelan los revolucionarios científicos del siglo XVII, que se califi-

can a sí mismos de *modernos*. No admiten, en contraposición con los aristotélicos y escolásticos, otras explicaciones que no sean las mecánicas, y aspiran a expresar el funcionamiento del mundo en lenguaje matemático. De hecho creen que, como ya había dicho Platón, la carta de Dios está escrita en caracteres matemáticos. El italiano Galileo Galilei (1564-1642) proclama en su obra el *Saggiatore* que la nueva filosofía natural debe expresarse en lenguaje matemático porque matemática es la estructura de la naturaleza: «La filosofía ha sido escrita en el enorme libro que tenemos ante los ojos, el Universo. Pero sólo lo podemos leer si conocemos sus letras y aprendemos su lenguaje. Está escrito en el lenguaje de la matemática y sus letras son triángulos, círculos y otras figuras geométricas; sin estos medios es imposible que el ser humano pueda comprender ni una sola palabra.»

Y otro sabio de la época, el astrónomo alemán Johannes Kepler (1571-1630), afirmaba: «El Creador Óptimo Máximo, al crear este mundo móvil y al disponer el orden de los cielos se atuvo a los cinco cuerpos regulares que han sido tan famosos desde los días de Pitágoras y Platón hasta los nuestros y [...] en función de su naturaleza ajustó su número, sus proporciones y la razón de sus movimientos.» Esos cuerpos geométricos regulares son el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro, que para Platón eran los símbolos de los cinco elementos del Universo: fuego, Tierra, aire, éter, agua. Lo que hace de estos cinco cuerpos formas ideales es que son los únicos cuyas superficies tienen lados y ángulos iguales y cuyas aristas descansan sobre una esfera. Johannes Kepler, en consecuencia, quiso relacionar los cuerpos ideales con las esferas en las que supuestamente se inscribían los planetas.

Un físico mucho más reciente, Eugene Wigner (premio Nobel en 1963), expresó así el poder de las matemáticas para explicar el mundo natural: «La enorme utilidad de las matemáticas en las ciencias naturales es algo que roza lo misterioso, y no hay explicación para ello. No es en absoluto natural que existan "leyes de la naturaleza", y mucho menos que el hombre sea capaz de descubrirlas. El milagro de lo apropiado que resulta el lenguaje de las matemáticas para la formulación de las leyes de la física es un regalo maravilloso que no comprendemos ni nos merecemos.»

Otro aspecto interesante de la ciencia *moderna* del Barroco (todavía llamada *filosofía natural*) es que se recupera la idea de los atomistas clásicos (Demócrito y Lucrecio) de que la materia está compuesta de corpúsculos, es decir, de pequeñas partículas o elementos invisibles al ojo desnudo. La existencia de los corpúsculos no dejaba de ser una hipótesis de trabajo, porque nadie los había visto. Pero lo importante es que las cualidades de los cuerpos (color, sabor, temperatura, flexibilidad) y los cambios que experimentan esas cualidades en las cosas debían explicarse en virtud de las características y movimientos, a ser posible descritos matemáticamente, de los corpúsculos constituyentes.

Los modernos imaginaban que el Universo era una gran máquina, y encontraban en el reloj la mejor metáfora del funcionamiento del mundo. Un reloj es un sistema muy complejo de piezas adaptadas entre sí para funcionar armónicamente (aunque cada una tenga su movimiento propio) sin necesidad de atribuirles voluntad ni propósito. Era la regularidad del reloj lo que hacía que esta máquina fuera tan adecuada para servir como metáfora de los movimientos previsibles de los cuerpos celestes. La nue-

va filosofía era pues mecanicista y corpusculista y aspiraba a ser matematizada.

Además, del mismo modo que el comportamiento inteligente de la maquinaria de un reloj respondía a un diseño producido por un ser inteligente, que era el constructor del reloj, también de la precisión del reloj universal se deducía la necesidad de un artífice sobrenatural.

En el siglo XVII estaban muy familiarizados con los autómatas, artefactos mecánicos que representaban animales y humanos, sin que nadie pensara por ello que tenían sesos o deseos. En consecuencia, la concepción mecanicista de la naturaleza no se oponía a la doctrina cristiana, sino que más bien la reforzaba. Las ideas *animistas* de la naturaleza de los aristotélicos podían llevar a algunos a pensar que todas las cosas de este mundo estaban animadas, una idea peligrosa, mientras que la metáfora del reloj reforzaba la doctrina ortodoxa de la separación de la materia y el espíritu y de la inmortalidad del alma.

Lo que reclamaban los modernos era el derecho a leer la carta de Dios. Si el Libro de la Naturaleza era tan divino como las Sagradas Escrituras, ¿por qué no iba a ser legítimo que los filósofos naturales se aplicasen a su lectura? Máxime cuando la filosofía natural ponía de manifiesto la grandeza del autor del diseño de la gran máquina universal.

Galileo defendía la teoría heliocéntrica (el Sol en el centro) del polaco Nicolás Copérnico (1473-1543) expuesta en el libro *De revolutionibus orbium* (publicado en el mismo año de la muerte de su autor). La teoría copernicana de que la Tierra y los planetas giraban alrededor del Sol desafiaba a los sentidos, que parecían indicar lo contrario, y a la teoría geocéntrica de Claudio Tolomeo

(hacia 100-170), que afirmaba que el Sol, la Luna y los planetas rotaban alrededor de la Tierra. Y también a las Sagradas Escrituras, donde, por ejemplo, se lee (*Josué* 10, 12-13) que Josué mandó detenerse al Sol para que no se hiciera la noche y continuar la batalla de Gabaón hasta la victoria total, lo que probaba que era el Sol el que se movía:

«El día en que Yahvéh entregó a los amorreos en poder de los hijos de Israel, fue cuando Josué habló a Yahvéh diciendo a la vista de Israel:

»"Sol, deténte sobre Gabaón;

»y tú, Luna, sobre el valle de Ayalón!"

»Yse detuvo el Sol,

»y se paró la Luna,

»hasta que el pueblo se hubo vengado de sus enemigos.»

No obstante, la teoría copernicana tuvo cierto éxito inicialmente, y en España se explicaba al sabio polaco en el Estudio de Salamanca. En 1561 los estatutos de esta universidad establecían que en el segundo año de la Cátedra de Astrología se podía leer a Tolomeo, a Geber o a Copérnico, según decidieran los alumnos («al voto de los oyentes»), y los estatutos de 1594 ordenaban que en el segundo cuatrimestre se leyera a Copérnico.

Es posible que en Salamanca interesase más el lado práctico de las muy precisas tablas astronómicas de Copérnico que su teoría heliocéntrica, pero hubo un alumno de Salamanca, un monje agustino llamado Diego de Zúñiga (1536-hacia 1600), que intentó hacer compatibles las ideas de Copérnico con la Biblia. En sus comentarios a *Job* (*In Job Commentaria*) de 1584, Zúñiga defiende la superioridad de Copérnico frente a Tolomeo a la hora de

explicar el curso y las posiciones de los planetas, y por otro lado trata de demostrar que el movimiento de la Tierra no es incompatible con las Sagradas Escrituras. En el *Eclesiastés*, Salomón afirma que «la Tierra eternamente permanece», pero no debe interpretarse como que está inmóvil, porque si se lee la frase completa se ve que es otro el significado: «Una generación se va y otra generación viene, más la Tierra eternamente permanece», lo que quiere decir simplemente que la Tierra no cambia como los hombres y no que se esté quieta.

Desgraciadamente, la Inquisición se atenía a la letra de la Biblia y en 1616 el libro de Copérnico entró en el *Index librorum prohibitorum*, el nefasto índice de los libros prohibidos de la Iglesia que todavía mucha gente viva ha llegado a sufrir (pues duró de 1559 a 1948). Curiosamente, aunque ni Copérnico, en vida, ni su libro habían tenido problemas con la Iglesia, a partir de 1616 desapareció de las enseñanzas, incluido el Estudio de Salamanca. También fue condenado el libro de Zúñiga *In Iob Cornmentaria*, por más que el mismo autor, en una obra posterior (*Philosophia*, de 1597), hubiera declarado imposible el movimiento de la Tierra: «Asimismo, las cosas pesadas que son arrojadas hacia lo alto con fuerza, aunque el tiro sea repetido mil veces, caen perpendicularmente en el mismo lugar, pero si la Tierra se moviera con tanto ímpetu, sustraería esto del lugar desde el que fue lanzado: así, pues, la Tierra no se mueve.»

La Iglesia, y especialmente sus enemigos jesuitas (que se preocupaban, para su desgracia, por los temas científicos), advirtieron a Galileo de que se olvidase de las ideas de Copérnico, cosa que hizo durante un tiempo, hasta que finalmente, en 1632, publicó su *Diálogo sobre los dos principales sistemas del mundo, el tolomeico y el copernicano*. Como se sabe, la Inquisición condenó a

Galileo en el célebre proceso del año siguiente (1633), en el que se le forzó a rectificar su opinión de que la Tierra era un planeta que se movía alrededor del Sol, y Galileo fue obligado a permanecer recluido en su casa de Arcetri (cerca de Florencia). Ésta fue su abjuración de la idea del movimiento de la Tierra: «Yo, Galileo, hijo de Vincenzo Galilei, florentino, de edad setenta años, constituido personalmente en justicia, estando de rodillas ante vosotros, muy eminentes y muy reverendos cardenales, inquisidores generales de la Cristiandad contra la maldad de los herejes [...] de todo corazón y con una fe sincera, abjuro, maldigo y detesto los indicados errores y herejías.» Y cuenta la tradición que cuando se levantó dio un golpe con el pie en el suelo y musitó: «*Eppur si muove!*» («Y sin embargo se mueve!»)

Para decir la verdad completa, la Iglesia no encontraba problemático el que se utilizase el modelo matemático de Copérnico en astronomía, pero no aceptaba que se proclamase que en realidad el Sol, y no la Tierra, ocupaba el centro. No obstante, Galileo no pretendía negar la verdad de fondo de la Biblia, sino sólo su literalidad, y sobre todo mantenía que la interpretación que el filósofo natural hacía de la palabra de Dios *revelada* en el Libro de la Naturaleza era tan válida, por lo menos, como la interpretación que hacía el teólogo a su manera a partir de la revelación contenida en las Escrituras. Para los filósofos naturales del Barroco, el mundo era una teofanía, una manifestación o *explicatio* de Dios.

En España la Inquisición tuvo durante el Barroco un efecto nefasto sobre la ciencia. Toda desviación de la filosofía natural de Aristóteles era sospechosa y, en particular, la teoría heliocéntrica no era admisible, pese a lo cual algunos autores recurrieron al subterfugio de considerar condenada su realidad, pero no su posibilidad teó-

rica. Los científicos *modernos* de finales del XVII español, conocidos como *novatores*, no lo tuvieron ciertamente fácil a la hora de romper con los saberes tradicionales y construir un conocimiento nuevo, pero fueron la base de la ciencia española de la Ilustración.

A los modernos del siglo XVII también les parecía absurda la doctrina de Aristóteles y de los escolásticos de las *formas sustanciales*: la idea de que los objetos están constituidos de materia, pero que es la forma la que les hace ser lo que son, como en una escultura es la forma que le da el escultor lo que convierte al mármol inexpressivo en la efígie de una persona. La materia no cuenta para Aristóteles, pues la causa de las propiedades de las cosas está en su forma. Los objetos de este mundo que llamamos caballos difieren entre sí (no hay dos caballos exactamente iguales), pero comparten una misma *forma sustancial* que los hace pertenecer, pese a las diferencias individuales o *accidentes*, a la misma categoría de cosa y poseer una serie de cualidades que son propias de esa clase de cuerpos que se llaman caballos. La *forma* no es *materia*, pero está ligada íntimamente a ella de una manera misteriosa.

Para los filósofos naturales modernos la doctrina aristotélica era ininteligible, porque no podía ser entendida en términos mecánicos ni podía pretender ser expresada en el lenguaje matemático. El calor, por ejemplo, se podía explicar mejor por medio de los movimientos y choques de los diminutos corpúsculos que forman la materia que recurriendo a la misteriosa idea de las *formas sustanciales*. Los modernos combatían también, y por la misma razón, una idea de la naturaleza que se había desarrollado inmediatamente antes, en el Renacimiento, y que se basaba en los *poderes ocultos*. Esta teoría defendía

que los cuerpos se atraían o repelían por fuerzas que actuaban a distancia de manera misteriosa; la influencia de los lejanos cuerpos celestes sobre los seres humanos, que daba fundamento a la astrología, era consecuencia de tales *poderes ocultos*. Para los filósofos naturales mecanicistas, la teoría de la *forma sustancial* de Aristóteles también olía a *poderes ocultos*.

El mecanicismo como explicación tenía sin embargo sus limitaciones, como pronto se comprobó. El inglés Isaac Newton (1642-1727) pasa por ser el máximo exponente de la Revolución Científica, y sin embargo no pudo explicar toda la física en términos mecánicos. La ley de la gravitación universal de Newton establecía la atracción de los cuerpos por medio de una fuerza que actuaba a distancia, y por eso, aunque la gravitación se formulase de manera irrefutablemente matemática, Newton fue acusado por filósofos como el alemán Gottfried Wilhelm Leibnitz (1646-1716) de recurrir a *poderes ocultos*, de naturaleza inmaterial. El propio Newton encontraba falta de sentido la idea de que la gravedad es una fuerza que actúa a distancia, e intentó sin éxito encontrar una manera de que la fuerza en cuestión se transmitiera mecánicamente a través de un medio. Sin embargo, aunque no tuviera un carácter mecánico, la gravitación servía para explicar la realidad por medio de una ley matemática, y en ese sentido era *moderna*.

El cielo de Aristóteles

«Hay más cosas en el cielo y en la Tierra que las que sueña tu filosofía», le dice Hamlet a Horacio, y los nuevos instrumentos ópticos de los filósofos naturales modernos les permitieron asomarse a mundos hasta entonces desconocidos por ser, o muy pequeños, o muy gran-

des. Pero no fueron los instrumentos la causa de la Revolución Científica, sino la elaboración de un conjunto nuevo de normas para construir el conocimiento, que se ha llamado, desde entonces, el *método científico*.

El método desafía de entrada el *argumento de autoridad*, el *magister dixit*, y es esa actitud crítica ante la verdad establecida la que caracteriza al científico moderno. Los impostores y embaucadores partidarios de los *fenómenos paranormales* y otras simplezas achacan a la ciencia académica un inmovilismo y cerrazón absurdos. Nada está más lejos de la mente de un científico que dar por buena, sin comprobación, una idea de otro científico. Lo que sucede es que esos *fenómenos paranormales* son, precisamente, improbables.

En el libro *La leyenda de Jaun de Alzate*, Pío Baroja (1872-1956) pone un delicioso ejemplo de actitud desafiante frente al viejo argumento de autoridad. Jaun es un aldeano inteligente que desconfía de los textos clásicos y busca una verdad basada en hechos. En un pasaje del libro, Jaun y sus compañeros fingen que salen volando del monte Larraun:

«Chiqui: —Vamos al Mediterráneo, paralelamente a los Pirineos.

»Macrosophos: —Alto ahí! ¿Cómo paralelamente? Eso no puede ser. Estrabón afirma que los Pirineos van de Norte a Sur, en dirección paralela al Rin.

»Chiqui: —Estrabón se equivoca.

»Macrosophos: —Estrabón no se puede equivocar.

»Jaun: —Pues se equivoca. Plinio, el Antiguo, comprendió que los Pirineos van de Este a Oeste, y Tolomeo marcó la posición de los dos puntos extremos: uno, el promontorio de Easo, en el Océano; y el otro,

el templo de Afrodita, de Portus Veneris, en el Mediterráneo.

»Macrosophos: —Hay que ver quién tiene más prestigio, si Tolomeo o si Estrabón.

»Jaun: —No; hay que ver quién dice la verdad.»

Cuando construyó su telescopio, Galileo se asomó a una nueva realidad que desafiaba las ideas establecidas. En el cielo que imaginaba Aristóteles había una esfera exterior que contenía las estrellas y dentro de ella una serie de esferas encajadas entre sí de sustancia transparente (de cristal, líquido o aire) conteniendo los planetas como cuerpos visibles. La esfera de las estrellas y las de los planetas giraban necesariamente con movimientos circulares y los planetas tenían que ser esferas sin defectos, porque el círculo y la esfera son las formas que representan la perfección absoluta que reina en el cielo. Todo es inmutable y perfecto en el cielo a partir de la Luna, y sólo en la Tierra existe el cambio y la imperfección.

Lope de Vega hace alusión a esa visión geocéntrica del Universo. En *El peregrino en su patria* se lee:

*El Sol mil veces discurriendo cuente
Del cielo los dorados paralelos,
Y de su blanca hermana el rostro aumente,
Que los diamantes de sus puros velos,
Que viven fijos en su otava esfera,
No han de igualarme aunque me maten celos.*

El Sol da vueltas alrededor de la Tierra y recorre los paralelos en los que los sabios han dividido el planeta. Su *blanca hermana* es la Luna, y las estrellas (*diamantes de sus puros velos*) están fijadas en la octava de las esferas que dan vueltas alrededor de la Tierra.

Al dar Tolomeo, en el siglo II, forma matemática al cielo, para predecir los movimientos de los planetas siguió el modelo de Aristóteles (aunque, curiosamente, las trayectorias de los planetas no se comportaban como si estuvieran en esferas sometidas a rotación). Pero Galileo enfocó su telescopio hacia la Luna y observó la irregularidad de sus cráteres, tan imperfectos en su *circularidad* como los de la Tierra. Además, Galileo vio un cometa situado más allá de la Luna, en lugar de más cerca, donde debería estar si el cielo por encima de la Luna fuera inmutable y sin cambios. Pero estas observaciones no lograban convencer a todo el mundo, porque había gente que, como decía Galileo, «antes que modificar algo en el cielo de Aristóteles, osarían negar lo que ven en el cielo de la naturaleza».

Las mentes realmente libres en todas las épocas han sido capaces de prescindir de las anteojeras de las teorías preexistentes, y ésa, la independencia de juicio, es la base del progreso en el conocimiento. El astrónomo español Jerónimo Muñoz (hacia 1520-1592) observó en los cielos la nova de 1572, fenómeno que atribuyó erróneamente a la aparición de un cometa en lugar de a lo que era en realidad, una estrella que aumentó de pronto su brillo. Pero eso es lo de menos, porque lo importante es que Muñoz fue capaz de deducir que el cuerpo de nueva aparición estaba más allá de la Luna, y que por lo tanto el firmamento no era inmutable (*incorruptible*) como creía Aristóteles, sino sujeto a cambios como la propia Tierra y todo lo que contiene. El método que empleó fue el de calcular el paralaje del cometa y concluir que era inferior al de la Luna, por lo que no podía ser un cuerpo sublunar, es decir, situado más acá (el paralaje es la diferencia entre las posiciones que en la bóveda celeste tiene un astro, según desde donde se observe; cuanto mayor el paralaje, menor la distancia, y cuanto menor el

paralaje, mayor la distancia). Obligado a elegir entre el resultado de sus observaciones y el modelo aristotélico consagrado por la tradición, en el que todo el mundo creía y era la doctrina oficial, el astrónomo español, como buen científico que era, se quedó con lo que podía ver y medir. Éstas son las palabras de Jerónimo Muñoz en su obra, de 1573, *Libro del nuevo Cometa, y del lugar donde se hazen; y como se vera por las Parallaxes cuan lexos están de Tierra y del Pronostico deste*:

«Por tanto, habiéndome hecho Dios merced de darme ingenio libre, bien inclinado y aparejado para entender cualquier facultad, viendo la flaqueza de las razones de Aristóteles con que quiere probar ser el cielo eterno, y habiendo observado con instrumentos las mudanzas que hay en el cielo [...] he entendido que es falso lo que dice, que es común opinión de todas las gentes que nunca ha habido en el cielo mudanza alguna, por lo cual los hace eternos. Y pues sé que hay en ellos mudanza, y en ellos se encienden los cometas, he sido forzado por razones naturales y demostraciones geométricas conceder que hay en el cielo corrupción y incendios.»

No existe propiamente un método científico codificado como un conjunto de procedimientos, aunque todo el mundo hable de él. El inglés Francis Bacon (1561-1626) entendía por método científico la inducción, es decir, la recolección del mayor número posible de datos, de los que saldrían las leyes generales que gobiernan la naturaleza. Pero no todos los científicos han estado siempre de acuerdo en que de los casos particulares surjan sin más las regularidades, y muchos han preferido enfrentarse a los hechos con una idea previa en la cabeza, es decir, pasar de lo general a lo particular, explicar los casos individuales por medio de leyes generales.

Karl Popper (1902-1994) y otros filósofos en el siglo XX le han dado muchas vueltas a este problema, pero todos los científicos estamos de acuerdo en que tiene que haber algún tipo de conexión entre ideas y hechos si se quiere construir el conocimiento verdadero sobre el mundo real. Sólo las matemáticas pueden prescindir de las observaciones: partir de unos principios generales, que se aceptan sin discusión, de los que se van deduciendo por lógica una serie de conclusiones. Pero las ciencias llamadas *exactas* se ocupan de los mundos que podrían existir, y las ciencias conocidas como *experimentales* del mundo en el que por suerte o por desgracia vivimos. En las primeras no cabe el error, pero son las segundas las que nos permiten leer la *Carta de Dios* de Platón, el *Libro de la Naturaleza* de Galileo.

Hay que añadir que por hechos Bacon entendía las observaciones fidedignas, realizadas por personas preparadas, y los experimentos adecuadamente planificados. Una de las características de la filosofía natural moderna era el rigor en la recogida de datos, que no debía estar influido por los prejuicios. La nueva filosofía natural dejaba aparte los valores morales y los intereses de los individuos, y aspiraba a ser objetiva y desapasionada. Incluso podía ir contra el sentido común, como cuando se afirmaba que era la Tierra, y no el Sol, el astro que giraba, pese a que los sentidos nos digan lo contrario.

El experimento

Un caso importante, en el que se recurría tradicionalmente al pensamiento animista para encontrar una explicación, era el del funcionamiento de las bombas aspirantes que se usan para extraer agua de un pozo. Cuando

la bomba hace el vacío el agua sube por el tubo hasta alcanzar una determinada altura, que se había observado que se situaba sobre los 10 metros. En la década de 1660, el inglés Robert Boyle (1627-1691), que quería comprobar hasta qué punto era cierto el hecho, construyó en Londres un tubo de metal de diez metros rematado por uno de cristal para apreciar bien la subida del agua. Así se aseguraba de que no había pérdidas de agua por filtración y de que la experiencia se realizaba en las debidas condiciones. La columna de agua subió 10,2 metros.

¿Cuál sería la causa de ascenso del líquido por el tubo? La respuesta podía estar en el horror al vacío que *siente*, según el pensamiento aristotélico, la naturaleza, y que llevaría al agua a *intentar* rellenar el tubo vacío. De hecho Aristóteles negaba que el vacío pudiera llegar a existir, habida cuenta de cuánto lo aborrece la naturaleza. La altura que alcanza el agua en su ascenso es una medida del grado de horror que experimenta el agua por el vacío.

Pero en 1644 un seguidor de Galileo, el italiano Evangelista Torricelli (1608-1647), aplicó un principio mecánico, el de balanza, a la solución del problema. Dentro del tubo no hay nada, mientras que fuera hay aire. Si el aire *pesa*, y dentro del tubo no hay aire, entonces el peso del aire empujará al agua hacia arriba en el tubo, hasta que se equilibren el peso del agua de la columna con la presión que ejerce el aire sobre el líquido. El mercurio es catorce veces más denso que el agua, y si Torricelli estaba en lo cierto cabía predecir que el mercurio subiría por el tubo hasta una catorceava parte de la altura que alcanza el agua en las bombas de succión, como así ocurrió: la columna de mercurio ascendió 73 centímetros. Torricelli acababa, por otro lado, de inventar el barómetro, un instrumento que permite medir linealmente, en centímetros

de mercurio, algo tan abstracto como es la presión atmosférica. Torricelli dijo entonces: «Vivimos en el fondo de un océano del elemento aire, el cual, mediante una experiencia incuestionable, se demuestra que tiene peso.»

Algunos pensaron, a pesar de todo, que lo que Torricelli había medido no era otra cosa que la magnitud con la que el mercurio aborrece el vacío. Entre estos escépticos se encontraba al principio el gran matemático francés Blaise Pascal (1623-1662). Para salir de dudas, Pascal pidió a su cuñado Florin Périer en 1647 que llevase el barómetro de Torricelli hasta la cima del Puy-de-Dôme (una montaña que a algunos nos suena además por ser una cima importante en el *Tour* de Francia). Al año siguiente se hizo el experimento. Mientras el cuñado de Pascal subía con un barómetro al Puy-de-Dôme, otro barómetro se quedó en un convento al pie de la montaña. Como hay menos atmósfera encima de las montañas que al nivel del mar cabía esperar que, de ser cierta la teoría mecánica de Torricelli, el mercurio subiría menos en la cima del Puy-de-Dôme, como así pudo comprobarse. Como buen científico, Pascal abandonó entonces la explicación animista del horror al vacío y se convirtió a la causa mecanicista.

Pero el experimento definitivo vino de la mano de Boyle y la máquina neumática que le había fabricado el también famoso científico inglés Robert Hooke (1635-1705). Esta máquina operaba con un émbolo y producía el vacío en una campana de vidrio por medio de la extracción del aire en fases sucesivas, subiendo y bajando el émbolo. Bajar el émbolo se hacía cada vez más difícil; cuando prácticamente no quedaba aire en el interior de la campana, no había fuerza humana que lo consiguiera. Este experimento equivale a ascender hasta el límite superior

de la atmósfera, la superficie de ese océano de aire del que hablaba Torricelli.

Boyle introdujo el barómetro de Torricelli en el interior de la campana y empezó a manejar el émbolo. Con cada extracción de aire descendía la columna de mercurio, exactamente como le sucedió al cuñado de Pascal cuando ascendió con el barómetro a la cumbre del Puy-de-Dôme. Finalmente, cuando ya era imposible bajar el émbolo la columna de mercurio casi había desaparecido. Pero si permitía que entrase algo de aire en la campana de vacío, la columna subía un poco. El océano de aire se comportaba como el de agua, y el aire actuaba como si fuera un fluido.

Experiencias como éstas fueron desacreditando la concepción aristotélica de la naturaleza, y poco a poco dejó de pensarse en términos biológicos para interpretar el comportamiento de la materia inanimada y de los cuerpos celestes. Estos comportamientos no son comparables a las conductas de los seres vivos, y carecen de propósito. Sin embargo se observan marcadas regularidades en ellos, y el descubrimiento y la descripción matemática de las leyes de la física y de la química se convirtieron en el objetivo de estas dos ciencias. Pero además de ese cambio de mentalidad, la nueva filosofía natural introdujo la observación cuidadosa y el experimento de laboratorio como modo de comprobar una teoría, o para decidir cuál entre varias alternativas posibles era la doctrina verdadera.

Las causas finales

En la catedral de Burgos hay un autómatas que se llama popularmente el *Papamoscas*, construido en la baja

Edad Media. Cada hora toca una campana y abre la boca (de donde le viene el nombre). A su lado una figura humana más pequeña, el *Martinillo*, da los cuartos tañendo dos campanas. Si los filósofos naturales modernos querían explicar la naturaleza en términos mecánicos, en autómatas como el *Papamoscas* y el *Martinillo* tenían un ejemplo perfecto de cómo extender esa explicación también al mundo viviente. En la ciencia aristotélica la biología era el modelo para la física y la química. Ahora ocurría al revés: la física y la química se podían convertir en el modelo a aplicar en la biología, una idea en la que todavía creen algunos científicos que son llamados por ello *reduccionistas* (ya que reducen la biología a mera física y química).

El matemático y filósofo francés René Descartes (1596-1650) pensaba que los animales eran equivalentes a autómatas, y trató de explicar su funcionamiento en términos puramente mecánicos. El ser humano era la excepción, naturalmente, porque además de tener el cuerpo de un autómata albergaba una sustancia no material, el alma, que sentía, pensaba y decidía lo que iba a hacer el cuerpo. El problema al que se enfrentó Descartes es el de cómo se podían relacionar el cuerpo con el alma, siendo el uno material y el otro no. Más adelante trataremos la *solución* que encontró Descartes para este problema.

Como hemos visto, lo que sobre todo animaba a los filósofos naturales modernos era la exclusión de su pensamiento de toda noción de finalidad, es decir, la eliminación de la teleología. El célebre astrónomo Johannes Kepler, autor de la *Astronomia nova* de 1609 (libro histórico en el que se abandonaba el modelo de órbitas circulares de los planetas y se sustituía por el de órbitas elípticas), estaba a caballo entre la visión animista y la me-

canicista del Universo a la hora de explicar la causa del movimiento de los planetas, es decir, la razón por la que giran alrededor del Sol. Por un lado pensaba que la causa de que la velocidad de los planetas alcance su valor mínimo en el punto de su órbita más alejado del Sol se debía al debilitamiento del poder del *alma* del planeta, pero por otro lado afirmaba que «cuando mencioné que la causa del movimiento de los planetas disminuye con su distancia respecto del Sol, concluí que esta causa debe ser algo corporal»; por *algo corporal* Kepler se refería a una explicación de tipo físico-matemático, como la que Newton encontró más tarde en la ley de la gravitación.

¿De qué tipo era esa explicación? Newton se limitó a proporcionar una explicación del movimiento de los cuerpos que podía ser expresada por medio de una ley matemática: dos cuerpos se atraen con una fuerza que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa, etc. En la fórmula interviene una constante (G) que es universal, es decir, la misma independientemente de cuáles sean los cuerpos en cuestión. La fórmula podría no ser así, pero es así. Se trataba, como las posteriores leyes físicas y químicas que se fueron elaborando, de una explicación acerca de *cómo* funciona el mundo físico, pero no se pretende saber *por qué* es así y no de otra manera. El propio Newton admitía que no tenía una explicación para la causa final de la gravedad, y no sabía cuál era su razón. Simplemente podía formularla matemáticamente.

Aunque para Descartes los seres vivientes podían ser comparados con las máquinas, hay una distancia abismal entre los organismos, aunque sean tan simples como una bacteria, y los autómatas como el *Papamoscas* y el *Martinillo* de la catedral de Burgos. En los relojes, por muy perfecta que sea su maquinaria, así como en los

autómatas, la sabiduría está en el artífice, que es el relojero o el ingeniero. En los seres vivos, la sabiduría está en ellos mismos. Todos los organismos (y no sólo los animales) a los que vemos modificarse, son *sabios*. Esa sabiduría consiste en la capacidad de adaptarse a los cambios en el ambiente, algo que un reloj no puede hacer, y recibe un nombre técnico: *homeostasis*. Como el medio cambia, los organismos deben modificarse continuamente para seguir siendo los mismos. Si nos exponemos a la intensa luz del Sol en el verano, los *melanocitos* (las células epiteliales con el pigmento melanina) hacen que nuestra piel se oscurezca para evitar que pase demasiada radiación ultravioleta a la dermis, la capa de tejido situada por debajo de la epidermis; una radiación ultravioleta excesiva podría producir un cáncer de piel. Cuando llega el invierno y la intensidad de la luz solar baja al mismo tiempo que nos cubrimos el cuerpo con la ropa, desaparece el moreno de nuestra piel. Si nos rompemos un hueso, o nos abrimos una brecha en la carne, hay mecanismos naturales que reparan el daño con sorprendente eficacia (los toreros, por ejemplo, se recuperan en pocos días de tremendas cornadas que abren inmensos boquetes en sus músculos). Si un agente patógeno o una toxina ingresa en nuestro cuerpo, el sistema inmunitario identifica y neutraliza al agente o a la toxina. La siguiente vez que el mismo agente o toxina vuelva a la carga, el organismo *recordará* la experiencia anterior, y la producción de anticuerpos o antitoxinas será mucho más rápida y más eficaz. El éxito de las vacunas está en la memoria inmunológica del cuerpo, y en algunos casos se necesitan de cuando en cuando dosis de *recuerdo*. En los animales llamados *endotermos* (popularmente de «sangre caliente») la temperatura corporal se mantiene constante dentro de ciertos límites a pesar de los cambios en la temperatura ambiente. La concentración de sal

en la sangre también es mantenida constante con gran eficacia por el riñón. Cuando vivimos durante un tiempo a una elevada altitud, una gran montaña o un altiplano, donde la concentración de oxígeno es menor que al nivel del mar, aumenta el número de *hematíes*, los glóbulos rojos transportadores de oxígeno. La sangre se espesa por ello, y sube así el famoso *hematocrito* que se investiga en los controles antidopaje en las competiciones deportivas, ya que el incremento de glóbulos rojos en sangre aumenta la eficacia en el transporte de oxígeno a los músculos (aunque, eso sí, con importantes riesgos para la salud).

Como el resto de la naturaleza, también los organismos vivos pueden ser estudiados con métodos físico- químicos, y así sabremos cómo funcionan. La disciplina biológica que se ocupa de ello se llama fisiología. Pero hay una diferencia fundamental entre la materia viva que estudia la biología y la materia no viva que investigan los físicos y químicos. La diferencia es que la noción de finalidad no puede ser excluida del mundo de la biología porque, como hemos visto, los organismos presentan dispositivos y comportamientos claramente orientados hacia un objetivo: son *intencionales*. Nadie puede dudar de que los seres vivos tienen un diseño corporal que les permite realizar eficazmente sus funciones, y mantenerse con vida; además, en el caso de los animales, hay un comportamiento encaminado a cumplir sus fines de existir y reproducirse. Boyle reconocía la necesidad de la noción de intencionalidad cuando se trataba de seres vivos: «No hay ninguna parte de la naturaleza, tal como la conocemos, en la que la consideración de las causas finales sea tan adecuada como en la estructura de los cuerpos de los animales.»

La biología no podía por eso limitarse a tratar de entender cómo funciona el mundo vivo. Necesitaba saber *por qué* es concretamente así, y no de otra manera. Es decir, qué hay detrás del diseño. Quién es su autor.

CAPÍTULO II

Darwin / Edipo

El oráculo de Delfos

A mediados del siglo XIX la ciencia de la biología se encontraba muy retrasada con respecto a la física y a la química, que habían dado un salto gigantesco con la Revolución Científica del siglo XVII. La biología no avanzaba conceptualmente, se encontraba bloqueada. Más que una verdadera ciencia era un compendio de curiosidades botánicas y zoológicas: una historia natural que informaba de las faunas y las floras de las diferentes tierras; una actividad intelectual descriptiva, pero en modo alguno explicativa. Tampoco los fósiles, cuyas utilidades para datar y correlacionar las rocas se empezaban a conocer, tenían una explicación científica convincente.

La razón del retraso conceptual de la biología era ésta: nadie sabía explicar la *perfección* de los seres vivos, es decir, que estén dotados de estructuras, mecanismos y comportamientos *inteligentes*. Como hemos comentado, los organismos presentan diseños, que además de asombrarnos por su complejidad, parecen haber sido creados para realizar mejor las actividades que les permiten conservar la vida y propagarla. Esos *diseños* cumplen, por lo tanto, fines; tienen objetivos. Son como las máquinas que fabricamos los humanos. Como diría más adelante Charles Darwin, son asombrosamente idóneos «en relación con los hábitos de vida» de los organismos, diferentes en cada especie. La única causa posible de tal

perfección era Dios, cuya mente, por definición, no puede ser conocida ni ser objeto de estudio experimental. Ningún filósofo había encontrado una respuesta mejor en toda la historia. Al situar la causa de la *perfección* de los seres vivos fuera de la naturaleza, no podía ser objeto de investigación científica, ya que la ciencia sólo se ocupa del Universo material. En cambio, como en el mundo de la física y de la química no hay estructuras que cumplan fines, el problema del *diseño* no existía, y por eso pudieron progresar sin trabas esas ramas de la ciencia.

Si el *diseño* en biología obedece a un *designio* divino, entonces es competencia de los teólogos, y no de los biólogos. Pero si se excluía a Dios, quedaba sin responder la pregunta de quién era el *diseñador*, qué mente había sido capaz de crear tanta maravilla (y tanta belleza). De hecho, como ya hemos visto, la *perfección* de la naturaleza era una de las vías de Santo Tomás para explicar la existencia de Dios.

La situación era parecida a la de la ciudad de Tebas en la Grecia clásica. Cuenta el mito que a sus puertas llegó un ser maligno, la Esfinge —un monstruo con cabeza de mujer, pecho, patas y garras de león, cola de serpiente y alas de pájaro—, que detenía a los tebanos para plantearles un enigma, que había aprendido de las Musas, devorándolos si no acertaban a resolverlo. Un oráculo predijo que Tebas se vería libre del monstruo cuando alguien resolviese el enigma. Éste consistía en averiguar cuál es la criatura provista de voz que camina a cuatro patas al amanecer, a dos al mediodía, y a tres durante la tarde. Un personaje llamado Edipo llegó entonces a Tebas y encontró la solución: era el ser humano, que de niño gatea, luego se yergue sobre sus piernas y finalmente, en la vejez, se apoya en un bastón. La Esfinge,

enloquecida, se suicidó tirándose por un precipicio. Edipo recibió entonces la mano de Yocasta, viuda del anterior rey de Tebas, Layo, que había sido asesinado en oscuras circunstancias por un viajero desconocido, y se convirtió en el nuevo rey de la ciudad.

En el mito griego la ciudad de Tebas permanecía sitiada; la biología también estaba bloqueada en el siglo XIX porque no se resolvía el enigma de quién era el autor del *diseño*. Del mismo modo que Edipo acertó a resolver el enigma de la Esfinge, Charles Darwin solucionó el de quién era el misterioso *diseñador*. Su respuesta fue increíble y asombrosa: «Nadie.» Es decir, ningún individuo o ser. El autor del *diseño* es un mecanismo natural, ciego y sin objetivos: la selección natural. O en otras palabras, el *diseño* se ha producido sin que nunca haya habido un *diseñador* ni un *designio*. Los organismos tienen estructuras, mecanismos y comportamientos *con propósito*, pero nadie los ha creado *a propósito*.

El paralelismo entre Edipo y Darwin va más allá aún: ambos sufrieron terriblemente porque buscaban afanosamente una verdad que, por otro lado, les dolía conocer.

Los problemas de Tebas no han concluido al despeñarse la Esfinge. Una vez convertido Edipo en rey, una misteriosa calamidad asola la ciudad y, Edipo, que desea liberar a Tebas de la terrible plaga, envía a su cuñado Creonte a consultar al oráculo del famoso santuario de Apolo en Delfos, como nos cuenta Sófocles (hacia 496-406 a. de C.) en su famosa tragedia *Edipo rey*.

«Edipo: Habla ante todos, porque siento más el dolor de ellos que el mío propio.

»Creonte: Voy a decir, pues, la respuesta del dios. El rey Apolo ordena de un modo claro que expulsemos de esta Tierra al miasma que de ella se está alimentando, y que no aguantemos más un mal que es incurable.

»Edipo: ¿Con qué purificaciones? ¿Qué medio nos libraré de la desgracia?

»Creonte: Desterrando al culpable o purgando con su muerte el asesinato cuya sangre impurifica la ciudad.

»Edipo: ¿A qué hombre se refiere al mencionar ese asesinato?

»Creonte: Teníamos aquí, ¡oh príncipe!, un rey llamado Layo, antes que tú gobernases la ciudad.

»Edipo: Lo sé, porque me lo han dicho; yo nunca lo vi.

»Creonte: Pues habiendo muerto asesinado, nos manda ahora manifiestamente el oráculo que se castigue a los homicidas.

»Edipo: ¿Dónde están ellos? ¿Cómo encontraremos las huellas de un antiguo crimen tan difícil de probar?

»Creonte: En esta Tierra, ha dicho. Lo que se busca es posible de encontrar, así como se nos escapa aquello que descuidamos.

»Edipo: ¿Fue en la ciudad, en el campo o en extranjera Tierra donde Layo murió asesinado?

»Creonte: Se fue, según nos dijo, a consultar con el oráculo, y ya no volvió a casa.»

La obra de Sófocles es profundamente trágica, porque el asesino de Layo es el propio Edipo, como sus averiguaciones lo llevan a descubrir. Cuanto más investiga más miedo siente, cuanto más se acerca a la verdad más te-

me dar con ella. Finalmente sabe que él es quien mató a Layo, el cual, para colmo de males, era su propio padre. Al final del camino Edipo descubre que es un parricida, y su dolor no tiene límites.

La pregunta

Charles Robert Darwin nació el 12 de febrero de 1809 en el pueblo inglés de Shrewsbury. Su padre, Robert Waring Darwin ejercía allí con éxito la profesión de médico. Era el padre de Charles Darwin una persona enorme, de 1,90 m de altura y más de 150 kg de peso, «el hombre más grande que he visto», según el propio hijo. La madre de Charles, Susanah, murió cuando él tenía sólo ocho años. El naturalista no guardaría prácticamente ningún recuerdo suyo: «[...] es extraño, pero apenas puedo recordar algo de ella, excepto su lecho de muerte, su vestido de terciopelo negro y su mesa de costura». Charles Darwin nunca fue un buen estudiante en la escuela, pero siempre le interesó la naturaleza. Su padre lo envió en octubre de 1825 (a los dieciséis años) a estudiar Medicina a la Universidad de Edimburgo, donde su hermano Erasmus (cinco años mayor) estaba completando los estudios. Pero ni Charles ni Erasmus sentían inclinación por el ejercicio de la medicina y ambos la abandonaron, Erasmus al cabo de un año, Charles al año siguiente. «También asistí en dos ocasiones —dice Charles en su *Autobiografía*— a la sala de operaciones en el hospital de Edimburgo y vi dos operaciones muy graves, una de ellas de un niño, pero salí huyendo antes de que concluyeran. Nunca más volví a asistir a una, pues ningún estímulo hubiera sido suficientemente fuerte como para forzarme a ello; esto era mucho antes de los

benditos días del cloroformo. Los dos casos me tuvieron obsesionado durante muchos años.»

Eso no quiere decir que Charles perdiera el tiempo durante los dos cursos que pasó en Edimburgo, porque, como siempre, se dedicó a las ciencias naturales e hizo varios contactos interesantes. Uno de ellos fue el doctor Grant: «Un día, mientras paseábamos juntos, expresó abiertamente su gran admiración por Lamarck y sus opiniones sobre la evolución. Le escuché con silencioso estupor, y, por lo que recuerdo, sin que produjera ningún efecto sobre mis ideas. Yo había leído con anterioridad la *Zoonomia* de mi abuelo, en la que se defienden opiniones similares, pero no me había impresionado. No obstante, es probable que el haber oído ya en mi juventud a personas que sostenían y elogiaban tales ideas haya favorecido el que yo las apoyara, con una forma diferente, en mi *El origen de las especies*. En aquella época yo admiraba muchísimo la *Zoonomia*, pero al leerla por segunda vez tras un intervalo de diez o quince años quedé muy defraudado, porque el número de las especulaciones era desproporcionadamente superior al de los datos.»

El abuelo de Charles, llamado Erasmus como su hermano mayor, fue médico, naturalista y poeta y escribió varias obras en verso; las más notables fueron *The Botanical Garden*, *The Temple of Nature or the Origin of Society* y la *Zoonomia or the Laws of Organic Life*. En la *Zoonomia* fue donde Erasmus Darwin (1731-1802) expuso sus ideas evolutivas, que eran similares a las de Lamarck en el sentido de que ambos pensaban que los organismos eran los protagonistas de la evolución, al modificarse activamente para adaptarse mejor al ambiente.

Las ideas científicas de Erasmus no le gustaban a su hijo Robert, el padre de Charles; por otra parte Erasmus y Robert no se llevaban bien.

Al ver que no haría carrera en Escocia, Robert Darwin envió a su hijo Charles a la Universidad de Cambridge para que estudiara para clérigo, y allí estuvo durante tres cursos, los que van de 1828 a 1831 (entre los diecinueve y veintidós años de edad). Cuando su padre se lo propuso Charles Darwin sintió dudas: «Perdí algún tiempo en considerarlo, pues, por lo poco que había oído o pensado sobre la materia, sentía escrúpulos en declararme fiel a todos los dogmas de la Iglesia Anglicana aunque, por otra parte, me agradaba la idea de ser cura rural. Por consiguiente, leí con gran atención *Pearson on the Creed* y otros libros de teología y, como entonces no dudé lo más mínimo sobre la verdad estricta y literal de cada una de las palabras de la Biblia, me convencí inmediatamente de que debía aceptar nuestro credo sin reservas.

»Considerando la ferocidad con que he sido atacado por los ortodoxos, parece cómico que alguna vez pensara ser clérigo. Y no es que yo renunciara expresamente a esta intención ni al deseo de mi padre, dicha intención murió de muerte natural cuando, al dejar Cambridge, me uní al *Beagle* en calidad de naturalista.»

Como había ocurrido en Edimburgo, la estancia en Cambridge fue muy provechosa para la futura carrera científica de Darwin, pero no para su formación como clérigo. Aun así aprobó los exámenes correspondientes: «Asimismo, en mi último año trabajé con cierto ahínco para el diploma final de B.A. [*Bachelor of Arts*], repasé mis clásicos, así como un poco de álgebra y de Euclides; este último me proporcionó un enorme placer, como ya me había sucedido en la escuela. Para aprobar el exa-

men del B.A. había que conocer también *Evidences of Christianity* de Paley, y la *Moral Philosophy* del mismo autor. Los estudié a fondo, y estoy seguro de que podría haber transcrito el *Evidences* entero con perfecta corrección, aunque, por supuesto, sin el estilo claro de Paley. La lógica de este libro y, puedo añadir, la de su *Natural Theology*, me procuró tanto deleite como Euclides. El estudio cuidadoso de estas obras, sin tratar de aprender nada de memoria, fue la única parte del curso académico que, como pensaba entonces y sigo creyendo ahora, sirvió algo para la educación de mi mente. En aquel tiempo no me preocupé por las premisas de Paley y, aceptándolas de buena fe, quedé encantado y convencido por la prolongada argumentación.»

En su *Natural Theology*, William Paley (1743-1805) usaba la analogía del reloj: tanto el mundo como el reloj necesitan de un artífice. Paley defendía el llamado argumento teleológico o del designio para demostrar la existencia de Dios; así, explicaba las adaptaciones de los seres vivos, que claramente reconocía, como prueba de la necesidad de un autor. De todos los argumentos (o vías) empleados para demostrar la existencia de Dios, el teleológico o del designio (o propósito) ha sido siempre el más popular, por ser también el más accesible y fácil de entender. Se puede resumir en esta pregunta: si no podemos concebir una máquina compleja, como un reloj o una bicicleta, sin su autor, y el que sus piezas se hayan ensamblado por puro azar nos parece una idea ridícula, ¿cómo pueden haber surgido espontáneamente unas máquinas biológicas tan perfectas como son los organismos si no hay un autor?; ¿no está claro que tiene que haber siempre una inteligencia detrás de cada diseño? A contestar esa pregunta dedicaría Charles Darwin el resto de su vida, aunque entonces, en 1831 y a la edad de veintidós años, el joven Darwin aún no lo sabía.

El naturalista don Carlos

La experiencia que marcó la vida de Darwin, en todos los sentidos fue el viaje de cinco años (1831-1836) alrededor del mundo que llevó a cabo en el bergantín *H. M. S. Beagle*. Darwin era entonces un licenciado en Teología por Cambridge, y no un científico de titulación, pero el interés por la naturaleza durante toda su vida anterior le habían preparado para obtener el máximo partido de una oportunidad tan excepcional. Fue en el viaje del *Beagle* cuando Darwin empezó a pensar por sí mismo sobre el origen de las especies, y el de sus adaptaciones.

Darwin cuenta en su *Autobiografía* que: «Mientras estaba a bordo del *Beagle* era muy ortodoxo, y recuerdo que se carcajaban de mí varios oficiales (aunque ellos eran también ortodoxos) por citar la Biblia como una autoridad incontestable sobre algún tema moral. Supongo que era la novedad del argumento lo que les divertía.»

Durante su estancia en Brasil, Darwin anotó en su diario con respecto al esplendor de la selva brasileña: «No es posible dar una idea adecuada de los sentimientos de maravilla, admiración y devoción que llenan y elevan la mente.» Pero al final de su vida, en 1876, Darwin escribiría en su *Autobiografía*: «El estado mental que las grandes escenas excitaban antes en mí, y que estaba íntimamente conectado con la creencia en Dios, no difiere esencialmente de lo que frecuentemente es llamado el sentido de lo sublime; y a pesar de lo difícil que pueda ser explicar la génesis de ese sentimiento, no debe ser esgrimido como un argumento que demuestre la existencia de Dios, no más que el poderoso, pero vago, sentimiento similar que nos provoca la música.»

Más adelante en su viaje por América, el joven Darwin descubrió otras cosas que le hicieron dudar de la inmutabilidad de las especies. «Durante el viaje del *Beagle* me había impresionado profundamente el descubrimiento, en la formación de La Pampa, de fósiles de grandes animales cubiertos con armadura igual a la de los armadillos actuales; en segundo lugar, por la manera en la que animales emparentados estrechamente se reemplazaban unos a otros hacia el sur del continente; y en tercer lugar, por el carácter sudamericano de la mayor parte de las especies del archipiélago de las Galápagos, y más en particular por la forma en la que difieren ligeramente en cada isla del grupo, ninguna de las cuales parece ser muy antigua en sentido geológico.

»Era evidente que hechos como éstos, así como muchos otros, sólo podían explicarse con la suposición de que las especies se modificaron gradualmente; y la idea me rondaba. Pero era igualmente evidente que ni la acción de las condiciones ambientales, ni la voluntad de los organismos (especialmente en el caso de las plantas), podía explicar los innumerables casos en que organismos de toda clase están maravillosamente ; adaptados a sus hábitos de vida —por ejemplo, un picamaderos o una rana saltadora para trepar por los árboles, una semilla para dispersarse por ganchos o por plumas—. Siempre me han impresionado mucho tales adaptaciones, y hasta que no fueran explicadas me parecía casi inútil esforzarse en probar indirectamente que las especies han sido modificadas.»

Con estas ideas rondándole la cabeza, Darwin volvió a su patria. Se casó el 29 de enero de 1839 (con treinta años) y residió en Londres hasta que en septiembre de 1842 se trasladó a su definitiva residencia en Down, en el campo, donde pasaría el resto de su vida. Durante es-

te periodo de tres años y ocho meses de vida en Londres, Darwin empezó a sufrir los achaques que le acompañarían toda su existencia, por los que se recluyó para siempre en su casa: «Pocas personas habrán vivido una vida más retirada que la nuestra. [...] Mi único placer y exclusivo quehacer a lo largo de la vida ha sido el trabajo científico, y la excitación de tal trabajo me hace a veces olvidar, o casi alejar, mis molestias e incomodidades diarias. No tengo en consecuencia nada que registrar del resto de mi vida, excepto la publicación de mis diversos libros.»

El joven Darwin que navegó alrededor del mundo en el bergantín *Beagle* había sido una persona realmente muy diferente del Darwin maduro que muchos años después pasaría a la historia por su teoría de la evolución por la selección natural. La imagen de ese anciano de barba blanca, aspecto venerable y vida retirada y sedentaria que se suele asociar con Darwin no tiene nada que ver con la del activo e intrépido naturalista que fue durante cinco años. El joven Darwin estaba lleno de energía, que se trasluce en las páginas de su memorable *Diario del viaje de un naturalista alrededor del mundo*. Es éste un extraordinario relato de viajes que se lee como una novela de aventuras y que está lleno de datos interesantes sobre las tierras y los pueblos que conoció. Sólo por su *Diario* es seguro que el nombre de Darwin no se habría olvidado y seguiría figurando entre los clásicos de la literatura de viajes. Aquel muchacho de veintitantos años parecía no detenerse ante nada en su afán por conocerlo todo sobre los países que visitaba.

Por poner un ejemplo de cuál era su temperamento, cuando el *Beagle* atracó en Bahía Blanca, Darwin decidió no seguir con el barco hasta Buenos Aires, y recorrer a caballo los 600 kilómetros de distancia entre ambas

ciudades por terreno desierto. Darwin contrató un gaucho para que le acompañara en el camino. En aquella época, en La Pampa se desarrollaba una guerra sin cuartel contra los indios, en términos muy parecidos a los que estamos acostumbrados a ver en las películas del Oeste, lo que hacía muy peligroso el viaje. Darwin salió un 8 de septiembre. A lo largo del camino se fue uniendo a grupos de soldados que seguían la línea de postas. El 11 de septiembre vieron una gran nube de polvo producida por un grupo de jinetes que se dirigía hacia ellos. Los jinetes eran indios, lo que conocieron por sus largas cabelleras, pero afortunadamente se trataba de una tribu amiga. El 15 de septiembre pasaron por una posta donde los indios habían asesinado a cinco soldados. El oficial tenía en su cuerpo dieciocho heridas de lanza. Cuando llegaron el 19 de septiembre a una casa de postas el dueño les dijo que si no tenían pasaporte no podían quedarse, pues los ladrones eran tan abundantes que no se fiaba de nadie. Darwin le mostró entonces su pasaporte, que empezaba con las palabras «El naturalista don Carlos», y fue admitido. El 20 de septiembre llegó a Buenos Aires. Como naturalista de raza que era, durante todo el camino no dejó de anotar en su diario toda clase de datos sobre los más diversos temas.

Darwin empezó inmediatamente después de volver de su viaje a trabajar sobre la transmutación de las especies. «Abrí mi primer cuaderno de notas en julio de 1837. Trabajaba sobre verdaderos principios baconianos [es decir, siguiendo el método inductivo de Francis Bacon], y recogía datos a gran escala sin ninguna teoría, más especialmente respecto de las producciones domésticas [...]. Pronto percibí que la selección era la clave del éxito humano en producir formas útiles de animales y plantas. Pero cómo la selección podía aplicarse a organismos

que viven en estado natural durante algún tiempo fue un misterio para mí.

»En octubre de 1838, es decir, quince meses después de que hube comenzado mi investigación sistemática, se me ocurrió leer, para distraerme, el libro de Malthus *Sobre la población*. Estaba bien preparado, gracias a una observación prolongada y continua de los hábitos de los animales y las plantas, para apreciar la lucha por la existencia, que se observa en todas partes, y me asaltó la idea de que, en esas circunstancias, las variaciones favorables tenderían a ser conservadas, mientras que otras menos privilegiadas, destruidas. El resultado de este hecho sería la formación de nuevas especies.» La explicación de este mecanismo, que llamaría la *selección natural*, sería el hilo fundamental del libro de Darwin *El origen de las especies*, publicado en 1859.

Ya no volvería Darwin a creer en el viejo argumento del designio, que tanto le había convencido cuando leyó a los veintidós años la *Natural Theology* de William Paley. «El viejo argumento del propósito en la naturaleza, ofrecido por Paley, que antes me pareció tan concluyente, falla ahora que la ley de la selección natural ha sido descubierta. No podemos argumentar por más tiempo que, por ejemplo, la bella charnela de la concha de un bivalvo ha tenido que ser hecha por un ser inteligente, como la bisagra de una puerta por el hombre. No parece haber más propósito en la variación de los seres vivos, y en la acción de la selección natural, que en la dirección en la que sopla el viento.»

La selección natural era la responsable del origen y de las adaptaciones de los seres vivos, incluidos los humanos, como acabó reconociendo Darwin: «En el año 1837 o 1838, tan pronto como llegué a la conclusión de que las especies eran productos mutables, no pude evitar el

convencimiento de que el hombre debía de estar sometido a la misma ley. En consecuencia, recogí notas sobre el tema para satisfacción propia y, durante mucho tiempo, sin intención alguna de publicarlas. Aun cuando en *El origen de las especies* no se examina la derivación de especie alguna en particular, pensé que, con el objeto de que ninguna persona honrada me acusara de ocultar mis puntos de vista convenía añadir que por medio de la obra «se aclararía el origen del hombre y su historia». Habría sido inútil, y perjudicial para el éxito del libro, haber alardeado de mi convicción con respecto a este origen, sin facilitar ninguna prueba.

»Pero cuando descubrí que muchos naturalistas habían aceptado plenamente la doctrina de la evolución de las especies, me pareció aconsejable dar forma a las notas que poseía y publicar un tratado sobre el origen del hombre específicamente.» Se refiere al libro *El origen del Hombre*, publicado en 1871.

Darwin, ¿parricida?

¿Qué fue lo que convirtió a un hombre intrépido y lleno de vitalidad, tal y como fue en el *Beagle* el joven Darwin, en una persona enfermiza y retraída? ¿Tal vez contrajo alguna enfermedad grave e incapacitante?

Se ha postulado que el origen de los males de Darwin fue el llamado mal de Chagas (nombrado así en honor del médico brasileño Carlos Chagas). Se trata de una trepanosomiasis, una infección producida por un protozoo, el *Trypanosoma cruzi* transmitido a los humanos por insectos chupadores de sangre. Uno de ellos es la vinchuca (*Triatoma infestans*), que Darwin conoció y padeció en su viaje. En el *Diario del viaje de un naturalista al-*

rededor del mundo, Darwin anota: «No pude descansar por haberme visto atacado (empleo a propósito esta palabra) por un numeroso y sanguinario grupo de las grandes chinches negras de las Pampas, pertenecientes al género *Benchuca*, una especie de *Reduvius*. Es imposible imaginarse algo más desagradable que sentir correr por el cuerpo estos insectos, blandos y sin alas, de cerca de una pulgada de largos.»

El mal de Chagas es una enfermedad endémica en amplias regiones rurales de América central y del sur. Tras un periodo de enfermedad aguda que empieza una semana después de la inoculación, el mal de Chagas se puede llegar a convertir en una enfermedad crónica, que provoca principalmente arritmias cardíacas. A veces se produce la muerte por fallo cardíaco, cuando el parásito infesta el músculo del corazón. No tiene cura. En cierta ocasión, el famoso médico y paleoantropólogo sudafricano Philip Tobias nos dijo que le parecía probable que Darwin hubiera padecido ese mal.

Pero hay otra explicación más inquietante. Lo que padecía Darwin podría también ser una neurosis producida por el choque ocasionado entre sus descubrimientos científicos, que le acercaban paso a paso a la verdad, y la figura paterna. Charles Darwin sentía hacia su enorme padre un gran aprecio, pero también un cierto resentimiento. «Mi padre me dijo una vez algo que me mortificó profundamente: "No te gusta más que la caza, los perros y coger ratas, y vas a ser una desgracia para ti y para toda tu familia." Mi padre, que era el hombre más cariñoso que he conocido jamás, y cuya memoria adoro con todo mi corazón, debía estar enfadado y fue algo injusto cuando utilizó estas palabras.»

Es un hecho que el padre de Charles era un hombre autoritario, como también parecen evidentes los sentimien-

tos ambivalentes del hijo hacia él. El padre hubiese desaprobado sin duda la teoría de la evolución que Charles estaba elaborando, lo que crearía el conflicto en su mente, que además se vería agravado por las convicciones religiosas muy firmes y ortodoxas de su querida esposa Emma, a la que por nada del mundo querría Charles Darwin lastimar.

Resulta curioso que Robert Darwin, el padre de Charles, hubiese tenido a su vez una difícil relación con su no menos autoritario padre, Erasmus, que era evolucionista como el nieto (y tal vez Robert no lo fuera como reacción frente a su padre). Por otro lado, Charles Darwin tenía antecedentes familiares dignos de consideración en relación con su posible neurosis. El tío Erasmus se suicidó a los cuarenta años. El abuelo materno sufría depresiones nerviosas, y el hermano de su madre tenía depresiones con fuertes problemas abdominales.

Pero hay autores que cuando utilizan la metáfora del parricidio perpetrado (psicológicamente) por Darwin apuntan más alto. Cuando Charles Darwin murió, el 19 de abril de 1882, veinte parlamentarios dirigieron una carta al deán de la abadía de Westminster para que fuera enterrado allí al lado de Newton. Por cierto que el embajador de España asistió a la ceremonia. En su excelente biografía de Darwin, Julian Huxley y H. D. B. Kettlewell escriben: «De esta manera acabaron unidos los dos mayores científicos de la historia de Inglaterra: Newton, que había acabado con los milagros en el mundo físico y había reducido a Dios al papel de un creador del cosmos que el día de la creación había puesto en marcha el mecanismo del Universo, sometido a las leyes inevitables de la naturaleza; y Darwin, que había acabado no sólo con los milagros, sino también con la creación, despo-

jando a Dios de su papel de creador del hombre, y al hombre, de su origen divino.»

Pero, a decir verdad, lo único que hizo Darwin fue llevar hasta las últimas consecuencias el programa de la Revolución Científica del Barroco, que consiste en explicar los fenómenos naturales por medio de causas naturales, sin excluir al ser humano. La diferencia fundamental de la biología de Darwin respecto de la física de Newton es que la biología sí puede ahora contestar a las preguntas del tipo *por qué*, como ¿por qué existen los seres vivos?, ¿por qué existen los humanos?, ¿por qué las aves tienen alas?, o ¿por qué los humanos poseen la facultad de pensar? Desde Darwin, la respuesta a estas preguntas es histórica, está en la evolución, y se puede contar en forma de una narración que describa cómo fueron surgiendo las diversas especies que hoy pueblan la Tierra, incluida la nuestra, y de qué modo aparecieron sus adaptaciones.

En materia religiosa, según cuenta su hijo Francis, Darwin era muy reservado y creía que era ésta una cuestión personal que pertenecía a la intimidad de cada uno. Darwin no deseaba, además, herir la sensibilidad de nadie, y por otro lado pensaba que no tenía nada que decir en un tema sobre el que no había reflexionado suficientemente. En consecuencia, con su humildad característica, Darwin no consideraba que su opinión en materia de religión tuviera algún valor especial, ni que su autoridad científica se extendiese a ese campo. En una carta de 1879 se pronuncia con franqueza acerca de sus sentimientos: «Cuáles sean mis propias opiniones es una cuestión que no importa a nadie más que a mí. Sin embargo, puesto que me lo pide, puedo afirmar que mi criterio fluctúa a menudo [...]. En mis fluctuaciones más extremas, jamás he sido ateo en el sentido de negar la

existencia de un Dios. Creo que en términos generales (y cada vez más, a medida que me voy haciendo más viejo), aunque no siempre, agnóstico sería la descripción más correcta de mi actitud espiritual.»

La creencia en la existencia de Dios y su papel como creador del Universo está fuera del terreno de la ciencia, y probablemente no puede ser demostrada ni descartada a partir de nuestro conocimiento, por muy perfecto que llegue a ser, del mundo material. Pero nada de lo que la ciencia ha descubierto se opone a que el creyente pueda pensar que Darwin sólo completó la tarea que se había propuesto Galileo: leer el *libro de la naturaleza*, encontrando que además de en términos matemáticos, ese libro también estaba escrito en lenguaje biológico.

Bolas de billar

A partir de la publicación de *El origen de las especies* en 1859, la teoría de la evolución fue admitida universalmente en el mundo científico, y la biología se liberó de la pesada losa que le impedía avanzar. Como ha escrito un famoso biólogo evolucionista, Theodosius Dobzhansky (1900-1975), nada tiene sentido en biología sin la evolución, hasta el punto de que todo lo descubierto antes de Darwin puede considerarse irrelevante. Pero, en contra de lo que suele pensarse, la gran aportación de Darwin no fue el descubrimiento de la evolución, sino el mecanismo de la selección natural que la explica —y de la que fue coautor independiente otro gran científico: Alfred Russel Wallace (1823-1975).

A finales del siglo XIX, Darwin era ensalzado como uno de los grandes genios de la Humanidad, pero, curiosamente, el mecanismo de la selección natural, la verdade-

ra causa de la evolución, apenas era tenida en cuenta. Otros mecanismos competían con éxito con la selección natural.

Uno de ellos era el *finalismo*: la evolución guiada por Dios. Aunque el finalismo no está *bien visto* en el mundo académico de la biología, no se puede decir que haya desaparecido, ni mucho menos, de las mentes de muchos pensadores y de las ideas de la gente normal. Y es que el finalismo, a diferencia del *darwinismo* (la teoría de la evolución por medio de la selección natural), da un sentido a nuestra presencia en este mundo. Un paleontólogo finalista, el jesuita francés Pierre Teilhard de Chardin (1881-1955), tuvo una gran acogida en nuestro país en los años sesenta del siglo XX, aunque hoy apenas se lo mencione dentro de los círculos académicos. Pero hay científicos que opinan en voz alta que la cuestión de si hay o no propósito en la evolución no es de carácter científico, sino metafísico, y que está fuera del alcance de la ciencia el descifrarla; los que así dicen, lo confiesen o no, son todos finalistas.

Desde el campo materialista, también había autores que sostenían que la evolución obedecía a causas internas de los organismos, y no a la selección natural, que es la acción que ejerce el ambiente sobre los organismos poniéndolos a prueba y dejando que subsistan sólo los más idóneos. Los paleontólogos observaban en el registro fósil líneas evolutivas que seguían trayectorias rectas, que ellos explicaban como resultado de inercias evolutivas. El ambiente era demasiado cambiante, decían, como para producir esas evoluciones lineales que detectaban los paleontólogos muy a menudo, y que denominaban *tendencias evolutivas*.

Otra fuente de discrepancia con el *seleccionismo* de Darwin era el *lamarckismo*. Se trataba de una teoría evo-

lucionista anterior a la de Darwin, que había sido propuesta por el francés Jean-Baptiste de Monet, barón de Lamarck (1744-1829). Según Lamarck la adaptación es la consecuencia de una actividad determinada desarrollada por un organismo: la jirafa, por ejemplo, tendría el cuello tan largo de tanto estirarlo para comer los brotes más tiernos de los árboles. Esos cambios eran heredados por los descendientes, que se beneficiaban de ellos.

Muchas personas instruidas, que admiten el hecho de la evolución, piensan en términos lamarckianos sin saberlo. Es posible que haya un planeta donde las modificaciones que se producen durante la existencia se hereden, y así los órganos más usados se desarrollen y los menos utilizados se atrofien, pero desde luego tal fenómeno no pasa en nuestro mundo. Ello se debe al tipo de herencia biológica de los habitantes de la Tierra, que reside en los genes, que a su vez están en los cromosomas, dentro de las células; no hay forma de que los genes de los espermatozoides y de los óvulos se enteren de qué músculos o de qué órganos usa más el individuo que los produce.

Uno de estos días, leíamos en las páginas de Salud de un periódico español un reportaje sobre medicina aeroespacial. Un catedrático de Fisiología se preguntaba qué cambios se producirían en el futuro en el hombre del espacio, que vivirá en ausencia de gravedad. Posiblemente, decía, con el paso de las generaciones se atrofiarán las extremidades inferiores hasta desaparecer, porque serán innecesarias en condiciones de ingravidez. Pero, ¿cómo podría producirse esa evolución? Según el principio lamarckiano, simplemente por la falta de uso de las piernas. Pero la explicación según el mecanismo darwiniano es muy diferente; consistiría en que muy pocos de los humanos nacidos en el espacio llegarían a reproducir.

cirse; los individuos que dejaran hijos serían precisamente aquellos que tuvieran las piernas más cortas (aunque es difícil imaginar por qué los astronautas patiocortos habrían de tener más posibilidades de llegar a adultos y perpetuarse en sus hijos; si se mantienen los cánones de belleza actuales más bien les sucedería lo contrario, y esta consideración no carece de importancia, porque según Darwin además de la selección natural que adapta a los organismos a su medio también funciona en la naturaleza la selección sexual, basada en la competencia para la reproducción). Explicado en términos deportivos, el lamarckismo quiere decir que a fuerza de jugar al baloncesto, generación tras generación, los jugadores serían cada vez más altos gracias a sus esfuerzos por llegar al aro. El darwinismo, en cambio, defiende que cuanto más alto sea antes de empezar a jugar al baloncesto un individuo (por constitución), más posibilidades tendrá luego de llegar a ser figura en ese deporte.

Aunque el lamarckismo *duro* no tiene defensores, porque está claro que los cambios producidos durante la vida en el fenotipo (el físico) no se heredan (no pasan al genotipo), persiste su influencia en el campo del evolucionismo en una forma *blanda*. Son muchos los que piensan que es la iniciativa de los organismos, más que la acción del medio sobre ellos, la principal fuerza de la evolución. Mientras que en el darwinismo es el ambiente el protagonista, en el lamarckismo lo son los organismos. El lamarckismo resulta por ello más atractivo que el darwinismo, porque también le da un cierto sentido a nuestros orígenes: somos el resultado de los esfuerzos de nuestros antepasados; ellos nos han creado. Autores importantes como Jacques Monod y Stephen Jay Gould se niegan a aceptar que los organismos sean meras *bolas de billar* en el juego de la evolución, la arcilla que la selección natural moldea. Estos autores creen que son

las acciones de los organismos las que determinan el curso futuro de la evolución (se entiende que nos referimos a comportamientos no programados genéticamente, sino a los que aparecen espontáneamente en un individuo o en varios). En palabras de Jacques Monod: «Si los vertebrados tetrápodos han aparecido y han podido dar la maravillosa expansión que representan los anfibios, los reptiles, las aves y los mamíferos, es porque en el origen, un pez primitivo "eligió" el ir a explorar la Tierra donde no podía sin embargo desplazarse más que saltando dificultosamente. Él creó así, como consecuencia de una modificación de comportamiento, la presión de selección que debía desarrollar los poderosos miembros de los tetrápodos.»

Stephen Jay Gould ofrece una versión parecida del mismo fenómeno: «En un caso clásico reciente, varias especies de herrerillos aprendieron a abrir las botellas de leche inglesas y a beberse la nata. Es fácil imaginarse una evolución siguiente de la forma del pico para hacer más fácil el pillaje (aunque probablemente se vea abortada por los cartones y el cese del reparto domiciliario). ¿Acaso no es esto algo lamarckiano en el sentido de que una innovación activa de la conducta, no genética, sienta las bases para reforzar la evolución? ¿Acaso no piensa el darwinismo que el entorno es una especie de crisol de refinamiento y que los organismos son entidades pasivas ante él?»

Y Kenneth Kardong lo expresa así: «El ejemplo del vuelo de las aves también nos recuerda que un nuevo papel biológico generalmente precede la aparición de una nueva estructura. Con un cambio en los papeles, el organismo experimenta nuevas presiones selectivas en un nicho ligeramente diferente. [...] Este cambio inicial en los papeles expuso la estructura a nuevas presiones selecti-

vas, favoreciendo las mutaciones que consolidan una estructura en su nuevo papel. Primero aparece la nueva conducta, a la que sigue el nuevo papel biológico. Finalmente se establece un cambio en una estructura para llevar a cabo la nueva actividad.»

La discusión de qué fue antes, el cambio de comportamiento o la mutación, parece la disputa del huevo y la gallina, pero es verdaderamente importante cuando se trata de las grandes transiciones evolutivas, las que determinan la aparición de un tipo de organismo realmente nuevo, y no una mera variante de lo anterior, en un tiempo relativamente breve. ¿También en esos casos, que cambian el curso de la evolución, el cambio morfológico vino precedido de un cambio en el comportamiento? ¿Hay en el origen de los tetrápodos, de los mamíferos, de los primates, de los homínidos o de los humanos un cambio en la conducta o un cambio en el genotipo? El importante paleontólogo George Gaylord Simpson (1902-1984) pensaba que era necesario que se produjera primero un cambio anatómico (una *preadaptación*); luego los individuos dotados de nuevas características podrían pasar a comportarse de modo diferente y ocupar un nicho ecológico nuevo, viviendo de una manera diferente.

Otro enemigo mortal del darwinismo era el *saltacionismo*, la idea de que la evolución se produce a base de grandes mutaciones. Pierde entonces todo su protagonismo la selección natural, que deja de ser esa paciente artesana que va cambiando muy poco a poco (despacio pero sin pausa) a los organismos a lo largo de muchísimo tiempo. Las grandes transiciones evolutivas se habrían producido, según los saltacionistas, de una sola vez, y la selección natural se las habría encontrado ya hechas. Aunque en sus formas extremas el saltacionis-

mo es incompatible con la genética moderna, han perdurado hasta nuestros días versiones modificadas del saltacionismo.

Los grandes descubrimientos de la nueva ciencia de la genética en el primer cuarto del siglo XX tampoco le eran favorables al darwinismo, pero en los años cuarenta se produjo una convergencia entre genéticos y darwinistas que dio luz a una síntesis entre las aportaciones de Gregor Mendel (1822-1884) y de Darwin, que fue conocida como *neodarwinismo* o *teoría sintética de la evolución*.

El neodarwinismo es la escuela hegemónica en el campo del pensamiento evolutivo, pero en el último cuarto del siglo XX ha surgido entre paleontólogos (Niles Eldredge y Stephen Jay Gould son sus creadores) una doctrina llamada el *equilibrio puntuado* que pone en duda el protagonismo absoluto de la selección natural en la historia de la vida. En esencia, el equilibrio puntuado viene a decir que mientras que la selección natural actúa sobre los individuos en el interior de las especies (lo que se conoce como *microevolución*), la historia de la vida (la *macroevolución*) es también consecuencia de algo parecido a una selección entre especies. Esto se debe a que las especies aparecen de manera rápida (siempre en términos de tiempo geológico, lo que supone miles de años) y luego permanecen sin grandes cambios, por lo que se comportan como individuos, con su fecha de nacimiento, su fecha de defunción y la posibilidad, que no siempre se realiza, de dejar vástagos en forma de especies-hijas. Por decirlo de una manera un poco esquemática, las especies normalmente no evolucionan, y cuando lo hacen sólo es una pequeña parte de la especie la que cambia; entonces es cuando aparece una especie-hija, como si fuera una yema en la rama de un árbol. El neodarwinismo tiende a pensar que las especies están evo-

lucionando todo el tiempo, porque la selección natural es un mecanismo que nunca se detiene. Para el neodarwinismo las especies se están modificando permanentemente; para el equilibrio puntuado el cambio se reduce al breve periodo en torno a la aparición de una especie. El neodarwinismo tiende a ver la geometría de la evolución como esencialmente lineal, mientras que para el equilibrio puntuado predomina la ramificación, y de todas las ramas sólo algunas producirían nuevos retoños, mientras que la mayoría de las especies se extinguirá sin descendencia.

Años después de descubrir el mecanismo de la selección natural, Darwin se dio cuenta de que si no hubiera actuado en el pasado un proceso complementario, sólo existiría hoy una especie sobre la Tierra, que habría ido cambiando a lo largo del tiempo desde que la vida apareció (hace unos 3.800 millones de años). La historia de la vida no es sólo cambio, sino también diversificación. ¿Qué hace que las líneas evolutivas se dividan y que las especies se multipliquen? Darwin no tenía una solución muy precisa para este problema, y lo resolvía suponiendo que la evolución tendía a ocupar todas las formas de vida posibles, todos los nichos ecológicos como se dice ahora. En palabras de Darwin: «Pero en aquel tiempo pasé por alto un problema de gran importancia; y a no ser por el principio del huevo de Colón, me resulta sorprendente cómo pude olvidar esta cuestión y su solución. Este problema es la tendencia en seres orgánicos descendientes del mismo tronco a divergir a medida que se modifican. Que han llegado a diferenciarse mucho es obvio, por la manera en que las especies de todas las clases pueden ser clasificadas en géneros, los géneros en familias, las familias en subórdenes y así sucesivamente, y aún recuerdo el lugar exacto del camino en que, yendo en mi coche, y para mi contento, se me ocu-

rrió la solución; esto fue mucho después de haber venido a Down. La solución, según creo, es que los vástagos modificados de todas las formas dominantes y crecientes tienden a adaptarse a los muchos y altamente diversificados lugares en la economía de la naturaleza.» Este *principio de divergencia* de Darwin no es, a diferencia de la selección natural, un verdadero mecanismo, sino una vaga intuición. ¿Qué hace, en realidad, que los descendientes de las especies que tienen éxito y se multiplican, *tiendan* a adaptarse a todos los nichos posibles y se diversifiquen? Las pretendidas tendencias de la naturaleza no son nunca explicaciones científicas.

Todavía no se entiende bien cómo se produce habitualmente una nueva especie a partir de una población de la especie antecesora. Se sabe que tiene que aparecer de alguna manera el aislamiento genético, es decir, la imposibilidad de que los miembros de esa población puedan cruzarse con los de las demás poblaciones y tener descendientes fértiles. Hay para ello varias posibilidades y se duda de cuál es la más frecuente; esta duda es comprensible porque los científicos todavía no hemos tenido tiempo de presenciar en directo cómo nace una especie (hacen falta miles de años para ello). De todos modos, se piensa que en la mayor parte de los casos la población que se convirtió en una nueva especie estaba previamente aislada geográficamente (aunque, en cualquier caso, el aislamiento geográfico no sería la causa, sino un condición necesaria).

Ya que nada tiene sentido en biología sin la perspectiva de la evolución, todo lo que se ha elaborado históricamente en relación con el origen del hombre, en particular, ha estado influido por las diferentes ideas que los autores tenían sobre cómo funciona la evolución en general. Por poner un ejemplo, se han defendido actitudes

racistas basándose en ciertas concepciones del proceso evolutivo.

Pero los viejos debates siguen todavía vigentes, y el papel que la selección natural, la causa de la evolución para Darwin, ha tenido en nuestro origen y características es aún materia de controversia. Según algunos autores la selección natural al modo *ordinario*, es decir, tal y como suponía Darwin (y luego los neodarwinistas) que funcionaba, no sería la responsable de algunas de nuestras características más importantes.

Los procesos de *heterocronía*, es decir, las alteraciones en el desarrollo, podrían, según algunos, explicar nuestro gran cerebro, el cráneo redondo y la cara pequeña, e incluso, según otros, hasta la postura bípeda y nuestra actitud inquisitiva e investigadora. Se trata de la teoría de la *neotenia*, que sostiene que somos seres inacabados porque nuestro desarrollo no se ha completado; dramatizando un poco: enormes fetos con capacidad reproductora.

Si la selección natural es despiadada y favorece sólo a los más aptos en la competición de unos individuos con otros, ¿cómo es posible que haya evolucionado el altruismo en las sociedades animales, incluida la humana? Ésta es una pregunta a la que debe enfrentarse el neodarwinismo, y lo ha hecho dando a luz a una especialidad llamada *sociobiología* que aspira a explicar, por medio de la selección natural darwiniana, el comportamiento social, que incluye el altruismo, la cooperación y las limitaciones a la agresión. El creador de la sociobiología es el americano Edward O. Wilson. El método de esta nueva escuela consiste en adoptar en el análisis la *perspectiva del gen*, una especie de *gencentrismo* que ha sido popularizado por el inglés Richard Dawkins como la teoría del *gen egoísta*.

En esencia, la explicación del altruismo consiste en negarlo. Lo que nos parece un acto altruista por parte de un individuo resulta ser egoísta en el nivel de los genes. Por poner un ejemplo, puesto que una madre comparte la mitad de sus genes con cada hijo, hay dos copias completas de sus genes en cuatro hijos, por lo que en caso de peligro le resulta rentable a sus genes que la madre muera si a cambio se salvan los cuatro hijos. De ahí sólo hay un paso a decir, como afirma Dawkins, que los genes utilizan a los cuerpos en su beneficio propio, no «dudando» en sacrificarlos, ya que los genes son eternos y los cuerpos meros vehículos temporales. Una gallina sería el medio que tiene un huevo de producir otro huevo. Como se discutirá ampliamente más adelante, la sociobiología llevada al terreno del comportamiento humano es objeto hoy de críticas acaloradas porque muchos ven un error y un peligro en cualquier forma de determinismo de la conducta humana.

Otro desafío importante al protagonismo de la selección natural lo tenemos en el origen de nuestra propia mente. La inteligencia humana no sería, para toda una corriente de pensamiento (que arranca del propio Alfred Russel Wallace), un resultado directo de la selección natural, sino uno colateral o indirecto. Nuestro cerebro no evolucionó para leer, escribir y hacer operaciones matemáticas, ni nuestra voz para cantar ópera, como nuestras manos no evolucionaron para tocar el piano; esto es obvio, pero hay quien dice que nuestro cerebro ni siquiera evolucionó para pensar (para manipular símbolos), ni nuestra laringe para hablar (para comunicarse por medio de símbolos), sino que la selección natural desarrolló estos órganos para otros cometidos, aunque bruscamente, en nuestra especie, cambiaran de función.

Nosotros participamos de la idea de que el papel de la selección natural en la historia de la vida merece ser estudiado a fondo, y que algunas de las críticas al neodarwinismo, por ejemplo las procedentes del campo de la paleontología, tienen una buena base. La selección natural podría no constituir la totalidad de la explicación. Pero no tenemos duda de que Darwin, como el Edipo del mito griego, liberó a la biología de la opresión de su particular enigma: ¿cómo es posible que haya diseño sin diseñador?

CAPÍTULO III

Un poco de física y química

Lo que mueve al mundo

Quizá la característica más destacada de la materia en el Universo es *que se mueve*. Las galaxias se están dispersando a gran velocidad desde el momento inicial del *Big Bang*. Los planetas giran alrededor de las estrellas o de otros planetas. Los cometas van y vienen. La Tierra rota sobre sí misma. Los océanos sufren el vaivén de las mareas, están surcados por grandes corrientes y su superficie se agita en olas. Los ríos fluyen y el viento sopla. Los continentes se desplazan, se reúnen o se separan, a lo largo de millones de años. Las moléculas se agitan incansablemente y, en su seno, los electrones no se detienen nunca.

Tampoco los seres vivos permanecen quietos. Los animales se persiguen, buscan comida, pareja, cobijo... En sus entrañas, los corazones bombean ríos de sangre, branquias y pulmones hacen correr el agua o el aire, el alimento es empujado a lo largo de sus tubos digestivos. Ninguno de sus órganos está parado. Ni siquiera las plantas conocen el reposo. Sus tallos y ramas crecen constantemente, sus hojas giran buscando la luz, las flores se abren y cierran, y en su interior la savia corre continuamente. Los microorganismos bullen, repitiendo a escala minúscula el ajetreo de la vida macroscópica.

También la vida implica movimiento. La muerte no es sino el fin del movimiento: el descanso eterno.

¿Qué es lo que mantiene activo este frenesí universal? La respuesta es simple y, a la vez, muy complicada: la *energía*. La energía es lo que mueve al mundo. Pero ¿qué es, exactamente, la energía? La física define la energía como la capacidad de imprimir una aceleración a una masa a lo largo de un espacio. O dicho en términos más simples: la energía es la capacidad de mover o de cambiar el movimiento de las cosas. Pero esta definición no nos lleva mucho más lejos de lo que ya sabíamos: que la energía es lo que mueve al mundo. Lo cierto es que aunque no podamos ofrecer una definición más satisfactoria de la energía, al menos sí que conocemos bien algunas de sus propiedades y manifestaciones.

La energía se nos presenta de muy diversas maneras: como energía mecánica, calor, energía luminosa, energía eléctrica, energía nuclear, energía química, etc. Aunque puedan parecer fenómenos muy distintos, todas las formas de energía están estrechamente relacionadas entre sí y pueden transformarse unas en otras. Para entender esta interrelación entre las distintas *energías* merece la pena que nos detengamos en la más fácil de comprender de todas ellas, la energía mecánica, que puede presentarse de dos maneras: como energía *cinética* o como energía *potencial*.

La energía cinética es la energía asociada al movimiento de la materia. O dicho de otro modo, la capacidad que tiene cualquier cuerpo que se desplace para mover, o deformar, a otro cuerpo con el que choque. El concepto de energía cinética está maravillosamente expresado en un viejo chiste, según el cual un soldado comentaba: «A mí no me dan miedo las balas, sino la velocidad que llevan.» No le faltaba razón al pusilánime guerrero: la ener-

gía cinética contenida en un cuerpo cualquiera al desplazarse es directamente proporcional al cuadrado de su velocidad.

La energía potencial de un cuerpo es su capacidad para adquirir energía cinética debido a su posición en un campo de fuerzas. En el caso del campo gravitatorio, esa posición es la altura a la que está situado el cuerpo. Es evidente que los objetos situados a más altura alcanzan mayor velocidad, al dejarlos caer, que los que están más bajos. También el concepto de energía potencial está recogido por la sabiduría popular: «Cuanto más alto, más dura será la caída.»

Detengámonos a observar los coches que circulan por nuestras calles. Todos tienen energía cinética debido a su movimiento. Y esto es fácil de comprobar, bastaría con que nos interpusiéramos en el camino de cualquiera de ellos. Entonces nos transmitirían una parte de su energía cinética, lanzándonos por los aires y deformando (rompiendo) nuestro cuerpo. Siguiendo con nuestra observación, nos enfrentaremos a un misterio: ¿qué ocurre cuando un coche frena y se detiene, a dónde ha ido a parar su energía cinética? La física nos asegura, en el *Primer Principio de la Termodinámica*, que la energía ni se crea ni se destruye sino que se transforma. Así pues, ¿en qué clase de energía se ha transformado la energía del movimiento del automóvil cuando éste se detuvo? La respuesta es que en calor. Los frenos del coche, los neumáticos, y el propio asfalto han aumentado su temperatura como resultado de la fricción que ha detenido al coche.

En realidad, el calor también es energía cinética. Las moléculas que componen los cuerpos no están paradas sino que se agitan continuamente. Si el cuerpo es gaseoso, sus moléculas se desplazan libremente, si es lí-

quido lo hacen con mayor dificultad, y si está en estado sólido se limitan a vibrar; pero no se están quietas. La temperatura de un cuerpo no es otra cosa que la suma del movimiento de sus moléculas. Si el cuerpo (gas, líquido o sólido) está muy caliente, sus moléculas se mueven (o vibran) muy deprisa, y si el cuerpo está frío, sus moléculas se mueven más lentamente. De modo que la energía cinética del coche se convirtió, al frenar, en energía cinética de las moléculas de los neumáticos y el asfalto.

Si tenemos la suficiente paciencia y continuamos observando al automóvil que se detuvo, tendremos ocasión de enfrentarnos a otro enigma: llegado el momento, el coche vuelve a ponerse en marcha, adquiriendo de nuevo energía cinética. Puesto que ya hemos dejado sentado que la energía no se crea ¿de dónde ha obtenido el vehículo la energía necesaria para volver a moverse? La respuesta nos la puede facilitar cualquier niño: del *combustible*. La propia palabra nos ofrece una pista sobre la naturaleza de la energía que mueve al coche. Combustible quiere decir que puede hacer combustión, es decir quemarse. Y cuando se produce una combustión se libera una gran cantidad de energía. Esto tampoco es difícil de comprobar, basta con quemar un papel, su combustión produce calor y luz.

A la energía que se esconde en la materia combustible se la conoce como *energía química* y volveremos sobre ella más adelante.

En cualquier caso, una parte de la energía química del combustible es transformada en energía mecánica (o sea, en movimiento) en el motor del coche, y otra parte se convierte en calor, que hace aumentar tanto la temperatura del motor que obliga a refrigerarlo continuamente. A su vez, la energía mecánica generada en el motor sir-

ve para mover las ruedas del automóvil y ponerlo en movimiento, y también para hacer girar una dinamo y producir energía eléctrica, que en los faros se convierte en luz.

Recapitulemos. La energía primaria del coche es la energía química del combustible. Esta energía acaba siendo transformada en energía cinética, calor, energía eléctrica y energía luminosa. Pero aún queda una pregunta que debemos responder: ¿cuál es el origen de la energía química del combustible? La respuesta no es otra que la luz solar. El cómo la energía de la luz del Sol ha ido a parar a los depósitos de carburante de nuestros vehículos es una historia sorprendente, en la que los seres vivos son los protagonistas. Historia que se torna en asombrosa si tenemos en cuenta que también la luz solar es la que alimenta a casi todos los seres vivos del planeta. Pero para poder comprender el misterio, y maravillarnos con él, aún es necesario que conozcamos mejor algunas cuestiones físicas y químicas.

El Universo en nuestra contra

Aunque, como hemos visto, la energía puede presentarse de muy diversas formas y es posible transformar unas en otras, no debemos pensar que todos los tipos de energía son iguales. Utilizando la jerga técnica, podemos distinguir entre formas de energía de *alta calidad* y formas de energía de *baja calidad*.

Para ayudarnos a entender la diferencia entre ambas nos vamos a permitir una licencia con el rigor científico para plantear una analogía entre el concepto de energía y el de valor económico. El diccionario de la Real Academia define el valor económico de un objeto como

«cualidad de las cosas, en virtud de la cual se da por poseerlas cierta cantidad de dinero o equivalente». O dicho de otro modo: el valor de una cosa es su capacidad de proporcionar a su poseedor cierta cantidad de dinero o equivalente. Si recordamos que la energía también es una capacidad, la de imprimir movimiento a la materia, veremos que ambos conceptos, valor económico y energía, tienen mucho en común.

Siguiendo con la analogía, es evidente que también el valor económico puede presentarse en forma de distintos objetos valiosos, como dinero, valores bursátiles, bienes muebles, inmuebles, etc. Y, como ocurría con las formas de energía, los diferentes objetos valiosos también pueden intercambiarse entre sí. Uno puede tener su capital en acciones, en billetes, en lingotes de oro, en diamantes, en pisos... y cambiar de unos a otros. Pues bien, también aquí podríamos distinguir entre objetos valiosos de *alta calidad* y objetos valiosos de *baja calidad*. Los de *alta calidad* son aquellos que pueden ser convertidos en dinero (o equivalente) de manera eficiente, mientras que los de *baja calidad* no permiten recuperar de manera eficaz el capital (o equivalente) invertidos en ellos. No somos expertos en economía, pero el oro suele considerarse como un objeto valioso de alta calidad, mientras que los mondadientes no parecen una inversión muy acertada. Aunque el oro y los mondadientes que pueden adquirirse por un millón de pesetas tienen, en origen, el mismo valor, el oro mantiene su capacidad de ser convertido con facilidad en un millón de pesetas, o su equivalente, mientras que en el caso de los mondadientes eso es mucho más dudoso. En el caso del oro, el valor permanece concentrado, mientras que al invertir en mondadientes hemos disipado el valor del millón de pesetas.

Ésta es la clave para entender el concepto de formas de energía de alta y baja calidad. En las primeras, la capacidad de generar movimiento permanece concentrada, mientras que en las segundas, dicha capacidad se disipa y no es aprovechable. En el ejemplo del automóvil, el combustible es una forma de energía de alta calidad, muy aprovechable para producir movimiento, u otra forma de energía, mientras que el calor generado por la fricción del frenazo es una forma de energía de baja calidad, poco aprovechable para producir movimiento (u otra forma de energía). Al generar calor, la energía cinética del automóvil se disipó al aumentar un poco la energía cinética de muchas moléculas de los frenos, los neumáticos y el asfalto. El oro se invirtió en una ingente cantidad de mondadientes.

Fue el científico francés Nicolas Léonard *Sadi* Carnot (1796-1832) quien descubrió que el calor es una forma degradada de energía, ya que es imposible convertir en movimiento (técnicamente en *trabajo*) todo el calor generado en cualquier proceso. Esto quiere decir que no es posible recuperar en forma de movimiento, o de otra forma de energía, la totalidad de la energía invertida en calentar un cuerpo. De este modo, el calor puede considerarse como una especie de sumidero para las demás formas de energía.

A partir de este sorprendente descubrimiento, que existe una forma de energía degradada, el calor, que no puede ser aprovechada ni transformada, se formuló la más desalentadora de las leyes científicas, conocida con el inocente nombre de *Segundo Principio de la Termodinámica*. Este principio, que puede ser (y ha sido) enunciado de muy diversas maneras, fue formulado por primera vez por el físico y matemático alemán Rudolf Emanuel Clausius (1822-1888). La formulación original de

Clausius es realmente difícil de comprender para alguien que no esté versado en termodinámica, pero puede transcribirse al lenguaje cotidiano (y que nos perdonen los físicos y los químicos) por algo así como que no es posible construir una nevera que además de enfriar los alimentos genere, al mismo tiempo, energía eléctrica. Que Clausius tenía razón nos lo certifica, cada dos meses, el recibo de la luz.

Bromas aparte, la formulación más habitual del Segundo Principio nos asegura que en un *sistema cerrado* la *entropía* tiende irremisiblemente a aumentar con el tiempo. El concepto de entropía expresa la cantidad de energía que se convierte en calor en un sistema cerrado. Y un sistema cerrado es aquél en el que no hay entradas ni salidas de energía ni de materia. Explicado de esta manera, el Segundo Principio de la Termodinámica no parece tan terrible; pero pasémoslo a un lenguaje más fácil de entender.

La entropía también puede ser considerada como una medida del desorden espacial y energético de un sistema. La idea de desorden energético no significa otra cosa que el paso de energía de alta calidad a energía de baja de calidad, mientras que el desorden espacial es, exactamente, lo que entendemos habitualmente por desorden.

Un ejemplo dramático (y el que más nos interesa) de las consecuencias del Segundo Principio es el caso de los seres vivos, sistemas de materia altamente ordenada. Si a un organismo se le convierte en un sistema cerrado, privándole de su fuente de materia y energía, de su alimento, muere y se descompone en un montón de materia altamente desordenada: «Polvo eres...»

De manera que en nuestro Universo la energía tiende a disiparse en forma de calor y la materia pugna por desordenarse. Y lo que es peor, si el Universo, como afirman muchos científicos, es en sí mismo un sistema cerrado, resulta que tiende a desordenarse irremisiblemente. Esta visión de un Universo cayendo inevitablemente por la cuesta abajo del desorden justificaría que el Segundo Principio fuera rebautizado como el *Principio del Pesimismo Universal*: da igual lo que hagamos, lo que intentemos construir, todo tiende inevitablemente al caos; tenemos al Universo en contra.

Sin embargo, existe un rayo de luz en este panorama tan sombrío. En 1943, el premio Nobel de Física austríaco Erwin Schrodinger (1887-1961) llamó la atención sobre el hecho de que el fenómeno de la vida parece desafiar al Segundo Principio de la Termodinámica, ya que, desde sus orígenes, la materia viva ha ido adquiriendo una complejidad cada vez mayor. Este incremento del orden a lo largo del tiempo parece refutar la imagen de un Universo condenado al caos. Sin embargo, esto sólo es una aparente contradicción: los seres vivos no son sistemas cerrados. Los organismos, al alimentarse, están continuamente adquiriendo energía de alta calidad y materia. Esta incorporación continua de energía y materia los convierte en sistemas abiertos, contra quienes el Segundo Principio no tiene poder.

Pero aunque algunos mostremos una cierta tendencia a engordar, los seres vivos no parecen acumular toda la energía de alta calidad y la materia que asimilan. ¿Adónde van a parar, entonces, dichas materia y energía? Lo cierto es que diariamente nos deshacemos de la mayor parte de la materia que asimilamos, en forma de dióxido de carbono, de orina y de sudor. Por otra parte, la energía de alta calidad la empleamos en generar calor y

energía para desplazarnos y mantener activas nuestras maquinarias biológicas; y esta energía también acaba convertida en calor. O sea, que incorporamos materia muy ordenada y energía de alta calidad y expelemos materia muy simple y calor. ¡Nos mantenemos ordenados a cambio de aumentar el desorden de la materia y de la energía externas!

En realidad, los seres vivos preservamos nuestro extraordinario nivel de orden gracias a un flujo constante de materia y energía que nos atraviesa, aumentando su desorden al hacerlo. Para decirlo técnicamente: mantenemos baja nuestra entropía a costa de aumentar la de nuestro entorno. Y la cantidad de desorden que generamos es mayor que la del orden que conseguimos (piensen, por ejemplo, en la cantidad de calor y desperdicios que producen nuestras ciudades).

En realidad, los seres vivos no violamos el Segundo Principio de la Termodinámica, ya que al generar un desorden externo mayor que nuestro orden interno, el desorden total del Universo (su entropía) aumenta. No somos otra cosa que aceleradores del caos. Ése es el precio de la vida.

Pero este proceso, que se describe de manera general con tanta facilidad, ¿cómo tiene lugar?, ¿qué tipo de energía de alta calidad emplea la materia viva?, ¿cómo la convierte en calor y en vida? El hilo del ovillo lo encontró hace mucho tiempo un hombre sabio.

Nosotros, las ovejas y la hierba

Los pastores que conducen su ganado por las faldas de la Sierra de Atapuerca son personas observadoras y su conversación resulta, a menudo, enriquecedora. Una

tarde de estío en la que volvíamos de los yacimientos, decidimos detenernos en una fuente de la que mana agua de las entrañas de la Sierra. Allí coincidimos con uno de los pastores, conocido nuestro. Nos saludamos e iniciamos una charla banal, mientras mirábamos, distraídos, al rebaño bebiendo. «Es curioso —dijo de repente nuestro amigo— que las ovejas y las personas utilicemos el mismo agua para beber.» Ante tamaña simpleza, nos miramos de soslayo e iniciamos una frase de despedida. Pero los pastores no suelen tener muchas ocasiones de comentar con alguien sus inquietudes, así que, desentendiéndose de nuestra aparente prisa por marcharnos, nuestro amigo continuó: «Las personas nos podemos comer a las ovejas porque todos somos animales y estamos hechos de carne, pero ¿cómo es posible que las ovejas coman sólo hierba? La hierba no es carne... » Se detuvo un momento, y enseguida reanudó sus reflexiones: «A mí me parece que aunque la hierba y la carne parezcan distintas, deben de estar hechas de la misma cosa.» Volvimos a mirarnos, pero ahora desconcertados por la agudeza del pastor. «Pero lo más raro es que la hierba crece de la Tierra —prosiguió—, como si también estuvieran hechas de lo mismo.» Volvió a detenerse y silbó a su perrillo para que acercara unas ovejas que se estaban alejando, entonces nos miró fijamente y nos reveló su descubrimiento: «Para mí que la Tierra, la hierba, las ovejas y nosotros estamos hechos de lo mismo, ¿no les parece?» Atónitos, no pudimos contestar.

Sin saberlo, nuestro amigo había seguido una senda similar a la recorrida por el filósofo y poeta romano Tito Lucrecio Caro (hacia 99-55 a. de C.) en su libro *De la naturaleza de las cosas* para argumentar que la materia del Universo estaba constituida por pequeñísimas partículas indivisibles (*átomos*, en griego), todas constituidas por el

mismo tipo de materia y que sólo diferían unas de otras por su forma y tamaño:

*[...] Y los prados risueños se convierten
En ganados, y en nuestros mismos cuerpos
Transfórmase el ganado, y a menudo
Con nuestro cuerpo auméntase los bríos
De alimañas y de aves carniceras.*

Por su parte, Lucrecio no hacía sino extender las ideas del filósofo, físico y matemático griego Demócrito (hacia 460- 380 a. de C.) y de su seguidor el filósofo Epicuro (hacia 341-270 a. de C.) Según Demócrito todos los cuerpos del Universo estaban formados por agregaciones distintas de estas partículas. Las diferencias entre unos objetos y otros sólo dependían del número, forma y disposición de tales átomos. Al parecer, la idea no era original de Demócrito, aunque él fue quien la desarrolló, sino de su maestro, el filósofo Leucipo (hacia 460-370 a. de C.). La teoría de Demócrito incluía aspectos tales como que el espíritu también está formado por un tipo especial de átomos, que se reparten por todo el cuerpo.

La idea central de la teoría de Demócrito (y Lucrecio), el que toda la materia del Universo esté compuesta por agregaciones de partículas infinitamente pequeñas y constituidas por el mismo tipo de sustancia, resulta básicamente acertada a la luz de nuestro conocimiento actual de la estructura íntima de la materia. Y el que nuestro amigo pastor llegase, por su cuenta, a conclusiones tan atinadas y parecidas a las de dos filósofos que vivieron hace más de dos mil años justifica nuestro pasmo.

La versión moderna de la teoría atómica fue iniciada por el científico británico John Dalton (1766-1844), quien, en 1807, propuso que la materia del Universo estaba com-

puesta por un conjunto de átomos, tantos como elementos químicos, que diferían entre sí en la masa pero no en la sustancia de la que estaban constituidos.

Hoy día conocemos con precisión el tamaño exacto de estos átomos, que ha resultado ser realmente reducido. El átomo más pequeño, el de hidrógeno, tiene un diámetro de $0,37 \times 10^{-7}$ milímetros. O sea, que en un milímetro caben, alineados, casi cuatro millones de átomos de hidrógeno. Tampoco los átomos resultan muy pesados, hace falta reunir un poco menos de un trillón de átomos (en realidad, *sólo* se necesitan 602.214 billones de átomos) de hidrógeno para obtener un peso de un gramo.

Hasta finales del siglo XIX no empezamos a entender realmente la estructura íntima de los átomos. Y lo primero que descubrimos es que la elección del nombre no había sido muy afortunada. Como ya hemos comentado, átomo significa en griego indivisible pero hoy sabemos que aquello a lo que llamamos átomo está, a su vez, compuesto de partículas de materia aún más diminutas. A estas partículas las denominamos genéricamente *partículas elementales* y se conocen en la actualidad más de 200 tipos distintos de ellas.

Sin embargo, y afortunadamente para el propósito de este libro, sólo dos tipos de partículas son las responsables de las propiedades químicas de los átomos, que son las que determinan el modo en que unos átomos se unen a otros para formar agregados mayores, las moléculas, de las que nos ocuparemos más adelante.

Las partículas a las que nos referimos reciben el nombre de *electrones* y *protones*. Los electrones fueron descubiertos por el inglés, premio Nobel de Física, Joseph John Thompson (1856-1940) en 1897, y son tan pequeños que hacen falta alrededor de 1.838 electrones para

igualar el peso de un átomo de hidrógeno, el átomo más pequeño. Pero la propiedad más importante de los electrones no es su tamaño, sino el hecho de que presentan carga eléctrica negativa. Los electrones son muy importantes en nuestra vida cotidiana, su tránsito a lo largo de un conductor constituye la corriente eléctrica que alimenta nuestros electrodomésticos, y las imágenes de las pantallas de nuestros televisores se originan a partir de un haz de electrones.

Los protones fueron descubiertos veintidós años después de los electrones, a partir de un experimento dirigido por el físico británico (nacido en Nueva Zelanda), y premio Nobel de Física, Ernest Rutherford of Nelson (1871-1937). En dicho experimento, se expuso a átomos de nitrógeno a la acción de la radiactividad (en concreto, a un bombardeo de partículas *alfa*). Como resultado, se obtuvieron átomos de oxígeno y unas partículas con carga eléctrica positiva y casi dos mil veces más pesadas que los electrones, los protones.

Además de electrones y protones, responsables de las propiedades químicas de los átomos, hay una tercera partícula de gran interés para comprender su estructura; son los *neutrones*, descubiertos en 1932 por otro físico británico, también galardonado con el premio Nobel de Física, James Chadwick (1891-1974). Estas partículas presentan una masa sólo ligeramente superior a la de los protones pero, tal como indica su nombre, no tienen carga eléctrica. Un neutrón está formado por la reunión de un electrón y un protón (¹) (y una tercera partícula, sin carga eléctrica, y de la que se duda que tenga masa,

¹ En realidad, el neutrón no está formado por la unión de un electrón y de un protón. No obstante, cuando se escinde un neutrón se liberan un protón y un electrón, por lo que podría decirse, con más propiedad, que es como si estuviera formado por un protón y un electrón.

llamada *neutrino*). Puesto que en el seno del neutrón, que es una partícula eléctricamente neutra, se encuentran un electrón (que tiene carga eléctrica negativa) y un protón (con carga eléctrica positiva), es fácil deducir que las cargas de los electrones y los protones son de la misma magnitud, aunque de signo contrario. Este hecho resulta fundamental para entender las propiedades químicas de los átomos.

El primer paso hacia la comprensión de la estructura íntima de los átomos lo dio Rutherford, quien estableció dos aspectos fundamentales. En primer lugar, que la mayor parte de la masa del átomo está concentrada en una región del espacio situada en su centro: el *núcleo*. Rutherford propuso, además, que los electrones se encontraban describiendo órbitas libremente alrededor de este núcleo. Puesto que los electrones tienen carga negativa, Rutherford añadió a su modelo que el núcleo debía presentar una carga positiva de la misma magnitud que la suma de las cargas negativas de sus electrones.

Sin embargo, el modo en el que los electrones se disponen alrededor del núcleo no fue explicado correctamente por el modelo de Rutherford, sino por el desarrollado, entre 1913 y 1915, por el físico danés Niels Bohr (1885-1962), por el que recibió el premio Nobel de Física de 1922.

El acierto de Bohr estuvo en integrar en su modelo el concepto de *cuanto*, propuesto por el físico alemán, y premio Nobel de Física, Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947). Según Planck, la materia no emite o absorbe la energía de manera continua sino en forma de pequeñas unidades discretas de energía. A estos paquetes mínimos de energía, Planck los llamó *cuantos*. Según el tipo de energía emitida o absorbida, la cantidad de energía de los cuantos es mayor o menor. La luz azul, por

ejemplo, está compuesta de cuantos de mayor energía que los de la luz roja, y los cuantos de la luz ultravioleta son de una energía aún mayor que los de la luz azul.

Pero volvamos a la disposición de los electrones. Según el modelo de Bohr, los electrones no pueden ocupar cualquier posición del espacio en su movimiento en torno del núcleo, sino que se disponen ordenadamente en una serie de capas definidas alrededor del núcleo. Cada una de estas capas tiene distinto nivel energético y la diferencia de energía entre dos capas contiguas es de un cuanto. Ahora bien, esta diferencia va siendo cada vez mayor a medida que nos alejamos del núcleo. Es decir, que entre las capas 1 y 2 hay un salto de energía menor que el existente entre las capas 2 y 3, que a su vez es menor que el existente entre las capas 3 y 4, y así sucesivamente.

Para que un electrón pueda pasar de una capa hasta la siguiente de mayor energía debe absorber una cantidad discreta de energía (el cuanto de Planck), que es liberada si el electrón hace el movimiento inverso y regresa a la capa de menor energía. Esta liberación de energía se hace en forma de *radiación electromagnética* (la luz es radiación electromagnética). A un cuanto de energía en forma de radiación electromagnética se lo conoce como *fotón*, por lo que también puede decirse que el electrón emite un fotón al desplazarse hacia una capa de energía más baja.

Evidentemente, la cantidad de energía liberada será mayor cuanto más alejadas estén del núcleo las capas entre las que se mueve el electrón. De este modo, si un electrón de las capas más lejanas al núcleo pasa a una capa de menor energía, liberará un fotón de alta energía, del tipo de la luz ultravioleta, mientras que un electrón situado en una capa de baja energía (o sea, más próxi-

ma al núcleo) que se mueva hacia otra capa aún más cercana al núcleo emitirá un fotón de baja energía, del tipo de la luz infrarroja. Y los electrones de capas intermedias emiten fotones en el espectro de la luz visible. Del mismo modo, para pasar de capas de baja energía hacia otras de mayor energía, los electrones absorben fotones. Los fotones de baja energía sólo pueden producir movimientos en los electrones de las capas más próximas al núcleo, mientras que los de alta energía hacen posible los movimientos de los electrones situados en las capas más alejadas del núcleo.

Este concepto es tan importante para entender el funcionamiento de los seres vivos que merece la pena que lo intentemos explicar mediante una analogía. Imaginen una escalera con peldaños progresivamente más altos (que equivaldrían a los niveles de energía, o capas, en los que puede moverse el electrón alrededor del núcleo). Ahora piensen en que deseamos colocarnos (haciendo el papel de un electrón) en uno de esos escalones. Evidentemente, empleamos una cantidad concreta de energía, que podríamos llamar *paso*, cada vez que subimos un peldaño, de manera que podemos decir que ascender al primero de ellos nos cuesta un *paso* de energía, invertimos otro *paso* en pasar del primer al segundo peldaño, y así sucesivamente escalón tras escalón. Estos *pasos* de nuestro ejemplo son el equivalente de los cuantos de Planck. Como cada escalón es más alto que el anterior, cada *paso* que damos (al ir ascendiendo) es más largo que el precedente. Es decir, que hay *pasos* más largos que otros (del mismo modo que hay cuantos con mayor energía que otros). Si ahora decidimos descender por la escalera, cada vez que saltamos de un peldaño al siguiente liberaremos la energía correspondiente a un *paso*, y esta energía se convierte en sonido al chocar con el escalón al que caemos (en realidad, la energía que libe-

ramos al caer se convierte en sonido y en calor, al friccionar nuestro cuerpo con el aire y con el propio escalón, pero admitamos que toda la energía de la caída entre dos escalones se convierte en ruido al tocar el escalón de abajo). El sonido que libera la energía de un *paso* al caer entre dos peldaños equivaldría, en nuestro ejemplo, al fotón emitido por un electrón al pasar a una capa de menor energía. Como los escalones son de distinta altura, el ruido que produciríamos al caer sería mayor en los peldaños más altos.

Del mismo modo, un átomo puede emitir fotones de mayor o menor energía según la diferencia de energía existente entre las capas por las que se desplaza el electrón. Y de la misma manera que no podemos permanecer suspendidos entre dos escalones, ni dar medios pasos, tampoco los electrones pueden situarse entre las distintas capas, ni absorber o emitir una cantidad de energía menor que un cuanto (o fotón, si es en forma de radiación electromagnética).

Aunque le resulte difícil de creer, este tipo de energía, encerrada en la posición de los electrones alrededor del núcleo atómico y que se libera cuando los electrones pasan a niveles energéticos más bajos, es la que nos mantiene vivos, evitando que el Segundo Principio de la Termodinámica nos mate.

Yo estoy bien, tú estás bien

El 8 de mayo de 1794 es una fecha aciaga para Francia y para la Ciencia. Ese día, la guillotina segó la vida de uno de los más grandes científicos de la historia, el padre de la química moderna, Antoine Laurent de Lavoisier (nacido en 1743). Entre sus múltiples logros, se encuen-

tra el descubrimiento de que la cantidad de materia se mantiene constante en las reacciones químicas. Contribuyó decisivamente al descubrimiento del *oxígeno* (al que él dio ese nombre, que significa *generador de ácidos*) y confirmó el hallazgo, realizado a la vez (aunque de manera independiente) por los científicos británicos Henry Cavendish (1731-1810) y James Watt (1736-1819), de que el agua está formada por la combinación de dos sustancias diferentes: el oxígeno y otro gas, al que Lavoisier nombró como *hidrógeno* (*generador de agua*). También le debemos la demostración de que el proceso conocido como combustión no es otra cosa que la combinación del oxígeno con las sustancias combustibles (u *oxidación*), y el reconocimiento de que la respiración de los animales es un tipo de oxidación.

Lavoisier formalizó el concepto de *elemento químico* como el de una sustancia sencilla, que no puede descomponerse en otras más simples. También propuso, con acierto, que la combinación de estos elementos, en múltiples compuestos, era el origen del resto de las sustancias del Universo.

Como ya hemos visto en el apartado anterior, Dalton partió de este concepto de *elemento* para proponer su teoría atómica de la materia. Dalton pensaba que cada elemento estaba constituido por una misma clase de átomos, que eran iguales entre sí, pero distintos a los átomos de otro elemento. La diferencia entre los átomos de los distintos elementos no se debía a que estuvieran compuestos por sustancias distintas, sino a que tenían masas desiguales. Es decir, que un átomo de plomo no estaba compuesto de otra sustancia que uno de hidrógeno; sencillamente, era más denso. Dalton acertó en parte, y en parte se equivocó: todos los átomos están constituidos del mismo tipo de materia (en esto acertó),

electrones, protones y neutrones, pero no se distinguen por su distinta cantidad de masa (aquí se equivocó) sino por el número de protones, neutrones y electrones que los componen.

Recordemos que en un átomo los protones y neutrones están situados en el núcleo y los electrones en la periferia. Pues bien, la diferencia sustancial entre los distintos elementos químicos radica *en el número de protones de su núcleo*, descubrimiento debido a los trabajos del investigador británico Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915). Así, el elemento más sencillo, el hidrógeno, tiene sólo un protón en su núcleo, el helio tiene dos, tres el litio y así sucesivamente hasta el elemento más complejo conocido, el meitnerio con sus ciento nueve protones.

También habíamos establecido que los átomos contienen, en condiciones normales, igual número de electrones que de protones. De manera que el hidrógeno tiene un electrón, el helio dos, el litio tres, hasta el meitnerio y sus ciento nueve electrones. Ahora bien, mientras que los protones se encuentran sólidamente situados en el núcleo y no pueden ser extraídos de él sin que el átomo se escinda (técnicamente, se fisione), los electrones, al estar en la periferia, pueden perderse o ganarse. Cuando un átomo gana un electrón (con su carga eléctrica negativa) se quiebra el equilibrio eléctrico entre protones y electrones y queda cargado negativamente, mientras que, a la inversa, si pierde un electrón se cargará positivamente. En ambos casos, el átomo se ioniza; o sea, se convierte en un *ion* negativo (*anión*) o positivo (*catión*). Los iones de un átomo siguen siendo el mismo tipo de elemento químico que el átomo original. Enseguida veremos qué puede hacer que un átomo gane o pierda electrones. Pero antes, ocupémonos de los neutrones.

La cantidad de neutrones que puede haber en el núcleo de un átomo es variable, sin que por ello se convierta en otro elemento, es decir sin que cambien sus propiedades químicas. El átomo más frecuente de hidrógeno no tiene ningún neutrón en su núcleo, pero hay átomos de hidrógeno que tienen un neutrón, y es posible obtener artificialmente una variedad de hidrógeno con dos neutrones. A las distintas variantes de los átomos de un elemento, según su número de neutrones, se las llama *isótopos*. El isótopo del hidrógeno con un neutrón recibe el nombre de *deuterio* y el isótopo artificial de dos neutrones se llama *tritio*. Pero no olvidemos que tanto el hidrógeno normal (sin ningún neutrón) como el deuterio y el tritio siguen siendo hidrógenos y tienen las mismas propiedades químicas.

Volvamos ahora al caso de los electrones ¿Por qué habría un átomo de ganar o perder un electrón, adquiriendo así una carga eléctrica, positiva o negativa? La respuesta se encuentra en la peculiar forma en que se sitúan los electrones alrededor del núcleo del átomo.

Como ya hemos visto, el modelo atómico de Bohr nos asegura que los electrones se disponen en capas alrededor del núcleo (²). Pero no todas las capas admiten el mismo número de electrones. El número de electrones de las sucesivas capas va aumentando según la regla $2n^2$, donde n es el número de capa. Por ejemplo, en la primera capa sólo *caben* dos electrones, en la siguiente

² En realidad, los electrones no se disponen alrededor del núcleo en capas concéntricas, ni como pensaba Bohr, sino que tienen una distribución espacial mucho más complicada, que fue descrita posteriormente por Schrödinger. Según este modelo, los electrones no se sitúan en órbitas o capas estables alrededor del núcleo, sino que se encuentran con mayor probabilidad en regiones determinadas del espacio, de forma muy compleja y variable, alrededor del núcleo. No obstante, para comprender los problemas que tratamos en este libro, podemos tomarnos la licencia de imaginarnos las capas situadas concéntricamente alrededor del núcleo.

puede haber un máximo de ocho electrones, en la tercera capa dieciocho electrones, treinta y dos en la cuarta, y cincuenta, setenta y dos, y noventa y ocho electrones, en las capas quinta, sexta y séptima, respectivamente.

Los electrones siguen un orden bastante complejo a la hora de ir situándose en las distintas capas. Aunque usted no lo recuerde, probablemente lo estudió en el bachillerato y seguro que consiguió aprobar el correspondiente examen. Pero no tema, no es necesario conocer dicho orden para entender por qué algunos átomos tienden a perder electrones, mientras que otros *prefieren* ganarlos. Basta con recordar una regla: que los átomos alcanzan su máxima estabilidad cuando en su capa más externa tienen exactamente *ocho* electrones. Esta regla cuenta con una excepción en el caso del helio, que sólo tiene dos electrones en su única capa. Pero como en ella sólo caben dos electrones, el átomo de helio tiene su última capa llena de electrones y es muy estable.

Los elementos cuyos átomos tienen ocho electrones en su última capa son: el *neón*, el *argón*, el *kriptón*, el *xenón* y el *radón*. Sus nombres no nos son del todo desconocidos; el neón, el argón y el kriptón, por ejemplo, se emplean en la fabricación de tubos fluorescentes y bombillas... y sí, el planeta natal de Superman también se llama Kriptón.

Para poder seguir avanzando, conviene que tengamos a mano un *sistema periódico*, que es un sistema de ordenación de los distintos elementos cuya formulación original se debe al químico ruso Dimitri Ivánovich Mendéleiev (1834-1907). En el sistema periódico los elementos están colocados en orden creciente según el número de protones en su núcleo. De modo que el primero es el hidrógeno y el último el meitnerio. Pero no se trata de una simple alineación de elementos, los ciento nueve ele-

mentos están ordenados en dieciocho columnas y nueve filas de diferentes longitudes. Esta organización, aparentemente caprichosa, de los elementos hace que aquellos que tienen el mismo número de electrones en su última capa se encuentren situados en la misma columna.

Antes de proseguir, merece la pena que nos detengamos un momento y simplifiquemos la explicación. Para poder entender las cuestiones químicas fundamentales en las que se basa la vida no necesitamos comprender las propiedades de todos los elementos del sistema periódico, basta con las de los dieciocho primeros, aquéllos situados en las tres primeras filas.

Los elementos de la columna del helio se caracterizan por tener ocho electrones en su capa más externa, más el helio con sus dos electrones en su única capa. Ya hemos visto que los átomos de estos elementos tienen una gran estabilidad; es decir, no están *dispuestos* a ganar o a ceder ningún electrón.

La columna encabezada por el *flúor* y el *cloro* contiene siete electrones en su capa más externa. Esta situación no es del *agrado* de los átomos, puesto que necesitan tener ocho electrones en su capa más externa para alcanzar la estabilidad. La manera más directa de lograr esa situación es la de capturar un electrón extra y reunir, así, ocho electrones en su capa más externa. Desdichadamente para ellos, al aceptar un electrón supernumerario el número de cargas negativas (electrones) sobrepasa al de cargas positivas (protones) y el átomo se carga negativamente (recordemos, se convierte en un ion). De manera que el conseguir la estabilidad que confiere la tenencia de ocho electrones en su capa externa implica la pérdida de la estabilidad eléctrica del átomo.

El *oxígeno* y el *azufre* son los elementos que nos interesan de la columna en la que los átomos tienen seis electrones en su capa más externa. Para alcanzar el número de ocho electrones en esa capa, deben ser capaces de captar dos electrones adicionales, pero esto implica una gran inestabilidad eléctrica, ya que los átomos se cargan con una doble carga negativa. Este problema se agudiza en la columna del *nitrógeno* y el *fósforo*, ya que al tener cinco electrones en su última capa, necesitarían tres más para conseguir ocho, y la ganancia de esos tres electrones determinaría que los átomos se cargaran con tres cargas negativas netas.

La columna del *carbono* y el *silicio* representa un dilema para estos elementos, que poseen cuatro electrones en su capa externa. Ante ellos se abre una doble posibilidad: o bien ganar cuatro electrones, lo que les permitiría sumar ocho electrones en su última capa, o bien perder los cuatro electrones de su capa externa, lo que convertiría su penúltima capa en la más externa. El carbono sólo tiene dos capas de electrones, de manera que si perdiera los cuatro de la última capa alcanzaría una situación idéntica a la del helio: dos electrones en una única capa. El silicio tiene tres capas (una más que el carbono) por lo que la pérdida de los cuatro electrones convertiría a su segunda capa, en la que tiene ocho electrones, en la última. La primera alternativa (ganar cuatro electrones) provocaría un superávit de cuatro electrones, con la correspondiente carga negativa en los átomos de estos elementos, mientras que la segunda posibilidad (ceder cuatro electrones) haría aparecer cuatro cargas netas positivas. Ambas situaciones son imposibles en condiciones naturales.

La columna que incluye el *boro* y el *aluminio* se caracteriza por tener tres electrones en su capa exterior. Si per-

dieran estos tres electrones, el boro (que tiene sólo dos capas) alcanzaría la configuración del helio (dos electrones en una única capa) y el aluminio quedaría con ocho electrones en su última capa. En ambos casos se cargarían con tres cargas positivas.

Los átomos de *berilio* y de *magnesio* tienen dos electrones en su capa externa..., y están *deseando* perderlos. Con ello, el berilio *conseguiría* quedarse con una sola capa con dos electrones (como el helio) y en el caso del magnesio, la penúltima, que tiene ocho electrones, pasaría a ser la más exterior. En esta situación, los respectivos átomos quedarían con dos cargas positivas.

Por último encontramos el *hidrógeno*, el *litio* y el *sodio*, todos con un electrón en su última capa. La pérdida de este electrón dejaría al sodio con ocho electrones en su última capa, al litio con la misma configuración que el helio y al hidrógeno sin ningún electrón. Es relativamente fácil que estos elementos puedan perder el electrón que les sobra, aunque todos ellos, quedarían con una carga positiva.

El caso del hidrógeno merece un comentario adicional. En teoría, también podría ocurrir que el hidrógeno ganase un electrón y completara su única capa, para adquirir la misma situación que el helio, pero el único protón de su núcleo no es lo suficientemente fuerte para realizar tal hazaña.

Veamos qué hemos sacado en claro de todo este lío de electrones y capas. En primer lugar, que hay elementos cuyos átomos (flúor, cloro, oxígeno, azufre, nitrógeno y fósforo) tienen tendencia a ganar electrones para alcanzar una configuración más estable. A esa tendencia se la denomina *electronegatividad*. Por el contrario, otro grupo de átomos (hidrógeno, litio, sodio, berilio, magnesio, boro

y aluminio) muestra propensión a ceder electrones (*electropositividad*). Finalmente, hay un tercer grupo, el del carbono y el silicio, *indecisos* entre ambas tendencias.

Es importante destacar que algunos de estos átomos no pueden satisfacer sus *deseos* de ganar o perder electrones. Es relativamente fácil ganar o perder un electrón, hacerlo con dos es bastante difícil, y resulta casi imposible desprenderse o capturar tres o más electrones.

Cuando un átomo que está dispuesto a ganar un electrón se encuentra con otro que *desea* perderlo se produce una transferencia electrónica del segundo al primero. Pero al llevarla a cabo, el donante del electrón adquiere una carga positiva, mientras que el aceptor queda con una carga negativa. Puesto que las cargas opuestas se ven atraídas, ambos átomos quedan unidos por la fuerza de la atracción eléctrica. A este tipo de unión se le denomina *enlace iónico*, y a los compuestos que se forman de esta guisa, *sales*.

Nuestra sal de mesa se forma de este modo, un átomo de cloro acepta un electrón de un átomo de sodio. El cloro queda cargado negativamente y el sodio positivamente. La atracción eléctrica hace que se unan en un compuesto llamado *cloruro sódico*.

El enlace iónico ayuda a algunos átomos a conseguir la estabilidad que tanto *ansían*, ya que permite neutralizar las cargas eléctricas que aparecen cuando los átomos ceden o toman los electrones que necesitan para alcanzarla. Pero ya hemos visto que esta situación no está al alcance de cualquier átomo, puesto que no todos pueden desprenderse o ganar tantos electrones como precisan. Por otra parte, el enlace iónico puede ser roto por el agua (la sal se disuelve fácilmente en agua), por lo que no parece una solución muy duradera.

Afortunadamente para los átomos, existe otra posibilidad: el *enlace covalente*. Una molécula de agua está formada por un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno fuertemente unidos. ¿Qué es lo que mantiene cohesionados a estos átomos? Quizá recuerden que el oxígeno tiene seis electrones en su última capa, por lo que necesita dos más para lograr el número de ocho y alcanzar la estabilidad. Por su parte, el hidrógeno sólo tiene un electrón en su única capa. La solución más fácil para el problema del oxígeno y del hidrógeno podría parecer la de que dos hidrógenos cedieran sus electrones a un átomo de oxígeno. Esta situación haría que cada hidrógeno adquiriese una carga positiva y el oxígeno dos negativas. La atracción eléctrica reuniría a los dos átomos de hidrógeno con el de oxígeno, compensándose las cargas. La idea es buena, pero imposible; sencillamente, el oxígeno no puede cargarse con dos electrones de más.

Entonces, ¿cómo se mantienen unidos los dos átomos de hidrógeno con el de oxígeno? Puesto que la transferencia de electrones no es posible entre ellos, la solución es otra: *compartir electrones*. Entre cada átomo de hidrógeno y el oxígeno se forma un orbital molecular integrado, cada uno de ellos, por el electrón de un hidrógeno y otro del oxígeno. Estos electrones, compartidos y situados en cada orbital molecular, ya no se mueven alrededor del hidrógeno o del oxígeno, sino alrededor de ambos. Ahora el oxígeno tiene cuatro electrones en su última capa más otros cuatro (dos suyos y otros dos aportados por los dos átomos de hidrógeno) en los dos orbitales moleculares, compartidos uno con cada hidrógeno. Cuatro más cuatro, ocho. Al mismo tiempo, cada hidrógeno cuenta con dos electrones en su orbital molecular compartido con el oxígeno. Y dos electrones en una única capa es la configuración del helio.

Mediante el procedimiento de compartir electrones, los átomos consiguen alcanzar la estabilidad por parejas. Pero como ocurre con otras parejas, la situación no siempre es de igualdad. En el caso del agua, el oxígeno atrae con mayor fuerza a los electrones que el hidrógeno, por lo que pasan más tiempo cerca de él que de su *cónyuge* molecular. Como consecuencia, la molécula de agua presenta un poco de carga negativa en el lado del oxígeno y algo de carga positiva en cada hidrógeno. Con todo, están mejor juntos que por separado.

El enlace covalente es muy fuerte (el diamante, la sustancia más dura conocida, está formada por carbonos firmemente unidos por enlaces covalentes) y, además, no se disuelve en agua como el enlace iónico. Esta última propiedad resulta muy útil para formar cuerpos que, como los de los seres vivos, están constituidos en su mayor parte por el líquido elemento.

Por cada electrón que un elemento necesite ganar o perder, puede formar un orbital molecular (y por tanto un enlace covalente) con otro socio dispuesto a compartir electrones. Así, el hidrógeno puede formar un enlace covalente, el oxígeno y su compañero de columna del sistema periódico, el azufre, pueden formar dos. El nitrógeno y el fósforo tres, mientras que el carbono y el silicio ostentan el récord de enlaces covalentes, pudiendo formar hasta cuatro. Estas distintas capacidades de establecer enlaces covalentes hacen que algunos átomos puedan formar moléculas mayores que otros, y explica su distinta importancia en la estructura molecular de los seres vivos.

Los ladrillos de la vida

Tal como hemos visto, nuestro amigo pastor acertó al afirmar que la tierra, la hierba, las ovejas y nosotros estamos hechos *de la misma cosa*. Como no sabe química, nuestro amigo no conoce que esa cosa, de la que todos estamos hechos, son los átomos de los distintos elementos químicos. Ahora bien, las proporciones en las que se encuentran los distintos elementos no son iguales en la tierra, por un lado, y en la hierba, la oveja y nosotros, por el otro.

El 98 por ciento de la corteza terrestre está formado por distintas combinaciones de apenas ocho elementos. Entre ellos, los más abundantes, con mucho, son el oxígeno (47 por ciento) y el silicio (28 por ciento). El siguiente elemento en importancia es el aluminio (8 por ciento), al que siguen, por este orden, hierro (4,5 por ciento), calcio (3,5 por ciento), sodio (2,5 por ciento), potasio (2,5 por ciento) y magnesio (2 por ciento). De hidrógeno (0,2 por ciento) y carbono (0,2 por ciento) apenas hay trazas en la corteza terrestre.

En cambio, los seres vivos estamos formados casi exclusivamente por tres elementos. Si tomamos como ejemplo a los seres humanos, nuestro cuerpo está constituido por un 63 por ciento de hidrógeno, un 25,5 por ciento de oxígeno y un 9,5 por ciento de carbono. Juntos, estos tres elementos componen el 98 por ciento del total de átomos de nuestro organismo. Y si a ellos le añadimos el nitrógeno (1,4 por ciento), ya conocemos el 99,4 por ciento de nuestra composición química, en lo que respecta a los elementos. Sorprendentemente, más del 70 por ciento de los átomos de nuestro cuerpo corresponde a hidrógeno y carbono, dos elementos que ya hemos visto que son escasos en la corteza terrestre. En

concreto, en nuestro interior el hidrógeno y el carbono son, respectivamente, 286 y 50 veces más abundantes que en las rocas. También es llamativo que tengamos la mitad de oxígeno y muchísimo menos silicio que la tierra en la que crece la hierba. De manera que los seres vivos no somos simples fragmentos de corteza terrestre.

Bueno, usted podría pensar que hemos errado en la comparación. A fin de cuentas, ¿quién ha dicho que tengamos que tener la misma composición que la corteza terrestre? Puesto que la vida se originó en el mar, lo lógico es pensar que nuestra composición química se parezca a la de los océanos, no a la de las rocas. Efectivamente, nuestra composición es muy similar a la del mar en un aspecto: tanto los océanos como los seres vivos estamos constituidos principalmente de agua (entre el 70 y el 90 por ciento de nuestra materia es agua). Pero ahí acaban los parecidos. En un litro de agua de mar hay, en promedio, 35 gramos de otros elementos químicos disueltos, y alrededor del 90 por ciento de esta cantidad está constituido por cloro (55 por ciento), sodio (30,5 por ciento) y magnesio (3,7 por ciento); apenas hay carbono en el agua de mar (menos del 0,01 por ciento). Así pues, incluso cuando la comparamos con el medio en el que se originó la vida, la composición química de los seres vivos sigue siendo muy diferente.

Una curiosidad referida al carbono. Los organismos actuamos como auténticos acumuladores de este elemento en el planeta. La cantidad de carbono contenida en los seres vivos se estima en la bonita cifra de seiscientos mil millones de toneladas. Esto, sin contar la ingente masa de carbono encerrada en los depósitos de carbón, gas y petróleo, que también fue acumulada por los seres vivos.

Nuestra peculiar composición delata que los procesos químicos de los seres vivos son claramente distintos de

los que ocurren en la materia inerte de la superficie del planeta.

¿Por qué estos elementos, hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno, son tan abundantes en los seres vivos? La respuesta la encontramos en la capacidad de los átomos de estos elementos para formar enlaces covalentes.

Como ya hemos visto, el hidrógeno puede formar un enlace covalente, el oxígeno dos, tres el nitrógeno y el carbono cuatro. Como estos cuatro elementos pueden reaccionar fácilmente unos con otros y entre sí, existe una amplísima gama de combinaciones posibles que determina una gran cantidad de compuestos diferentes. Esta variedad de combinaciones se ve incrementada por el hecho de que el carbono, el oxígeno y el nitrógeno pueden compartir enlaces simples o dobles con los otros elementos. Además, los compuestos formados de esta manera son muy estables, ya que los enlaces covalentes entre estos cuatro elementos se encuentran entre los más fuertes y estables.

Como el elemento que puede formar un mayor número de enlaces es el carbono, hasta cuatro, resulta la pieza fundamental en este *mecano* molecular. La unión de átomos de carbono puede formar cadenas lineales, redes, cadenas cerradas (*anillos*), o cualquier combinación de esas estructuras dando lugar a moléculas de gran tamaño y complejidad; y todavía le quedarán enlaces libres para unirse a átomos de hidrógeno, oxígeno y/o nitrógeno. Todas las moléculas de los seres vivos están formadas básicamente a partir de un esqueleto de carbonos unidos. De hecho, el carbono es el elemento esencial en la química de los seres vivos, y no es de extrañar que, a menudo, se identifique la vida con el carbono.

Sin embargo, existe otro elemento dispuesto a hacerle la competencia al carbono. Se trata de su compañero de columna en el sistema periódico, el silicio. Como al carbono, la estructura electrónica del silicio le capacita para formar también hasta cuatro enlaces covalentes. Este hecho ha llevado a algunos a proponer que también sería posible la vida basada en la química del silicio, tal como lo es a partir de la química del carbono. Se ha llegado a decir, incluso, que en otros planetas podría haber seres vivos contruidos de silicio en lugar de carbono. Pero si esta opinión es acertada, ¿cómo explicar que en nuestro planeta la vida se originara a partir del carbono y no del silicio, que es mucho más abundante? En realidad, el silicio no es tan bueno como el carbono para formar seres vivos debido a sus diferentes propiedades químicas.

En primer lugar, el silicio tiene menor capacidad que el carbono para combinarse consigo mismo. Es decir, que los enlaces covalentes entre los átomos de silicio son menos estables que los que se forman entre los átomos de carbono. Esta situación limita mucho la capacidad del silicio para formar cadenas, redes y anillos. Además, la unión entre el silicio y el oxígeno, en forma de *sílice* o *silicatos*, no es soluble en el agua ni da lugar a ningún tipo de gas. La sílice y los silicatos forman rocas, lo que dificultaría su acceso a unos hipotéticos seres vivos de silicio. Por el contrario, la unión del carbono con el oxígeno produce *dióxido de carbono*, un gas atmosférico soluble en el agua, o carbonatos que aunque pueden precipitar y dar lugar a rocas (de hecho, hay montañas enteras de carbonato en forma de roca caliza), éstas pueden ser disueltas por el agua. La presencia de carbono en el agua y en el aire facilita su acceso a los seres vivos. Finalmente, la unión entre el silicio y el oxígeno es mucho más estable que la del carbono con el oxígeno, por lo que aun-

que pudieran acceder con facilidad a la sílice y a los silicatos, los hipotéticos organismos de silicio tendrían muy difícil su obtención, ya que no podrían arrancárselo al oxígeno. Por su parte, la unión del carbono y el oxígeno, en forma de dióxido de carbono, puede ser rota, facilitando a los seres vivos una fuente de carbono.

No obstante, no todos los seres vivos son capaces de fracturar la molécula de dióxido de carbono; esta gesta química sólo está al alcance de los organismos *autótrofos*, de los que nos ocuparemos más adelante.

En resumen, los organismos somos extraordinariamente exquisitos a la hora de elegir los elementos químicos que intervienen en nuestra composición. Prácticamente, solo empleamos oxígeno, hidrógeno, carbono, un poco de nitrógeno y unas pizcas de otros elementos (sobre todo azufre y fósforo).

Pero si en cuanto a los átomos somos tan exigentes, nuestra peculiaridad es aún mayor cuando se trata de moléculas. Las moléculas son uniones de átomos en cantidades determinadas y con propiedades químicas y físicas muy concretas. Cada tipo de sustancia está constituido por una, o varias, clases específicas de moléculas. La molécula de *ozono* consta de tres átomos de oxígeno, la de agua de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, y la de dióxido de carbono de dos átomos de oxígeno y uno de carbono. Como pueden ver, cada molécula tiene su propia *receta*, o *fórmula atómica*, que expresa cuántos átomos de cada elemento intervienen en su composición. Así las fórmulas respectivas del ozono, el agua y el dióxido de carbono son: O_3 (tres átomos de oxígeno), H_2O (dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno) y CO_2 (un átomo de carbono y dos de oxígeno).

Todos los diferentes tipos de rocas están constituidos por un número relativamente reducido de clases de moléculas. En las erupciones volcánicas estas moléculas de las rocas se pueden combinar de diferente manera para dar lugar a las moléculas de la mayoría de los gases atmosféricos; con la extraordinaria excepción del oxígeno, de la que también nos ocuparemos luego. Por su parte, las sales disueltas en el agua también proceden de las moléculas de las rocas y pueden precipitar para formar nuevas rocas. ¿Y las moléculas de los seres vivos? ¿También son el mismo tipo de moléculas que las de las rocas? No. Estamos constituidos por un conjunto de moléculas que son exclusivas de los seres vivos.

Ahora bien, si las moléculas que componen los seres vivos sólo se encuentran en ellos mismos, ¿de dónde obtuvo sus peculiares moléculas el primer ser vivo? Para contestar a esa pregunta (que no deja de ser una versión química del quién fue antes, si el huevo o la gallina) es preciso que primero sepamos, a grandes rasgos, cuáles son esas moléculas tan especiales de las que estamos compuestos.

Básicamente, las moléculas de la vida, o *biomoléculas*, pueden agruparse en cuatro grandes clases: *glúcidos* (o azúcares), *lípidos*, *proteínas* y *nucleótidos*. Además, aunque no es exclusiva de los seres vivos, también merece la pena que le dediquemos unas líneas al agua; a fin de cuentas representa entre el setenta y el noventa por ciento de la composición química de los organismos.

Los glúcidos componen una familia de moléculas químicamente muy homogéneas. Cuando se estableció su composición química, se los denominó *hidratos de carbono* porque por cada átomo de carbono hay dos de hi-

drógeno y uno de oxígeno, como si cada carbono estuviera unido a una molécula de agua. En realidad esto no es así, pero el nombre de hidratos de carbono ha perdurado y está más extendido que el de glúcidos. De entre los muchos tipos de glúcidos existentes, en este libro sólo nos ocuparemos del más popular, que también es el más importante para los seres vivos: la *glucosa*.

La molécula de glucosa está constituida por seis átomos de carbono, doce de hidrógeno y seis de oxígeno ($C_6H_{12}O_6$). Los seres vivos empleamos la glucosa con dos propósitos principales: como combustible para obtener energía y como material de construcción.

Las moléculas de glucosa encierran una gran cantidad de energía química. Por ejemplo, una cucharada pequeña de glucosa contiene la suficiente energía como para elevar la temperatura de un litro de agua en algo más de quince grados centígrados. La mayor parte de nuestras células no sólo pueden obtener energía a partir de la glucosa; como veremos enseguida, también pueden utilizar como combustible a los lípidos y a las proteínas. Pero hay una excepción a esta norma: el tejido nervioso. En condiciones normales, las células de nuestro cerebro únicamente pueden recurrir a la glucosa como fuente de energía. Por ello, es preciso mantener un nivel constante de glucosa en la sangre (alrededor de 0,8 gramos de glucosa por cada litro de sangre). Si la cantidad de glucosa en sangre disminuye hasta la mitad de dicho nivel aparecen disfunciones cerebrales, y si se reduce a la cuarta parte puede producirse el estado de coma. Nuestro cerebro es un incansable devorador de glucosa que requiere alrededor de 140 gramos diarios de este glúcido, lo que representa la energía necesaria para elevar en un grado centígrado la temperatura de una masa de ¡533 litros de agua!

Por otra parte, las moléculas de glucosa pueden unirse fácilmente entre sí mediante enlaces covalentes. Cada molécula de glucosa puede unirse a otras por varios puntos, lo que da lugar a diferentes tipos de cadenas lineales y/o redes tridimensionales, cada una con sus propias peculiaridades. Estas *supermoléculas*, formadas por cientos o miles de moléculas de glucosa, se denominan genéricamente *polisacáridos*.

Algunos polisacáridos sirven para almacenar glucosa, a la espera de su uso como combustible, mientras que otros se emplean como material de construcción de determinadas partes de los seres vivos. Los animales, y los hongos, almacenamos la glucosa en forma de un polisacárido llamado *glucógeno* que en nuestro caso se acumula en el hígado, sobre todo, y en los músculos. La misión de los depósitos de glucógeno en nuestro organismo es la de asegurar la provisión de glucosa a los órganos, sobre todo al cerebro, en situaciones de estrés, como el ejercicio intenso. En dichas circunstancias, se dispara el consumo de glucosa por parte de las células de nuestro cuerpo, con el riesgo de que el nivel de glucosa en sangre baje y la función cerebral se vea afectada. En estos casos, los enlaces entre las unidades de glucosa (que componen las moléculas de glucógeno) se escinden y éstas son liberadas a la sangre. Cuando cesa la situación de estrés, se retira el exceso de glucosa de la sangre, volviendo a formarse glucógeno.

El principal polisacárido de reserva de las plantas es el *almidón*. Como la vida de los vegetales es más apacible que la de los animales y, por otra parte, no tienen un cerebro que precise un aporte constante de glucosa, la misión del almidón no es la de mantener estable el nivel de glucosa en los tejidos vegetales. Las plantas acumulan almidón para hacer frente a otras situaciones.

Por ejemplo, muchas plantas aprovechan las estaciones benignas para fabricar la mayor cantidad posible de glucosa, que almacenan en sus órganos subterráneos (sí, las plantas fabrican su propia glucosa y más adelante veremos cómo lo hacen). Cuando llega el invierno, estas plantas pierden sus tallos y hojas permaneciendo vivas las partes subterráneas, que subsisten gracias a la glucosa almacenada en la buena estación. Las patatas son un buen ejemplo de este tipo de planta. Otras veces, las plantas acumulan almidón en las semillas. Se aseguran así de que sus embriones dispongan de una buena provisión de glucosa hasta que puedan conseguirla por sí mismos. Los cereales son plantas de esta clase.

La mayor parte de la glucosa que llega a nuestro organismo procede del almidón de las plantas, a través de las patatas, del arroz y de otros cereales como el trigo (con cuya harina, además del pan, se fabrican las pastas alimenticias).

Pero las plantas utilizan gran parte de su glucosa para construir otro tipo de polisacárido: la *celulosa*, que es el componente principal de raíces, tallos y hojas. Los humanos empleamos esta sustancia para fabricar papel, cartón, etc. Aunque la celulosa tiene la misma composición química que el glucógeno y el almidón, la forma en que se unen entre sí las moléculas de glucosa es distinta en cada caso. Y esta diferencia determina sus particulares propiedades físicas y químicas. Así, la celulosa es una sustancia bastante consistente y también un magnífico aislante térmico. Estas características son muy útiles para las células de los vegetales, que emplean la celulosa para construir una pared que las rodea completamente, ayudándolas a mantener su forma y aislándolas del medio.

Aunque la diferencia más notable entre la celulosa, por una parte, y el glucógeno y el almidón, por otra, es de índole biológica: los animales no somos capaces de digerir la celulosa.

Quizás esté pensando que aquí hay algo que no encaja. Puesto que hay muchísimos animales que se alimentan exclusivamente de raíces, tallos, hojas e incluso madera, no parece que pueda ser cierto a la vez el que estos órganos vegetales estén constituidos mayoritariamente de celulosa y que los animales no podamos digerirla. Y sin embargo, es así. Lo que sucede es que todos esos animales cuentan con la impagable ayuda de una serie de microorganismos que viven en número ingente en sus tubos digestivos y que sí son capaces de descomponer la celulosa en glucosa. De modo que, al ingerir la materia vegetal, los animales no hacen sino alimentar a los microbios de sus aparatos digestivos, quienes proliferan gracias al aporte de glucosa que obtienen de la celulosa. El animal se limita a ir digiriendo a los microorganismos, junto con la glucosa obtenida por ellos. Por supuesto, siempre quedan en sus tubos digestivos suficientes microbios como para encargarse de la próxima comida.

Aunque no la podamos digerir, ni tampoco contemos con los microorganismos adecuados, la celulosa juega un papel importantísimo en nuestra alimentación. Constituye la llamada *fibra vegetal*, que facilita el trabajo de nuestro intestino, y cuya carencia en la dieta puede acarreararnos trastornos graves.

El segundo tipo de biomoléculas son los lípidos, responsables de nuestra figura, y entre los que se incluyen los *aceites* y las *grasas*. Resulta muy difícil definir químicamente a los lípidos, puesto que componen una clase de

moléculas muy variadas, aunque todos comparten una propiedad física: su insolubilidad en el agua.

Los lípidos cumplen funciones dispares en los organismos. Constituyen una fuente importantísima de energía; por ejemplo, el tejido cardíaco obtiene la mayor parte de la energía necesaria para hacer latir al corazón a partir de lípidos (el 70 por ciento, con el corazón a ritmo normal, o al poco tiempo de incrementar su actividad). Por otra parte, los lípidos son el componente principal de las membranas celulares y en el heterogéneo grupo de los lípidos se encuentran algunas *hormonas* (como los *andrógenos*, hormonas sexuales masculinas, y los *estrógenos*, hormonas sexuales femeninas) y *vitaminas* (como la A, la E y la K).

Adentramos en la gran disparidad química de los lípidos y su polivalencia biológica desborda el propósito de este libro, pero hay un tipo especial de lípidos a los que merece la pena dedicarle algunas líneas. Se trata de los *ácidos grasos*. Aunque rara vez se encuentran libres en las células, son uno de los componentes fundamentales de muchos tipos de lípidos. En función de su estructura química, hay dos clases de ácidos grasos: los ácidos grasos *saturados* y los *insaturados*. La diferencia estriba en que, en los primeros, los carbonos están unidos entre sí mediante enlaces covalentes sencillos, mientras que en los segundos hay carbonos ligados mediante enlaces covalentes dobles. Si sólo hay un doble enlace se habla de ácido graso *monoinsaturado*, y si presenta dos o más dobles enlaces recibe el nombre de *poliinsaturado*. Los animales producimos grasas ricas en ácidos grasos saturados, mientras que las grasas vegetales son más pródigas en ácidos grasos insaturados. A esta norma se escapan los animales que viven a bajas temperaturas, en

cuyas grasas también hay predominio de los ácidos grasos insaturados.

Los mamíferos somos capaces de sintetizar la práctica totalidad de los ácidos grasos saturados y monoinsaturados que necesitamos para vivir a partir de moléculas más sencillas ingeridas en la dieta, pero somos incapaces de generar ácidos grasos poliinsaturados y debemos incorporarlos con los alimentos. Si a un animal de laboratorio se le priva de ácidos grasos poliinsaturados sufre numerosas patologías y acaba muriendo. La especial importancia de estos ácidos grasos, que debemos ingerir, justifica el que se los conozca como ácidos grasos *esenciales*; son el ácido *linoleico* y el ácido *gamma-linolénico*. Afortunadamente para nosotros, estos ácidos grasos esenciales son muy abundantes entre las plantas.

Esta situación podría llevarnos a pensar que no es posible una dieta carente de alimentos vegetales por completo. Sin embargo, los esquimales se han encargado de demostrar lo contrario: en sus ecosistemas no hay plantas a las que recurrir y por lo tanto el componente vegetal está ausente de su dieta (por lo menos hasta hace unos pocos años). ¿De dónde obtienen los esquimales sus ácidos grasos esenciales? La respuesta está en el antes repudiado y ahora ensalzado pescado azul. Este tipo de vertebrado es capaz de sintetizar sus propios ácidos grasos poliinsaturados y los esquimales consumen este tipo de pescado, o a otros animales que son, a su vez, depredadores de estos peces.

Además, los ácidos grasos también son importantes para nuestra salud por su relación con una molécula cuyo solo nombre nos hace temblar: el *colesterol*, un lípido que, paradójicamente, resulta imprescindible para el correcto funcionamiento de nuestro organismo. Entre otras

misiones, el colesterol es un componente fundamental de la membrana de las células animales y es precursor, entre otras moléculas, de las *sales biliares* y de las hormonas *esteroideas* (andrógenos y estrógenos). Sin embargo, y a pesar de su gran importancia, el colesterol puede llegar a ser muy peligroso para nuestra salud. Cuando el nivel de colesterol en sangre rebasa determinado límite tiende a depositarse en la pared interna de los vasos sanguíneos, colaborando en la formación de *ateromas*, que pueden llegar a impedir el riego sanguíneo del corazón o del cerebro.

Está demostrado que existe una relación directa entre la cantidad de colesterol y de ácidos grasos saturados que se ingieren con la dieta y el nivel de colesterol en la sangre. Es decir, que los alimentos ricos en grasas animales, que contienen colesterol y ácidos grasos saturados, pueden provocar el aumento del nivel de colesterol en la sangre si no se toman con moderación. Por el contrario, se sabe que el incrementar la proporción de ácidos grasos poliinsaturados en la dieta determina que el nivel de colesterol en la sangre descienda sensiblemente. Estos descubrimientos han reivindicado la llamada dieta mediterránea, pródiga en grasas vegetales, y el pescado azul, rico en ácidos grasos poliinsaturados.

Las proteínas son el tercer grupo de biomoléculas y, junto con los ácidos nucleicos, las más notables. Esta afirmación se basa en varios hechos. En primer lugar, se trata de las biomoléculas más abundantes en las células, constituyendo alrededor de la mitad de su peso seco. Además de otras muchas funciones, las proteínas intervienen en todas las reacciones químicas de los seres vivos, hasta el punto de ser las responsables de sus características y funcionamiento. Tan importantes son las pro-

teínas para los organismos, que la estructura de todas y cada una de ellas está codificada en el material genético de las células. De manera que la información biológica, que se transmite de generación en generación, consiste básicamente en las *recetas* para sintetizar las adecuadas proteínas.

Se trata de moléculas enormes, constituidas, a su vez, por la unión de otras moléculas más pequeñas llamadas *aminoácidos*. En la estructura química de cualquier aminoácido pueden distinguirse dos regiones: una que es constante en todos ellos, y otra que es variable y que determina las propiedades químicas de cada tipo de aminoácido. La región constante incluye un grupo *amino* (un átomo de nitrógeno unido mediante enlaces covalentes a dos hidrógenos) y un grupo *ácido* (un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno; a uno de ellos mediante un enlace covalente doble, y al otro, que a su vez está unido a un hidrógeno, a través de un enlace covalente sencillo). El grupo amino de un aminoácido puede reaccionar con el grupo ácido de otro y quedar unidos covalentemente. De este modo, los aminoácidos pueden unirse unos a otros, como los vagones de un tren, para formar cadenas de longitud muy variable. La mayor parte de las proteínas están compuestas por un número de entre 100 y 300 aminoácidos, pero este número puede ser muy superior, llegando en algunas proteínas a cerca de 2.000 aminoácidos. Sorprendentemente, el número de clases diferentes de aminoácidos es muy reducido en los seres vivos. La inmensa mayoría de las decenas de miles de proteínas de los diferentes organismos son combinaciones de tan sólo veinte tipos distintos de aminoácidos.

Y sin embargo, los vertebrados no somos capaces de sintetizar la totalidad de esos veinte tipos de aminoáci-

dos. Así, los seres humanos necesitamos incorporar en los alimentos diez de ellos, que reciben el nombre de aminoácidos *esenciales* (³). De éstos, hay cinco tipos que son relativamente raros en los cereales y las leguminosas, lo que determina que las personas que decidan mantener una dieta estrictamente vegetariana deban planear ésta con sumo cuidado para asegurarle al cuerpo el debido suministro de aminoácidos esenciales.

Las proteínas cumplen una asombrosa variedad de funciones en los seres vivos. Aunque no es su misión principal, también son usadas por las células como uno de sus combustibles habituales. Como consecuencia de la degradación de las proteínas se produce un residuo nitrogenado (procedente del grupo amino de los aminoácidos) que debe ser eliminado, fundamentalmente, en la orina (en forma de *urea*, en los mamíferos terrestres). Por este procedimiento, una persona cualquiera puede eliminar diariamente entre 6 y 20 gramos de nitrógeno.

Otra de las funciones que realizan las proteínas es la de servir de material de construcción para diversos tejidos y estructuras. Los anuncios de cosméticos nos han familiarizado con algunas proteínas comprometidas en esta tarea, como son la *queratina* y el *colágeno*. La primera es el componente fundamental de las uñas, del pelo y de la capa superficial de la piel. El colágeno se encuentra, sobre todo, en aquellos tejidos que necesitan, a la vez, re-

³ A lo largo de la vida, disminuye el número de aminoácidos que necesitamos incorporar en la dieta. Esto es así porque hay algunos aminoácidos de los denominados esenciales que sí somos capaces de sintetizar autónomamente, aunque en pequeñas cantidades. Durante el crecimiento, el organismo necesita un gran aporte de aminoácidos para construir tejidos nuevos. En esas condiciones se desborda nuestra capacidad de síntesis de esos aminoácidos y debemos obtenerlos a partir de los alimentos.

sistencia y elasticidad: la piel, los tendones, los ligamentos, o las paredes de los vasos sanguíneos, por ejemplo.

Las proteínas también están involucradas en la defensa del cuerpo contra los microorganismos (las *inmunoglobulinas*), en el transporte de numerosas sustancias, como el oxígeno (la *hemoglobina*), en la contracción muscular (la *actina* y la *miosina*), y en la función hormonal (*insulina* y *hormona del crecimiento*, por ejemplo).

Pero la misión más característica de las proteínas es la de ser los *biocatalizadores* de los seres vivos. Un catalizador es una sustancia que incrementa la velocidad de una reacción química sin intervenir en ella. El catalizador de los motores de los coches acelera la combustión de la gasolina, sin combinarse con el oxígeno ni con la gasolina. Pues bien, la práctica totalidad de las distintas reacciones químicas que tienen lugar en el interior de los seres vivos no se producirían, o lo harían demasiado lentamente, si no estuvieran catalizadas por una familia de proteínas conocidas como *enzimas*. Se puede decir que las enzimas regulan y dirigen las reacciones químicas de los seres vivos. Por lo tanto, no debemos extrañarnos de que la herencia biológica consista en transmitir a la descendencia la información necesaria para sintetizar las proteínas que caracterizan a cada especie. De esta misión, la transmisión de la herencia biológica, se encargan los ácidos nucleicos.

Los glúcidos y lípidos están compuestos de carbono, oxígeno e hidrógeno. A estos elementos se añade el nitrógeno (y algo de azufre) en la composición química de las proteínas. Los ácidos nucleicos añaden un quinto elemento (además del carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno) a su composición química: el fósforo. Al igual que sucede con las proteínas, los ácidos nucleicos están

constituidos por la unión de otras moléculas menores; en este caso, se trata de los *nucleótidos*.

Los nucleótidos son moléculas bastante complejas formadas, a su vez, por la reunión de otras tres moléculas más simples: *ácido fosfórico*, una *base nitrogenada* y un glúcido de cinco átomos de carbono. El glúcido (o azúcar) constituye la piedra angular de este trío químico: a él se unen, siempre mediante enlaces covalentes, el ácido fosfórico y la base nitrogenada. A su vez, la molécula de ácido fosfórico se une al azúcar de otro nucleótido, cuya molécula de ácido fosfórico está unida al azúcar de un tercer nucleótido, y así sucesivamente para formar cadenas de varios cientos a varios cientos de millones de nucleótidos, según el tipo de ácido nucleico.

Todos los nucleótidos presentan el mismo tipo de ácido fosfórico (*ácido ortofosfórico*), pero no ocurre lo mismo con la molécula de azúcar, ni con las bases nitrogenadas. De hecho, hay dos tipos de azúcares, que determinan dos clases diferentes de ácido nucleico, y cinco bases nitrogenadas distintas. Los dos azúcares son la *ribosa* (en realidad, la D-ribosa) y su pariente químico la *desoxirribosa*, similar a la ribosa pero con un átomo de oxígeno menos.

Los nucleótidos formados con ribosa pueden unirse a cuatro tipos de bases nitrogenadas: *adenina*, *guanina*, *citosina* y *uracilo*. Estos nucleótidos constituyen un tipo de ácido nucleico llamado ARN (de las iniciales de su nombre: *Ácido RiboNucleico*). Por su parte, los nucleótidos contruidos con desoxirribosa pueden unirse a las mismas bases nitrogenadas que los compuestos con ribosa, excepto con el uracilo, en cuyo lugar interviene la quinta clase de base nitrogenada: la *timina*. Estos nucleótidos son los que componen el ADN (*Ácido DesoxirriboNucleico*). Estas diferencias químicas son importan-

tísimas puesto que determinan que el ADN y el ARN cumplan misiones muy diferentes en la transmisión de la información genética.

Los distintos nucleótidos, pero especialmente los que incluyen desoxirribosa y adenina, pueden formar otras moléculas diferentes de los ácidos nucleicos con una misión bien distinta. Cuando en su estructura incluyen tres moléculas de ácido fosfórico, en vez de una sola, los nucleótidos no se unen unos a otros para formar cadenas, sino que permanecen aislados. Estos nucleótidos con tres ácidos fosfóricos constituyen las unidades de almacenamiento energético de las células; la más empleada, con mucho, por éstas es el ATP o *trifosfato de adenosina*. También nos volveremos a encontrar más adelante con esta molécula y tendremos ocasión de entender su importante papel en la vida celular.

Un último apunte en esta presentación de los ácidos nucleicos. *Todos* los seres vivos del planeta utilizan los mismos tipos de ácidos nucleicos, compuestos por las mismas moléculas, de acuerdo con las mismas reacciones químicas. Esto no es una casualidad, se trata de la evidencia más directa del origen común de todos ellos, la prueba palmaria de la Evolución.

No deja de resultar una paradoja que a nuestro mundo, al que hemos bautizado con el nombre de la Tierra, lo apodemos el planeta azul, en referencia no a la Tierra sino al componente que cubre la mayor parte de su superficie: el agua. El agua es una sustancia auténticamente singular, tanto por sus propiedades físicas, como por sus características químicas. Y puesto que sus particularidades determinan en gran parte las propiedades de los seres vivos, merece la pena que, aunque no se trate de

una biomolécula, le dediquemos al agua las últimas líneas de este capítulo.

Como ya tuvimos ocasión de comentar en el apartado dedicado al enlace covalente, una molécula de agua está formada por un átomo de oxígeno unido covalentemente a dos de hidrógeno. También explicamos allí que el átomo de oxígeno tiene mayor afinidad por los electrones que intervienen en los dos enlaces de la molécula que los respectivos átomos de hidrógeno. En consecuencia, estos electrones se sitúan más cerca del oxígeno que de los hidrógenos, provocando la aparición de una pequeña carga eléctrica negativa en el lado del oxígeno y de una carga positiva, también pequeña, en cada hidrógeno. Así, el agua es una molécula bipolar; es decir, con una parte positiva y otra negativa.

La vida se basa en un conjunto de reacciones químicas en las que los diferentes compuestos que intervienen en ellas han de poder acercarse o separarse unos de otros para poder reaccionar. Para ello, deben estar incluidos en un medio líquido. En un medio sólido son muy pocas las reacciones químicas que se pueden producir, ya que los átomos no pueden desplazarse para reaccionar unos con otros. En el seno de un gas, los átomos se desplazan con gran libertad, pero la densidad de éstos es tan baja que disminuye la probabilidad de encontrarse para reaccionar.

En cambio, los líquidos resultan ideales como *soporte* de las reacciones químicas. En su seno, los átomos pueden desplazarse libremente y la densidad de los productos puede ser muy elevada, aunque para ello es preciso que estén disueltos en el líquido. De modo que el medio ideal para las reacciones químicas es un líquido con capacidad disolvente. Ahora bien, si el líquido es un disolvente muy fuerte, puede llegar a romper los enlaces

covalentes, impidiendo la formación de muchas de las biomoléculas imprescindibles para los seres vivos.

La naturaleza bipolar del agua la convierte en un magnífico disolvente. Imaginemos una molécula de sal de mesa, formada por un átomo de sodio unido mediante un enlace iónico a un átomo de cloro. Quizá convenga recordar en este punto que el enlace iónico es un enlace debido a la atracción eléctrica existente entre un átomo cargado positivamente, por haber perdido un electrón, y otro con carga negativa, por haber aceptado un electrón de más. En la sal de mesa (cloruro sódico) el sodio es el átomo con carga positiva y el cloro el que tiene la carga negativa. Ambos se mantienen unidos por la fuerza de la atracción eléctrica. Pues bien, si incluimos una molécula de cloruro sódico en agua, las moléculas de ésta se orientarán de manera que las que estén próximas al átomo de sodio le ofrecerán su lado negativo (el del oxígeno), mientras que las moléculas de agua cercanas al cloro girarán para enfrentarle su lado positivo (el de los hidrógenos). De este modo, un buen número de moléculas de agua intentarán atraer al sodio, mientras que otras harán lo mismo con el cloro. El resultado será la ruptura del enlace iónico del cloruro sódico, que se separará en sodio y cloro, que quedarán disueltos en el agua. El sodio y el cloro pueden permanecer separados (disueltos) en el seno del agua porque sus cargas eléctricas se verán compensadas por la acción combinada de las cargas débiles de las moléculas del agua que las rodean.

La capacidad del agua para disolver enlaces iónicos, así como para mantener estabilizados a átomos (o moléculas) con cargas eléctricas, es fundamental en la química de los seres vivos y convierte al agua en el soporte ideal de dichas reacciones. Además, el agua no es capaz de disolver los enlaces covalentes, lo que permite que se

formen y se mantengan estables las diferentes biomoléculas.

La naturaleza bipolar de las moléculas de agua también es responsable de las peculiares propiedades físicas de este líquido. Los hidrógenos de cada molécula de agua, con su débil carga positiva, se ven atraídos por la leve carga negativa de los oxígenos de otras moléculas de agua y se unen a ellos mediante enlaces eléctricos débiles. Estos enlaces débiles se están rompiendo y formando continuamente, lo que da como resultado que, aunque las moléculas de agua pueden fluir libremente unas respecto de otras, también están, al mismo tiempo, ligadas entre sí mediante una red de enlaces eléctricos débiles hidrógeno-oxígeno.

Como consecuencia de la existencia de esta red de enlaces débiles es difícil aumentar el movimiento de las moléculas de agua al suministrarle calor. Recordemos que la temperatura de un cuerpo no es otra cosa que la cantidad de movimiento de sus moléculas. Pues bien, al calentar el agua, la energía suministrada se invierte, en su mayor parte, en romper los enlaces eléctricos entre las moléculas de agua y sólo una parte de dicha energía puede dedicarse a incrementar el movimiento de las moléculas. Como resultado, el agua es capaz de absorber gran cantidad de calor aumentando muy poco su temperatura. A este fenómeno se lo conoce como *inercia térmica*, y también ocurre en el sentido inverso: el agua es capaz de ceder mucho calor disminuyendo poco su temperatura. En suma, que el agua se calienta y se enfría muy lentamente.

Esta peculiaridad del agua nos explica por qué las regiones costeras gozan de climas más suaves que las del interior. El agua del mar (y también la que está en la atmósfera y determina la humedad ambiental) es capaz de

absorber mucho calor del aire durante el verano, para cedérselo, de nuevo lentamente, durante el invierno. Así los veranos son menos calurosos y los inviernos más suaves. En realidad, este *efecto termostato* del océano actúa en el ámbito planetario ya que el agua de las regiones cálidas, cargada de calor, se mueve en forma de corrientes oceánicas hacia las zonas más frías en donde libera dicho calor (también hay corrientes frías que llevan agua a baja temperatura hacia las regiones cálidas). De este modo, el agua distribuye el calor solar por el planeta, favoreciendo las condiciones para la vida.

Un botón como muestra. En el Golfo de México el agua del océano absorbe una enorme cantidad de calor. Este agua caliente discurre, en la llamada Corriente del Golfo, a través del Atlántico hacia el Este hasta alcanzar las costas de Europa occidental. El efecto de esta corriente cálida sobre las costas europeas es fácil de comprobar si reparamos en que la ciudad de París, de clima templado, está a la misma latitud que la gélida Península del Labrador, en Canadá (por cuyas costas discurre una corriente fría procedente de Groenlandia).

Otra propiedad física del agua de gran interés es el hecho de que sus valores de congelación y ebullición están separados por un gran intervalo de 100 grados centígrados. Como gran parte de la superficie de la Tierra presenta, a lo largo del año, una temperatura comprendida entre dichos valores, la mayoría del agua del planeta permanece en estado líquido, el idóneo para la vida.

Incluso en las regiones en las que la temperatura desciende durante algunos meses por debajo del punto de congelación, el agua se presenta en estado líquido durante una buena parte del año. Ello es debido a otra afortunada peculiaridad del líquido elemento: su estado sólido (el hielo) es menos denso que el estado líquido. Co-

mo consecuencia, el hielo flota sobre el agua. Esta situación es excepcional, ya que lo habitual en otros compuestos es que ocurra lo contrario: la fase sólida es más densa que la líquida y se hunde en ella.

Imaginemos lo que ocurriría en grandes zonas del océano, y en muchos lagos situados en latitudes altas, si el agua se comportase como la mayoría de los compuestos. Durante el invierno, el agua de la superficie se helaría al ceder su calor al frío aire. Al ser más densa, esta capa helada se hundiría hasta el fondo, dejando una nueva capa de agua en contacto con el aire helado. De nuevo se congelaría la capa superficial y nuevamente se iría a pique. El lago, o el mar, se iría congelando desde abajo hacia arriba y una gran cantidad de hielo se acumularía en el fondo. Al llegar la estación cálida, la radiación solar sólo alcanzaría a calentar la zona más superficial, por lo que la capa de hielo permanecería inmutable en el fondo. En el siguiente invierno se añadirían nuevas capas de hielo, que no podrían deshacerse durante el verano. Finalmente, llegaría un invierno en el que los lagos y mares de las latitudes altas estarían completamente congelados desde el fondo hasta la superficie. Durante el verano sólo se podría deshelar la capa más superficial, que absorbería el calor del Sol, impidiendo el deshielo de las zonas más profundas.

Afortunadamente para la vida en altas latitudes, ocurre justamente lo contrario. En la estación fría se hiela la capa más superficial, pero como el hielo es menos denso que el agua líquida, flota sobre ella y permanece en la superficie, aislando al agua más profunda del aire frío y evitando su congelación. Al llegar el estío, el calor solar funde la capa externa de hielo. Con la llegada del nuevo invierno comenzará un nuevo ciclo de helada-deshielo, que sólo afecta a la capa superior de agua.

En resumen, la estructura molecular del agua confiere a ésta las características ideales para contener la vida: es un disolvente débil, contribuye a distribuir el calor solar por todo el planeta, y permanece en estado líquido en la mayoría de regiones de nuestro mundo durante buena parte del año. Tanta es la importancia de estas propiedades del agua para los seres vivos que, junto a su gran abundancia en la superficie terrestre, justificarían que, como dice la canción, cambiáramos el nombre de nuestro planeta, de Tierra a Agua.

CAPÍTULO IV

El origen de la vida

El conocimiento de la naturaleza

Los seres vivos venimos al mundo dotados de grandes conocimientos en ciencias naturales. Esta sabiduría es casi enciclopédica entre los animales que nos son más próximos en nuestra vida cotidiana: aves y mamíferos. Deténgase a observar los gorriones de su barrio, o los perros y gatos (propios o ajenos), su comportamiento es muy complejo y está maravillosamente ajustado al entorno en el que viven. Saben perfectamente qué cosas deben comer y cuáles no. Son capaces de reconocer a los miembros de su especie de entre los demás animales. También distinguen, dentro de sus congéneres, a machos de hembras y a los adultos de los inmaduros. Reconocen cuál es la estación idónea para la reproducción y qué deben hacer para llevarla a cabo. Muchos animales son capaces de emigrar a lugares situados a enormes distancias, y conocen tanto el camino a seguir como el momento de emprender el viaje. Hay aves que demuestran grandes conocimientos de arquitectura en la construcción de sus nidos y las arañas podrían impartir cursos sobre el arte de tejer.

Lo cierto es que se pueden escribir libros enteros dedicados al asombroso conocimiento que tienen los animales de su entorno (de hecho, ya están escritos y se siguen escribiendo cada día) y nosotros nos ocuparemos más adelante de ello. Tan convencidos estamos los hu-

manos de esta sabiduría, que es un tópico generalmente aceptado el que los animales son capaces de saber, antes que nosotros, cuándo va a ocurrir una catástrofe natural.

En el caso de las plantas, la cosa no es tan evidente. Los vegetales no parecen un ejemplo de perspicacia, y, sin embargo, también saben si es de día o de noche, reconocen el paso de las estaciones y actúan en consecuencia, llenándose de hojas, flores y frutos, o despojándose de todo ello. También son capaces de distinguir la dirección en la que les llega la luz, o su posición espacial (coloque una planta en posición invertida y al cabo del tiempo verá que el tallo ha girado para recuperar la situación normal). Sus raíces reconocen el terreno y se dirigen hacia las zonas más ricas en nutrientes o en agua. Algunas, incluso, son capaces de detectar la presencia de insectos y atraparlos. También cuentan con reclamos para atraer a aquellos insectos que llevarán su polen hasta otras plantas de su especie. En suma, que también ellas demuestran un gran conocimiento de la naturaleza. Sin duda, éste es menor que en el caso de la mayoría de los animales, pero es que para ganarse el sustento una planta no necesita saber tanto de la vida como un animal.

Podría parecer que los microbios no pueden incluirse entre los seres vivos con *conocimientos*, pero esto no es así. También ellos distinguen lo que es alimento de lo que no lo es, o reconocen perfectamente qué región de su entorno es más favorable para su vida. Más aún, muchos microorganismos son parásitos de organismos pluricelulares pero no atacan a todas las células de su desdichado anfitrión, sólo a las de determinados tipos. La enfermedad conocida como malaria (o paludismo) es una de las principales causas de mortalidad (sola o en

asociación con otras patologías) en los países del Tercer Mundo. El agente causante de esta terrible dolencia es un microorganismo perteneciente al género *Plasmodium* (en realidad hay varias especies de *Plasmodium* que producen distintas variantes de la enfermedad; el más letal de todos ellos es el *Plasmodium falciparum*). Pues bien, este microbio es extremadamente exquisito y sólo infecta a los glóbulos rojos de nuestra sangre. Es decir, que es capaz de reconocer un tipo celular concreto de entre los muchos que componen nuestro cuerpo; sin duda, es un microbio con grandes nociones de citología.

Los seres humanos también tenemos un gran conocimiento del mundo natural, que se diferencia del que poseen el resto de los seres vivos tanto cuantitativa, como cualitativamente. En primer lugar, nuestro conocimiento es sustancialmente mayor que el de cualquier otro organismo, o que el de todos ellos reunidos. Por otra parte, la sabiduría del resto de los organismos es, en su mayor parte, innata, mientras que la abrumadora mayoría de nuestros conocimientos los adquirimos a lo largo de nuestra vida, por experimentación o aprendizaje. Es decir, que los demás seres vivos ya nacen con casi todo (o la totalidad) de lo que necesitan saber; muchos de estos *conocimientos* están codificados en sus genes en forma de pautas estereotipadas de comportamiento (*instintos*, si hablamos de los animales). Pero en el caso de los humanos esto no es así. Venimos al mundo con sólo una pequeña parte de los conocimientos que adquiriremos a lo largo de nuestra vida. El grueso de nuestra sabiduría no está escrito en los genes sino en la mente de nuestros mayores y, más recientemente, en los libros.

Hay otra diferencia fundamental entre el conocimiento de la naturaleza que tienen los demás organismos y el nuestro. Mientras que el suyo carece de entendimiento

sobre los fenómenos naturales, el de los humanos está basado en la comprensión de dichos fenómenos. Como consecuencia, los demás seres vivos se comportan de manera pasiva ante la naturaleza, no tienen la capacidad (o es muy reducida) de modificar las condiciones de su entorno para adaptarlas a sus necesidades. Por el contrario, nuestro conocimiento sobre los mecanismos que rigen la naturaleza nos permite actuar sobre ellos y modificar enormemente nuestro entorno. Con las ventajas y peligros que ello comporta.

Estas dos cualidades tan humanas, facultad para comprender las leyes del mundo natural y capacidad de manipularlas, las solemos nombrar por separado como *ciencia* y *tecnología*. Pero no siempre hemos hecho uso de ellas de la misma forma. Durante la mayor parte de la historia (incluida la prehistoria) el ser humano ha pensado que la explicación de los fenómenos naturales era de tipo sobrenatural.

Las diferentes culturas han coincidido en la elaboración de mitos muy diversos para explicar los acontecimientos de la naturaleza: los nacimientos, la muerte, la lluvia, la caída del rayo, el origen del mundo, de la vida... Y puesto que, según ese punto de vista, las causas de lo que ocurre en este mundo se sitúan fuera de él, las diferentes civilizaciones han ideado un sinfín de formas para dirigirse al mundo sobrenatural e influirlo en la dirección deseada, mediante ritos, conjuros, sacrificios, encantamientos...

Pero hubo un momento y un lugar en los que surgió un pensamiento radicalmente distinto. Quizá fue la revolución intelectual más importante de la historia de la humanidad. El lugar fue Grecia y el momento alrededor del siglo VII a. de C. La idea nueva que nació entonces, y que cambió para siempre el rumbo de la historia, es la de que

los fenómenos naturales tienen causas naturales. Pero los antiguos griegos fueron más lejos aún: además sostuvieron que dichas causas naturales podían ser entendidas por la inteligencia humana. Ambas afirmaciones se oponían a lo que todas las culturas habían pensado desde la noche de los tiempos, y son la base de nuestra concepción moderna de la naturaleza, marcando el nacimiento de la ciencia y de la tecnología tal como las entendemos hoy.

Desde el Barroco, esta concepción de un universo auto-suficiente, que no precisa de fuerzas sobrenaturales para ser explicado, ha ido ganando batalla tras batalla, al ir dando cuenta de una parte cada vez mayor de la realidad a partir de las propiedades elementales de la materia. A comienzos del siglo XIX sólo el fenómeno de la vida resultaba de difícil explicación desde esta perspectiva, por lo que constituyó el último reducto de quienes defendían la presencia de fuerzas sobrenaturales en el mundo natural.

El gran desarrollo de la biología a lo largo de los siglos XIX y XX nos ha permitido confirmar que el funcionamiento de los seres vivos se rige por leyes naturales como el resto de la materia del universo. Sin duda, uno de los hitos más trascendentales en nuestra comprensión del fenómeno biológico lo supuso la demostración inequívoca del proceso de la evolución y la propuesta de un mecanismo natural que lo explicaba. Después de ello, sólo quedaron dos puntos de debate entre quienes pensaban que la vida es un fenómeno natural y quienes sostenían su origen sobrenatural. Ambas cuestiones se corresponden con dos fenómenos únicos y de difícil explicación desde el campo de los que buscaban explicaciones naturales: el propio origen de la vida y la aparición de la *consciencia* (o del ser humano, si lo prefieren). To-

avía es pronto, en este capítulo, para ocuparnos del segundo de ellos, pero es el momento adecuado para dirigir nuestra atención al primero, al origen de la vida.

Una mala noticia

La concepción clásica de la ciencia moderna está basada en el convencimiento de que la naturaleza debe mostrar *regularidades* en sus manifestaciones. Puesto que el universo está regido por leyes, que emanan de las propiedades básicas de la materia, siempre que se den las mismas condiciones se deben de producir los mismos efectos. A este tipo de planteamiento científico se lo conoce como *determinismo*: el resultado de un proceso está predeterminado por las condiciones de partida. Desde este punto de vista, el quehacer científico consiste en encontrar y comprender dichas regularidades, mientras que la actividad tecnológica persigue el controlar las correspondientes condiciones para conseguir los efectos deseados.

Sin embargo, desde finales del siglo XIX sabemos que existen muchos procesos naturales que, partiendo de las mismas condiciones, pueden dar lugar a múltiples resultados, siendo algunos más probables que otros. Ésta es una visión *probabilística* del mundo natural: el resultado de un proceso no está rígidamente determinado por las condiciones de partida, sino que existen múltiples resultados posibles que tienen diferentes probabilidades de suceder. En la concepción probabilística se acepta que en la naturaleza se produzcan *singularidades*: sucesos, que, por su baja probabilidad de ocurrir, no suelen repetirse.

Desde esta perspectiva, podemos preguntarnos si la aparición de vida desde la materia inerte es un fenómeno regular o singular en la naturaleza.

Para Aristóteles la cuestión no admitía dudas. La vida se originaba normalmente a partir de la sustancia inánime. En sus obras describe casos de aparición de insectos, crustáceos, moluscos, peces y ratones a partir del barro. Para nombrar a este proceso, por el que la vida se origina desde la materia muerta, Aristóteles acuñó la expresión *generación espontánea*. La generación espontánea de Aristóteles era una causa natural para el fenómeno de la vida y se manifestaba regularmente. Aunque sostenían una concepción de la naturaleza muy diferente de la de Aristóteles, Demócrito y Epicuro, también pensaban que la vida es un fenómeno que se origina espontáneamente a partir de la materia inerte. Su seguidor Tito Lucrecio Caro lo expresó en los siguientes versos:

*Así que vemos del hediondo cieno
Nacer gusanos vivos cuando ha sido
Podrida con las lluvias abundantes
La húmeda Tierra [...].*

La gran autoridad intelectual de Aristóteles contribuyó a que la generación espontánea fuera una idea aceptada sin cuestionar hasta mediados del siglo XVII. De hecho, fue apoyada por algunos de los grandes pensadores de la Iglesia como San Basilio (329-379), San Agustín y Santo Tomás de Aquino. Pero no sólo el prestigio de Aristóteles y de los santos jugó a favor de la generación espontánea. Además, se trataba de un fenómeno que, aparentemente, era fácil de comprobar experimentalmente. Personalidades del mundo de la ciencia tan pres-

tigiosas en su época como el médico inglés William Harvey (1578-1657), el cirujano francés Ambroise Paré (1510-1590), o el médico belga Jean-Baptiste Van Helmont (1577-1644) apoyaban la existencia de dicho fenómeno. Van Helmont llegó, incluso, a proponer una receta para obtener ratones, en tres semanas, partiendo de unos granos de trigo y una camisa sucia reunidos en una caja. El propio Isaac Newton aceptaba la generación espontánea como un hecho.

No obstante, la credibilidad de la generación espontánea empezó a resquebrajarse como resultado de los experimentos del médico de Florencia Francesco Redi (1626-1698), que se ocupó del caso de los gusanos que aparecen *espontáneamente* a partir de la materia orgánica en descomposición. En su opinión, dichos gusanos eran la consecuencia de la inseminación de dicha materia por parte de otros seres vivos, en concreto las moscas, que depositaban en ella sus puestas. Para probarlo, Redi realizó, en 1668, un experimento muy sencillo: colocó en el interior de dos recipientes materia orgánica en descomposición, a continuación tapó la boca de uno de ellos con una gasa y dejó el otro abierto. Al cabo de cierto tiempo, aparecieron gusanos en el interior del recipiente abierto pero no en el que estaba cubierto por la gasa. Al tapar el recipiente, Redi había impedido el paso a las moscas y había evitado que pusieran sus huevos en la materia putrefacta de su interior.

Redi suele ser considerado como el primer autor que desacreditó experimentalmente la teoría de la generación espontánea, pero lo cierto es que, al fracasar en su intento de explicar el fenómeno de la aparición *espontánea* de insectos en el interior de unas excrecencias de las plantas que se conocen como *agallas*, a Redi no le quedó más remedio que aceptar un tipo especial de ge-

neración espontánea para justificar dicho fenómeno. Fue el médico y biólogo italiano Antonio Vallisnieri (1661-1730) quien, alrededor de 1700, demostró, sin ninguna duda, que los insectos de las agallas nacían a partir de puestas de individuos adultos de su misma especie. La planta reaccionaba contra el cuerpo extraño que le había sido inoculado, la puesta del insecto, y generaba un tipo de crecimiento anómalo a su alrededor, las agallas.

El experimento de Redi y los trabajos de Vallisnieri fueron un duro golpe para la teoría de la generación espontánea, al que se fueron sumando observaciones cada vez más rigurosas sobre la aparición *espontánea* de otros invertebrados, que siempre acaban siendo explicadas como consecuencia de puestas de organismos precedentes. De este modo, la teoría de la generación espontánea fue cayendo en el descrédito.

Sin embargo, no tardó en recuperarse gracias a los descubrimientos propiciados por uno de los grandes inventos del siglo XVII: el microscopio, que nos permite ver aquello que por su pequeñez se escapa al ojo humano. Uno de los más afamados constructores de microscopios de aquella época fue un comerciante holandés, contemporáneo de Redi: Antonio van Leeuwenhoek (1632-1723).

Aparte de su maestría en la construcción de microscopios, de los que fabricó más de trescientos, Leeuwenhoek realizó importantes descubrimientos científicos, tales como la existencia de los microorganismos (en 1683), de los glóbulos rojos de la sangre, y de los espermatozoides. Leeuwenhoek contribuyó al desprestigio de la generación espontánea al demostrar que animales como los mejillones, pulgas y gorgojos no aparecen espontáneamente de la arena, sino que proceden de diminutos huevos preexistentes.

Junto a los trabajos de Redi y de Vallisnieri, la evidencia aportada por Leeuwenhoek hizo abandonar la idea de la generación espontánea para los animales complejos, pero, paradójicamente, ofreció a dicha teoría un espaldarazo inesperado con el descubrimiento de la existencia de los microorganismos. Nadie pensaba que los microbios fueran capaces de reproducirse mediante *semillas* o *huevos*, por lo que su aparición en un medio en el que no estaban previamente sólo podía deberse a que se habían generado espontáneamente. Y la comprobación de este fenómeno estaba al alcance de cualquiera: se tomaba un líquido al que se había añadido materia orgánica, se llevaba a ebullición, lo que debería liberarlo de la presencia de cualquier microbio, se dejaban pasar unos días y al aplicar el microscopio se descubría una próspera multitud de microorganismos. Ésta era la prueba concluyente de la generación espontánea, según sus defensores. El fenómeno había quedado restringido al ámbito de la vida microscópica pero, a cambio, la evidencia parecía irrefutable,

Para Leeuwenhoek, estos resultados no eran concluyentes y sospechaba que los microorganismos que aparecían en los caldos de cultivo habían llegado hasta allí después de su esterilización, procedentes del aire. De hecho, un seguidor de Leeuwenhoek, Luis Joblot (1645-1723), realizó en 1718 una experiencia, en cierto modo similar a la de Redi, consistente en hervir durante quince minutos un medio de cultivo en dos recipientes, uno abierto y otro cerrado. Tras la ebullición del caldo de cultivo, el recipiente abierto se llenaba rápidamente de microorganismos mientras que el que había estado cerrado permanecía estéril durante muchos días, pero cuando se abría los microbios aparecían en su interior al poco tiempo. Aunque el resultado del experimento parece concluyente en la dirección de las sospechas de

Leeuwenhoek, no resultó convincente para una buena parte de los científicos de la época. Muchos consideraban que la composición del aire del frasco cerrado había sido alterada por el prolongado calentamiento. Y esta alteración, se argumentaba, le hacía perder al aire su capacidad de generar la vida, impidiendo la aparición espontánea de los microorganismos.

De este modo, la polémica continuó a lo largo del siglo XVIII. Entre aquellos que se oponían a la generación espontánea, se encontraba el científico y sacerdote italiano Lazzaro Spallanzani (1729-1799), un investigador polifacético entre cuyos logros están el haber logrado el primer trasplante de cabeza de la historia..., entre caracoles, la inseminación artificial de una perra, y la demostración de que es en los tejidos de los animales donde el oxígeno es transformado en dióxido de carbono (y no en los pulmones, como había propuesto erróneamente Lavoisier).

El adversario de Spallanzani en esta polémica fue otro sacerdote católico, el británico John Turberville Needham (1713-1781). Needham era acérrimo defensor de la generación espontánea y realizó una serie de experiencias cuyos resultados presentó como evidencia indiscutible de dicho fenómeno: tomó una serie de recipientes en los que introdujo caldo de cordero y los hizo hervir durante dos minutos, a continuación los cerró y observó su interior al cabo de algún tiempo, encontrando en ellos gran número de microorganismos. La conclusión de Needham fue que dichos microorganismos habían aparecido por generación espontánea, ya que el líquido del frasco había sido esterilizado y éste cerrado convenientemente.

Pero Spallanzani no coincidía con Needham en la interpretación de los hechos. En su opinión, el tratamiento de Needham era demasiado suave y no garantizaba la esterilización del caldo. Más aún, al cerrar los frascos *des-*

pués de la ebullición del líquido, Needham había permitido que los microorganismos del aire volvieran a contaminar los frascos. Para probar su punto de vista, Spallanzani hizo bullir durante cuarenta y cinco minutos un caldo de cultivo en el interior de frascos cerrados herméticamente. En los frascos de Spallanzani no aparecían microorganismos. Needham objetó que, como en el caso del experimento de Joblot, el tratamiento de Spallanzani alteraba la propia naturaleza del aire por lo que no era posible que la generación espontánea tuviera lugar.

La disputa quedó en tablas ante la imposibilidad de encontrar un procedimiento que permitiese esterilizar los frascos sin que el aire de su interior se viera afectado por el proceso. De este modo, a finales del siglo XVIII y principios del XIX, grandes biólogos como los franceses Georges Louis Leclerc Buffon (1707-1788), Jean-Baptiste de Monet, barón de Lamarck, y Georges Cuvier (1769-1832), o el inglés (y abuelo de Darwin) Erasmus Darwin, se mostraban partidarios de la generación espontánea. Paradójicamente, una de las personalidades de la época que no aceptaban la generación espontánea no procedía del campo de la biología; François Marie Arouet, *Voltaire* (1694-1778), publicó en 1769 un panfleto en el que satirizaba los trabajos de Needham y elogiaba los de Spallanzani. Pero el problema de la generación espontánea y, sobre todo, su importancia sobre nuestra visión del mundo, iba a sufrir un giro decisivo a mediados del siglo XIX.

Hasta ese momento, el debate sobre la generación espontánea estaba relativamente exento de carga ideológica. El motivo era que para la mayoría de los investigadores, y filósofos, el ser humano no formaba parte de la naturaleza. O al menos no como los demás seres vivos. El pensamiento dominante era el de aceptar que el ser hu-

mano había aparecido por un acto de creación divina especial y diferente de la del resto de los organismos. De modo que el que los microbios, o incluso los invertebrados, pudieran o no aparecer de manera espontánea no dejaba de ser una disputa académica, desligada de la cuestión del origen de la humanidad. Por ello, era posible que dos sacerdotes católicos, Spallanzani y Needham, pudieran alinearse, sin problemas, en favor o en contra de la generación espontánea.

Pero esta situación cambió para siempre en 1859. En ese año, Darwin publicó su obra *El origen de las especies*, en la cual se demostraba de manera incuestionable el fenómeno de la *evolución*, según el cual todos los seres vivos están relacionados por una serie de antepasados comunes, más lejanos en el tiempo cuanto mayor es la diferencia morfológica entre ellos. Es decir, que los seres humanos compartimos un antepasado común, cercano en el tiempo, con los primates más parecidos a nosotros (chimpancés, orangutanes y gorilas), un ancestro más alejado del resto de mamíferos, otro, aún más alejado, con los demás vertebrados terrestres... y así hasta llegar a un único antepasado común con el resto de organismos: el primer ser vivo.

De un plumazo, el ser humano pasaba a formar parte del reino animal y la cuestión de nuestro origen quedaba ligada a la del resto de criaturas. Desde esta perspectiva, la vieja polémica de la generación espontánea adquiría un matiz completamente distinto. Ahora se dilucidaba el problema del origen de la humanidad. Para los defensores del origen divino del ser humano sólo quedaban dos alternativas: o bien Darwin se equivocaba y el origen del hombre no estaba relacionado con el del resto de los seres vivos (en cuyo caso la cuestión de la generación espontánea seguiría siendo un tema *académico*) o si por el

contrario Darwin estaba en lo cierto, el origen de la vida (y por tanto el del ser humano) debía corresponder a un único acto de creación divina, incompatible con la generación espontánea.

Por una paradoja del destino, el mismo año en que apareció *El origen de las especies*, de Darwin, también vio la luz el tratado más extenso dedicado a probar la veracidad de la generación espontánea. Su autor fue el científico francés Félix Archimède Pouchet (1800-1859), quien ofrecía en su obra los resultados de numerosos experimentos a favor de la existencia de la generación espontánea.

Lo cierto es que aunque la mayor parte de la comunidad científica se adhirió rápidamente a las ideas de Darwin, la cuestión de la generación espontánea permanecía como un problema de difícil solución.

Ya hemos planteado la dificultad técnica que entrañaba el realizar un experimento que satisficiera a ambas partes. Recordemos que la clave del problema, el nudo gordiano de la polémica, estribaba en conseguir un medio de esterilizar el caldo de cultivo y el aire del interior del recipiente que lo contenía, sin que el propio aire sufriera el proceso de esterilización. Algo que parecía imposible, hasta el punto que desde el experimento de Joblot (en 1718) nadie había acertado a encontrar la solución.

Para intentar salir del punto muerto en que se encontraba la cuestión, la Academia de Ciencias de París ofreció, a comienzos de la década de 1860, un premio en metálico a quien dilucidara la vieja polémica. Poco podían imaginarse los académicos que la solución definitiva estaba a punto de ser alcanzada de la mano de un científico francés que en 1860 escribía a un amigo: «Espero dar

en breve un paso decisivo, resolviendo claramente la famosa cuestión de la generación espontánea.»

¿Quién era este científico que se atrevía a anunciar la solución definitiva de un debate que duraba ya casi doscientos años? Se trataba de uno de los grandes genios de la historia de la ciencia, Louis Pasteur (1822-1895). En el momento de escribir esas líneas, Pasteur tenía treinta y ocho años y ya era un científico reconocido por sus descubrimientos relacionados con la química de los seres vivos. A la edad de veintiséis años, había presentado un trabajo ante la Academia de Ciencias de París en el que daba cuenta del fenómeno de la *isomería*, o asimetría espacial de las moléculas, según el cual dos moléculas con la misma composición química e idéntica estructura, pero que sean imágenes especulares la una de la otra, presentan diferentes propiedades físicas y biológicas.

Así explicado, el fenómeno de la isomería parece terriblemente complicado, pero piensen en sus manos: ambas tienen la misma composición y estructura, pero cada una es la imagen especular de la otra (es decir, que la mano derecha es como la imagen en un espejo de la mano izquierda), lo que determina diferencias funcionales entre ambas. Tanto es así, que muchos objetos de uso cotidiano (una buena parte de los ratones de ordenador, por ejemplo) están fabricados para ser usados específicamente por la mano derecha (si usted es zurdo, en este mundo de diestros, sabe a lo que nos referimos). Evidentemente, las manos no son moléculas, pero la analogía es buena para entender el fenómeno de la isomería.

Pero volvamos con Pasteur. En 1857 había demostrado que el proceso conocido como fermentación, de enorme importancia industrial, era ocasionado por la acción de

microorganismos (levaduras y bacterias). En 1865, con posterioridad a sus experimentos sobre la generación espontánea, Pasteur inventó un método, conocido como *pasteurización*, para eliminar los microbios que avinagran el vino, evitando graves pérdidas a una de las industrias más importantes de Francia en aquel momento (la pasteurización también puede aplicarse a otros líquidos como la leche, permitiendo su conservación a largo plazo). El prestigio de Pasteur era tan grande en 1865, que el Parlamento francés le encomendó la misión de salvar de la ruina a otro importante sector de la economía francesa: la industria de la seda, en peligro por una plaga en los gusanos de seda conocida como *pebrina*. Pasteur puso manos a la obra y a lo largo de tres años descubrió y aisló al agente causante de la enfermedad, proponiendo un método para acabar con la epidemia. En 1868 la enfermedad se había erradicado y la industria de la seda francesa se había salvado del desastre.

La carrera de Pasteur dio un giro de consecuencias extraordinarias cuando, en 1871, desplazó su atención desde los procesos industriales hacia el campo de la salud. Debido a su experiencia con los microorganismos, Pasteur propuso su teoría microbiana de la enfermedad, que sostiene que muchas enfermedades están causadas por la acción de microorganismos. Esta idea fue recibida con gran escepticismo, pero en 1881 Pasteur logró demostrar sus ideas al desarrollar tratamientos para prevenir dos graves enfermedades de los animales domésticos: el cólera de las gallinas y el carbunco (también conocido como carbunco o ántrax maligno). Esta última enfermedad afecta principalmente al ganado ovino y bovino, pero también puede transmitirse a los seres humanos. Es una de las enfermedades infecciosas de las que se tiene noticia desde más antiguo, ya que aparece descrita en el *Éxodo*. El agente patógeno, una bacteria co-

nocida como *Bacillus anthracis*, fue descubierto en 1863 por el científico francés Casimir Joseph Davaine (1812-1882) ⁽⁴⁾, siendo la primera enfermedad microbiana en la que se estableció el agente patógeno. Aunque en ausencia de tratamiento el carbunco puede llegar a ser mortal para las personas, la terapia con antibióticos es muy eficaz contra la enfermedad.

Nuevamente, los beneficios económicos de los descubrimientos de Pasteur fueron enormes. A estas alturas, era ya reconocido como uno de los mayores científicos de su época y tenido por un héroe nacional en Francia. Pero su éxito más espectacular aún estaba por llegar. En 1882, a la edad de sesenta años, Pasteur comenzó a investigar una de las más terribles enfermedades de su época (aunque de una incidencia muy baja): la rabia. Siguiendo con su método habitual, su primer objetivo fue identificar y aislar al agente causante de la enfermedad. Una vez logrado, Pasteur consiguió preparados con cepas cuya virulencia había sido atenuada y que eran susceptibles de ser usadas para inmunizar a los pacientes. Pero aún faltaba la comprobación definitiva en seres humanos.

La ocasión se presentó el 6 de julio de 1885, fecha en que tuvo lugar una de las escenas más dramáticas de la historia de la medicina: ese día, una mujer acude a Pasteur con su hijo de nueve años al que acaba de morder un perro rabioso. En su desesperación, la madre viene a solicitar ayuda al gran hombre, quien accede a tratar al chiquillo. El niño se llama Joseph Meister y será la primera persona en recibir el tratamiento de Pasteur contra la rabia. A lo largo de diez días, Pasteur inyecta a Joseph

⁴ El descubrimiento de Davaine no fue aceptado hasta que, en 1876, el gran microbiólogo alemán Robert Koch (1843 1910) aisló la bacteria y documentó su ciclo vital.

preparados, de virulencia cada vez mayor, con el agente causante de la rabia. Al finalizar el tratamiento el niño no desarrolla la enfermedad, se ha salvado, y la rabia ha sido vencida.

Como ya hemos mencionado, la obra de Pasteur fue ampliamente reconocida durante su vida. Amén de los numerosos premios en metálico, Pasteur recibió algunas de las más prestigiosas condecoraciones de su tiempo. Entre ellas, destacan la Legión de Honor (de la que obtuvo el grado de Caballero en 1853, el de Comandante en 1868, y la Gran Cruz en 1881) y el Gran Cordón de la Orden de Isabel la Católica (en 1882).

Pero la prueba mayor, y más escalofriante, de agradecimiento por su labor pudo haber tenido lugar después de su muerte. El pueblo de Francia le despidió con un funeral de Estado en Notre-Dame, en una de cuyas capillas fue enterrado hasta que, en 1896, sus restos fueron trasladados a una cripta del Instituto Pasteur. Allí, desde 1910, reposan junto a él los restos de su esposa, Marie Laurent. Según el gran microbiólogo francés René Dubos, durante la invasión nazi, en 1940, las fuerzas de ocupación alemanas pidieron que les fuera abierta la cripta en la que se encontraban los restos de Pasteur y de su mujer. El conserje encargado de las llaves se suicidó antes que franquear el paso a los ocupantes. Ese conserje era Joseph Meister, el niño de nueve años a quien Pasteur salvó de la rabia.

De manera que lo que para otro científico habría supuesto el mayor éxito de su vida profesional, la solución del problema de la generación espontánea, para Pasteur no fue sino un jalón más en su carrera. Recordemos que los defensores de la generación espontánea, como Needham, creían que el propio aire era capaz de generar por sí mismo la aparición de los microbios en los caldos

de cultivo previamente esterilizados. Por eso descartaban los experimentos, como los de Spallanzani, en los que el aire era sometido a elevadas temperaturas, ya que éstas alteraban al aire y le hacían perder su *fuerza vital*.

Pasteur comenzó sus investigaciones demostrando que el aire no estaba exento de microorganismos. Para ello, aspiró aire a través de un tubo de vidrio en cuyo interior había colocado, a modo de filtro, un tapón de algodón previamente esterilizado. A continuación, disolvió el algodón con éter y encontró restos de numerosos microorganismos en la disolución. Estos microorganismos sólo podían proceder del aire que había pasado a través del tubo y que las fibras del algodón habían retenido.

Una vez sentado que el aire contenía microbios, Pasteur realizó su segundo, y definitivo, experimento. Tomó un matraz de cuello de cisne (esto es, un recipiente cuyo cuello es muy largo y delgado) y lo llenó con un caldo de cultivo, doblando a continuación el cuello del matraz hacia abajo y luego hacia arriba (sometido a calor, el vidrio se dobla con gran facilidad). Seguidamente, hizo hervir el caldo hasta que comenzó a salir vapor por el extremo del cuello del matraz. Entonces dejó enfriar el caldo, sin cerrar el matraz. Pasaron los días y no apareció ningún microorganismo en el interior del caldo. El experimento era concluyente, Pasteur había demostrado la falsedad de la generación espontánea. En palabras del principal valedor de Darwin, el inglés Thomas Henry Huxley (1825-1895), escritas el año de 1863: «Por mi parte, creo que, con los resultados de los experimentos de Pasteur frente a nosotros, no podemos evitar llegar a las mismas conclusiones que él; y que la doctrina de la generación espontánea ha recibido el *coup de grâce* final.»

Aparentemente, el experimento de Pasteur no difiere de los previos de Joblot o Spallanzani: hacer hervir un caldo de cultivo en el interior de un recipiente. La diferencia fundamental es que el matraz de Pasteur *estuvo abierto todo el tiempo*. Al hacerlo así, Pasteur permitió que el aire de la habitación, que no había sido sometido a tratamiento alguno, penetrara en el recipiente después de la cocción del caldo. Con ello, eliminaba cualquier duda sobre la validez del experimento. Pero ¿cómo es posible que al dejar entrar aire fresco en el matraz éste no se contaminara de microbios? La respuesta está en el codo que Pasteur generó al doblar el cuello del matraz. El aire pasaba libremente por el cuello del matraz, pero las partículas de polvo suspendidas en el aire, en donde se encuentran los microorganismos, quedaban retenidas en dicho codo. La solución dada por Pasteur fue tan simple como genial. Y, como confirmación de sus resultados, cuando se rompía el cuello del matraz y se eliminaba el codo que retenía el polvo del aire, el caldo de cultivo se llenaba de microorganismos.

Aunque Pouchet intentó rebatir los resultados de Pasteur, la batalla estaba ya irremisiblemente perdida: en 1864 la Academia de Ciencias de París admitió los resultados de Pasteur (Pouchet eludió el repetir sus experimentos y defender sus resultados frente a la comisión de expertos designada por la Academia). Poco después, en 1869, el científico inglés John Tyndall (1820-1893), descubridor del efecto que lleva su nombre y que explica por qué el cielo tiene color azul, pudo observar directamente que la putrefacción de la materia orgánica (causada por la proliferación de microorganismos en ella) no se producía en presencia de aire libre de polvo en suspensión, pero sí tenía lugar cuando el aire contenía partículas de polvo, lo que confirmaba los resultados de Pasteur.

Todavía hubo un rebrote de la polémica acerca de la generación espontánea durante la década de 1870. Pasteur volvió a entrar en liza, principalmente contra Henry Charlton Bastian (1837-1915) que sostenía que la generación espontánea era posible en condiciones muy determinadas. Nuevamente, en 1877, la Academia de Ciencias de París nombró una comisión de expertos, a la que aceptaron someterse Pasteur y Bastian. Y otra vez, como había ocurrido diez años atrás con Pouchet, Pasteur desacreditó los argumentos y pruebas de su oponente, que también en esta ocasión rehuyó la confrontación directa con él.

No obstante, y a pesar del papel protagonista de Pasteur en su abandono, es de justicia reconocer que en el definitivo arribamiento de la teoría de la generación espontánea también influyeron decisivamente los avances de otras ramas de la biología experimental, como la citología. De hecho, Pasteur no pudo dar cuenta de experiencias en las que tras esterilizar un caldo de cultivo por ebullición prolongada, en frascos cerrados herméticamente, reaparecían, inexplicablemente, determinados microorganismos. Fue Tyndall el investigador que encontró la solución a este problema, al descubrir que determinadas bacterias pueden enquistarse, encerrándose en cápsulas (*esporas*) que resisten la ebullición prolongada.

Cuando se hierva un caldo de cultivo que contiene dichas bacterias (por ejemplo, tal como hizo Tyndall, un caldo de cultivo fabricado con heno como fuente de materia orgánica), algunas de éstas se encapsulan formando esporas que resisten la ebullición. Al bajar la temperatura del caldo, esas esporas se abren y vuelven a aparecer microorganismos allí donde, aparentemente, habían sido eliminados. Tyndall descubrió que si los caldos de cultivo eran sometidos a periodos breves de calenta-

miento intenso, separados por intervalos en los que se dejaba descender la temperatura hasta valores idóneos para el crecimiento microbiano, la esterilización era total y no volvían a aparecer microorganismos en el medio de cultivo. En los periodos en los que el caldo es calentado hasta la ebullición desaparece la casi totalidad de las bacterias, excepto unas pocas que forman esporas. Al dejar enfriar el caldo, estas esporas se abren y las bacterias reanudan sus quehaceres habituales. Si en ese momento se las somete a un nuevo calentamiento rápido, sólo una pequeña fracción de esas pocas bacterias consigue encapsularse de nuevo. Repitiendo el procedimiento varias veces se logra la total eliminación de las bacterias. Esta técnica recibe el nombre de *tindalización*, en honor de su inventor.

El fin de la teoría de la generación espontánea supuso una grave crisis en las investigaciones científicas sobre la vida. En apenas tres años (1859-1862) los trabajos de Darwin y Pasteur habían provocado un giro copernicano en el problema del origen del hombre. El primero había demostrado su relación con el origen de los demás seres vivos y el segundo había refutado que dicho origen pudiera producirse de manera espontánea. ¿Qué alternativa quedaba para explicar el origen de la vida? Para muchos, la respuesta estaba en un acto divino de creación. Y para aquellos que no querían renunciar a la idea de que la vida es un fenómeno natural, que puede explicarse por causas naturales, sólo quedaba la desazón de no poder ofrecer ninguna explicación.

En 1864, Pasteur escribía (la cursiva es nuestra): «Ah! Es que yo la privé [a la sustancia empleada en los caldos de cultivo], es que yo la privo ahora, en este momento, *de la única cosa que no le ha sido dado al hombre producir*, yo la privé de los gérmenes que flotan en el aire, la

privé de la vida, pues la vida es el germen y el germen es la vida.» ¿Por qué se refería Pasteur a la vida como a «la única cosa que no le ha sido dado al hombre producir»? Si el hombre no puede repetir las condiciones en las que la vida surgió por vez primera ¿no será porque dichas condiciones son de índole sobrenatural? Si Pasteur apuntaba en la dirección del acto de creación, Darwin se alineaba entre los que preferían no plantearse una pregunta que, en ese momento, quedaba fuera del alcance de la ciencia. Aunque después de la primera edición de *El origen de las especies*, Darwin no tuvo empacho, en el párrafo final del libro, en atribuir al Creador el origen de la vida ⁽⁵⁾, su auténtico punto de vista sobre el problema lo planteó en una carta de 1863 a su compatriota y amigo, el botánico Joseph Dalton Hooker (1817-1911): «Es un disparate hablar sobre el origen de la vida; se podría hablar también del origen de la Materia.»

Pero la postura de los dos gigantes del siglo XIX iba a cambiar con los años. En 1878, apenas un año después de su triunfo definitivo sobre Bastian, Pasteur escribió, refiriéndose a la generación espontánea: «No creo que sea imposible.» Y cinco años más tarde, en 1883, reconoció su interés por crear vida artificialmente. Por su parte, Darwin manifestaba en 1871, en otra carta a Hooker, que la vida pudo surgir de manera natural «en una pequeña charca caliente, en presencia de todo tipo de sales de amonio y de ácido fosfórico, de luz, calor, electricidad». Ambos comenzaban a considerar las circunstancias en las que la vida podría surgir de la materia inerte. La crisis había pasado, la ciencia volvía a mirar a la cara al problema del origen de la vida.

⁵ Si bien en el Capítulo VIII, dedicado al instinto, Darwin advertía que «debo sentar la premisa de que no me ocupo del origen de las facultades mentales, de igual modo que tampoco lo hago del origen de la vida misma».

El ruso y el americano

Como ya hemos tenido ocasión de exponer en páginas precedentes, las moléculas de las que están formados los seres vivos, las biomoléculas, son muy diferentes de las que componen la materia inorgánica. Entonces dijimos que dichas moléculas sólo se encuentran en los propios organismos, lo que planteaba el problema del origen de las biomoléculas del primer ser vivo.

A comienzos del siglo XIX, estaba muy extendida en la comunidad científica la opinión de que las biomoléculas sólo pueden ser generadas por los propios organismos y que no se producen espontáneamente en la naturaleza. Sin embargo, esta idea fue refutada en 1828, cuando el químico alemán Friedrich Wöhler (1800-1882) fue capaz de sintetizar a partir de sales inorgánicas (cianato de plomo y amoniaco) una molécula orgánica típica de los seres vivos: la urea. La importancia del descubrimiento de Wöhler fue glosada, en 1863, por Thomas Henry Huxley: «No hace muchos años —y no se debe olvidar que la química orgánica es una ciencia joven, que sólo cuenta con unas pocas generaciones de antigüedad, y que no cabe esperar mucho de ella—, no hace muchos años desde que se decía que era completamente imposible sintetizar cualquier compuesto orgánico; es decir, cualquier compuesto no-mineral de los que se encuentran en los seres vivos. Así ha sido durante mucho tiempo; pero ya ha pasado un buen número de años desde que un distinguido químico extranjero consiguió producir urea, una sustancia de carácter muy complejo, que forma parte de productos de desecho de las estructuras animales.»

La urea es una molécula compleja, ampliamente distribuida entre los distintos organismos. En los seres humanos, y en muchos mamíferos, la urea se sintetiza en el hígado, como producto de desecho del metabolismo de los aminoácidos. Cuando éstos son degradados liberan sus grupos amino, que de quedar libres en la sangre o los tejidos darían lugar a amoníaco, una sustancia altamente tóxica. Para evitarlo, el grupo amino es incorporado a una molécula más compleja y mucho menos tóxica, la urea, que, convenientemente diluida en agua, se excreta en la orina.

No obstante el innegable éxito de Wöhler, que marcó el nacimiento de la química orgánica, la investigación científica del origen de la vida topaba aún con dos serios problemas en el siglo XIX. Por un lado, el conocimiento que se tenía de química orgánica, en general, y de bioquímica, en particular, era muy reducido (tal como señalaba Huxley en el párrafo citado anteriormente), lo que limitaba el planteamiento de hipótesis detalladas sobre los procesos químicos que podrían haber originado la vida. Por otra parte, había otra cuestión de difícil solución: si la materia orgánica podía generarse a partir de la materia inorgánica, sin la intervención de los seres vivos, ¿por qué dichos procesos no ocurrían en la actualidad?

Para algunos científicos, la respuesta a esta pregunta era que la vida no se originó en la Tierra, sino que llegó a través del espacio desde otro lugar en donde las condiciones físicas y químicas fueran más favorables para su aparición. Esta hipótesis tuvo en el sueco, premio Nobel de Química, Svante Arrhenius (1859-1927) a uno de sus principales valedores. La idea del origen extraterrestre de la vida ha contado con escaso apoyo (aunque entre sus defensores se han alineado científicos de la talla del premio Nobel de Medicina Harry Francis Compton Crick,

el descubridor junto con James Dewey Watson de la estructura tridimensional del ADN), fundamentalmente porque coloca el problema fuera del alcance de la ciencia experimental y porque es posible concebir teorías alternativas que sí sitúan el origen de la vida en nuestro planeta.

Para comprender en qué circunstancias pudo aparecer la vida en la Tierra, es preciso que volvamos sobre la composición química de nuestro mundo. La actual atmósfera terrestre está dominada por la presencia de nitrógeno (77 por ciento) y oxígeno (21 por ciento). La gran cantidad de oxígeno libre en la atmósfera confiere a ésta un carácter *oxidante*, algo incompatible con las reacciones químicas que han de producirse para que la materia inorgánica se combine y dé lugar a la materia orgánica, que está altamente *reducida*. Más adelante explicaremos con más detalle los conceptos de oxidación y reducción, por ahora nos basta con considerar que un átomo está oxidado si se encuentra unido al oxígeno y reducido si se halla enlazado con el hidrógeno.

La naturaleza oxidante de la actual atmósfera terrestre impide la aparición espontánea de biomoléculas a partir de compuestos inorgánicos; sin embargo, la atmósfera no siempre ha tenido la misma composición. En primer lugar, es sorprendente la gran cantidad de oxígeno libre en la atmósfera actual. El oxígeno es altamente reactivo y tiende a unirse (a oxidar) a los demás elementos químicos, por lo que no debería hallarse libre, sino asociado a otros elementos en forma de óxidos. La única explicación para la alta concentración de oxígeno en la atmósfera presente es la acción de los organismos fotosintetizadores, que rompen las moléculas de agua (H_2O) liberando oxígeno. Es decir, que la presencia de oxígeno en la atmósfera es posterior a la aparición de la vida. Parece

claro pues que la atmósfera en la que tuvieron lugar las reacciones químicas que dieron lugar a la vida carecía de oxígeno, y no era tan oxidante como lo es en la actualidad.

Por otra parte, es muy razonable suponer que la atmósfera primitiva hubo de ser mucho más rica en hidrógeno de lo que lo es hoy día. El hidrógeno es el elemento más abundante del universo y cabe pensar que también fue un constituyente mayoritario en la atmósfera primordial. En planetas de pequeño tamaño, como es el caso de la Tierra, la fuerza de la gravedad no es capaz de retener a los átomos pequeños —y el hidrógeno es el menor de todos— que se van escapando de su atmósfera a lo largo del tiempo. En cambio, los planetas grandes, como Júpiter, tienen un campo gravitatorio lo suficientemente fuerte como para retener los átomos ligeros y por ello sus atmósferas mantienen una composición química más parecida a la inicial. De este modo, la atmósfera de Júpiter es rica en moléculas reducidas, como el *metano* (CH_4) y el *amoniaco* (NH_3). Tomando la atmósfera de Júpiter como modelo de lo que pudo ser la primitiva atmósfera terrestre, se propuso que la atmósfera primordial de la Tierra carecía de oxígeno y era rica en moléculas reducidas, como el metano y el amoniaco.

Entre los que pensaban así se encontraba un bioquímico ruso, Alexander Ivanovich Oparin (1894-1980), que en 1922 presentó a la Sociedad Botánica de Moscú un trabajo en el que proponía que en el seno de una atmósfera de esas características (sin oxígeno, pero rica en agua, metano, y amoniaco), sometida a intensa radiación ultravioleta y sacudida por descargas eléctricas, se habrían producido series de reacciones químicas cuyo resultado sería la aparición de todos los tipos de moléculas orgánicas. Según la teoría de Oparin, estas moléculas se acu-

mularon en los mares primitivos y, a su vez, habrían seguido reaccionando y combinándose entre sí para dar lugar a moléculas cada vez más complejas. Finalmente, estas moléculas complejas se separaron del medio, mediante procesos físico-químicos, en pequeñas vesículas (*coacervados*) a partir de las cuales aparecieron los primeros seres vivos.

La hipótesis de Oparin se benefició de los mayores conocimientos de química orgánica de que se disponía en las primeras décadas de nuestro siglo. Para esas fechas, se habían sintetizado artificialmente numerosos compuestos orgánicos y se conocían bien las bases químicas de dichos procedimientos. Oparin también se basó en el desarrollo de las investigaciones sobre el origen de la Tierra y la posible composición de su atmósfera primitiva. Pero además de estos conocimientos, la teoría de Oparin estuvo muy influida por las ideas del filósofo alemán, y uno de los padres del socialismo, Friedrich Engels (1820-1895), así como por las del propio Darwin.

Del primero, Oparin tomó la idea de que la materia evoluciona a lo largo del tiempo, adquiriendo formas cada vez más complejas que desembocan en la materia viva. Esta idea es crucial, puesto que permite concebir que el abismo existente entre la materia inorgánica y los seres vivos puede ser cubierto en una serie de etapas de complejidad creciente, y no en un único salto. Pero el problema capital para comprender el origen de la vida, a partir de una serie de reacciones químicas de la materia inanimada, lo constituye el hecho de que dichas reacciones químicas se producen de manera aleatoria en muchas direcciones. ¿Cómo pudieron dichas reacciones encadenarse en la dirección adecuada, por sí solas, para dar lugar a algo tan delicadamente ordenado y ajustado como es la materia viva? O dicho en términos más sim-

ples, ¿cómo puede surgir el orden a partir del caos? Oparin encontró la respuesta en la genialidad de Darwin: la selección natural.

En una celebérrima frase, el gran Albert Einstein (1879-1955) dejó clara su opinión sobre el papel del azar en el mundo natural: «Dios no juega a los dados.» En la época de Darwin, muchos de sus críticos, especialmente desde el campo de la paleontología, hacían la misma crítica a su teoría de la evolución (suya y de Wallace). Aquellos científicos no podían concebir que el extraordinario diseño que muestran los seres vivos en todas sus estructuras se debiera a un proceso en cuyas entrañas anidaba el más puro azar. Sin embargo, esas críticas carecían de fundamento. El verdadero descubrimiento de Darwin, la selección natural, es un mecanismo que *dirige* la acción del azar, eligiendo lo mejor (adaptado) entre aquellas variantes producidas aleatoriamente. El dado de Darwin no es el dado al que se refiere Einstein, el dado de Darwin está cargado, trucado, por la selección natural: aunque muchas cosas son posibles, sólo algunas pueden prevalecer.

Así, según Oparin, la evolución química de la materia dio lugar a los coacervados, vesículas rellenas de moléculas orgánicas reunidas azarosamente, y éstos fueron seleccionados en función de su capacidad para perdurar. De este modo, de todos los coacervados que se formaron sólo subsistieron aquellos que contenían determinadas combinaciones de biomoléculas, cuyas reacciones químicas les conferían mayor estabilidad. Y de entre todos los que iban prevaleciendo, triunfaron los que fueron capaces de mantener durante más tiempo la adecuada combinación de moléculas orgánicas, intercambiando materia y energía con el medio circundante. Finalmente, de entre los elegidos se seleccionaron los que adquirie-

ron la capacidad de aumentar de número al ser capaces de dividirse sin perder sus propiedades. Habían nacido los primeros organismos.

Es relativamente frecuente en la historia de la ciencia que dos científicos hagan el mismo descubrimiento, o propongan la misma teoría, de manera independiente y casi simultánea. Tras su primera comunicación de 1922, Oparin publicó en 1924 un libro de modestas dimensiones en el que detallaba su teoría. Posteriormente, en 1936, apareció su obra más conocida y extensa: *El origen de la vida sobre la Tierra*. De manera independiente, cuando aún no se conocían los trabajos de Oparin en Occidente, uno de los científicos más polifacéticos del siglo XX, John Burdon Sanderson Haldane (1892-1964), publicó en 1928 una teoría sobre el origen de la vida muy parecida a la de Oparin. Por ello, a menudo se reúne a ambos autores y se habla de la teoría de Oparin-Haldane.

Durante un cuarto de siglo, las ideas de Oparin (y Haldane) fueron objeto de polémica, sumaron adhesiones y suscitaron rechazos, pero la discusión se mantuvo en el plano estrictamente teórico. Entonces, a comienzos de la década de 1950, un joven estadounidense pensó en realizar un experimento para contrastar la hipótesis fundamental del científico ruso. Este joven se llamaba (y todavía se llama) Stanley Miller y era un modesto estudiante de doctorado, de tan sólo veintitrés años, de la Universidad de Chicago cuando concibió y llevó a la práctica un sencillo experimento, cuyos resultados constituyen uno de los mayores descubrimientos científicos del siglo XX.

Antes de explicar el experimento de Miller y su importancia, merece la pena comentar un aspecto sobre las circunstancias en las que lo realizó. En el tiempo en que Miller efectuó su experimento era estudiante en el labora-

torio del químico Harold Clayton Urey (1893-1981), galardonado en 1934 con el premio Nobel de Química por el descubrimiento del deuterio (¿se acuerdan del deuterio? Es el isótopo del hidrógeno que tiene un neutrón en su núcleo) y uno de los padres de la bomba atómica. Urey también era especialista en el tema de la composición química de la atmósfera primitiva y sus opiniones eran similares a las de Oparin, en que la atmósfera primitiva carecía de oxígeno y era rica en metano, amoníaco y agua. Los estudiantes de Urey conocían bien sus ideas, puesto que él mismo las defendía en los seminarios que impartía. Precisamente fueron las lecciones de Urey las que indujeron a Miller a plantear su experimento.

La mayor parte de los autores que describen dicho experimento tienen gran cuidado en señalar que Miller lo llevó a cabo bajo la atenta dirección de Urey. Sin embargo, existe otra versión, recogida por el científico francés Joël de Rosnay, según la cual la idea de Miller de recrear las condiciones propuestas por Oparin para la atmósfera primitiva, y comprobar si aparecían o no biomoléculas, era especialmente atrevida ya que en dichas condiciones podía formarse una enorme cantidad de compuestos, cuyo análisis estaba fuera del alcance de un simple estudiante de doctorado. Por ello, Miller no habría realizado su experimento bajo la atenta mirada de su director, sino que lo habría llevado a cabo ¡a escondidas!

Aunque la anécdota recogida por De Rosnay es más divertida que la versión *oficial* del experimento de Miller, y cuadra muy bien con cierta mitología sobre las relaciones entre profesores y estudiantes, lo cierto es que es falsa. Afortunadamente, el propio Miller describió en 1974 las circunstancias que rodearon a su trabajo y su relación con Urey. Efectivamente, cuando Miller propuso a Urey la realización de un experimento para contrastar

las hipótesis de Oparin, éste se mostró escéptico ante la idea. En opinión de Urey, el experimento propuesto por Miller podía dar lugar a un sinnúmero de compuestos orgánicos, cuyo análisis requeriría mucho tiempo y esfuerzo. Además, y éste era el principal obstáculo que veía Urey, los resultados podrían no ser concluyentes en ninguna dirección. El profesor se mostraba reacio a embarcar a su alumno en una tesis doctoral de difícil ejecución y muy dudosos resultados. En vez de eso, propuso a Miller otro tema de investigación que le garantizaba la realización de una buena tesis doctoral.

Pero Miller, con la tozudez propia de la juventud, insistió en que ése (la contrastación experimental de las tesis de Oparin), y no otro, era el tema al que quería dedicar su tesis. Ante la insistencia de Miller, Urey le propuso concederle entre seis meses y un año para que probara su idea. Si transcurrido ese tiempo no había conseguido resultados claros, debería renunciar a su propósito y aceptar el tema de tesis que él le proponía. Miller estuvo de acuerdo y *entre ambos* diseñaron el experimento y el aparato para llevarlo a cabo. Miller se puso manos a la obra y, tras algunos ensayos preliminares, en apenas tres meses y medio consiguió resultados claros y espectaculares.

Y entonces ocurrió una anécdota que da cuenta de la auténtica talla moral de Urey. Convencido de que sus resultados eran de gran importancia, Miller pidió permiso a Urey para escribir un artículo y enviarlo a la revista *Science*. Urey le animó a hacerlo. Una vez finalizado, y antes de enviarlo, Miller se lo presentó a Urey para su aprobación. Lo que sucedió entonces fue tan excepcional que merece que dejemos a Miller que lo narre con sus propias palabras: «Entonces escribí un breve artículo incluyendo el nombre de Urey como co-autor y se lo llevé

para su aprobación. Lo primero que me dijo es que retirara su nombre del artículo porque yo había realizado la mayor parte del trabajo por mí mismo, y si su nombre aparecía en el artículo yo recibiría poco o ningún crédito. Aquello fue extraordinariamente generoso por su parte porque en química el director de la investigación casi siempre figura en los artículos resultantes de la tesis del estudiante.»

¿En qué consistió el experimento de Miller y cuáles fueron sus resultados? Miller recreó en el laboratorio las condiciones físicas y químicas que Oparin y su profesor Urey defendían para la primitiva atmósfera terrestre. Construyó un circuito cerrado que constaba de un matraz conectado, mediante un tubo de vidrio, a una campana en la que había situado dos electrodos; de esta campana surgía otro tubo que volvía al primer matraz. A su vez, este tubo había sido doblado en una parte de su trayecto para formar un codo.

El experimento comenzó cuando, tras haber practicado el vacío en el interior del circuito, Miller situó una mezcla de agua, hidrógeno, amoníaco y metano en el interior del matraz. A continuación hizo hervir el agua del matraz, con lo que generó una corriente de aire caliente y vapor de agua. De este modo, la mezcla de agua, hidrógeno, amoníaco y metano (que representaba la hipotética atmósfera primitiva) circuló durante días por el circuito. Al pasar por la campana con los electrodos, la mezcla era sometida periódicamente a descargas eléctricas de 60.000 voltios, que simulaban los relámpagos de la atmósfera primigenia.

Al cabo de una semana, un líquido anaranjado se había ido acumulando en el codo del tubo de vidrio. Miller procedió al análisis meticuloso de dicha sustancia naranja y encontró en ella numerosas moléculas orgánicas, entre

las que se encontraba la urea y, sobre todo, algunos de los aminoácidos presentes en los seres vivos. Frente a lo que teóricamente cabría esperar, a partir de las condiciones de partida, no se había formado una extraordinaria cantidad de moléculas muy diversas, sino que sólo había aparecido un número limitado de ellas, entre las que se encontraban algunas de las biomoléculas esenciales de los seres vivos. Las ideas de Oparin se habían visto espectacularmente confirmadas por Miller: en las condiciones supuestas para la primitiva atmósfera terrestre, los ladrillos de la vida habían aparecido a partir de la materia inorgánica.

Miller publicó sus resultados en la revista *Science* en 1953, el mismo año en que Watson y Crick daban a conocer en *Nature* la estructura tridimensional del ADN. Sin duda, la cosecha de 1953 fue excelente para la biología.

El experimento de Miller fue un aldabonazo en las investigaciones sobre el origen de la vida y abrió el camino hacia su estudio experimental. Desde entonces se han realizado una gran cantidad de experimentos, variando las condiciones de partida, bien las moléculas originales, bien la fuente de energía. Como resultado, se han obtenido experimentalmente todos los tipos de biomoléculas de los seres vivos. Algunos de los éxitos más resonantes en estas investigaciones los obtuvo Juan Oró.

En 1960, Oró mezcló amoníaco y gas cianhídrico con agua y los calentó a 90 grados, condiciones compatibles con las de la Tierra primitiva, obteniendo adenina. Recordarán que la adenina es uno de los componentes de los ácidos nucleicos (ADN y ARN) y del ATP (trifosfato de adenosina), moléculas fundamentales de los seres vivos. El hallazgo fue tan inesperado que, en un primer momento, Oró pensó que se había equivocado. Posteriormente, en 1963, logró sintetizar, también en condicio-

nes similares a las de la primitiva atmósfera, los glúcidos ribosa y desoxirribosa, las otras biomoléculas constituyentes del ADN, el ARN, y el ATP.

Sin embargo, estos éxitos se han visto ensombrecidos en los últimos años al acumularse dudas respecto de que la composición original de la atmósfera terrestre fuera tan favorable a la aparición de las distintas biomoléculas. Hay datos que sugieren que la primitiva atmósfera reductora fue substituida pronto, antes de que se dieran las condiciones para el surgimiento de la vida, por otra de carácter neutro. En esas condiciones, la obtención de biomoléculas no es tan exitosa. Mientras se debate la naturaleza y evolución de la pretérita atmósfera terrestre, se han sugerido otros posibles escenarios para el surgimiento de las biomoléculas, aun en una atmósfera no reductora. Uno de ellos apunta hacia ambientes de tipo volcánico, como las fumarolas del fondo del océano, en las que se dan a la vez altas temperaturas, como fuente de energía, y moléculas reducidas. La segunda posibilidad, presentada por Oró en los años sesenta, eleva, una vez más, su vista hacia cielo, hasta el espacio exterior.

Los resultados del experimento de Miller recibieron un gran respaldo por el descubrimiento de biomoléculas de origen extraterrestre. Desde antiguo, se conoce la existencia de moléculas orgánicas (aminoácidos, bases nitrogenadas, y lípidos) en un tipo especial de meteoritos conocidos como *condritas carbonáceas*. Durante algún tiempo, no estuvo claro el origen de dichas biomoléculas, pues no podía descartarse que se tratara de contaminación de la propia atmósfera terrestre. Sin embargo, un suceso afortunado vino a despejar las dudas. En 1969 cayó en Australia, cerca de los campos auríferos de Murchinson, un meteorito de este tipo que pudo ser analizado poco después de su caída, evitando la contamina-

ción. Los resultados del análisis son muy reveladores: se hallaron seis de los veinte aminoácidos empleados por los seres vivos. Estos aminoácidos habían aparecido igualmente en el experimento de Miller y en cantidades similares. De modo que el experimento de Miller tiene una validez universal: allí donde se den las condiciones adecuadas, aparecerán las moléculas de la vida. Desde este punto de vista, la cuestión de si dichas moléculas se formaron en la Tierra, o vinieron de fuera, tiene una trascendencia menor. Lo realmente importante es que la materia inorgánica puede generar *espontáneamente* la materia orgánica.

En los últimos años hemos ido descubriendo que la presencia de biomoléculas en el espacio exterior no es un suceso excepcional, sino relativamente frecuente. Así nos lo confirman los análisis realizados en meteoritos preservados de la contaminación terrestre durante miles de siglos bajo el hielo antártico. También hemos detectado, merced a la radioastronomía, la presencia de biomoléculas en nubes de polvo galáctico y en el espacio interestelar. En 1988 la sonda *Giotto* de la Agencia Espacial Europea atravesó la estela del cometa *Halley*, revelando una insólita cantidad de materia orgánica.

El primer paso ya está dado. La formación de biomoléculas a partir de la materia inorgánica es un hecho incuestionable a día de hoy. Quedan aún por esclarecer las siguientes etapas en el camino hacia la vida: cómo pudieron las moléculas orgánicas organizarse espontáneamente para dar lugar al primer ser vivo. En esta fase de las investigaciones hay numerosas líneas de trabajo y se han formulado diferentes modelos contrapuestos. Pero aún carecemos de resultados experimentales que nos permitan acotar significativamente el campo de lo posible. Tal vez estemos próximos a la realización de un ex-

perimento (quizá se esté llevando a cabo en estos momentos) que, como el de Miller, nos alumbre en nuestro conocimiento sobre el origen de la vida.

Mientras llega ese momento, cedemos, de nuevo, la palabra a Miller, quien a la pregunta de si el origen de la vida es un problema al alcance del conocimiento del ser humano contestó: «Creo que no hemos dado todavía con el truco correcto. [...] Cuando encontremos la respuesta, será tan condenadamente simple, que todos nos preguntaremos ¿cómo no se me ocurrió a mí antes?»

¿Solos o acompañados?

La gran mayoría de la opinión pública está firmemente convencida de la existencia de la vida extraterrestre. Es tanta la seguridad que existe al respecto, que casi se ha convertido en un dogma de fe, propio de nuestros tiempos. Cuando alguien anuncia que ha presenciado una aparición de la Virgen, el escepticismo, si no la burla, es la reacción más frecuente en la mayoría de los medios de comunicación. No importa que los testigos de la presunta aparición sean numerosos, o que haya entre ellos personas intelectualmente bien preparadas, la incredulidad es la norma. Esta situación contrasta vivamente con el pábulo que se concede al avistamiento de naves alienígenas, e incluso al contacto personal y directo con sus tripulantes. La cinematografía y la literatura de nuestro tiempo están tan llenas de extraterrestres que casi produce extrañeza no encontrárnoslos por la calle.

Si alguien decide poner en duda públicamente la existencia de la vida fuera de nuestro planeta corre el peligro de ser tratado de ignorante y recibir comentarios lapidarios del tipo de «¡Claro que existe vida, pero diferente de

la que conocemos!» o «¡Cómo vamos a ser los únicos seres vivos del universo!»

El primer argumento no deja de ser divertido, porque si la vida extraterrestre es realmente tan distinta, ¿cómo podríamos reconocerla aunque nos la topáramos de bruces? De hecho, la única posibilidad que tenemos de reconocer la existencia de vida fuera de nuestro mundo estriba en que se *parezca* sustancialmente a la vida con la que estamos familiarizados. Existe un ejemplo histórico de nuestra capacidad para reconocer como tales a seres vivos muy diferentes de los conocidos. Cuando Leeuwenhoek descubrió los microorganismos, en 1683, no tuvo dudas en catalogarlos como seres vivos, pese a que diferían enormemente de los organismos conocidos hasta la fecha. Más allá de la gran diferencia existente entre los microbios y los animales, Leeuwenhoek percibió una característica que él pensaba que era consustancial a los animales: el movimiento autónomo.

Hoy día existe una rama de la biología que se encarga de determinar cuáles son esas características básicas de la vida, con el objeto de buscarla e identificarla fuera de nuestro planeta. Se trata de la *exobiología*. De manera jocosa, se suele decir que la exobiología es la única ciencia sin objeto de estudio, puesto que no se conoce ningún organismo extraterrestre. Sin embargo, a Cuvier, el padre de la paleontología, le podría corresponder el honor de haber sido el primer y único (hasta el momento) exobiólogo de la historia, ya que tuvo la ocasión de analizar a un ser que no era de este mundo.

Cuvier fue el creador de uno de los instrumentos conceptuales más importantes para el estudio de los fósiles: el *Principio de Correlación Orgánica*. Este Principio sostiene que las diferentes partes de los seres vivos están tan delicadamente ajustadas, funcional y estructuralmen-

te, las unas a las otras, que es posible deducir el modo de vida y la estructura completa de un organismo a partir de algunas de sus partes. Basándose en este principio, Cuvier maravilló a la sociedad de su época reconstruyendo organismos extinguidos a partir de unos pocos fósiles. Hoy día los paleontólogos, conscientemente o no, seguimos usando el Principio de Correlación Orgánica de Cuvier en nuestras reconstrucciones. La carrera académica de Cuvier fue meteórica y hacia 1800, con tan sólo treinta y un años, ya era catedrático del College de France. Pero su brillantez científica y académica no estaba acompañada de encanto personal. Cuentan que sus alumnos le odiaban. Al parecer, según recoge Herbert Wendt en su libro *Tras las huellas de Adán*, los alumnos de Cuvier decidieron un día vengarse de su detestado profesor, gastándole una broma especialmente pesada. Una noche, se deslizaron en su dormitorio y uno de ellos, convenientemente disfrazado de diablo, se acercó al dormido Cuvier diciendo algo así como: «¡Despierta! Soy el Demonio y vengo a devorarte.» Ocultos en las sombras de la habitación, el resto de compañeros se relajaban pensando en el terrible susto que le iban a propinar a Cuvier. Pero éste, lejos de asustarse, abrió los ojos y, con gran sangre fría, contestó: «Imposible, tienes cuernos y pezuñas. Por el Principio de Correlación Orgánica has de ser herbívoro.» Tras un segundo de silencio, una salva de aplausos llegó desde la oscuridad de la alcoba.

Cierta o no, la anécdota de Cuvier nos ilustra sobre un punto realmente interesante: la paleontología también se enfrenta al problema de estudiar seres vivos que no están en nuestro planeta. El tiempo, y no el espacio, separa a los organismos que investiga la paleontología de los que conocemos hoy día. Y como la exobiología, también la paleontología intenta aprehender las cualidades básicas de la vida para poder usarlas en sus estudios.

Pero volvamos al caso de la vida extraterrestre. El segundo de los argumentos («¡Cómo vamos a ser los únicos seres vivos del universo!») tiene más enjundia y puede contemplarse desde una perspectiva científica.

En 1961, el astrofísico estadounidense Frank Drake construyó una ecuación, conocida como la *Fórmula de Green Bank*, para calcular cuántas civilizaciones extraterrestres cabe esperar que existan, a día de hoy, en nuestra galaxia. Pero como nuestro interés por esta cuestión va más allá del momento presente, podemos modificar levemente dicha ecuación para calcular cuántas civilizaciones extraterrestres han surgido en toda la historia de la galaxia. Desde esta perspectiva, la *Ecuación Green Bank* (modificada) es como sigue:

$$N = R \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c$$

No se asuste, la ecuación es bien sencilla. N es el número total de civilizaciones que ha habido en la galaxia desde su formación. R es el total de estrellas formadas en la galaxia. El factor f_p es la fracción de dichas estrellas que tienen sistemas planetarios describiendo órbitas a su alrededor. El número promedio de planetas adecuados para la vida en cada sistema planetario está representado por el coeficiente n_e . La probabilidad de que la vida surja en un planeta con las condiciones propicias es f_l . El coeficiente f_i representa la probabilidad de que surja la inteligencia y f_c , es la probabilidad de que la vida inteligente desarrolle una civilización tecnológica. Como lo que aquí nos interesa es la existencia o no de vida extraterrestre, prescindiremos de los últimos dos coeficientes f_i y f_c .

Según los astrónomos, el número aproximado de estrellas en nuestra galaxia (R) se acerca a 2×10^{11} . Al parecer, es razonable suponer que la mitad de esas estrellas contengan sistemas planetarios ($f_p = 0,5$) y que, en promedio, cada sistema incluya dos planetas con las condiciones adecuadas para el surgimiento de la vida ($n_e = 2$). Esto nos deja con la asombrosa cantidad de 2×10^{11} planetas útiles para la vida. Para que se hagan una idea de lo que representa ese número, piensen que es un poco más que la distancia de la Tierra al Sol, expresada en metros, o la cantidad de segundos que hay en 6.342 años.

Quizá le parezca que son unos cálculos demasiado optimistas. Es posible, pero tienen su razón de ser. En primer lugar, el que las estrellas tengan planetas en órbita a su alrededor es una consecuencia inevitable del proceso de formación de éstas. La estrella que mejor conocemos, el Sol, tiene su sistema planetario, y se conocen más casos en la galaxia. De manera que suponer que la mitad de las estrellas pueden tener planetas a su alrededor no es descabellado.

En cuanto a que cada sistema planetario tenga, en promedio, dos planetas confortables para la vida, tampoco parece exagerado. No hay ninguna razón para suponer que los planetas de los hipotéticos sistemas planetarios tengan que estar concentrados en las proximidades de su correspondiente estrella, donde la temperatura sería muy elevada, o todos situados muy alejados de ella, lo que implicaría temperaturas demasiado bajas. Lo razonable es pensar que el proceso de formación de las estrellas, y de sus planetas acompañantes, haya dado lugar a planetas de distintas masas, emplazados a diferentes distancias de la estrella madre: unos cercanos, otros situados a distancias intermedias y otros más alejados.

También es razonable suponer que un buen número de estos planetas tengan la suficiente masa como para generar un campo gravitatorio capaz de retener una atmósfera. Por ello, dos planetas susceptibles de generar y albergar la vida no parece un número disparatado.

Aunque, si eso es cierto, ¿por qué nuestro sistema solar, el único que conocemos con detalle, sólo contiene un planeta con vida, la Tierra? ¿No será que, finalmente, los cálculos sí son demasiado optimistas? Lo cierto es que en nuestro sistema solar hay al menos dos planetas susceptibles de albergar la vida. Estos planetas son la Tierra... y Marte.

El planeta rojo está situado algo más lejos del Sol que el planeta azul pero la diferencia no es relevante en cuanto a las condiciones de Marte para alojar la vida. Una diferencia más importante estriba en el tamaño de nuestro vecino cósmico. Marte es sensiblemente más pequeño que la Tierra; en consecuencia, su campo gravitatorio es más débil y su atmósfera más tenue. Esta sí que es una dificultad seria, pero no insalvable, para el desarrollo de los seres vivos. Una atmósfera poco densa deja pasar hasta la superficie una gran cantidad de radiación ultravioleta, letal para cualquier ser vivo. Ahora bien, el agua líquida puede servir como un eficiente filtro para los rayos ultravioleta y la vida podría cobijarse bajo una capa protectora de agua.

Desgraciadamente, en Marte no hay agua líquida. El planeta está demasiado frío y el agua se encuentra congelada. Pero esto es lo que ocurre en la actualidad; hay indicios muy firmes de que en el pasado remoto Marte gozó de temperaturas más benignas y de que el agua líquida circuló por su superficie. De ser así, la vida podría haber aparecido en Marte y permanecer aún relictas bajo la capa de hielo de sus casquetes polares. De hecho,

recientemente se han encontrado en nuestro planeta bacterias y algas unicelulares que viven en condiciones similares bajo los hielos antárticos. Quizá esos hipotéticos marcianos (seguramente microbios) se hayan extinguido, pero siempre quedaría la posibilidad de encontrar huellas de su existencia. Esta probabilidad abre el campo a una nueva ciencia: la *exopaleontología*.

Que Marte está considerado como un magnífico candidato para albergar (o haber albergado) la vida, lo prueba el hecho de que se hayan enviado dos naves, las *Viking 1* y *2*, convenientemente pertrechadas de los más refinados ingenios para detectar la presencia de seres vivos. Ambas alcanzaron la superficie marciana en 1976, con un intervalo de un mes y medio, en puntos separados en cerca de 6.500 km, y llevaron a cabo una serie de experimentos destinados a detectar la presencia de vida en Marte. En un primer momento, los resultados obtenidos en tales experimentos parecían apuntar a la existencia de vida en Marte, pero análisis más detallados hicieron llegar a la conclusión de que se había tratado de un error de interpretación..., aunque siempre quedará una sombra de duda.

En 1996 se avivó la esperanza de encontrar vida de origen extraterrestre. En agosto de ese año, se publicó que en el interior de un modesto meteorito (de algo menos de dos kilogramos de peso), que lleva la sigla de ALH84001, recogido en 1984 en los hielos de la Antártida se habían encontrado nódulos de carbonatos, cuya composición química incluye moléculas y estructuras orgánicas similares a las generadas por las bacterias terrestres. El meteorito ALH84001 llegó a la Tierra hace 13.000 años, procedente de la superficie marciana de donde fue arrancado hace 16 millones de años por el impacto de un gran asteroide contra Marte. Desgracia-

damente, aunque el origen marciano de ALH84001 está fuera de toda duda, la naturaleza biológica de las presuntas biomoléculas es muy discutible. Tras el gran alboroto inicial, una parte sustancial de la comunidad científica no considera la evidencia hallada en ALH84001 una prueba incuestionable de vida alienígena.

En cualquier caso, haya vida en él o no, Marte parece ser *el otro* planeta habitable que le corresponde a nuestro sistema solar según la estadística.

Hasta aquí la parte de la ecuación de *Green Bank* que compete al mundo inorgánico. Pero ahora se trata de establecer en cuántos de los planetas potencialmente fértiles se puede haber originado la vida. Para ello es preciso preguntarse cuál es la probabilidad de que surja la vida cuando todas las circunstancias están a su favor (el coeficiente f_i de la ecuación). Si, como opinan algunos, la vida es una regularidad de la materia, entonces dicha probabilidad tomará un valor próximo a 1 (sucederá con bastante frecuencia) y el universo bullirá de vida. Pero si, como piensan otros, la vida es una singularidad, entonces la probabilidad de que aparezca es indistinguible de cero (casi nunca ocurrirá), y deberíamos ir haciéndonos a la idea de que estamos solos.

El paladín de la visión más pesimista fue Jacques Monod, quien en su libro *El azar y la necesidad* expresó la convicción de que la vida es un fenómeno de tan baja probabilidad que no cabe esperar que haya tenido lugar en otro lugar o en otro momento: «La antigua alianza ya está rota; el hombre sabe al fin que está solo en la inmensidad indiferente del universo de donde ha emergido por azar.» Según Monod, el fenómeno de la vida es una singularidad de origen natural; es decir, compatible con

las leyes que rigen el universo, aunque no es inevitable, ni siquiera predecible, a partir de éstas. La vida es sólo uno de entre los muchos acontecimientos posibles con una probabilidad *a priori* de producirse casi nula.

Pero existen visiones alternativas a la de Monod, procedentes del campo de la biología molecular y de la rama de la física que estudia la termodinámica de los sistemas alejados del equilibrio. Desde el primero de ellos se han postulado modelos teóricos, que cuentan con base experimental, que reducen el campo de acción del azar en el camino hacia la vida. En síntesis, estos modelos postulan que a partir de un conjunto de biomoléculas sencillas puede establecerse un fenómeno de evolución, regido por la selección natural, que desemboque en la aparición de sistemas moleculares complejos con algunas de las características básicas de los seres vivos: estabilidad físico-química, autorreplicación eficaz, y capacidad de evolucionar a lo largo del tiempo.

Por otra parte, se ha descubierto que en los sistemas muy alejados del equilibrio termodinámico la materia se organiza espontáneamente en estructuras muy ordenadas, llamadas *estructuras disipativas*. Un sistema está en equilibrio termodinámico cuando la energía y la materia del mismo están homogéneamente distribuidas en él. Esta distribución homogénea es el estado más desordenado posible del sistema, por lo que el Segundo Principio de la Termodinámica nos asegura que todos los sistemas cerrados tenderán al estado de equilibrio por ser el de máximo desorden (o, si lo recuerdan, de mayor entropía).

Veamos un ejemplo sencillo: si usted llena la bañera de agua fría e introduce a continuación una bolsa de agua caliente habrá creado una situación de desequilibrio termodinámico, ya que el calor no está distribuido homogé-

neamente por el sistema, hay una zona más caliente que otra. Pero esta situación dura poco tiempo, el agua fría absorbe calor del agua caliente y enseguida se igualan las temperaturas entre el agua del interior y del exterior de la bolsa. El calor se ha distribuido homogéneamente, se ha restablecido el equilibrio termodinámico y el Segundo Principio se anota un nuevo triunfo.

Ahora bien, hay situaciones en las que los sistemas están alejados del equilibrio de forma permanente. Los océanos terrestres están siendo calentados de forma distinta en el ecuador que en las regiones árticas. Inexorablemente, debido a la forma esférica de la Tierra, la radiación solar mantiene al conjunto de los océanos en una situación alejada del equilibrio termodinámico. Y en esta situación asistimos a un prodigio: el agua se pone espontáneamente en marcha y aparecen ríos en el seno del propio mar. Son las corrientes oceánicas, que transportan agua cálida hacia las regiones frías y agua gélida hacia las zonas calientes. Estas corrientes oceánicas son estructuras muy ordenadas, con billones de moléculas trasladándose al unísono en una dirección determinada. Las corrientes oceánicas son un ejemplo muy simple de estructura disipativa, generada en un sistema alejado del equilibrio. Evidentemente, la existencia de las corrientes acelera el proceso de intercambio de calor entre las regiones frías y cálidas y, por lo tanto, están al servicio del restablecimiento del equilibrio termodinámico.

Nuestro planeta recibe una ingente cantidad de energía procedente del Sol. Gran parte de esta energía llega en forma de luz, una forma de energía de *alta calidad*. Gran parte de esta energía es reflejada de vuelta al espacio exterior y una pequeña porción es absorbida por las rocas y el agua de la superficie, calentándose al hacerlo. Por la noche, los objetos calentados durante el día de-

vuelven al espacio la energía absorbida en forma de radiaciones infrarrojas, una forma de energía de *baja calidad*. De manera que en el proceso se convierte luz, energía *muy ordenada*, en calor, la forma más *desordenada* de la energía.

Si nos detenemos a reflexionar sobre las líneas anteriores, llegaremos a la conclusión de que la superficie terrestre, inundada de luz, es un sistema muy alejado del equilibrio en relación con el negro espacio exterior. En estas circunstancias, cabría esperar la aparición de estructuras disipativas que acelerasen el proceso de conversión de la luz en calor. Efectivamente, dichas estructuras disipativas existen: son los seres vivos. Los organismos fotosintetizadores absorben una gran cantidad de luz del Sol, que de otra manera se reflejaría hacia el espacio exterior. La luz atrapada por dichos organismos es convertida en materia orgánica, que a su vez es usada como combustible para obtener la energía con la que los seres vivos escapamos a la tiranía del Segundo Principio. Y en este proceso, toda la luz captada en la fotosíntesis es transformada en calor. De manera que la biosfera (el conjunto de seres vivos) se mantiene viva transformando la luz en calor, acelerando el aumento del desorden en el Universo.

Enfocado el problema desde esta perspectiva, que contempla a los seres vivos como estructuras disipativas, la vida aparece como un fenómeno no sólo compatible con las leyes de la física, sino casi inevitable. Para decirlo con las palabras del investigador belga, de origen ruso, y premio Nobel de Física, Ilya Prigogine: «Pero no parece descabellado considerar que el fenómeno vida es tan previsible como el estado cristalino o el estado líquido.»

Como se puede ver, no existe acuerdo entre los científicos sobre la naturaleza de la vida, suceso azaroso e

irrepetible o inevitable y habitual en el universo. Sin embargo, a decir verdad, la segunda de las posibilidades es la que goza hoy de más partidarios.

Nosotros no somos biólogos moleculares, ni biofísicos, ni especialistas en termodinámica, por lo que no entramos a discutir esas cuestiones. Pero hay un aspecto del problema, apuntado por Monod, que sí nos atañe como estudiosos de la vida del pasado. Si la vida es el resultado inevitable de las propiedades físico-químicas de la materia, ¿no debería haber surgido más de una vez en un planeta tan hospitalario como el nuestro? La universalidad del código genético nos garantiza que todos los seres vivos de nuestro mundo procedemos de la misma forma de vida ancestral: en nuestro mundo sólo hay una forma de vida.

Desde luego, las condiciones de nuestro mundo han cambiado mucho desde que apareció la vida, y no sólo en cuanto a composición química o condiciones físicas. Tal como ya señaló Darwin (en la misma carta a Hooker de 1871 que hemos mencionado más arriba), la propia existencia de los seres vivos impide la aparición de nuevas formas de vida: «Hoy en día materia como ésa sería instantáneamente devorada o absorbida, lo cual no habría sido el caso antes de que las criaturas vivientes fueran formadas.» Sin embargo, como también apunta Darwin, este argumento no es aplicable al momento inicial, cuando aún no había seres vivos sobre la faz de la Tierra. En aquellas condiciones, ¿no deberían haberse originado varias formas diferentes de vida, distintas de la que conocemos en el momento presente, al menos en sus códigos genéticos?

Para que las biomoléculas que se formaban en la atmósfera primitiva, e iban cayendo sobre la superficie terrestre, pudieran reaccionar unas con otras en el camino

hacia la vida, era necesario que se cumplieran dos condiciones: primero, que se diluyeran en un medio acuoso y, segundo, que se encontraran en altas concentraciones dentro de dicho medio. Si la concentración fuera baja, las probabilidades de que se encontraran y pudieran reaccionar unas con otras disminuyen drásticamente. De este modo, se ha propuesto que uno de los medios ideales para la aparición de la vida serían charcas en las que la evaporación del agua provocaría la adecuada concentración de biomoléculas. Según ese modelo, tuvo que existir un gran número de tales charcas, aisladas unas de otras y representando, cada una de ellas, un medio ambiente diferente. En esas condiciones, en cada charca se pudo producir el proceso de aparición de la vida. Y si la vida es un suceso de alta probabilidad, tuvo que aparecer varias veces en algunas de aquellas charcas. ¿Dónde están esas formas distintas de vida, cómo es que no han llegado hasta nosotros?

Puede argumentarse que tal vez aparecieron, pero que un posterior proceso de competencia entre todas ellas ha seleccionado únicamente a la que actualmente conocemos, por ser la más apta. Esta argumentación choca con lo que observamos en la biosfera actual, en donde la competencia entre especies, la disparidad de medios, y el aislamiento geográfico han producido y mantenido a lo largo del tiempo una extraordinaria diversidad biológica. Más aún, conocemos numerosos casos de *fósiles vivientes* (incluyendo tipos muy primitivos de bacterias), que son organismos representantes de grupos biológicos que florecieron en el pasado y que luego fueron reemplazados por la competencia con otras especies mejor adaptadas. ¿Puede alguien creer que en la Tierra primitiva sólo existiera un tipo de medio ambiente, común a toda la superficie del planeta y netamente favorable al único tipo de vida que conocemos en la actualidad? ¿Se puede

defender que entonces no existían barreras geográficas entre los numerosos lugares, charcas o mares, en los que la vida pudo originarse, y que se produjo un fenómeno de competencia a escala planetaria de consecuencias tan devastadoras que liquidó totalmente a todas las formas de vida diferentes de la actual, sin dejar ni un solo representante de alguna de ellas en algún rincón del planeta? La explicación alternativa es aceptar que sólo conocemos una forma de vida en nuestro planeta porque ésta se originó una única vez, en un momento determinado y en un lugar concreto. O sea, un suceso afortunado.

Como pueden ver, hay argumentos a gusto de todos. Solamente el día en que se genere, mediante un mecanismo repetible, un ser vivo en un laboratorio, o encontremos evidencia de vida extraterrestre, habremos resuelto el dilema a favor de los que opinan que la vida es un suceso de alta probabilidad en el universo. Mientras ese día llega, ya hemos avanzado un largo trecho en la comprensión del proceso que originó al primer ser vivo. Quizá aún no podamos saber cuánto hubo de azar y cuánto de necesidad en el origen de la vida, pero si hay una cosa de la que estamos seguros: no es necesario invocar causas sobrenaturales para explicarlo. Sea un suceso previsible o azaroso, la vida es compatible con las leyes que rigen al universo.

En cuanto a nuestra propia opinión sobre si la vida es un fenómeno de alta o baja probabilidad, y expresándolo en forma de respuesta a la pregunta que da título a este capítulo, no esperamos que haya muchos inquilinos en este vecindario.

Alborada

Nuestro planeta es un mundo que está mudando continuamente su piel de roca. El calor generado por las desintegraciones radioactivas que tienen lugar en su seno hace que bajo los primeros kilómetros de rocas sólidas (*litosfera*) exista una gruesa capa en la que las rocas están semifundidas (*astenosfera*). Sobre esta banda de roca fluida se desliza la capa rígida superior, provocando el movimiento de las masas continentales, reuniéndolas o separándolas. En determinados lugares de la superficie del globo, el material ardiente del interior terrestre escapa de su encierro y, al contacto con el agua o el aire, se solidifica formando nueva litosfera. También existen lugares en los que buena parte de la fría y dura litosfera se hunde (*subduce*) hacia el interior de la Tierra, en donde volverá a fundirse en parte.

Las rocas que forman los continentes son más ligeras que aquellas que componen los fondos oceánicos y por ello las masas continentales siempre permanecen *a flote*, sin verse arrastradas hacia las zonas más profundas del interior del planeta. Pero la superficie de los continentes está siendo denudada de manera implacable por la acción del viento y, sobre todo, del agua, impulsados por la energía del Sol. Los sedimentos originados por estos procesos se acumulan en determinadas regiones y son compactados para originar nuevas rocas: las rocas sedimentarias.

La vida de las rocas sedimentarias tampoco es apacible. Sometidas al colosal empuje de los continentes, en su eterno deambular, son plegadas y fracturadas, originando así buena parte de las cadenas montañosas de nuestro mundo, sobre las que vuelven a actuar las infatiga-

bles limas del viento y del agua. En otras ocasiones, los sedimentos son arrastrados junto con la corteza oceánica sobre la que se depositaron hacia los candentes abismos del interior terrestre, donde se funden y permanecen hasta que puedan volver, en forma de lava, a la superficie del planeta para comenzar un nuevo ciclo.

Es fácil comprender que, sometida a este incesante ajetreo, la litosfera terrestre ha sido reciclada muchas veces desde que se formó nuestro mundo, y que ya no queda en él ninguna de las rocas que constituyeron su primera piel. A pesar de ello, los científicos están muy seguros de que nuestro planeta se formó hace algo más de 4.500 millones de años. Esta cifra se deduce teóricamente a partir del proceso por el que se piensa que se originó nuestro sistema solar; según esos cálculos, los planetas debieron de estar ya formados entre hace 4.500 y 4.700 millones de años. Sin embargo, en los años sesenta del siglo XX la roca terrestre más antigua conocida tenía una edad de tan sólo 3.800 millones de años, lo que dejaba un enojoso lapso de tiempo de más de 700 millones de años respecto de las predicciones de los modelos teóricos. Pero ya hemos dicho que no cabe esperar encontrar en la actual litosfera terrestre ninguna roca del tiempo del origen del planeta. En esas condiciones ¿era posible contrastar el modelo? La respuesta podía encontrarse en nuestra vecina, la Luna.

La Luna es un planeta inerte, cuyo pequeño tamaño hace que su calor interno se disipe rápidamente hacia el espacio exterior. En consecuencia, el interior lunar es uniformemente rígido, sin capas fluidas. Por otra parte, la Luna carece de atmósfera y de agua líquida, por lo que no se producen fenómenos de erosión como los terrestres. De modo que las rocas de la superficie lunar no han sufrido un reciclaje como el que experimentan las de la

Tierra. En la Luna sí es esperable encontrar rocas tan viejas como el propio planeta. Pero, ¿cuándo se originó la Luna?, ¿ocurrió antes o después de la formación de la Tierra?

Se han propuesto tres hipótesis para explicar la formación de nuestro satélite. La primera defiende que se originó en otro lugar del universo y luego fue capturada por el campo gravitatorio terrestre. Esta idea está hoy abandonada porque es muy difícil de explicar, físicamente, cómo pudo producirse la captura y estabilización, en una órbita tan cercana a nuestro planeta, de un cuerpo celeste tan grande (en relación con el tamaño de nuestro mundo).

La segunda posibilidad es que la Luna se originase independientemente, en el mismo lugar que ocupa actualmente, pero por un proceso similar al que dio lugar a la Tierra. En este caso, ambos planetas tendrían edades muy similares. Sin embargo, la composición de la Luna es difícilmente compatible con esta hipótesis. Si se hubiera originado en el mismo lugar, y por idéntico proceso, que la Tierra, la Luna debería tener una composición similar a la del planeta azul. Pero esto no es así, la Luna es menos densa que la Tierra, lo que sugiere una composición distinta.

Curiosamente, la hipótesis que goza hoy de aceptación casi general fue propuesta originalmente por el segundo hijo de Darwin, George Howard Darwin (1845-1912), en la última década del siglo XIX. Según esta teoría, la Luna procede de la propia Tierra. En su primera formulación, esta hipótesis sostenía que la fuerza centrífuga generada por la rotación terrestre pudo haber causado el desprendimiento de parte de la masa de la Tierra, cuando ésta aún no estaba solidificada. Hoy día se piensa, más bien, en una colisión entre la Tierra primigenia y un gigantesco

cuerpo celeste, de un tamaño intermedio entre el de la Luna y Marte. La descomunal energía liberada en el titánico impacto pudo proyectar hacia el espacio a una enorme cantidad de material que acabó concentrándose en la actual Luna. Según los defensores de esta teoría, la mayor parte de los residuos proyectados al espacio, y de los que se formó la Luna, provinieron del propio cuerpo que impactó contra la Tierra, que sería mucho más pobre en hierro que nuestro planeta, lo que explicaría la menor densidad de nuestro satélite.

Si, como piensan la mayoría de los científicos dedicados a esta cuestión, la existencia de la Luna se debe a un suceso casual, cual es un choque entre planetas, debemos felicitarnos por nuestra buena fortuna. Si tal episodio no hubiera ocurrido, si la Luna no existiera, las condiciones de nuestra querida Tierra serían bien diferentes de las que conocemos. En primer lugar, el ciclo día/noche no sería de veinticuatro horas, sino mucho más corto, de alrededor de quince horas. Esto es así porque la presencia de un cuerpo celeste tan grande como la Luna, situado tan cerca de nosotros, frena la velocidad de rotación de nuestro mundo debido a la fricción de las mareas. Pero la influencia más dramática que ejerce la Luna sobre nuestro planeta es la de estabilizar las variaciones en la inclinación del eje de rotación de nuestro mundo. Esta inclinación determina el ciclo de las estaciones y sus variaciones hacen que cíclicamente, cada muchos miles de años, las estaciones sean más o menos marcadas. Al estabilizar las variaciones en la *oblicuidad*, o inclinación, del eje de rotación terrestre, la Luna impide que se produzcan fluctuaciones bruscas y muy amplias, actuando de estabilizador climático de la Tierra. Para decirlo sencillamente, si la Luna no existiera la Tierra se habría visto sometida, a lo largo de su historia, a fluctuaciones climáticas muy rápidas y radicales, lo que habría supuesto un

serio inconveniente para el desarrollo de la vida. Si la Luna no estuviera en el cielo, seguramente la Humanidad no estaría en la Tierra para echarla de menos.

En cualquier caso, la hipótesis sobre el origen lunar que más partidarios suma en la actualidad considera que la Luna es contemporánea o poco posterior a la formación de la Tierra, por lo que sus rocas más antiguas son un buen indicador de la antigüedad terrestre. En esa idea los astronautas de las distintas misiones Apolo recibieron el encargo de traer de vuelta muestras de rocas lunares para establecer su edad. Y entonces comenzó un auténtico *thriller* científico. Una tras otra, las diferentes expediciones fueron trayendo rocas selenitas, cuyas antigüedades eran, para frustración de los científicos, entre 3.100 y 4.200 millones de años. Finalmente, en el curso de la última misión lunar, en diciembre de 1972, los astronautas del Apolo 17 Eugene Cernan y Harrison Schmitt recogieron una muestra cuya antigüedad resultó ser de al menos 4.600 millones de años. Las predicciones sobre la edad de la Tierra habían sido confirmadas.

Estos resultados han sido reforzados posteriormente por el hallazgo en nuestro planeta de cristales de circón (incluidos en rocas sedimentarias más modernas) con una antigüedad de 4.270 millones de años. De modo que la antigüedad de nuestro planeta parece estar firmemente establecida. Ahora bien, lo que realmente nos interesa es saber cuáles son las rocas sedimentarias más viejas, porque solamente en su seno podremos buscar los rastros de los primeros seres vivos.

Uno de los lugares del mundo en donde pueden hallarse las rocas más veteranas de nuestro planeta se encuentra en el distrito de Isua, en la región occidental de Groen-

landia. Allí hay estratos datados en alrededor de 3.800 millones de años. Las rocas de Isua se formaron en un ambiente en el que había agua líquida, temperaturas tropicales y fenómenos de vulcanismo. En su interior, se han hallado microsferas de materia orgánica que se han presentado como fósiles de células primitivas. Esta interpretación goza de poco crédito en la actualidad, pero hay un aspecto de la composición química de las rocas de Isua que es realmente intrigante. Se trata de la proporción entre los dos isótopos estables del carbono.

El isótopo del carbono más abundante en nuestro planeta es el Carbono-12 (o ^{12}C), que constituye algo menos del 99 por ciento del total. El isótopo más famoso es el radioactivo Carbono-14 (^{14}C), muy raro, que se emplea para realizar dataciones radiométricas. Y el isótopo menos conocido es el Carbono-13 (^{13}C), que constituye poco más del 1 por ciento del carbono terrestre. La diferencia entre los tres radica en el número de neutrones de sus núcleos: el ^{12}C tiene 6 neutrones y los isótopos ^{13}C y ^{14}C presentan, respectivamente, 7 y 8 neutrones en sus núcleos. El ^{12}C y el ^{13}C son isótopos estables; esto es, no sufren desintegración radioactiva.

Lo que a nosotros nos interesa es que los seres vivos se muestran muy exquisitos a la hora de elegir las moléculas de dióxido de carbono (CO_2) con las que formarán su propia materia orgánica, mostrando una ligera afinidad por aquellas que incluyen al isótopo ^{12}C , frente a las constituidas por ^{13}C . Esta preferencia por el isótopo ligero hace que en sus células haya una leve desproporción, a favor del ^{12}C , respecto de la razón isotópica presente en nuestro planeta. Pues bien, el grafito (un mineral formado exclusivamente de carbono) encontrado en las rocas de Isua está tenuemente enriquecido en ^{12}C , lo que sugiere la actividad de organismos.

No obstante, estas pruebas paleobioquímicas son difícilmente compatibles con otros tipos de evidencia. Los estudios llevados a cabo en la Luna indican que nuestro satélite (y por tanto también la Tierra) estuvo sometido a una intensa lluvia de meteoritos hasta hace alrededor de 3.900 millones de años. Y es verosímil que algunos de ellos fueran lo suficientemente grandes como para que el correspondiente impacto pudiera evaporar la mayor parte del agua de los océanos. Aunque no es del todo imposible que la vida pudiera originarse en esas condiciones (como discutiremos más adelante), no cabe duda que hasta hace 3.900 millones de años la Tierra no pasaba por sus mejores momentos para originar la vida. Entonces, si se aceptan los datos de Isua como evidencia de la existencia de organismos hace 3.800 millones de años, el lapso temporal en el que se originó la vida queda reducido a menos de 100 millones de años. Demasiado poco tiempo, en opinión de muchos, para que los procesos que originaron la vida hubieran podido tener lugar.

Antes de continuar, conviene que nos detengamos en un punto del mayor interés: 100 millones de años ¿son mucho o poco tiempo? En términos relativos, sólo representan algo más del dos por ciento de la edad de nuestro planeta. Pero este criterio es engañoso. Cuando la vida apareció, hace 3.800 millones de años (si es que fue en la época de Isua), 100 millones de años representaban el catorce por ciento, largo, de la edad de la Tierra. Busquemos, pues, otra manera de medir cuánto representan 100 millones de años. Lo ideal es relacionar esa cifra con el problema que nos interesa.

Parece razonable admitir que hay mucha mayor distancia, en términos de complejidad, entre la materia inerte (incluyendo cualquier combinación de biomoléculas) y una humilde bacteria, que entre ésta y el más complejo

de los seres vivos. Pues bien, a juzgar por los datos del registro fósil, desde que surgió el primer ser vivo (que sería muy parecido a una bacteria), hasta la aparición de las primeras células *eucariotas* (el tipo de células que componen los animales, por ejemplo), hubieron de pasar cerca de mil setecientos millones de años; diecisiete veces más que los cien millones de años que le llevó al planeta originar la vida (si se acepta, repitámoslo de nuevo, la evidencia de Isua).

No obstante, muchos investigadores achacan el largo *retraso* en la aparición de las células eucariotas a que no se dispuso de la suficiente cantidad de oxígeno en la atmósfera terrestre como para sostener las reacciones químicas en las que se basa su vida. Según esta hipótesis, el paso de la célula *procariota* a la célula eucariota estuvo *retenido* por el bajo nivel de oxígeno en la atmósfera y no porque la evolución sea tan parsimoniosa en sus tareas. Ahora bien, como veremos enseguida no se conoce con exactitud la tasa con la que se produjo dicho incremento de oxígeno, por lo que no es posible saber si los organismos eucariotas aparecieron poco o mucho tiempo después de que se alcanzaran los valores adecuados para su vida. Lo único que parece seguro es que tardaron esos mil setecientos millones de años en hacerlo. A juzgar por la velocidad a la que parece actuar la evolución biológica, 100 millones de años son un suspiro.

Sin embargo, la opinión de que 100 millones de años es poco tiempo para el desarrollo de los procesos que originaron la vida está basada en la asunción de que dichos procesos, la mayoría de naturaleza química, actuaban a la misma velocidad que la evolución biológica. El problema adquiere una perspectiva distinta si, como defieren dos de los más eminentes científicos en este campo, Antonio Lazcano y el propio Miller, no se acepta de an-

temano esa premisa. Según estos investigadores, la *evolución química*, que produjo el primer ser vivo a partir de biomoléculas aisladas, se produjo a mucha mayor velocidad que la subsiguiente evolución biológica y habría bastado un lapso temporal de entre diez millones de años y diez mil años (en los cálculos más optimistas), para dar cuenta del proceso. La gran autoridad de Lazcano y Miller en estos temas nos induce a tomarnos muy en serio sus argumentos.

Por otra parte, el descubrimiento en la década de los setenta de los ecosistemas establecidos alrededor de fumarolas, en regiones marinas abisales, permite contemplar el problema desde otro punto de vista. En estos lugares existen unas bacterias especiales que utilizan compuestos reducidos de azufre, que se generan en estos pequeños volcanes submarinos, como fuente de energía para producir, de una manera similar a la empleada por los organismos fotosintéticos, su propia materia orgánica. La gran resistencia al extremado calor existente en su hábitat, con temperaturas próximas a los 100 grados centígrados, ha llevado a que se denomine *termófilas* (amantes del calor) a estas bacterias. También se han encontrado bacterias termófilas en otros parajes no submarinos, como las charcas hidrotermales del parque Yellowstone. Las bacterias termófilas no sólo son amantes de las altas temperaturas, además detestan el oxígeno y únicamente viven en ambientes carentes de él. Por otra parte, la estructura de uno de sus ácidos nucleicos (el *ARN ribosómico*) hace que se incluya a algunas de estas bacterias termófilas en el grupo de bacterias considerado como el más primitivo (las llamadas *Arqueobacterias*).

Quizá, la materia orgánica de las rocas de Isua, con su desproporción isotópica, fue formada por organismos si-

milares a los actuales termófilos, cuyos antepasados pudieron haberse originado, mucho tiempo atrás, en las grandes profundidades marinas (en las proximidades de fumarolas submarinas), a salvo del bombardeo de meteoritos. Es posible, pero no todos los especialistas están de acuerdo.

En la región noroccidental de Australia se encuentra un territorio que, a causa de su extrema aridez, se conoce como North Pole (Polo Norte). Allí se halla la formación geológica denominada Warrawoona, constituida en su mayor parte por lavas expulsadas en el seno de aguas poco profundas. También hay rocas sedimentarias, de una antigüedad de casi 3.500 millones de años, que incluyen unas estructuras muy peculiares, denominadas *estromatolitos*, formadas por la superposición de cientos de finas capas de sedimentos ricos en carbonato cálcico.

Al sudoeste de la región de Warrawoona se encuentra la Bahía del Tiburón (Shark Bay), cuyos fondos aparecen cubiertos de estromatolitos similares a los de Warrawoona. Pero los estromatolitos de Shark Bay presentan una diferencia notable respecto de los de Warrawoona: se están produciendo en la actualidad, por lo que ha sido posible averiguar cuál es la causa de su formación. Los estromatolitos de Shark Bay son el resultado de la actividad biológica de comunidades de bacterias que forman una capa de pocos centímetros de espesor sobre el fondo de la bahía. En opinión de muchos científicos, los estromatolitos de Warrawoona también se formaron debido a la actividad de bacterias. Pero, si esto es así, ¿qué podemos saber de aquellos microorganismos que vivieron en esta zona del planeta hace 3.500 millones de años?

Hay otros lugares en el mundo, entre los que se encuentra la desembocadura del Ebro, en los que pueden hallarse mantos microbianos como los de Shark Bay. El estudio de estos tapetes microbianos ha puesto de manifiesto que están constituidos por varios tipos de bacterias, que se alimentan de muy diversas maneras. Unas, las *cianobacterias* (hasta hace poco conocidas como algas cianofíceas o algas azules), realizan el mismo tipo de fotosíntesis que llevan a cabo las plantas: utilizan el agua como materia prima y liberan oxígeno como producto de desecho. Hay otros tipos de bacterias (las bacterias rojas y las bacterias verdes) que efectúan otra forma diferente de fotosíntesis, que no usa el agua ni produce oxígeno, sino que emplea el *sulfuro de hidrógeno* (H_2S) como materia prima y libera azufre. También hay bacterias que, simplemente, se alimentan de los restos de las bacterias fotosintéticas muertas. En realidad, los mantos microbianos que generan los actuales estromatolitos son auténticos ecosistemas en miniatura.

Pero hay un aspecto que determina la vida en estos mundos diminutos: el oxígeno liberado por las cianobacterias es tóxico para los otros tipos de bacterias. Esto confiere una cierta ventaja a las cianobacterias. Al gasear a sus competidores, los eliminan de la zona más adecuada para realizar la fotosíntesis: la capa superior, y mejor iluminada, del manto microbiano.

Pues bien, en los estromatolitos de Warrawoona se han hallado estructuras microscópicas que han sido atribuidas a cianobacterias fósiles. También se han encontrado pruebas químicas que indican la presencia de microorganismos que realizaban el mismo tipo de fotosíntesis que las bacterias verdes y rojas (la que libera azufre en vez de oxígeno). De modo que los estromatolitos de Warrawoona pudieron formarse por la acción de comuni-

dades bacterianas similares a las que originan los estromatolitos actuales.

Aunque no hay un acuerdo total, para muchos investigadores los estromatolitos y microfósiles de Warrawoona, y no las rocas de Isua, constituyen la evidencia segura más antigua de vida en nuestro planeta. Por otra parte, se conocen estromatolitos fósiles en otras regiones del mundo, cuyas antigüedades están muy próximas a la de Warrawoona. Éste es el caso, por ejemplo, de los hallados en la Formación Fig Tree de la región del Transvaal (Sudáfrica), cuya edad ronda los 3.400 millones de años. Y a partir de hace 2.900 millones de años, los estromatolitos se volvieron relativamente abundantes en el planeta.

Ahora bien, es casi seguro que los microorganismos que formaron los estromatolitos de Warrawoona no fueron los primeros seres vivos del planeta, sino unos descendientes muy evolucionados de aquéllos. La fotosíntesis, en cualquiera de sus versiones, es un proceso extraordinariamente complejo y refinado, del que debieron carecer los primeros seres vivos. Y puesto que los datos apuntan a que los organismos de Warrawoona ya empleaban diversos tipos de fotosíntesis (la que produce oxígeno y la que genera azufre) para sintetizar su materia orgánica, no pueden considerarse como los primeros seres vivos que aparecieron en nuestro planeta. Los auténticos pioneros, posiblemente bacterias del tipo de las termófilas, debieron vivir antes del tiempo de Warrawoona.

Aunque no fueran los primeros organismos sobre la faz de la Tierra, no debemos subestimar a las cianobacterias, ellas fueron las responsables de la mayor alteración medioambiental de la historia del planeta. Ése fue un suceso feliz para nosotros, porque consistió en la acumula-

ción de la gigantesca cantidad de oxígeno que muestra la actual atmósfera de nuestro mundo.

Ya hemos comentado anteriormente que nuestro planeta *no debería* tener oxígeno libre en su atmósfera, o al menos no en la cantidad presente. Para empezar, no hay mecanismos abióticos que produzcan oxígeno en grandes cantidades. No es un gas que se libere en las erupciones volcánicas, y sólo en las capas altas de la atmósfera se originan cantidades ínfimas de oxígeno por la acción de los rayos ultravioletas sobre moléculas de vapor de agua. Pero, además, el oxígeno es muy reactivo con un gran número de elementos químicos, por lo que cualquier molécula de oxígeno que quede libre es rápidamente capturada para formar, sobre todo, sulfatos y óxidos de hierro. De hecho, solamente el 5 por ciento del oxígeno que se produce en la actualidad por medio de la fotosíntesis queda libre en la atmósfera, el resto es atrapado y convertido, como ya queda dicho, en sulfatos y óxidos de hierro.

Aparte de los presuntos fósiles de cianobacterias de Warrawoona, que no todos los investigadores aceptan como tales, la evidencia segura más antigua de producción biológica de oxígeno se ha establecido en los estromatolitos de hace 2.700 millones de años de la Formación Tumbiana, en el occidente de Australia. Allí se han hallado pruebas químicas de actividad fotosintética en ambientes muy pobres en sulfuro de hidrógeno, por lo que sólo puede tratarse de fotosíntesis a partir de agua, la generadora de oxígeno. En aquel momento, la atmósfera terrestre carecía de oxígeno libre. Durante cientos de millones de años, el oxígeno liberado por la acción de miles de millones de minúsculos microbios fue atrapado por las moléculas de hierro disueltas en el agua marina y quedó enterrado en los sedimentos en forma de óxidos

de hierro. Pero hace 2.300 millones de años, tras un pulso de 400 millones de años, los microorganismos comenzaron a doblar la muñeca del planeta: el oxígeno comenzó a acumularse de manera patente en la atmósfera, hasta el punto de afectar a la composición de las rocas sedimentarias.

La *pirita* y la *uraninita* son dos minerales que no soportan, sin descomponerse, la exposición prolongada (hablamos de siglos de exposición) a una atmósfera con niveles apreciables de oxígeno. Pues bien, estos minerales no se encuentran en rocas sedimentarias cuyo proceso de formación implique largas exposiciones a la acción de la atmósfera, más jóvenes de 2.300 millones de años, pero sí están presentes en las rocas de ese tipo formadas antes de esa fecha. La conclusión es evidente: hasta hace 2.300 millones de años la cantidad de oxígeno presente en la atmósfera terrestre era tan baja que no era capaz de alterar las piritas y uraninitas, que pasaban a formar parte de las rocas sedimentarias. Luego, hace 2.300 millones de años, la cantidad de oxígeno en la atmósfera terrestre se incrementó hasta un nivel que impidió la permanencia de esos minerales en las rocas sedimentarias. Se calcula que, en aquellos momentos, la cantidad de oxígeno en la atmósfera terrestre había alcanzado un valor equivalente a la centésima parte del actual.

La cantidad de óxido de hierro presente en las rocas sedimentarias desciende notablemente a partir de hace 1.700 millones de años, indicando que la producción de oxígeno ya había dado cuenta de la mayor parte del hierro disuelto en el agua de los océanos. A partir de ese momento, la acumulación de oxígeno en la atmósfera se aceleró, alcanzando los niveles actuales hace entre 600 y 400 millones de años.

De este modo, con su gesta a escala planetaria, las cianobacterias determinaron la historia de la vida en nuestro mundo. El oxígeno es un elemento tóxico para los seres vivos y sólo aquellos que fueron capaces de encontrar mecanismos para tolerarlo y usarlo en sus propias reacciones químicas pudieron expandirse por el planeta. Como ventaja adicional, los organismos capaces de emplear el oxígeno obtienen mayor cantidad de energía que los que no lo usan. Y ese superávit energético es imprescindible para que los organismos pluricelulares puedan mantener su compleja organización. Sin oxígeno, los animales no podríamos vivir en este mundo.

Pero, además, el incremento del nivel de oxígeno en la atmósfera tuvo un efecto colateral de extraordinaria importancia para el desarrollo de la vida en nuestro planeta (especialmente para el poblamiento de las tierras emergidas): la aparición de la capa de ozono. El ozono (O_3) se forma en las capas altas de la atmósfera por la acción de los rayos ultravioletas sobre las moléculas de oxígeno (O_2). Los átomos de ozono forman una tenue capa en la región superior de la atmósfera que filtra la llegada de la radiación ultravioleta a la superficie del planeta. Esta radiación es letal para los seres vivos, que en ausencia de la capa de ozono sólo pueden vivir bajo el manto protector del agua de los océanos.

De este modo, la inmensa mayoría de los organismos que pueblan nuestro mundo azul tiene contraída una deuda impagable con las humildes cianobacterias. Parafraseando a Churchill, podríamos concluir afirmando que nunca los más grandes debieron tanto a los muy pequeños.

CAPÍTULO V

Los devoradores de luz

Las cinco caras de la vida

Hay una vieja canción de Bob Dylan cuyo estribillo («*Al principio [de los tiempos], el hombre dio nombre a los animales*») refleja perfectamente uno de los trabajos más importantes de los científicos naturalistas, que consiste, precisamente, en dar nombres a los seres vivos. En realidad, el objetivo de esta tarea no es otro que el de establecer el inventario de la biodiversidad; es decir, saber cuántos *tipos diferentes de organismos* hay en nuestro planeta. Ésta es una cuestión que admite múltiples respuestas, según el significado que le demos a la expresión tipos diferentes de organismos. Si nos referimos a especies distintas conocidas a día de hoy, la respuesta es que su número sobrepasa largamente el millón y medio.

Pertencen a la misma especie todos aquellos organismos capaces de reproducirse en condiciones naturales y cuya descendencia sea también fértil. Caballos y burros son dos especies diferentes porque aunque pueden cruzarse, el resultado, la mula, es estéril. Distinguir las diferentes especies es una tarea que no resulta muy complicada en la mayoría de los casos y por eso cada especie reconocida y nombrada por los científicos también suele

tener un nombre propio en las distintas lenguas vernáculas (aunque la correspondencia no es siempre exacta).

Sin embargo, no todas las especies son igual de diferentes entre sí, sino que hay grupos de especies que se parecen mucho unas a otras. Todos los felinos son muy semejantes, y lo mismo podemos decir de los escarabajos, o de los pinos. Basándose en esos parecidos entre especies, los científicos las agrupan en categorías cada vez más generales, siempre en función de sus semejanzas. De este modo, las especies parecidas se reúnen en *géneros*, éstos en *familias*, que a su vez se agrupan en *órdenes*, que componen *clases*, que se reúnen en *filos* (del latín *filum*, tronco), y éstos, finalmente, se integran en *reinos*.

Los tigres, por ejemplo, son una especie cuyo nombre científico es *Panthera tigris* y pertenecen, con leones, jaguares, panteras de las nieves, y leopardos, al género *Panthera*. A su vez, este género se integra en la familia *Felidae* (o félidos) junto a gatos, linceos, guepardos, pumas, etc. La familia de los félidos está incluida en el orden *Carnívora*, al que también pertenecen, entre otras, las familias de los osos (*Ursidae*), hienas (*Hyaenidae*) y de los perros y afines (*Canidae*). El orden *Carnívora* es uno de los que componen la clase de los Mamíferos, que pertenece al filo de los Cordados (formado en su gran mayoría por los vertebrados), que, a su vez, forma parte del reino Animal.

De modo que, como puede ver, podemos formular la pregunta: ¿«Cuántos tipos distintos de seres vivos hay?» a diferentes niveles: ¿Cuántas especies distintas hay en una familia determinada? o ¿Cuántas familias en un orden? o ¿Cuántos filos en un reino? o ¿Cuántos reinos hay en el conjunto de los organismos? Esta última pregunta es, quizá, la más interesante ya que puede tradu-

cirse por algo así como ¿cuántos tipos distintos de seres vivos *realmente* diferentes hay?

Quizá usted haya estudiado en la escuela que sólo existen dos reinos (es decir dos formas básicamente distintas de seres vivos): el Animal y el Vegetal. Por si es así, conviene comenzar diciendo que hoy día todos los biólogos están de acuerdo en que eso no es cierto. Quizá sea la única cuestión en la que existe consenso total. Distintos especialistas defienden diferentes clasificaciones basadas en números dispares de reinos, pero lo que nadie discute es que la diversidad de los seres vivos, tal como la conocemos hoy, no puede ser resumida en sólo dos reinos.

¿Cuántos reinos hay entonces? Como ya hemos adelantado existen diferentes puntos de vista, pero el que quizá goza de más apoyo, y el más fácil de entender, es aquel que sostiene que los seres vivos pueden agruparse en cinco reinos distintos: *Monera*, que incluye a bacterias y cianobacterias; *Protista*, en donde están los protozoos, las algas unicelulares, etc.; *Fungi*, formado por los hongos; *Metafita*, que son las plantas; y *Metazoa* (metazoos), que está constituido por los animales.

¿Cuáles son las características que distinguen a los componentes de cada reino? O, dicho de otro modo, ¿en qué consiste eso de ser Monera, Protista, Hongo, Vegetal, o Animal? El primer rasgo distintivo, que nos permite dividir a los seres vivos en dos grandes grupos, es el nivel de organización: los organismos pueden estar constituidos por una única célula autónoma, o formados por un conjunto de células que se relacionan entre sí funcionalmente, de manera que no son autosuficientes por separado. A los primeros se los denomina *unicelulares* y a los segundos *pluricelulares*. Evidentemente, existe una gran diferencia entre el nivel de organización unicelular y el

pluricelular, que justifica que se agrupen por separado unos y otros. De los cinco reinos, dos son unicelulares, Monera y Protista, y tres pluricelulares, Hongos, Plantas y Animales.

Otra diferencia capital entre los seres vivos hace referencia a la estructuración de las propias células. Hay células que son muy sencillas y que carecen de compartimientos internos (*orgánulos*) en donde las diferentes funciones puedan realizarse independientemente. Ni siquiera el material genético está separado del resto de los componentes celulares. A este tipo de célula, más simple y primitiva, se la denomina *procariota*. Existe otro tipo de organización celular más compleja, denominada *eucariota*, en la que el interior celular está compartimentado en vesículas (*orgánulos*), en las que se realizan funciones diferentes. Una de estas vesículas separa el material genético del resto del interior celular y recibe el nombre de *núcleo*. En resumen, las células procariotas carecen de orgánulos, incluido el núcleo, mientras que las eucariotas sí tienen orgánulos, entre ellos el núcleo. La gran diferencia estructural y funcional que existe entre ambos tipos celulares queda de manifiesto si tenemos en cuenta que no hay ningún organismo pluricelular cuyas células sean procariotas; es decir que el tipo de estructuración celular limita el nivel de organización.

Ya habrá deducido que los tres reinos pluricelulares (Hongos, Plantas y Animales) están compuestos por organismos eucariontes (es decir, constituidos por células de tipo eucariota). De los dos reinos de organismos unicelulares, uno, Monera, presenta la organización procariota y el otro, Protista, la eucariota.

Llegados a este punto, ya conocemos las características que definen a los reinos Monera (organismos unicelulares procariotas) y Protista (organismos unicelulares eu-

cariotas), mientras que los reinos de los Hongos, Plantas y Animales comparten tanto el tipo de célula (eucariota), como el nivel de organización (pluricelular). ¿En qué se distinguen unos de otros? La clave está en la diferente manera de conseguir el sustento que tienen los componentes de cada uno de los reinos pluricelulares.

A los organismos que, como nosotros, no son capaces de generar su propia materia orgánica de manera auto-suficiente, sino que emplean la fabricada por otros seres vivos, se los conoce como *heterótrofos*. Aquellos otros organismos que son capaces de sintetizar su propia materia orgánica a partir de moléculas más simples reciben el nombre de *autótrofos*. Dentro de los reinos Monera y Protista hay tanto organismos autótrofos, como heterótrofos. Incluso se encuentran especies que pueden emplear ambos modos de vida, según sean las condiciones ambientales. Pero dentro de los reinos de organismos pluricelulares hay mucha más disciplina a la hora de *ganarse el pan*: las plantas son autótrofas, mientras que hongos y animales son heterótrofos.

De modo que las plantas se caracterizan por ser organismos pluricelulares, eucariotas y autótrofos, mientras que hongos y animales se distinguen por ser pluricelulares, eucariontes y heterótrofos. La diferencia entre hongos y animales reside en la diferente manera que tienen de ser heterótrofos. También existen diversas formas de ser autótrofo, y de ellas nos ocuparemos en este capítulo, dejando para más adelante a los heterótrofos.

La mayoría de los organismos autótrofos obtienen su energía a partir de la luz solar, a través de un proceso que es una de las grandes maravillas de la vida. Se trata de la *fotosíntesis*, un prodigio que permite convertir la materia inorgánica en materia orgánica. Pero antes de explicar en qué consiste, y para poder comprender el al-

cance de ese milagro, es preciso que volvamos, de nuevo, nuestra atención hacia la química.

La economía de las moléculas

En el tercer capítulo de este libro vimos que la energía química encerrada en el combustible es la responsable de que los automóviles se muevan y de que sus faros alumbren. También dijimos entonces que dicha energía química procedía, en última instancia, de la luz solar y nos remitimos a páginas posteriores para aclarar estos puntos.

En primer lugar, conviene recordar que no todos los automóviles usan el mismo tipo de combustible. Unos emplean gasolina y otros recurren al gasóleo. La diferencia entre ambos combustibles se encuentra en su composición química: la primera está constituida por moléculas orgánicas compuestas por entre cinco y diez átomos de carbono, mientras que las moléculas del segundo están formadas por un número de átomos de carbono que varía entre once y dieciocho. O sea, que las moléculas de la gasolina son más pequeñas que las que componen el gasóleo. Aparte de esa diferencia de tamaño, las moléculas de la gasolina y del gasóleo comparten una propiedad esencial: sólo están formadas por carbono e hidrógeno.

Tampoco todas las gasolinas son iguales, ni cuestan lo mismo. La diferencia fundamental entre unas y otras estriba en una propiedad expresada en el llamado *índice de octano*, que mide la tendencia a detonar de una gasolina: al aumentar dicho índice, disminuye la tendencia a detonar de una gasolina. Por cierto, que cuanto mayor es dicha tendencia, menor es el rendimiento de la gasolina y

más grande es el deterioro del motor. Aumentar el índice de octano de las gasolinas requiere procedimientos de mejora (técnicamente conocidos como *reformado*), que incrementan su precio. Por eso, las gasolinas con mayor índice de octano son de mayor calidad, y más caras.

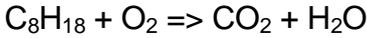
La composición química de las distintas gasolinas es muy variable, ya que diferentes componentes pueden dar lugar al mismo índice de octano. Sin embargo, para simplificar, podemos aceptar que el ingrediente principal de las gasolinas de altos índices de octano es una molécula que recibe el simpático nombre de

2,2,4-trimetilpentano (C_8H_{18}).

Esta molécula está compuesta por ocho átomos de carbono y dieciocho átomos de hidrógeno, unidos entre sí mediante enlaces covalentes sencillos.

Las moléculas de trimetilpentano son puestas en contacto con el oxígeno atmosférico (O_2) en el interior del motor del coche, produciéndose una reacción química, conocida como combustión, que libera una gran cantidad de energía. Como resultado de dicha reacción, son expulsadas al exterior, por el tubo de escape, moléculas de agua (H_2O) y de dióxido de carbono (CO_2). Detengámonos un segundo para analizar lo ocurrido. Si nos fijamos detenidamente en la reacción, observaremos que todos los carbonos, que antes estaban unidos a otros carbonos y a hidrógenos, se han unido ahora a oxígenos, y que todos los hidrógenos, que estaban enlazados a carbonos, también se han ligado a oxígenos (⁶):

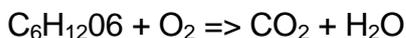
⁶ Para simplificar la explicación, hemos presentado la reacción sin ajustar. En realidad, reaccionan dos moléculas de trimetilpentano con veinticinco moléculas de oxígeno, para dar dieciséis moléculas de dióxido de carbono y dieciocho de agua.



Es decir, y esto es lo realmente importante, que la reacción producida en el seno del motor del coche ha consistido en romper la molécula de trimetilpentano para unir todos sus átomos con átomos de oxígeno. En esto precisamente consisten todas las combustiones: en combinar con el oxígeno los átomos de las moléculas orgánicas. Por eso no es posible hacer arder un papel, una madera, o una cerilla en ausencia de oxígeno, porque falta el elemento principal de la reacción química. No es de extrañar que las combustiones formen parte de un conjunto más amplio de reacciones químicas conocidas como *oxidaciones*.

Seguramente, se estará preguntando, a estas alturas, que relación tiene todo esto con los seres vivos. La respuesta está en que nosotros y el resto de los seres vivos obtenemos nuestra energía de la misma manera que el motor del automóvil: oxidando materia orgánica. Tomemos, por ejemplo, el caso de la glucosa, que es uno de los combustibles principales de nuestro organismo. En el interior de nuestras células la glucosa es oxidada, empleando en ese proceso el oxígeno que tomamos en la respiración, y transformada en agua y dióxido de carbono, que expulsamos a través de los pulmones. En el transcurso de este proceso se libera una gran cantidad de energía, que es la que empleamos para realizar nuestras funciones y mantenernos con vida.

Si no está convencido, compare la fórmula de la oxidación del trimetilpentano con la de la oxidación de la glucosa ($C_6H_{12}O_6$) (⁷):



De modo que los seres vivos y los automóviles obtenemos la energía de modo análogo: oxidando la materia orgánica. No obstante, existe una diferencia radical en la manera de llevar a cabo el proceso. Es evidente que si nuestras células oxidaran la glucosa de la misma manera que se oxida el trimetilpentano en el motor del coche, arderíamos como teas. En los seres vivos, los procesos de obtención de energía se llevan a cabo de una manera muy controlada, extrayendo la energía poco a poco, a través de numerosas reacciones químicas intermedias, de la misma manera que en una central nuclear se extrae la energía del material radioactivo de manera controlada.

Tanto la oxidación del trimetilpentano como la de la glucosa son reacciones químicas que liberan energía. A este tipo de reacciones se les denomina reacciones *exergónicas*. También hay reacciones que precisan absorber energía para llevarse a cabo, a éstas se las conoce como reacciones *endergónicas*. Si, por ejemplo, quisiéramos volver a combinar de nuevo las moléculas de dióxido de carbono y de agua para producir nuevamente gasolina (trimetilpentano), o glucosa, necesitaríamos suministrar la misma cantidad de energía que se liberó al oxidarlas. Es decir, que para producir un litro de gasolina a partir del dióxido de carbono y el agua que salen por el

⁷ Tampoco en este caso hemos presentado la reacción ajustada. Cada molécula de glucosa reacciona con seis moléculas de oxígeno, produciendo seis moléculas de dióxido de carbono y otras seis de agua.

tubo de escape de un automóvil, necesitaríamos la energía producida por la oxidación (combustión) de un litro de gasolina. Pero ése es sólo un cálculo teórico, en realidad necesitaríamos emplear más de un litro de gasolina para conseguir esa cantidad de energía útil, ya que una buena parte de la energía suministrada se perdería en forma de calor y no podríamos emplearla en el proceso (por culpa, como siempre, del *malvado* Segundo Principio de la Termodinámica).

Pero, ¿por qué se libera energía cuando se oxida la materia orgánica? O, dicho de otro modo, ¿por qué se libera energía cuando el carbono y el hidrógeno dejan de estar enlazados entre sí y se unen al oxígeno? La respuesta está en que los enlaces covalentes que se forman entre diferentes moléculas requieren distinta cantidad de energía para constituirse: hay enlaces de mayor energía que otros. Así, los enlaces entre carbonos, o entre un carbono y un hidrógeno, precisan más energía para formarse que los enlaces entre el hidrógeno y el oxígeno, o entre el carbono y el oxígeno. La energía absorbida en la formación de un enlace permanece latente en dicho enlace, de modo que cuando éste se escinde, la energía acumulada en el enlace se libera al medio. De este modo, cuando un enlace de alta energía (carbono-carbono o carbono-hidrógeno) se rompe para dar lugar a nuevos enlaces de menor energía (carbono-oxígeno o hidrógeno-oxígeno) queda un sobrante de energía libre, que puede emplearse para mover el automóvil, o para que nuestras células realicen sus funciones (más la parte que inexorablemente se convierte en calor).

Para aclarar estas ideas, volvamos a establecer la analogía entre energía y valor monetario, sustituyendo en el párrafo anterior el concepto de energía por el de dinero. De este modo, podemos decir que los enlaces covalen-

tes entre los distintos átomos tienen precios diferentes, y que hay enlaces más caros que otros. El dinero empleado en la formación de un enlace permanece invertido en dicho enlace, de manera que cuando se rompe recuperamos el dinero que nos costó establecerlo. Siguiendo con la comparación, se puede decir que los enlaces carbono-carbono y carbono-hidrógeno son más caros que los enlaces carbono-oxígeno e hidrógeno-oxígeno. Y lo que ocurre en las oxidaciones es que se rompen enlaces caros para constituir enlaces baratos, quedando un remanente de dinero libre, que puede ser empleado para otras cuestiones.

Pero mientras que la energía así producida en la oxidación de la gasolina queda libre en el motor del coche, aumentando enormemente su temperatura, no ocurre lo mismo en el seno de las células. De hecho, si la energía producida por la oxidación de la glucosa se liberara incontroladamente al medio celular, la célula se abrasaría. Ya hemos comentado que la oxidación de la glucosa se realiza a través de numerosas reacciones intermedias, delicadamente reguladas. En algunos de estos pasos se liberan pequeñas cantidades de energía, que son inmediatamente invertidas en la formación de otro tipo de enlace de alta energía, en el seno de una molécula de la que ya hemos hablado anteriormente: el trifosfato de adenosina o ATP.

El ATP está formado por la unión de una molécula más pequeña, la adenina, y tres moléculas de ácido fosfórico. Los enlaces que mantienen unidas a estas moléculas de ácido fosfórico entre sí, y al resto de la molécula de ATP, son enlaces de alta energía. Cada vez que en el proceso de oxidación de la glucosa se libera una fracción suficiente de energía, ésta se invierte en establecer un enlace de alta energía entre una molécula de *difosfato de*

adenosina (esto es, una adenina unida a sólo dos moléculas de ácido fosfórico), o *ADP*, y una molécula de ácido fosfórico, dando lugar a una molécula de ATP. Por este procedimiento, por cada molécula de glucosa que se oxida en cualquiera de nuestras células se producen treinta y ocho moléculas de ATP, que quedan a disposición de la célula para ser empleadas donde y cuando sea necesario. Cada vez que la célula requiera energía para realizar cualquier proceso, utilizará tantas moléculas de ATP como necesite: al romper sus enlaces (dando lugar, de nuevo, a moléculas de ADP y ácido fosfórico) recuperará la energía que invirtió en formarlos. Aunque parezca muy rebuscado, este mecanismo permite aprovechar al máximo la energía obtenida al oxidar la glucosa.

Antes de terminar con este apartado, y para tratar a la química con el debido respeto, conviene precisar el auténtico significado del término oxidación, y de su opuesto, *reducción*. En líneas anteriores hemos dado a entender que un átomo se oxida cuando se une al oxígeno y que se reduce al unirse al hidrógeno, pero esto son sólo verdades a medias. En rigor, un átomo se oxida cuando cede electrones y se reduce cuando los gana. En la mayor parte de los casos esta ganancia, o pérdida, es sólo relativa. En realidad, ni el carbono ni el hidrógeno pierden electrones al enlazarse con el oxígeno. En el apartado dedicado al enlace covalente (que, si lo recuerdan, consiste en compartir electrones), ya explicamos que la mayor parte de las veces uno de los átomos atraía con más fuerza a los electrones compartidos y los aproximaba a su núcleo, alejándolos de su *partenaire* molecular. En este caso, el átomo que consigue aproximar los electrones se reduce (porque los *gana*), mientras que el átomo cuyos electrones son alejados de su núcleo se oxida (ya que los *pierde*).

De entre todos los elementos, el mayor atractor de electrones es el flúor; cualquier átomo que se una al flúor verá cómo éste le retira sus electrones, oxidándolo. El flúor ostenta el título de campeón de la oxidación, siendo capaz de oxidar al mismísimo oxígeno. Sorprendentemente, en una unión oxígeno-flúor, ¡el oxígeno es el oxidado y el flúor el reducido! Ahora bien, hay muy poco flúor en nuestro planeta, y el poco que hay está firmemente unido a otros elementos, por lo que no está disponible para oxidar la materia orgánica. El segundo elemento en capacidad de atraer electrones, el subcampeón de la oxidación, es el oxígeno (en dura pugna con el cloro), que, además de ser muy abundante, sí se encuentra aislado y listo para oxidar la materia orgánica. Por eso, el oxidante por antonomasia de la materia orgánica en nuestro mundo es el oxígeno. Es importante señalar que el quinto elemento en la lista de oxidantes, por detrás del nitrógeno, es el azufre. Más adelante veremos la importancia de no olvidar esta propiedad del azufre.

En el otro extremo, el hidrógeno es el elemento que cede con mayor facilidad sus electrones a su compañero de enlace covalente; es el campeón de la reducción. Ésta es la explicación de por qué cuando el carbono está unido al hidrógeno se encuentra reducido (porque el hidrógeno le cede sus electrones) y de por qué se oxida al enlazarse al oxígeno (porque éste le retira sus electrones). Y como el oxígeno tira con más fuerza que el carbono de los electrones del hidrógeno, éste se oxida aún más al cambiar carbono por oxígeno.

Si este galimatías electrónico le resulta muy complicado, basta con recordar que cuando el carbono se une al hidrógeno se reduce y que cuando se liga al oxígeno se oxida. No olvide tampoco que al pasar de carbono reducido (unido al hidrógeno o a otro carbono) a carbono oxi-

dato (unido al oxígeno) se libera energía, mientras que la reacción inversa, de oxidado a reducido, absorbe energía.

Y para terminar con la comparación entre los automóviles y los seres vivos, reparemos en una cuestión capital. Los coches (en realidad, los sufridos usuarios) obtienen su combustible en las gasolineras, pero ¿y los seres vivos?, ¿cuáles son y dónde están nuestras estaciones de servicio?

El fuego verde

Todos los organismos de nuestro mundo descendemos del primer ser vivo que apareció sobre la faz del planeta. A partir de aquella primera chispa, la llama de la vida fue cobrando fuerza hasta convenirse en un incendio colosal. Hoy la vida arde por doquier, en las tenebrosas profundidades marinas, en las blancas cimas de las más altas montañas, en las ínfimas fisuras del manto helado de la Antártida, en la profundidad de las cuevas, o en los resquicios de rocas situadas a decenas de kilómetros de la superficie del planeta. Aunque desde su comienzo la vida se ha diversificado enormemente, no ha vuelto a originarse de nuevo. Los seres vivos sólo somos transmisores de la vida de una generación a la siguiente, pero no la generamos *ex novo*. En cierto sentido, muy profundo, todos los seres vivos seguimos siendo aquel primer organismo. Somos distintas llamas de la misma hoguera.

Fue el geólogo ruso Vladimir Ivanovich Vernadsky (1863-1945) quien acuñó la expresión *fuego verde* para referirse al fenómeno de la vida. Lo que Vernadsky quería resaltar en tan bella metáfora es el hecho de que los seres vivos se comportan como un tipo especial de

energía, que se nutre, a su vez, de otra forma de energía para mantener su existencia. Como ya hemos visto en anteriores capítulos, los seres vivos actuamos como transformadores energéticos, degradando la energía y produciendo calor para seguir vivos, de la misma manera que el fuego consume el combustible para seguir ardiendo. De ahí el término *fuego*. Y la energía que nos nutre, la que nos mantiene vivos, procede en última instancia de la luz solar, que algunos organismos son capaces de convertir en energía química, en forma de moléculas orgánicas. Y en el corazón de este proceso, conocido como fotosíntesis, se encuentra una molécula, la clorofila, de color *verde*.

La fotosíntesis constituye el proceso que mantiene la mayor parte de la vida de nuestro mundo y constituye un auténtico prodigio físico y químico. Para que puedan hacerse una idea de lo que representa la fotosíntesis, imaginen lo que supondría el poseer un dispositivo que convirtiera de nuevo en gasolina los gases que salen por el tubo de escape de nuestros automóviles. Porque eso es, exactamente, lo que son capaces de llevar a cabo los organismos fotosintetizadores: invertir el proceso de la respiración. Es decir, usando la energía de la luz solar, volver a combinar el dióxido de carbono y el agua para producir oxígeno y materia orgánica (a partir de ahora, simplificaremos sustituyendo el término materia orgánica por una de las biomoléculas: la glucosa).

Por una simpática coincidencia, la fotosíntesis fue descubierta en el Siglo de las Luces, gracias a las investigaciones del inglés Joseph Priestley (1733-1804) y del holandés Jan Ingenhousz (1730-1799). El primero de ellos, Priestley, fue uno de esos extraordinarios hombres que engendró el siglo XVIII. Librepensador insobornable, sus heterodoxas opiniones en religión y política le causaron

numerosos sinsabores a lo largo de su vida. Sus creencias religiosas le impidieron acceder a la docencia universitaria, lo que le movió a fundar en 1758 una academia privada, que llegó a ser la más prestigiosa de Gran Bretaña. También debido a sus opiniones religiosas, fue apartado del segundo viaje de exploración del capitán James Cook (1706-1790) en el que, originalmente, figuraba como astrónomo.

En el terreno político, Priestley también nadó a contracorriente de las ideas dominantes de su sociedad. Así, fue uno de los pocos valedores, en Inglaterra, de las causas de la Revolución Americana, primero, y de la Revolución Francesa, después. Su apoyo a esta última le valió que el 14 de julio de 1791 (en el segundo aniversario de la toma de La Bastilla) una turba enfurecida destruyera su hogar y su laboratorio. Aún aguantó tres años más en su patria, pero en 1794 Priestley marchó al exilio, hacia la recién nacida república americana, donde fue calurosamente recibido, entre otros, por sus amigos Thomas Jefferson (1743-1826) y John Adams (1735-1826). En los Estados Unidos le ofrecieron la Cátedra de Química de la Universidad de Pensilvania, pero Priestley la rechazó para fundar, junto con su mujer, una colonia de exiliados de Gran Bretaña por causa de sus ideas religiosas. Este proyecto nunca llegó a realizarse. Cuando se produjo el conflicto entre Jefferson y Adams, el incorregible Priestley tomó partido en favor de Jefferson. La elección de éste como tercer presidente de los Estados Unidos, acaecida en 1800, hizo que los últimos años de Priestley discurrieran, por primera vez en su vida, en armonía con las autoridades políticas.

A lo largo de su vida, Priestley se interesó por un amplio abanico de materias, como la gramática, la política, la teología, la educación, y la química. En todas ellas estu-

vo a gran altura, aunque fueron sus trabajos científicos los que le valieron el paso a la posteridad. Fue Benjamin Franklin (1706-1790), al que conoció en 1765, quien atrajo la atención de Priestley hacia el fenómeno de la electricidad. Su primer logro importante fue precisamente el descubrimiento (en 1767) de que el grafito conduce la electricidad. También dedujo correctamente, a partir de un experimento de Franklin, la relación cuadrática inversa que guarda la fuerza de atracción entre dos cargas eléctricas con la distancia que las separa (aunque este descubrimiento pasó desapercibido en aquel momento).

Sin embargo, su interés derivó pronto, desde la naturaleza y propiedades de la electricidad, hacia el problema de la composición química del aire, en donde realizó sus más importantes descubrimientos. Su primer trabajo en este campo estuvo relacionado con su fallida participación en el segundo viaje del capitán Cook. Esta expedición fue planeada con sumo cuidado para evitar, en la medida de lo posible, las muertes debidas a enfermedades causadas por las privaciones o la deficiente alimentación. Tan eficaces resultaron las precauciones que se tomaron que sólo un hombre, de una dotación de 112, murió por enfermedad en un viaje que duró tres años. En ese contexto, Priestley se preocupó del problema de mantener potable el agua durante el mayor tiempo posible. Con ese fin, concibió la manera de incorporar dióxido de carbono al agua, en la idea de que así se evitaría su corrupción. De modo que el agua carbonatada (o soda), que es la base de gran parte de nuestros refrescos, fue invención de Priestley.

La mayoría de las biografías de Priestley subrayan el descubrimiento del oxígeno (en 1774) como su logro científico más notable. Sin embargo, la paternidad de tal descubrimiento es discutible ya que, en realidad, el pri-

mero en aislar dicho gas fue el químico sueco Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), aunque la publicación de su descubrimiento apareció (por causas editoriales) con posterioridad al trabajo de Priestley. En cualquier caso, ambos realizaron el hallazgo independientemente. Sin embargo, ni Scheele ni Priestley interpretaron correctamente su descubrimiento, debido a que ambos eran partidarios de la teoría, muy en boga en el siglo XVIII, del *flogisto*.

Tanto Priestley como Scheele estaban convencidos de la existencia de una sustancia, el flogisto, que intervenía decisivamente en los procesos de combustión y de respiración. Según esta teoría, el flogisto era un fluido elástico que formaba parte de la composición de las sustancias inflamables. Cuando dichas sustancias ardían, el flogisto se liberaba y pasaba a combinarse con el aire. Una vez que el aire se saturaba de flogisto (convirtiéndose en aire flogisticado), se detenía la combustión. Los partidarios de la teoría del flogisto pensaban que, al igual que ocurría en la combustión, la respiración de los organismos liberaba flogisto al aire. Y del mismo modo que el aire flogisticado (esto es, saturado de flogisto) no sostenía la combustión, tampoco permitía la respiración.

Lo que Priestley realmente descubrió es que cuando se calienta óxido de mercurio en el interior de una campana con *aire flogisticado* (que no permite la combustión ni la respiración) se opera un cambio en la naturaleza de dicho aire, de modo que vuelve a ser posible que arda una llama o que respire un animal. Priestley interpretó lo sucedido como que el aire había sido *desflogisticado*; es decir, liberado del flogisto. De hecho, al gas obtenido en su experimento, lo llamó *aire desflogisticado*. La interpretación correcta de los resultados de Priestley fue obra de Lavoisier, quien rechazó la existencia del flogisto y pro-

puso la de un gas (el oxígeno) que se combinaba con otras sustancias en los procesos de combustión y respiración. Mientras que Priestley pensaba que simplemente había liberado del flogisto al aire de la campana (lo había *desflogisticado*), Lavoisier dedujo correctamente que, al ser calentado, el óxido de mercurio había liberado al aire de la campana un gas nuevo (el oxígeno). La polémica entre Lavoisier y Priestley no cedió hasta la muerte de ambos.

Así, aunque a Priestley y Scheele les corresponde el mérito de haber sido los primeros en aislar el oxígeno, fue Lavoisier quien realmente lo reconoció y estableció su existencia como elemento químico. Decidan ustedes quién fue el auténtico descubridor de este gas.

En este contexto, hay un aspecto de las investigaciones de Priestley que nos interesa especialmente. Se trata de un experimento que realizó buscando la manera de obtener aire desflogisticado (o sea, rico en oxígeno). Tras mantener encendida una vela en el interior de una campana de vidrio hasta la extinción de la llama, Priestley observó que la introducción de una ramita de menta en dicha campana bastaba para que, al cabo de algunos días, la llama pudiera arder de nuevo. Con este experimento, Priestley estableció que las plantas verdes producen oxígeno (aire desflogisticado, en sus palabras) y dio, sin saberlo, el primer paso hacia el descubrimiento de la fotosíntesis.

Pero la fisiología de las plantas no era el objeto de interés de Priestley, por lo que no continuó con esa línea de investigación. A quien sí interesaba el funcionamiento de los vegetales era al médico y botánico holandés Jan Ingenhousz. En una admirable serie de experimentos (publicados en 1779), Ingenhousz corroboró los resultados de Priestley y estableció, de manera incuestionable, que

es la luz del Sol, y no su calor, la responsable de que las partes verdes de las plantas produzcan oxígeno (al que Ingenhousz también denominaba aire desflogisticado). Hombre piadoso, Ingenhousz pensaba que esta característica de las plantas respondía a la sabiduría del Creador, que velaba por reponer la calidad del aire que los animales, y también las plantas en las horas de oscuridad viciaban a través de la respiración.

Puesto que las plantas cesaban en la producción de oxígeno por la noche, pero no en su respiración, Ingenhousz alertó sobre el peligro que corrían aquellas personas que tuvieran plantas en sus dormitorios durante la noche. En su opinión, éstas vician el aire en las horas de oscuridad, poniendo en peligro a la incauta persona que comparta alcoba con ellas. Esta idea de que las plantas son nocivas durante la noche constituye el mayor éxito de la historia de la divulgación científica, puesto que hoy día, más de doscientos años después de su formulación, sigue siendo un tópico muy común, al menos en Europa. Tan extendida se encuentra esta idea en nuestro continente, que en la sección dedicada a la ciencia del periódico *New York Times* se dio respuesta (el 12 de septiembre de 1995) a un lector que preguntaba si tenían razón sus amigos europeos que le advertían del peligro de dormir con plantas en la habitación. La respuesta del especialista fue que sólo corren algún riesgo aquellas personas que duerman junto a una enorme cantidad de plantas en una habitación muy pequeña y mal ventilada. Y concluía añadiendo que otra persona que acompañara al durmiente consumiría mucho más oxígeno que cualquiera de las plantas que solemos tener en nuestros hogares.

La luz, de la que obtienen las plantas la energía para realizar la fotosíntesis, es un fenómeno complejo cuya comprensión trajo de cabeza a los físicos durante más de doscientos años. Hoy sabemos que comparte muchas de sus propiedades con otros fenómenos físicos a los que reunimos bajo el nombre de *ondas*. Las olas del mar son un buen ejemplo de ondas, y de su observación podemos conocer algunas de las propiedades básicas de este tipo de fenómenos. Si usted se sitúa en un punto de la costa y, pertrechado con un cronómetro, cuenta el número de olas que pasan por un punto de referencia en un tiempo determinado (digamos un minuto), establecerá un parámetro fundamental de cualquier onda: su *frecuencia*. Cuantas más olas pasen en el tiempo determinado mayor será la frecuencia del oleaje. Otra característica en la que puede reparar es en la distancia entre las crestas de las olas; es decir, la *longitud de onda*. Evidentemente, cuanto mayor sea dicha longitud de onda (y por tanto más separadas estén las olas) menos olas pasarán por su punto de referencia en cada unidad de tiempo. O dicho de otro modo, la frecuencia y la longitud de una onda son inversamente proporcionales: cuanto mayor es la una menor es la otra.

Otro fenómeno de observación habitual, y también de gran interés, es el hecho de que la luz del Sol, que es de color blanco, se descompone en luces de varios colores al pasar a través de las gotas de agua. Así se forma el arco iris cuando la luz del Sol atraviesa las gotas de lluvia o aquellas otras lanzadas al aire por una catarata o un surtidor. La explicación de este hermoso fenómeno estriba en que la luz del Sol está constituida por un haz de otras luces que se separan al pasar a través de un cuerpo transparente (debido al fenómeno físico conocido como *refracción*). Cada una de esas diferentes luces que componen la luz solar corresponde a una onda diferente,

con su frecuencia y longitud de onda distinta y característica. A estas luces se las puede denominar, con más propiedad, radiaciones electromagnéticas. En adelante emplearemos ambos términos, luz y radiación, como sinónimos.

Si nos fijamos en el arco iris, podemos distinguir los diferentes colores (luces o radiaciones) que componen la luz blanca: del rojo, en un extremo, al violeta, en el otro. La luz de color rojo es la que tiene mayor longitud de onda y, por tanto, también es la de frecuencia más baja. Por el contrario, la luz violeta presenta la frecuencia mayor y es la de menor longitud de onda. Pero los colores del arco iris sólo son aquellos que el ojo humano puede percibir. En la luz solar hay otras radiaciones cuya frecuencia es aún menor (y su longitud de onda mayor) que la luz roja: es la luz, o radiación, infrarroja. También hay luces imperceptibles para nosotros más allá del color violeta; es decir con una frecuencia mayor (o, si lo prefieren, una menor longitud de onda): se trata de la luz, o radiación, ultravioleta. Más allá de la radiación infrarroja se encuentran las ondas de radio y con frecuencias mayores que la de la luz ultravioleta están los rayos X.

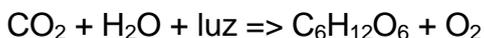
Cada una de estas luces contiene energía, en mayor cantidad cuanto más alta sea la frecuencia. Por eso los rayos ultravioleta son capaces de quemar nuestra piel, porque tienen asociada una gran cantidad de energía. Seguramente, estará recordando que no es ésta la primera vez que relacionamos energía y luz. En el tercer capítulo ya comentamos que la luz roja (de baja frecuencia) estaba asociada a fotones de baja energía, mientras que los fotones de la luz azul eran de alta energía. Y si lo recuerda, los fotones eran el equivalente a los cuantos: las cantidades de energía mínimas que la materia era capaz de absorber y/o emitir. De manera que cuando las

plantas captan la energía de la luz solar para realizar la fotosíntesis, en realidad están captando fotones, o unidades mínimas de energía en forma de luz.

Puesto que no todas las luces son iguales, cada una con sus fotones de diferente energía, podemos preguntarnos si todas ellas pueden ser aprovechadas por las plantas o si, por el contrario, éstas se muestran exquisitas a la hora de utilizar un tipo u otro de radiación. En realidad, las plantas solamente emplean la luz visible. Las radiaciones infrarrojas contienen poca energía y las ultravioletas tienen demasiada. En el medio está la virtud, y ése es el rango de las radiaciones que componen la luz visible. Ahora bien, le proponemos un acertijo: de entre las luces que componen el espectro visible, ¿cuál o cuáles son las preferidas por las plantas? La respuesta puede parecerle chocante: todas menos la de color verde. Sin embargo, si se detiene un segundo a pensarlo descubrirá que la respuesta es evidente. Si las partes de los vegetales que realizan la fotosíntesis son de color verde, es porque reflejan precisamente ese tipo de luz. Y la reflejan porque no la utilizan. Si emplearan la totalidad de las radiaciones que componen la luz blanca, las plantas no reflejarían ninguna de ellas y serían negras.

El gran milagro

En términos generales, la fotosíntesis es el proceso contrario de la respiración y, por lo tanto, su fórmula general es:



Es fácil de deducir que lo que ocurre en la fotosíntesis es que las moléculas de agua (H_2O) se escinden y sus hidrógenos acaban uniéndose al carbono de las moléculas de dióxido de carbono (CO_2), que, a su vez, se unen entre sí. En el transcurso del proceso quedan moléculas de oxígeno libres. Sin embargo, ésta es una descripción muy grosera de un proceso que consta de numerosos pasos intermedios. Conviene que maticemos un poco más. En primer lugar, hay que aclarar que el oxígeno que se libera a la atmósfera procede, íntegramente, de las moléculas de agua y no de las de dióxido de carbono.

En segundo término, es importante explicar que los hidrógenos que viajan desde las moléculas de agua hasta las de dióxido de carbono lo hacen de una manera muy especial. Cuando se rompe el enlace entre los átomos de hidrógeno y oxígeno de una molécula de agua, los átomos de hidrógeno quedan escindidos: por una parte su núcleo y por otra el electrón que intervenía en el enlace covalente. Así, la rotura de la molécula de agua produce un átomo de oxígeno, dos núcleos de hidrógeno y dos electrones. Como los átomos de hidrógeno *normales* sólo cuentan en su núcleo con un solitario protón (recuerde que el isótopo del hidrógeno llamado deuterio tiene, además, un neutrón en el núcleo), podemos decir que por cada molécula de agua fracturada se obtienen un átomo de oxígeno, dos electrones y dos protones (los dos núcleos de hidrógeno).

O sea, que la fotosíntesis consiste en la rotura de una molécula de agua y en el traslado ordenado de los constituyentes del hidrógeno (un electrón y un protón por cada átomo) hasta los carbonos procedentes del dióxido de carbono. Este proceso tiene lugar en dos actos: en el primero se fractura la molécula de agua, y los electrones y protones son llevados hasta su correspondiente acep-

tor, en donde vuelven a reunirse; en la segunda parte de la fotosíntesis los hidrógenos son cedidos al carbono procedente de moléculas de dióxido de carbono para que se combinen y formen moléculas orgánicas. A la primera fase se la denomina *fase luminosa*, porque precisa de la luz para llevarse a cabo, y a la segunda se la conoce como *fase oscura*, porque hasta hace poco se pensaba que era totalmente independiente de la luz. En las plantas, ambas fases tienen lugar en un orgánulo celular llamado *cloroplasto*, en donde se capta la luz del Sol y se realizan todas las reacciones químicas de la fotosíntesis.

Ahora bien, romper la molécula de agua y arrancarle dos electrones es una hazaña química. Si lo recuerda, el hidrógeno es el elemento que mayor facilidad tiene para ceder sus electrones, mientras que el oxígeno es el segundo elemento en cuanto a la avidez por captar electrones. Juntos, hidrógeno y oxígeno, forman una pareja extraordinariamente estable, reunidos por enlaces covalentes de baja energía. ¿Cómo es posible romper esta molécula tan estable y sustraerle dos electrones al *tiránico* oxígeno? La dificultad en conseguirlo es tan grande que, fotosíntesis aparte, éste es un proceso que apenas se produce en la naturaleza. La clave de esta proeza se encuentra en un complejo conjunto de moléculas que recibe el nombre de *fotosistema*. Los cloroplastos cuentan con dos fotosistemas diferentes que cumplen misiones distintas y se conocen como *Fotosistema I* y *Fotosistema II*. Ambos están constituidos por un buen número de proteínas (muchas de las cuales son enzimas que catalizan las diferentes reacciones químicas) y otras moléculas conocidas como *pigmentos*.

Los pigmentos son moléculas que por su peculiar estructura son capaces de absorber un fotón y elevar uno

de sus electrones hasta un nivel de energía superior (¿se acuerda de los niveles de energía en que se disponen los electrones, que explicamos con el ejemplo de los escalones de diferentes alturas?). Cuando se encuentra en esa situación, con un electrón promovido a un nivel energético superior, se dice que la molécula de pigmento está *excitada*.

El principal pigmento de ambos fotosistemas es la *clorofila*. La clorofila del Fotosistema II es excitada por la luz cuya longitud de onda es de 680 nanómetros (un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro), mientras que la del Fotosistema I capta la luz de 700 nanómetros de longitud de onda. En ambos fotosistemas existen otros pigmentos que son capaces de absorber la energía de luces de otras longitudes de onda diferentes y canalizar dicha energía hasta las moléculas de clorofila. Al conjunto de estos pigmentos *auxiliares* se lo denomina *antena colectora* (hay una por fotosistema).

En realidad, sólo uno de los dos fotosistemas interviene en la rotura de la molécula de agua y en la liberación de los dos electrones de sus hidrógenos. Se trata del denominado Fotosistema II. Este nombre resulta desconcertante para los estudiantes de biología, porque el Fotosistema II es el iniciador del proceso de la fotosíntesis y de manera intuitiva, por ser el primero en actuar, parece que debería corresponderle el nombre de Fotosistema I. Sin embargo, esta terminología tiene su lógica: el Fotosistema II recibe esta denominación porque apareció en segundo lugar a lo largo de la evolución.

Cuando la molécula de clorofila del Fotosistema II es excitada por un fotón, uno de sus electrones es traspasado a una cadena de molécula conocida como *cadena transportadora de electrones*, que lo conducen hasta el Fotosistema I. El tránsito del electrón por esta cadena

transportadora genera energía con la que la célula es capaz de sintetizar una molécula de ATP (a partir de ADP y una molécula de ácido fosfórico), que, como ya hemos visto, es la unidad energética de los seres vivos. De este modo, la energía de la luz que excitó a la clorofila se ha invertido en formar los enlaces de alta energía del ATP. La energía luminosa ha sido transformada en energía química.

Ahora, la clorofila del Fotosistema II se encuentra con un electrón de menos y *necesita* captar otro para recuperar la estabilidad química. Esta avidez de la clorofila por los electrones desencadena la ruptura de la molécula de agua para arrebatarte los electrones correspondientes a los hidrógenos (a través de un mecanismo complejo conocido como *reloj fotolítico del agua*). Estos electrones pasan (de uno en uno) a la clorofila, que volverá a perderlos al absorber la energía de la luz (un fotón por cada electrón), iniciando un nuevo ciclo.

Volvamos al electrón que habíamos dejado a las puertas del Fotosistema I, en donde es captado por la correspondiente molécula de clorofila. La llegada de un fotón excita la clorofila del Fotosistema I y le hace perder al electrón que acababa de aceptar procedente del Fotosistema II. A partir de aquí, el electrón puede seguir dos vías. En primer lugar puede ser conducido de nuevo a la cadena transportadora de electrones para volver a promover la formación de ATP. A este mecanismo se lo conoce como *flujo cíclico de electrones*. La otra alternativa consiste en ser transportado, a través de la inevitable cadena de moléculas intermediarias, hasta su aceptor final, una molécula que recibe el impresionante nombre de *nicotinaminadenín dinucleótido fosfato*, pero que se nombra habitualmente por sus iniciales: NADP+ (el símbolo + indica que se encuentra en su estado oxidado y

que es capaz de aceptar un electrón). Al llegar al NADP+ el electrón se reúne de nuevo con un protón para volver a formar un átomo de hidrógeno y pasar a formar parte de una molécula de NADPH (la H final indica que ahora la molécula tiene un átomo de hidrógeno más).

Aquí termina la fase luminosa de la fotosíntesis, en el transcurso de la cual hemos asistido a la rotura de una molécula de agua, con el concurso de la energía luminosa, y a la transformación de ésta en energía química, en forma de ATP y NADPH.

En la fase oscura de la fotosíntesis se emplean esas moléculas de ATP y NADPH para sintetizar las correspondientes moléculas orgánicas. Al conjunto de reacciones químicas (más de una docena) que componen el proceso de síntesis de moléculas de glucosa a partir del dióxido de carbono se lo conoce como Ciclo de Calvin (⁸), en honor de su descubridor, y premio Nobel de Química, Melvin Calvin (1911-1997).

Pero el Ciclo de Calvin no es el único proceso que tiene lugar en la fase oscura de la fotosíntesis. Los productos de la fase luminosa (ATP y NADPH) también se emplean para producir amoníaco y sulfuro de hidrógeno (imprescindibles para sintetizar los aminoácidos) a partir de dos sales presentes en el suelo y el agua: los sulfatos y los nitratos.

⁸ En realidad, el Ciclo de Calvin produce moléculas de gliceraldehído 3 fosfato (de tres carbonos cada una), que pueden usarse como punto de partida para la síntesis, tanto de glucosa, como de otras biomoléculas como los lípidos y los aminoácidos.

Menús alternativos

La fotosíntesis, tal como la hemos descrito, no es un proceso que sea patrimonio exclusivo de las plantas, sino que también lo llevan a cabo las cianobacterias y las algas. De hecho, la mayor parte del oxígeno producido a lo largo de la historia de nuestro planeta, y del que se sigue produciendo hoy en día, lo liberan esos modestos organismos unicelulares.

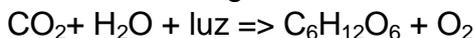
Por otra parte, aunque este tipo de fotosíntesis es un proceso deslumbrante, que genera la mayor parte de la materia orgánica, y por tanto de la vida, de nuestro mundo, no es la única manera que han encontrado los seres vivos, a lo largo de su historia, para procurarse autónomamente el sustento. Para empezar, como ya dijimos en el capítulo dedicado al origen de la vida, existen otros tipos distintos de fotosíntesis. Estas *otras* fotosíntesis están circunscritas al mundo de las bacterias y presentan diferencias notables con la fotosíntesis *estándar* de plantas, algas y cianofíceas.

En primer lugar, se diferencian en las moléculas a las que les son arrancados los electrones (o *donantes de electrones*) merced a la energía de la luz. Si la fotosíntesis de las plantas utiliza el agua como fuente de electrones (y de protones), las diferentes fotosíntesis alternativas emplean una pléyade de otras moléculas, que incluye diferentes compuestos de azufre (como el sulfuro de hidrógeno: H_2S), el hidrógeno molecular (H_2), distintas moléculas orgánicas (como el *succinato* o el *malato*), e incluso el hierro (en su forma reducida, o ferrosa). Al no escindir moléculas de agua, los organismos que realizan estos otros tipos de fotosíntesis no liberan oxígeno a la atmósfera, por lo que se habla de fotosíntesis *anoxigénica*.

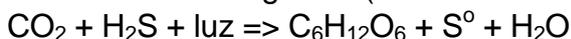
ca (es decir, no productora de oxígeno), en contrapartida a la fotosíntesis que sí libera oxígeno, que se denomina *oxigénica*.

Un buen ejemplo de fotosíntesis anoxigénica lo constituye el realizado por las bacterias rojas y verdes del azufre. Cuando, en páginas anteriores, nos detuvimos a explicar qué elementos químicos eran buenos oxidantes (o sea, aceptores de electrones o, si lo prefiere, de hidrógenos), mencionamos entre ellos al azufre. Al igual que el oxígeno, el azufre puede enlazarse covalentemente con dos átomos de hidrógeno para formar sulfuro de hidrógeno (H_2S). Es fácil apreciar que esta molécula es similar a la del agua (H_2O). Pues bien, en este tipo de fotosíntesis se emplea la energía de la luz para romper los enlaces entre el azufre y los hidrógenos y se utilizan los electrones y protones de los hidrógenos liberados para generar energía química (ATP) y moléculas transportadoras de hidrógeno (NADPH), igual que en la fotosíntesis oxigénica. Sin embargo, a diferencia de ésta, no se libera oxígeno (O_2) sino azufre elemental (S^0) y agua. Compare las fórmulas generales de ambos procesos y podrá apreciar los parecidos y las diferencias:

Fotosíntesis oxigénica:



Fotosíntesis anoxigénica (bacterias del azufre):



Pero las diferencias no acaban aquí. Los organismos que realizan cualquier tipo de fotosíntesis anoxigénica sólo disponen de un fotosistema en su maquinaria celular (y no de dos, como en el caso de plantas, algas y cianobacterias), cuya clorofila tampoco es exactamente

igual a la de los fotosistemas de las plantas. Por poner un ejemplo, la clorofila del único fotosistema de las bacterias rojas del azufre absorbe fotones de la luz de una longitud de onda de 870 nanómetros (sensiblemente mayor que los 700 nanómetros de la clorofila del Fotosistema I). El fotosistema bacteriano es equivalente al Fotosistema I y fue el primero en aparecer en la evolución, aunque pronto aparecieron organismos (las cianobacterias) pertrechados de ambos fotosistemas. La aparición del Fotosistema II, permitió el empleo del agua como donante de electrones, lo que supuso dos grandes ventajas. En primer lugar, el agua es un *combustible* mucho más abundante en nuestro mundo que cualquier otro donante de electrones alternativo y, además, se encuentra universalmente distribuido. La segunda mejora consistió en que, al ser el oxígeno un elemento de mayor poder de oxidación que el azufre, la rotura de la molécula de agua permite generar mayor cantidad de energía química.

Todavía quedan en nuestro mundo algunos microorganismos testigos de los tiempos de la aparición del Fotosistema II. Según como sean las condiciones ambientales, la cianobacteria *Oscillatoria limnetica* puede realizar la fotosíntesis oxigénica, con ambos fotosistemas trabajando en cadena, o bien la anoxigénica, empleando únicamente el Fotosistema I (de manera análoga al fotosistema bacteriano).

A finales de la década de 1880, el gran microbiólogo ruso Sergei Nicolaevitch Winegradsky (1856-1953) realizó un descubrimiento sorprendente: existen microorganismos (bacterias) que son capaces de generar autónomamente su propia materia orgánica en ausencia de luz. Hasta ese momento se pensaba que todos los seres vivos de la Tierra dependían para subsistir de la capacidad de los organismos fotosintéticos para convertir la luz so-

lar en materia orgánica. A estos organismos autótrofos que no emplean la fotosíntesis se les denomina como *quimiolitotrofos*.

Al igual que los organismos fotosintetizadores, los quimiolitotrofos precisan de un donante de electrones y una fuente de energía para convertir el dióxido de carbono en materia orgánica. El donante de electrones puede ser muy variado: las bacterias del hidrógeno emplean precisamente ese elemento (H_2), las incoloras del azufre utilizan el sulfuro de hidrógeno (H_2S), las nitrificantes usan el amoníaco (NH_4) y las del hierro se sirven de la forma ferrosa de este elemento. Como fuente de energía, estos organismos utilizan la que se libera al oxidar los donantes electrónicos. Así, en presencia de oxígeno, el hidrógeno se oxida a agua, el sulfuro pasa a sulfato, el amoníaco a nitritos y la forma ferrosa del hierro se transforma en la férrica. En esos procesos, los organismos quimiolitotrofos obtienen, a la vez, los electrones y la energía que necesitan para sintetizar su materia orgánica.

Seguramente, habrá reparado en que todos ellos necesitan de la presencia de oxígeno libre para llevar a cabo las reacciones de oxidación con las que obtienen su energía. Y como el oxígeno libre es un producto de la fotosíntesis oxigénica, podemos concluir que también estos organismos dependen de ese proceso, y por tanto de la luz solar, para subsistir. Esto es cierto. Pero también lo es que hay organismos quimiolitotrofos que no necesitan oxígeno para oxidar a los donantes de electrones, sino que emplean otros oxidantes, más débiles, como son el dióxido de carbono, el azufre, los sulfatos, los nitritos, o el hierro en su forma férrica. Estos quimiolitotrofos que no emplean el oxígeno sí que son realmente independientes de cualquier tipo de fotosíntesis y de la luz solar. Hoy día son muchos los especialistas que piensan

que los primeros seres vivos que aparecieron en nuestro planeta fueron organismos de este tipo.

En cualquier caso, tal como ya hemos visto, la fotosíntesis oxigénica es el proceso responsable de la formación de la mayor parte de la materia orgánica de nuestro mundo, tanto ahora como en el pasado remoto. Y puesto que nuestros combustibles fósiles, carbón, gas y derivados del petróleo, se han formado a partir de los restos de miles de millones de organismos pretéritos cuya materia orgánica fue sintetizada a partir de la energía de la luz, no olvide, la próxima vez que se detenga a llenar el depósito de su automóvil, que, a fin de cuentas, lo que dispensan en las gasolineras no es otra cosa que la luz del Sol... transformada en energía química.

CAPÍTULO VI

Los imprescindibles hongos

Guerra y paz

Para muchas personas, los términos hongo y seta son sinónimos. Pero esto es un error, la seta sólo es una estructura generadora de esporas que forman algunos tipos de hongos en el momento de la reproducción.

Pero si el hongo no es la seta, ¿cómo son entonces los hongos? Resulta un poco difícil de imaginar, puesto que los hongos no presentan tejidos ni órganos auténticos. De hecho, sus células ni siquiera están completamente separadas unas de otras, como sí ocurre en el caso de plantas y animales. Las células de los hongos forman hileras, llamadas *hifas*, conectadas entre sí en un conjunto reticular que recibe el nombre de *micelio*. El micelio de un hongo sencillo recuerda mucho a una hilacha de algodón.

Al carecer de órganos, los hongos no presentan tubo digestivo ni, en consecuencia, boca. Por lo tanto, los hongos no se tragan el alimento para luego digerirlo en su interior, sino que cada célula, de manera independiente, libera sustancias que descomponen la materia orgánica en sus moléculas elementales y luego las absorben.

La mayor parte de los hongos obtienen sus moléculas orgánicas descomponiendo partes muertas de otros seres vivos, como hojas caídas, la corteza de los árboles o la epidermis de los vertebrados terrestres. Éste es un

trabajo esencial que permite reciclar la materia orgánica en los ecosistemas, y del que hongos y bacterias son los principales protagonistas. Esta pacífica manera de ganarse el sustento recibe el nombre de *saprotitismo*.

Además del saprotitismo, muchos hongos consiguen sus moléculas orgánicas a través de un procedimiento mucho menos inocente: el *parasitismo*. Los hongos que utilizan esta manera de ganarse la vida crecen, sobre el organismo hospedante o, muy frecuentemente, dentro de sus tejidos. En este último caso, de las células del hongo brotan unas prolongaciones, llamadas *haustorios*, que se introducen en las células parasitadas y absorben de ellas los nutrientes. Evidentemente, esta forma de vampirismo celular es perjudicial para las células que lo sufren, pudiendo llegar a morir.

Los hongos parásitos de los seres humanos son escasos, pero, algunos de ellos pueden ser muy molestos (como el que produce el pie de atleta, *Trychophyton interdigitale*, o el causante de la tiña de la cabeza, *Microsporum audoninii*), o incluso fatales. Entre estos últimos se encuentra la especie *Candida albicans*, que habitualmente vive en la boca, el tubo digestivo y la vagina de las personas. Allí es mantenido a raya por la competencia que mantienen con esta especie otros microorganismos de la flora bacteriana. Pero cuando el equilibrio de esta flora se quiebra, el hongo puede proliferar y ocasionar patologías, como el afta de los bebés, vaginitis o infecciones cutáneas en axilas e ingles. Si se aspiran sus esporas y el hongo invade los pulmones puede llegar a ocasionar una grave dolencia, y hasta la muerte, si no se sigue el adecuado tratamiento.

Los insectos sufren muchas más infecciones por hongos que los vertebrados. Ésta es una circunstancia afortunada para nosotros, porque las especies parásitas pueden

ser empleadas en el control de plagas. Por ejemplo, en la lucha contra las poblaciones de los mosquitos *Anopheles*, propagadores de la malaria, se emplean hongos del género *Caelomyces* que destruyen las larvas de esos nocivos insectos.

Los hongos que son parásitos de las plantas constituyen una auténtica plaga y se calcula que son los responsables de alrededor del 80 por ciento del total de enfermedades sufridas por los vegetales. El hongo conocido como Cornezuelo del centeno (*Claviceps purpurea*), que infecta a esa gramínea, produce una sustancia altamente tóxica que causó estragos durante la Edad Media entre las desprevenidas personas que consumían este cereal. Otro ejemplo de las devastadoras consecuencias de los hongos parásitos de los vegetales cultivados ocurrió en 1840 en Irlanda, cuando un parásito de las patatas (*Phytophthora infestans*) arruinó la cosecha de ese tubérculo y ocasionó una tremenda hambruna que se saldó con millares de muertos (hay quien estima en cerca de un millón la cifra de fallecimientos por esta causa) y obligó a emigrar a una buena parte de la población.

Ni siquiera los propios hongos están a salvo de sus congéneres y hay especies micoparásitas capaces de infectar a otros hongos y vivir a su costa. Incluso algunas de ellas, como es el caso de *Penicillium vermiculatum*, pueden llegar a causar la muerte de los hongos invadidos.

Sin embargo, la muerte del hospedante nunca es un buen negocio para el parásito porque su propia supervivencia depende de la de su víctima. Por ello, a lo largo de muchos millones de años de evolución algunos hongos han encontrado formas de mejorar su relación con los organismos a los que parasitan. El truco consiste en dar algo a cambio del parasitismo. Aquellos hongos que, a lo largo de miles de generaciones, han llegado a favo-

recer de alguna manera a sus víctimas se aseguran un mejor suministro de alimento, aumentando con ello sus posibilidades de supervivencia. De este modo han aparecido, y se han perfeccionado, dos situaciones en las que los hongos benefician a los organismos que parasitan: se trata de la formación de líquenes (o *liquenización*) y de *micorrizas*.

Los líquenes son unos seres vivos que crecen sobre el suelo desnudo, en las superficies de las rocas, o sobre otros organismos (en las cortezas de los árboles, por ejemplo). Su aspecto puede ser escamoso, laminar o ramificado. Durante mucho tiempo, se pensó que los líquenes eran un tipo de organismo similar a los vegetales. Sin embargo, no es así. Los líquenes están formados por la reunión de dos seres vivos distintos que viven íntimamente unidos: un hongo y un organismo capaz de realizar la fotosíntesis (un alga unicelular o una cianobacteria). Al hongo que forma parte de un líquen se le denomina *micobionte*, mientras que el organismo fotosintetizador recibe el nombre de *fotobionte*. Aunque hay numerosos casos en los que un tipo de hongo concreto selecciona siempre el mismo tipo de alga (o de cianobacteria), también es muy frecuente que en un mismo líquen pueda haber diversos micobiontes y fotobiontes. Pero esta especie de promiscuidad celular no siempre cuenta con la tolerancia del micobionte. A veces, un hongo determinado infecta a un líquen previamente formado y, lejos de mostrarse amigable con el micobionte fundador, acapara las atenciones del fotobionte hasta hacer desaparecer a su competidor. A esta forma tan poco educada de comportarse, los botánicos la han bautizado como *cleptobiosis*.

Problemas de pareja aparte, lo cierto es que juntos, micobionte y fotobionte, pueden vivir en ambientes extre-

mos, en los que no podrían hacerlo por separado. De hecho, los líquenes se extienden desde las regiones árticas a las antárticas y son capaces de prosperar también en las cimas de las altas montañas y en los desiertos. Entre los pocos ambientes que les son hostiles a los líquenes, se encuentran las zonas donde el aire está contaminado, como es el centro de las grandes urbes. Dada su extraordinaria sensibilidad a la polución atmosférica, los líquenes constituyen un magnífico bioindicador de la calidad del aire.

En el seno de un líquen, las hifas del hongo protegen a las células del alga de la excesiva luminosidad y de la desecación. Además, las células del hongo son capaces de captar agua de la humedad ambiental y cedérsela al alga. También le aportan diversos nutrientes que sus células son capaces de absorber del sustrato. Pero nada es gratis en la naturaleza. El hongo no se toma tantas molestias por el bienestar del alga por un motivo altruista. De sus células parten haustorios que se introducen en las células del alga y absorben las moléculas orgánicas que el alga sintetiza mediante la fotosíntesis.

Se trata de una unión de conveniencia entre el hongo y el alga, ya que si el medio ambiente es favorable para el crecimiento de cualquiera de los dos socios por separado (o de ambos), la liquenización no se produce. Como corresponde a organismos autónomos, hongo y alga se reproducen sexualmente por separado, aunque también han desarrollado un sistema de reproducción asexual conjunta, que consiste en desprender fragmentos del líquen que contienen a ambos.

El fenómeno de la liquenización es muy beneficioso para los demás organismos con los que comparten ecosistemas: algunos tipos de líquenes (en los que intervienen las cianobacterias como fotobiontes) son los mayores

productores de sales de nitrógeno, aprovechables por las plantas, de muchos ecosistemas.

Los hongos también han aprendido a establecer sociedades de beneficio mutuo con las plantas, a través de la formación de micorrizas. En este caso, el hongo *infecta* las raíces de sus hospedantes y extrae de sus células los hidratos de carbono que la planta produce en el tallo y las hojas a través de la fotosíntesis. Como contrapartida, el hongo se desvive para mejorar las condiciones de vida de la planta. Aumenta la capacidad de la absorción de agua de las raíces y también facilita la incorporación de algunos nutrientes (sales minerales) indispensables para la planta, como el sodio, el potasio, el nitrógeno y, sobre todo, el fósforo. Además, el hongo produce hormonas de crecimiento para su hospedante y lo protege frente al ataque de microorganismos patógenos. Este tipo de asociación está muy extendido en el mundo de las plantas y permite a muchas de ellas vivir en lugares en los que no podrían hacerlo sin contar con la ayuda del hongo.

También pueden encontrarse casos extraordinarios de cooperación entre insectos y hongos. La avispa de la madera (*Sirex noctilio*) y el hongo *Amylosterum areolatum* mantienen una relación de la que ambos se benefician mutuamente. Las hembras de las avispas presentan unos receptáculos especiales, en forma de bolsa, en donde transportan esporas del hongo. Cuando realizan la puesta, las avispas taladran la madera de los árboles para construir pequeños túneles. En uno de ellos depositan sus huevos y en los otros dejan caer las esporas del hongo. Es evidente que la avispa favorece grandemente la dispersión de las esporas del hongo. La contrapartida tiene lugar cuando las larvas del insecto salen del interior de los huevecillos. Entonces, se encuentran con una

buena provisión de alimento en forma de la madera descompuesta por la acción de las hifas del hongo, que han proliferado antes del nacimiento de las jóvenes avispas.

Como puede ver, los hongos demuestran una gran *sabiduría* a la hora de explotar los recursos de su entorno. El modo de vida saprófito les permite acceder a un recurso por el que no compiten otros organismos como las plantas y los animales. Sus mayores competidores en este campo son las bacterias, a las que, como veremos enseguida, han aprendido a mantener a raya. Y muchos de aquellos hongos que se ganan el pan de cada día mediante el parasitismo han desarrollado estrategias basadas en la cooperación con sus víctimas, lo que permite que el hongo y su hospedante puedan vivir en lugares que de otro modo les estarían vedados. En sus relaciones con los otros seres vivos, los hongos han demostrado que pueden ser unos terribles enemigos o unos valiosísimos aliados.

No hay enemigo demasiado pequeño

Como ya hemos comentado, muchas bacterias son también saprófitas, por lo que compiten con los hongos por la fuente de alimento. Esta competencia entre hongos y bacterias lleva ocurriendo desde hace muchos cientos de millones de años, en el transcurso de los cuales los hongos han descubierto una serie de moléculas que, liberadas al medio externo, eliminan a sus competidores bacterianos y permiten al hongo disfrutar en solitario del banquete. Se trata de una de las guerras químicas más antiguas de las que se tiene noticia.

Los seres humanos también estamos en guerra con las bacterias. Son las causantes de muchas enfermedades

contagiosas, cuyo solo nombre aún nos hace estremecer, como la lepra, la tuberculosis, la sífilis, o la peste bubónica. Además, las bacterias también son las responsables de las infecciones que siguen a las heridas (en la guerra, el trabajo, las intervenciones quirúrgicas, o los alumbramientos, por ejemplo), que han sido la causa de la muerte de muchísimas personas. Por ello, muchos científicos han dedicado sus vidas a buscar sustancias que puedan acabar con las bacterias sin afectar a nuestras propias células. La tarea era muy complicada, porque no es fácil encontrar un veneno que ataque a un tipo de ser vivo (las bacterias) sin que también actúe sobre otro (nuestras células). Por ello, los remedios que se elaboraban eran, a menudo, casi tan peligrosos como las propias enfermedades.

Afortunadamente, hemos encontrado en los hongos un valiosísimo aliado. Entre los muchos investigadores que en el año 1921 se dedicaban a estudiar la biología de las bacterias, tratando de hallar algún método eficaz de combatir contra ellas, se encontraba un científico de origen británico llamado Alexander Fleming (1881-1955). Su método de trabajo consistía, básicamente, en cultivar bacterias en unos pequeños recipientes redondos de fondo plano, denominados placas de Petri. Con el adecuado medio de cultivo, las bacterias proliferan en las placas de Petri hasta formar colonias coloreadas, perceptibles a simple vista. Añadiendo a los medios de cultivo de las placas las sustancias con las que se desea experimentar, es fácil reconocer si el crecimiento de la colonia bacteriana se ve alterado por la presencia de la sustancia en cuestión. Una vez encontrado un producto tóxico para las bacterias, el siguiente paso es experimentar su efecto en los mamíferos y, finalmente, en los humanos. Evidentemente, es mucho más sencillo de contar que de realizar.

Trabajando de este modo, Fleming buscaba sustancias que pudieran destruir las colonias bacterianas y que al mismo tiempo resultaran inocuas para el ser humano. Entonces tuvo una idea extravagante pero cuyos resultados tuvieron, a la larga, una enorme trascendencia en la historia de la humanidad: aprovechando que se encontraba resfriado, añadió a uno de los cultivos parte de su propia mucosidad. En contacto con ella, la colonia bacteriana desaparecía. Fleming dedujo correctamente que la mucosidad debía contener alguna sustancia que eliminaba las bacterias. También pudo comprobar que la saliva y las lágrimas producían un efecto similar. Sin duda, la sustancia presente en el moco también estaba en los otros fluidos corporales y debía formar parte de un sistema natural de defensa contra las bacterias. Fleming denominó *lisozima* a dicha sustancia. Desgraciadamente, la lisozima sólo era eficaz contra unas pocas bacterias, ninguna de las cuales era responsable de las terribles enfermedades e infecciones causadas por ellas.

Siete años más tarde, una tarde del mes de septiembre de 1928, Fleming volvió a toparse con una sustancia letal para las bacterias, pero esta vez su eficacia resultó ser mucho mayor que en el caso de las lisozimas. En relación con una investigación relacionada con el virus de la gripe), Fleming había sembrado varias placas de Petri con la bacteria *Staphylococcus aureus*, una inquilina habitual de la superficie de la piel que es la causante de las infecciones en los dedos cuando se producen pequeñas heridas.

La técnica de inseminación de los medios de cultivo de las placas de Petri es sencilla, pero requiere del necesario cuidado para evitar que dichos medios se vean contaminados por las esporas de otros microorganismos, siempre presentes en el polvo del aire.

Pues bien, una de las preparaciones del laboratorio de Fleming no se había realizado con el suficiente cuidado y estaba contaminada por la presencia de un moho (un tipo de hongo) verdoso muy común: el *Penicillium notatum*. Los hongos que pertenecen al género *Penicillium* se encuentran entre los más frecuentes en nuestra vida cotidiana. Algunos de ellos son los que echan a perder algunas frutas (especialmente cítricos) en nuestros frigoríficos y despensas. También son los responsables del peculiar sabor de los quesos Roquefort (el *Penicillium roqueforti*) y Camembert (*Penicillium camemberti*).

En aquella tarde de septiembre, Fleming reparó en la placa de Petri incorrectamente preparada. Su mirada, entrenada durante muchos años en la observación de la más mínima alteración del crecimiento de las colonias bacterianas, quedó detenida en la zona de contacto entre la colonia del moho y la de la bacteria. Alrededor de la primera había un espacio en el que la bacteria no medraba. Inmediatamente, Fleming intuyó el significado de aquello: el hongo debía de producir alguna sustancia que eliminaba a la bacteria.

Dejando a un lado las demás investigaciones, Fleming se concentró en intentar aislar la sustancia producida por el hongo. Procedió a retirar de la placa de Petri la colonia del moho y la introdujo en un recipiente lleno de caldo de cultivo. Al cabo de poco tiempo el hongo había proliferado y el caldo de cultivo se había tornado de un color amarillento como resultado de la presencia de una sustancia sintetizada por el *Penicillium*, a la que Fleming bautizó como *penicilina*. Sus experimentos posteriores le mostraron que la penicilina era mortífera para un gran número de bacterias, incluso diluida muchos centenares de veces.

Tan sólo cinco meses desde su primera observación, Fleming dio a conocer su hallazgo en el Club de Investigaciones Médicas de Londres, pero la noticia no mereció la atención de sus colegas, por lo que Fleming procedió a conservar su extracto de penicilina y volvió a sus otras investigaciones.

Visto de forma retrospectiva, podemos asombrarnos, e incluso indignarnos, ante la falta de perspicacia de la sociedad científica de aquella época. Pero la realidad es que una cosa es descubrir una sustancia con propiedades terapéuticas y otra muy diferente el ser capaz de producirla en cantidades suficientes como para que sea de utilidad. En la época del descubrimiento de Fleming las técnicas bioquímicas no habían alcanzado el gran desarrollo que tienen hoy día y la tarea de extraer, purificar y concentrar grandes cantidades de penicilina quedaba fuera de su alcance. Eso explica el aparente desinterés en el que a la postre resultó ser el mayor descubrimiento de la historia de la medicina.

Hubieron de pasar once años antes de que la ciencia volviera a reparar en la existencia de la penicilina. En 1933, un brillante investigador en bioquímica se había visto obligado a abandonar su patria, Alemania, debido a su ascendencia judía y decidió emigrar a Gran Bretaña. Se trataba de Ernst Boris Chain (1906-1979). Tras una estancia de dos años en la Universidad de Cambridge, Chain recaló en la Universidad de Oxford donde comenzó a trabajar con otro notable científico, de origen australiano: Howard Walter Florey (1898-1968). Entre otras líneas de trabajo, se dedicaron a la investigación de sustancias bactericidas producidas por otros microorganismos. De este modo, se interesaron por las investigaciones de Fleming sobre las lisozimas y este interés les llevó a conocer su trabajo con la penicilina.

Pertrechados de medios técnicos más avanzados y siendo expertos en el campo de la bioquímica, no tardaron en aislar y concentrar una pequeña cantidad de penicilina. Su concentrado era mil veces más potente que el extracto obtenido por Fleming. A continuación experimentaron con ratones y descubrieron que la penicilina era extraordinariamente eficaz contra muchos tipos de bacterias y que carecía de efectos tóxicos para los mamíferos.

Con su exigua provisión de penicilina, que era de obtención muy laboriosa (hacían falta dos mil litros de caldo de cultivo para obtener la dosis necesaria para tratar un solo caso), atendieron a algunos pacientes aquejados de infecciones bacterianas y pudieron comprobar que el efecto de la penicilina era el mismo en los seres humanos que en los ratones. Pero aún quedaba el problema técnico de la producción de penicilina en grandes cantidades. Florey y Chain buscaron ayuda y recursos en el Gobierno y las industrias británicas, pero corría el año de 1940 y el país se hallaba inmerso en la Segunda Guerra Mundial y no disponía de medios para dedicar a este tipo de investigaciones.

Entonces Florey viajó a los Estados Unidos, que aún no habían entrado en la guerra, y allí encontró el apoyo que precisaba. Más aún cuando el país se vio involucrado en el conflicto, el Gobierno declaró la penicilina producto prioritario de guerra. Las investigaciones dedicadas a conseguir que se produjera penicilina masivamente se intensificaron y a finales de 1942 los principales problemas técnicos ya estaban resueltos. Entre los hallazgos que permitieron aumentar espectacularmente la producción de penicilina estuvo el descubrimiento de otro tipo de hongo, el *Penicillium chrysogenum*, cuya productividad era doscientas veces mayor que la del *Penicillium*

notatum. Este y otros avances permitieron incrementar la producción de penicilina de tal manera que al finalizar la Segunda Guerra Mundial la industria farmacéutica suministraba la cantidad suficiente para el tratamiento de siete millones de enfermos al año.

El descubrimiento de la penicilina no sólo permitió disponer de un eficaz remedio para enfermedades de elevadas tasas de mortalidad (como la sífilis, la difteria, la escarlatina y la gangrena gaseosa, por poner algunos ejemplos), sino que abrió el camino para el posterior descubrimiento de nuevas sustancias sintetizadas por los hongos, u otros organismos, igualmente eficaces en la lucha contra las mortíferas bacterias. Había comenzado la era de los antibióticos.

Fleming, Chain y Florey fueron honrados universalmente y sus méritos certificados por la concesión del premio Nobel de Medicina de 1945. Aunque los tres obtuvieron las más variadas distinciones y galardones, fue Fleming quien recibió el máximo reconocimiento. Entre los títulos, condecoraciones y nombramientos que recibió destacan su nombramiento (en 1944) como *sir* (caballero), la Gran Cruz de Alfonso X el Sabio (en 1948), el doctorado *Honoris Causa* por más de treinta universidades de todo el orbe, y el nombramiento de jefe Honorario *Doy-Gei-Tan* de la tribu Kiowa.

Si a usted, como a nosotros, le resulta intrigante el significado de este último título (*Doy-Gei-Tan*), no le importará que dejemos un momento de lado a los hongos para dedicar unas líneas a los indios americanos.

Llevados por nuestra curiosidad de conocer el significado de esas palabras en kiowa, recurrimos a nuestro amigo (y catedrático de Lingüística de la Universidad Complutense de Madrid) Enrique Bernárdez, amante de las

lenguas amerindias y conocedor de alguna de ellas como el navajo. Pero el problema de la traducción de *Doy-Gei-Tan* era más peliagudo de lo que nosotros suponíamos. En la actualidad el nombre *kiowa* se aplica a dos tribus diferentes: a los kiowas propiamente dichos, que viven mayoritariamente en el estado de Oklahoma, y a una rama de los apaches, a los que también se llama kiowas, pero cuya lengua es totalmente distinta de la de los *auténticos* kiowas.

Nuestro amigo comenzó a investigar bajo la hipótesis de que habían sido los *verdaderos* kiowas quienes habían concedido a Fleming la distinción y se encontró con que se trata de una lengua casi perdida de la que, aunque existe una gramática, no hay diccionario. Decidió entonces ponerse en contacto con los propios kiowas y descubrió que casi nadie habla esa lengua en la actualidad. A día de hoy, la tribu kiowa cuenta con alrededor de 7.000 miembros, de los que sólo unos mil, la inmensa mayoría ancianos, tienen nociones de su lengua. Desgraciadamente, el kiowa está entre las lenguas cuya desaparición a corto plazo parece inevitable.

Lejos de desanimarse, nuestro amigo siguió indagando y se puso en contacto con el director del Kiowa Tribal Museum, Ernest Yellowhair Toppah (que ignoraba la distinción que los propios kiowas habían otorgado a Fleming). Yellowhair reunió a los ancianos de la tribu para hacerles la consulta y, entre todos, dieron solución al enigma: *Doy* quiere decir *medicina* y *Gei-Tan* significa *encontró*. De manera que finalmente pudimos conocer, rescatado del olvido, el significado del título con el que los kiowas quisieron honrar a Fleming: *El que encontró la Medicina*.

De la historia del hallazgo de la penicilina podemos extraer una enseñanza de gran importancia en nuestros

días: ninguna especie está de más en este planeta. Los biólogos y asociaciones conservacionistas nos alertan a diario sobre la catástrofe que supone la reducción de la biodiversidad como consecuencia de las actividades humanas. Hay especies que tienen la fortuna de gozar del aprecio generalizado (los orangutanes, gorilas, lince, osos, elefantes, o ballenas, por poner unos ejemplos) y no hace falta argumentar la importancia de mantenerlas en este planeta. Pero hay otros organismos que no cuentan con nuestras simpatías, o a los que apenas llegamos a conocer porque los extinguimos casi a la vez que los descubrimos. Incluso sospechamos, con gran certeza, que hay especies que nunca conoceremos, porque las estamos haciendo desaparecer antes, incluso, de tener noticias suyas. Dejando a un lado, no por menos importantes, los argumentos éticos para frenar esta sangría en la biodiversidad de nuestro mundo, el caso de la penicilina nos ofrece un extraordinario ejemplo de cómo cualquier ser vivo puede sernos de gran ayuda. Aunque aún no sabemos cómo.

La totalidad de los seres vivos de este planeta constituye nuestro patrimonio más valioso, pero también pertenece a los que están por venir. Seamos justos con ellos y no lo dilapidemos.

CAPÍTULO VII

Los primeros de *Nosotros*

Si no quedara en el planeta ningún vestigio de los organismos que vivieron en el pasado, si no existieran los fósiles, ¿cómo nos imaginaríamos la historia de la vida?

Sin duda, el estudio de los organismos actuales nos habría llevado a descubrir el fenómeno de la evolución. De hecho, en la época de Darwin se conocían muchos menos fósiles que en la actualidad y su interpretación llevaba a algunos paleontólogos a negar el hecho evolutivo. La veracidad de la evolución puede ser demostrada a partir de nuestro conocimiento de las bases moleculares de la herencia, o con argumentos biogeográficos (esto es, la distribución geográfica de los organismos) y de anatomía comparada, tal como hizo Darwin. Los mecanismos que impulsan el proceso evolutivo, cambio aleatorio del material genético y selección natural, también pueden estudiarse sin fósiles. Más aún, las relaciones evolutivas entre los actuales seres vivos pueden ser establecidas con gran fiabilidad a partir de análisis anatómicos, embriológicos y moleculares, sin contar con el registro fósil.

Lo que nos estaría vetado, si no dispusiéramos de fósiles, es el conocimiento de la vida del pasado. ¿Cómo podríamos llegar a saber que hace más de sesenta y cinco millones de años existieron unos animales magníficos que poblaron los continentes, los mares y los aires y que luego desaparecieron para siempre de la faz de la Tierra? Seguramente sabríamos que los chimpancés y

los humanos estamos estrechamente emparentados (más aún que el gorila y el chimpancé entre sí) y que compartimos un antepasado común que vivió entre hace siete y cinco millones de años, pero ¿tendríamos alguna posibilidad de conocer el proceso por el que nos hemos hecho humanos?, ¿podríamos acaso saber si ocurrió antes el aumento de tamaño del cerebro o la adquisición de la locomoción bípeda? La respuesta es que no.

Los fósiles nos proporcionan una información valiosísima no sólo sobre los organismos que vivieron en el pasado, y que ya no están entre nosotros, sino que además nos permiten saber *cómo* se desarrolló la historia de la vida. Sin fósiles, quizá nos imaginaríamos que los diversos tipos de organismos que pueblan actualmente el planeta fueron apareciendo de forma gradual y paulatina. Y tal vez concebiríamos otra historia no menos tranquila sobre la extinción de los organismos intermedios entre las formas actuales.

Lo que seguramente no podríamos imaginar es la turbulenta historia que narran los fósiles. Episodios trágicos de fulminantes extinciones masivas, capítulos gloriosos de proliferación súbita de numerosas formas de vida desapareces y largos episodios de calma, apenas alterados por un continuo goteo de aparición y extinción de especies. Los fósiles nos permiten conocer que la historia de la vida ha sido convulsa y está jalonada de acontecimientos extraordinarios. Y de entre todos ellos, quizá el más fascinante sea el de la aparición de nuestro propio reino.

Ya hemos comentado que cuando Darwin publicó *El origen de las especies* el registro fósil era muy reducido y que desde el campo de la paleontología se alzaron voces en contra de lo defendido por Darwin y a favor de la inmutabilidad de las especies. Uno de los argumentos de mayor peso que esgrimían los adversarios de Darwin era

la aparición repentina del reino animal, hace unos 545 millones de años. Este suceso sirve para dividir la historia de la Tierra en dos grandes capítulos: el *Proterozoico* (o época anterior a los animales) y el *Fanerozoico* (o época de los animales visibles). El primer periodo del Fanerozoico recibe el nombre de *Cámbrico*. En el tiempo de Darwin no se habían encontrado fósiles de animales en las rocas anteriores al Cámbrico (es decir, *precámbricas*), mientras que en las rocas cámbricas se encontraban en gran profusión. Además, en los fósiles cámbricos ya era posible reconocer a los primeros representantes de la práctica totalidad de filos que componen el reino animal: veintinueve de los treinta filos que se conocen en la actualidad, y que tienen registro fósil, ya están presentes en los estratos cámbricos.

La teoría de la selección natural, formulada por Darwin, predice la aparición *gradual* de las diferentes formas de seres vivos y era difícilmente compatible con la aparición súbita del reino animal, con toda su diversidad ya establecida desde el principio, tal como parecían registrar los fósiles. Había quien argumentaba que esta aparición fulminante atestiguaba el momento de la creación de los animales, tal como se narra en la Biblia: en un momento, y todos a la vez.

En el capítulo décimo de *El origen de las especies* Darwin se ocupó de este problema, reconociendo que se trataba de una cuestión de muy difícil explicación y que «puede ser esgrimido con toda propiedad como un argumento válido contra las ideas aquí expuestas». Aunque Darwin reconocía que «no puedo dar una respuesta satisfactoria a la pregunta de por qué no encontramos ricos depósitos fosilíferos pertenecientes a esos períodos que, presumiblemente, ocurrieron antes del sistema Cámbrico», estaba seguro de que la vida animal debió

de existir antes del Cámbrico. En apoyo de esta idea, Darwin invocó, desde la cuarta edición de *El origen...*, la existencia de un fósil enigmático, llamado *Eozoon canadiensis*, que había sido hallado en 1858 por William Edmond Logan (1798-1875) en rocas de edad precámbrica del oeste de Canadá.

Sin embargo, la naturaleza de este presunto fósil era muy controvertida. Para una parte de los paleontólogos se trataba de un auténtico fósil, que atestiguaba la presencia de animales en el *Precámbrico*, mientras que otros muchos, entre ellos el español Juan Vilanova y Piera (1821-1893), opinaban que se trataba de un falso fósil, de origen mineral. La cuestión fue solventada por Karl August Möbius (1825-1908), quien demostró el origen inorgánico del presunto fósil.

Pero independientemente de cuál fuera la naturaleza del *Eozoon*, el principal argumento de Darwin para intentar justificar la ausencia de un amplio registro fósil anterior al Cámbrico era la imperfección del registro fósil. En esa línea, Darwin apuntó que: «No debemos olvidar que sólo conocemos rigurosamente una pequeña porción del mundo.» De este modo, Darwin expresó su esperanza de que tal vez se encontrarían fósiles precámbricos de animales cuando se conocieran mejor las vastas regiones entonces inexploradas del planeta. Dicho en otros términos, Darwin esperaba que en el futuro se hallase, en alguna parte del mundo, la *fuentes* de la que había surgido el río del reino animal, que en el Cámbrico ya era muy caudaloso.

Todavía hoy, el origen de los animales se pierde en la noche de los tiempos y, aunque es razonable suponer que debió ocurrir bastante antes de su irrupción repentina en el registro fósil, lo cierto es que apenas tenemos noticias de animales fósiles hasta cerca de 600 millones

de años. Esto puede ser así porque los primeros animales eran muy sencillos, compuestos quizá por sólo unas pocas células, y no sintetizaban elementos duros susceptibles de fosilizar. Sin embargo, incluso teniendo en cuenta esos factores, la historia que encontramos registrada en las rocas sedimentarias nos habla de un mundo dominado por los seres unicelulares.

Los estromatolitos se hicieron frecuentes desde hace alrededor de 2.900 millones de años y los encontramos en zonas geográficas muy dispares, revelando el éxito de los mantos bacterianos que los originan. Es concebible que en el seno de dichos mantos se dieran las condiciones adecuadas para la aparición de los primeros protistas, tanto heterótrofos (que podrían alimentarse de las propias bacterias, o de sus restos) como autótrofos. El primer fósil del que se está razonablemente seguro que pertenece a un protista data de hace 2.100 millones de años y se atribuye a un alga unicelular (*Grypania spiralis*). También se piensa que eran algas unicelulares los organismos que produjeron unos fósiles relativamente abundantes hace 1.600 millones de años, los *acritarcos*.

Sin embargo, no hay fósiles de esa antigüedad que se puedan atribuir con seguridad a los grupos de protistas heterótrofos, entre los que debieron estar los antepasados directos de los animales. Los primeros fósiles seguros de protistas heterótrofos proceden de estratos datados en unos 850 millones de años, en la localidad del centro de Australia conocida como Bitter Springs. Lo cierto es que las algas unicelulares secretan una pared celular lo suficientemente espesa y resistente como para favorecer su fosilización, mientras que muchos protistas heterótrofos no lo hacen, por lo que sus posibilidades de fosilizar y de ser reconocidos por los investigadores son mucho menores.

Sea como sea, lo cierto es que, como si se tratara de una ópera wagneriana, la aparición en el registro fósil de los primeros animales estuvo precedida por un acontecimiento colosal a escala planetaria. Hace entre 610 y 590 millones de años tuvo lugar la que seguramente fue la mayor de todas las glaciaciones que ha sufrido nuestro planeta. La gran glaciación *Varangiense* (también conocida como *Lapländiense* o *Marinoense*), no sólo duró veinte millones de años, sino que además afectó a la totalidad de las tierras emergidas, algo único en la historia de la Tierra. Coincidiendo con el final de esta ciclópea glaciación aparecen registrados en los sedimentos las improntas de un buen número de organismos nunca antes vistos; entre ellos, los primeros animales.

En las cercanías de la ciudad australiana de Adelaida se encuentra un paraje llamado Ediacara Hills, en donde está enclavada una vieja mina de plata abandonada. Un buen día de 1946 el eminente geólogo australiano Reginald Claude Sprigg (1919-1994) se encontraba en aquel lugar realizando un estudio geológico relacionado con la minería, cuando decidió concederse un breve descanso para almorzar. De manera distraída comenzó a levantar lajas de roca con su martillo de geólogo y reparó en que en muchas de ellas aparecían tenues impresiones que Sprigg reconoció como fósiles. Aunque pensaba que las rocas de Ediacara eran de comienzos del Cámbrico, pronto se estableció que en realidad eran más viejas y pertenecían a finales del Precámbrico, con una antigüedad de unos 590 millones de años (casi cincuenta millones de años más que las rocas cámbricas más antiguas). La esperanza de Darwin de que se encontraran fósiles de animales precámbricos en algún lugar recóndito del globo se había visto colmada. Y por una deliciosa coincidencia, el término Ediacara deriva de un vocablo de la lengua aborígen que significa *manantial*.

Los fósiles de Ediacara no eran los primeros que se conocían de época precámbrica, ya se habían producido algunos descubrimientos ocasionales desde mediados del siglo XIX. Pero se trataba de hallazgos dispersos de pocos fósiles de difícil interpretación, que no permitían abordar el problema del origen de los animales. Sin embargo, los fósiles de Ediacara, además de ser muy numerosos, registran con aceptable nitidez algunas de las estructuras de los animales que los produjeron. De hecho, se trata de organismos que carecían de cualquier tipo de esqueleto, y lo que se conserva es la impronta de sus tejidos blandos, algo excepcional en el registro fósil.

Los organismos fosilizados en Ediacara vivían en el suelo de un mar poco profundo. Periódicamente, las tormentas removían las arenas del fondo que, al depositarse de nuevo, cubrían a sus habitantes. Los organismos así enterrados morían y se descomponían, pero antes la forma de sus cuerpos quedaba impresa en los sedimentos arenosos que constituían su sudario.

El hallazgo de Ediacara impulsó a muchos investigadores a buscar y registrar minuciosamente rocas de la misma antigüedad, lo que permitió hallar cerca de una docena de nuevos yacimientos repartidos por varios continentes, confirmando y ampliando el descubrimiento realizado por Sprigg en Ediacara. Al conjunto de fósiles de todos estos yacimientos se los denomina habitualmente como *fauna ediacarensis*. Los primeros estudios sobre estos organismos llevaron a la conclusión de que se trataba de formas primitivas de algunos de los filos de animales conocidos desde el Cámbrico.

Este punto de vista cuadraba a la perfección con lo esperado por Darwin: la aparentemente súbita aparición de los animales en el Cámbrico había estado precedida de etapas intermedias en las que los distintos filos de ani-

males habían ido surgiendo gradualmente. Sin embargo, esta interpretación de los fósiles de Ediacara fue contestada por otra visión mucho más revolucionaria, propuesta desde mediados de la década de 1980 por el paleontólogo alemán Adolf Seilacher, según la cual muchos de los organismos fosilizados en Ediacara no se corresponden con auténticos animales, sino con un tipo diferente y nuevo de organismos pluricelulares que bautizó como *vendozoos* o *vendobiontes* (en referencia al periodo geológico, el Vendense, en que se encuentran sus fósiles). Según Seilacher, los vendobiontes se apartan de los auténticos animales porque carecen de boca o cualquier otro orificio que les permita ingerir el alimento, rasgo éste que es distintivo del reino animal.

Los animales nos diferenciamos de los hongos, que también son criaturas pluricelulares y heterótrofas, en dos rasgos fundamentales. Por un lado, nuestras células están altamente especializadas en realizar distintas tareas y se organizan en tejidos. Además, nosotros engullimos el alimento a través de aberturas al exterior (la boca, fundamentalmente). De modo que nuestras células absorben los nutrientes en el interior de una cavidad interna (aparato digestivo), en la que habitualmente el alimento es degradado por la acción de sustancias liberadas por células especializadas (con la excepción de las esponjas y algunos tipos de parásitos internos, cuya morfología ha variado mucho como resultado de su profunda adaptación a ese tipo de vida). A este último proceso se lo conoce como *digestión*, y es exclusivo de los animales.

A la falta de boca, u otros orificios, se puede añadir que los vendobiontes eran organismos que carecían de la capacidad de desplazarse autónomamente (por eso quedaron enterrados, porque no pudieron huir) y que sus

cuerpos presentaban una gran superficie. Tan extraños resultan muchos de ellos, que hay quien ha llegado a proponer que se trata de líquenes. La ausencia de boca y la incapacidad de desplazarse hace difícil de imaginar cómo podrían obtener el alimento y ha hecho que Seilacher propusiera que quizá los vendobiontes absorbieran los nutrientes directamente del agua del mar, e incluso que incluyeran algas en sus tejidos y, al igual que los hongos en los líquenes, obtuvieran de éstas parte de su alimento. La reconstrucción ideada para algunas de estas extrañas criaturas, como las llamadas *Dickinsonia* y *Charniodiscus*, las muestra como delgados colchones, divididos en compartimentos rellenos de líquido, en donde vivirían las algas que les proporcionaban el sustento.

Esta idea de que pudiera haber existido un tipo de organismo heterótrofo que obtuviese el alimento *cultivando* microorganismos en su interior, a los que haría llegar los nutrientes del medio externo, puede parecer extravagante e incluso descabellada. Sin embargo, en la biosfera actual hay animales que hacen exactamente eso. Entre ellos está un gusano tubícola, *Riftia pachyptila*, que vive en las inmediaciones de fuentes termales submarinas, llamadas humeros o fumarolas, a casi tres mil metros de profundidad. Estas chimeneas abisales producen un chorro de agua caliente, rica en sulfuro de hidrógeno. Ya hemos visto que el sulfuro de hidrógeno puede ser empleado como fuente primaria de energía para sintetizar materia orgánica por un conjunto de bacterias quimiolitotrofas.

Al igual que los vendozoos, *Riftia* no tiene boca ni tubo digestivo; únicamente presenta, en el extremo de su cuerpo que sobresale del tubo que constituye su hogar, un penacho de branquias a través de las cuales respira el animal. Puesto que carece de boca, o de cualquier

otra abertura en su cuerpo por la que poder ingerir la más pequeña partícula, ¿cómo obtiene el alimento *Riftia*? La respuesta está en un peculiar órgano que rellena buena parte del cuerpo del animal: el *trofosoma*, cuyas células se encuentran literalmente invadidas de un elevadísimo número de bacterias capaces de producir materia orgánica a partir de la oxidación del sulfuro de hidrógeno. Ahí está el secreto de la supervivencia de *Riftia*: este *ingenioso* gusano toma el sulfuro de hidrógeno del medio a través de sus branquias y se lo hace llegar, por medio de su sistema circulatorio, a las bacterias que pululan en las células de su trofosoma. En justa correspondencia, las bacterias pasan a su hospedador parte de las moléculas orgánicas que sintetizan. De este modo, la cooperación entre el gusano y las bacterias permite la supervivencia de ambos. Esta forma de vida ha exigido adaptaciones muy complejas en *Riftia*, que incluyen la presencia de un tipo de hemoglobina muy especial. Y *Riftia* no es el único animal que utiliza a las bacterias del azufre para subsistir. También lo hacen otros moradores de las fumarolas abisales como son la almeja *Calypptogena magnifica* y el mejillón *Bathymodiolus thermophilus*. De manera que el modo de vida propuesto para los vendobiontes no es tan excéntrico como podría parecer.

Hoy día, muchos paleontólogos aceptan la interpretación de Seilacher para una buena parte de los fósiles ediacárenses. Sin embargo, hay otros fósiles que sí se pueden relacionar con algunos de los filos conocidos del reino animal, como los *poríferos* (o sea, las esponjas), los *cnidarios* (anémonas de mar, corales y medusas), los *equinodermos* (estrellas y erizos de mar, entre otros), los *artropodos* (el grupo más numeroso del reino animal que incluye, por ejemplo, a los insectos, cangrejos, arañas, ciempiés y al grupo exclusivamente fósil de los trilobites)

y otros varios tipos, de aspecto vermiforme, que comúnmente agrupamos bajo el nombre de *gusanos*.

Este punto de vista se ha visto reforzado en la última década del siglo XX tras el descubrimiento, en el norte de Rusia, del mayor yacimiento de fauna ediacareense del mundo. A partir de los hallazgos realizados en los últimos años en este lugar, se ha publicado recientemente que uno de los fósiles enigmáticos de Ediacara, llamado *Kimberella*, podría tratarse del antepasado directo de los moluscos (filo que incluye, entre otros animales, a los pulpos y afines, a los caracoles, y a los bivalvos, como el mejillón o las ostras).

O sea, que hace cerca de 600 millones de años convivían los antepasados directos de algunos de los principales tipos de animales (en número de especies) junto con unas extrañas criaturas, los vendozoos, que ya no existen en la actualidad. Esta conclusión abre la puerta a una cuestión del máximo interés: si se puede rastrear el origen de algunos de los principales filos de animales hasta hace cerca de 600 millones de años, ¿cuándo se produjo su separación? O dicho de otro modo: ¿cuándo aparecieron los primeros animales?

Ya hemos visto que el registro fósil no es de mucha ayuda para la época que se extiende más allá de los tiempos de Ediacara. ¿Dónde buscar entonces? La respuesta estriba en intentar leer la historia que los actuales animales llevan escrita en su propio material genético. Cuando una determinada especie produce, por evolución, dos especies descendientes, ambas comparten (es decir, tienen igual) la inmensa mayoría de sus genes. La diferencia que las separa todavía es muy pequeña y sólo afecta a una pequeñísima fracción de su material genético (las estirpes de los seres humanos y de los chimpancés se separaron hace alrededor de seis millones de

años y todavía compartimos el 99 por ciento de nuestro material genético). A partir de ese momento la divergencia genética, al igual que la diferencia morfológica, se va acrecentando con el discurrir del tiempo.

Este hecho ha permitido idear a los biólogos moleculares una ingeniosa manera, conocida como *reloj molecular*, de estimar el tiempo transcurrido desde el momento de la separación de cualquier conjunto de organismos actuales. El reloj molecular ha sido aplicado a muchos casos, unas veces con mayor acierto que otras. El empleo de dicha técnica presenta dos dificultades, de las que la más inmediata es la de establecer el ritmo de cambio genético. No es lo mismo suponer que el cambio se produce de una manera constante, que pensar que la tasa de cambio varía a lo largo del tiempo. Y aun en el caso más sencillo, el del cambio constante, no es fácil cuantificar el ritmo de cambio. Si se eligen valores altos, es decir que el cambio sea rápido, el reloj molecular arrojará edades más jóvenes que si se emplean valores bajos, o sea que se cambia despacio. Como se puede ver, es posible alcanzar resultados muy dispares según se decida emplear una u otra tasa.

Y aquí empieza la segunda dificultad. ¿Cómo contrastar los resultados obtenidos empleando ritmos de cambio genético distintos? Imagine que empleando un ritmo de cambio determinado obtenemos, por ejemplo, que dos linajes se separaron hace diez millones de años, mientras que si usamos otra tasa de cambio más parsimoniosa llegamos a la conclusión de que las mismas estirpes se separaron hace quince millones de años. ¿Cómo saber cuál de los dos resultados es el más acertado? La única manera posible de dar respuesta a esta pregunta es utilizar el registro fósil. Si existen fósiles de ambas líneas evolutivas desde hace, por ejemplo, trece millones

de años, está claro que el primer resultado es erróneo y debe mantenerse el segundo. Es decir, que los relojes moleculares necesitan ser *calibrados* a partir del registro fósil.

En el caso que nos ocupa, el origen de los animales, también se han ensayado distintos relojes moleculares, que han producido resultados dispares. El investigador Gregory Wray y su equipo publicaron en 1996 un estudio realizado a partir de las diferencias y similitudes halladas en un conjunto de siete genes presentes en todos los animales, que indicaba que el punto de divergencia de los metazoos (es decir, el origen de los animales) se produjo entre hace mil y mil doscientos millones de años, muchísimo tiempo antes de Ediacara. Sin embargo, este resultado fue cuestionado apenas dos años después por otro estudio, encabezado por Francisco Ayala, que, tras analizar las disparidades presentadas por diversos animales en dieciocho genes, había obtenido una fecha mucho más reciente, hace alrededor de 670 millones de años, para la separación de los dos grandes grupos del reino animal: los *protóstomos* (que incluyen, entre otros, a los filos de los moluscos y de los artrópodos) y los *deuteróstomos* (en el que estamos ubicados los equinodermos y los vertebrados). Aunque las fechas no se referían exactamente al mismo acontecimiento (puesto que la separación entre protóstomos y deuteróstomos fue posterior al origen de los animales), y por tanto los resultados podían ser compatibles, la divergencia entre ambos estudios resultaba demasiado grande. Y para complicar más el problema, un año después, en 1999, Blair Hedges y sus colaboradores dieron a conocer los resultados de un estudio aún más extenso, que reforzaban las conclusiones de Wray y su equipo, ya que situaban la separación entre las líneas de los vertebrados (deuterósto-

mos) y de los insectos (protóstomos) en hace casi mil millones de años.

La evidencia aportada por el registro fósil no nos permite elegir, en rigor, entre los resultados ofrecidos por los diferentes relojes moleculares. La fauna ediacareense data de hace 590 millones de años y es posterior a los puntos de divergencia propuestos por los distintos investigadores. Hay quien opina que la fecha propuesta por Ayala y sus colaboradores está demasiado cerca de la de los fósiles ediacarenses y que no deja tiempo suficiente para que se hubiera producido la diversificación que se observa en dicha fauna, pero también hay quien piensa que la fecha de 670 millones de años para la separación entre los grandes grupos de animales es más compatible con la evidencia de los fósiles ediacarenses que las fechas más antiguas.

En este contexto, cobra una especial relevancia un hallazgo publicado en 1998 por un grupo de paleontólogos liderado por Seilacher. Estos científicos afirman haber encontrado evidencia fósil que acredita la existencia de un animal del tipo de los *gusanos*, en rocas del centro de la India datadas en cerca de 1.100 millones de años. Este hallazgo consiste en una estructura que ellos interpretan como el túnel fosilizado que elaboró un gusano que excavaba en el sedimento en busca de su alimento en aquella remota época. Casi no hace falta decir que esta interpretación ha sido discutida y rebatida por otros autores. No obstante, de confirmarse la existencia de este tipo de animales hace más de mil millones de años, con más y mejores fósiles, la suerte estaría echada en esta polémica y el origen de los animales se retrotraería en el tiempo mucho más allá de lo que Darwin jamás se hubiera atrevido a soñar.

Esponjas, medusas y gusanos

Quizá le parezca un poco decepcionante el tener a un *gusano que comía barro* en su árbol genealógico. Pero los gusanos son un tipo de animal que se merece el mayor de nuestros respetos, ya que fueron ellos quienes *inventaron* muchas de las características que vemos como propias de los animales. Para poner a los gusanos en el sitio, elevado, que se merecen pasemos revista al modo en el que los animales más simples se ganaban (y aún se ganan) la vida en los tiempos de Ediacara.

Los animales de anatomía más sencilla que conocemos en la actualidad son las esponjas. Imagine que es usted un ingeniero de seres vivos (tal como se muestra en la película *Blade Runner*) y que recibe el encargo de diseñar un animal, lo más sencillo posible, para poblar los fondos marinos de un planeta de condiciones similares a las de la Tierra. Para cumplir con su encargo, usted decide eliminar la mayor cantidad posible de órganos y limitar el número de estirpes celulares al mínimo imprescindible. Para ello, debe plantearse primero cuál es la manera más sencilla de obtener el alimento, puesto que, como buen animal, su criatura debe ser heterótrofa. Después de documentarse adecuadamente, llega a la conclusión de que la forma menos complicada de obtener los nutrientes es la de filtrar el agua para retirar de ella los microorganismos y/o los restos orgánicos que se encuentran en suspensión (procedentes de la actividad de otros seres vivos). Filtrar el agua tiene la ventaja, adecuada a las limitaciones del encargo recibido, de que no hay que moverse para buscar el alimento, basta con hacer circular el agua a través de un filtro. Bien, usted necesita ahora diseñar una bomba impulsora y un filtro lo más sencillos posible.

Antes de comenzar a idear un sistema de esas características, decide investigar en las soluciones encontradas por la naturaleza para el mismo propósito. A fin de cuentas, la vida está siendo sometida a un proceso de refinamiento, protagonizado por la selección natural, desde hace muchos millones de años, y seguro que puede encontrar alguna inspiración para comenzar con su diseño. Y entonces, para su pasmo y maravilla, usted descubre las esponjas, que le proporcionan, no una inspiración, sino el problema resuelto.

Las esponjas son los animales más sencillos que existen. Carecen de órganos especializados, son *sésiles* (o sea, no se desplazan), y están constituidas por unos pocos tipos básicos de células. Pero no nos dejemos engañar por su sencillez, las esponjas son un maravilloso dispositivo biológico, que lleva funcionando eficientemente en este planeta, donde la competencia es feroz, desde hace muchos cientos de millones de años. Como prueba de la gran *profesionalidad* de estos animales, está el hecho de que se conozcan más de tres mil especies diferentes de esponjas.

Como ya habrá deducido, las esponjas se ganan la vida filtrando el agua, el trabajo más simple posible para un animal. En esencia, una esponja no es otra cosa que un saco con una gran abertura (o unas pocas), llamada *ósculo*, y multitud de pequeños orificios o poros (de donde les viene el nombre de poríferos), denominados *ostíolos*. Las paredes del saco están constituidas, básicamente, por dos tipos de células: unas en la pared interna, denominadas células con collar o *coanocitos*, y otras en la capa externa, que reciben el nombre de *pinacocitos*.

Las células de la capa interna son especiales porque en la cara que mira hacia la cavidad interior del saco presentan una larga prolongación parecida a un látigo (y

que recibe, precisamente, el nombre de *flagelo*). Justo en la base del flagelo, y rodeándolo como un collarín (por el que reciben el nombre de células con collar o coanocitos), se dispone una estructura que recuerda a una cesti-lla en cuyo entramado quedan retenidas las partículas que se encuentran en suspensión en el agua y que consti-tuyen el sustento de la esponja. Para evitar que el agua ya filtrada se estanque en las proximidades de su estruc-tura filtradora, los coanocitos baten el agua con sus fla-gelos, removiéndola constantemente.

Pero además de estas microcorrientes, producidas por el batir de los flagelos, las esponjas necesitan generar una corriente de agua permanente que renueve el agua de su interior. El esfuerzo necesario para mover esa ma-sa de agua queda fuera del alcance de los coanocitos y la esponja se vale de un *ingenioso* truco para hacer cir-cular el agua a su través. La suma de los diámetros de todos los ostiolos es mucho mayor que el diámetro del ósculo (o del conjunto de ósculos). Esta disposición en embudo produce un efecto de *ventosa* que arrastra el agua, haciéndola circular desde la apertura más ancha (el conjunto de los ostiolos) hacia la más estrecha (el ósculo). De este modo, la esponja se ve continuamente atravesada por una infinidad de pequeñas corrientes de agua, que van confluyendo hacia el ósculo. Y estos dimi-nutos ríos que corren a través de la esponja aseguran la provisión constante de agua fresca que filtrar. Una es-ponja de las más sencillas, del género *Leuconia*, con una altura de tan sólo diez centímetros y con un diámetro de un centímetro, bombea y filtra la respetable cantidad de 22,5 litros de agua cada día (es decir, que cada hora ha-ce pasar por su interior una cantidad de agua casi igual a cien veces su propio volumen). No cabe duda de que se trata de un *dispositivo* muy eficaz.

Pero usted, que es ingeniero de seres vivos, no se deja impresionar con facilidad. Usted conoce bien que no basta con asegurar la captación del alimento para que un animal funcione correctamente. La extrema sencillez de las esponjas presenta muchos problemas para la adecuada realización de otras funciones y le asaltan numerosas dudas sobre la viabilidad de una estructura tan simple. ¿Cómo puede evitar la esponja que se colapsen los finísimos canales, que conducen de los ostiolos al ósculo? ¿Cómo llega el alimento, captado por los coanocitos de la capa interna, a los pinacocitos de la capa externa? ¿Cómo les llega el oxígeno a las células y cómo eliminan sus sustancias de desecho? ¿Cómo puede un animal sésil defenderse de los posibles depredadores, ante los que parece una presa apetitosa y fácil? ¿Cómo puede reproducirse un animal tan sencillo, si carece de órganos reproductores? Para estar seguro de que el diseño funciona hay que cerciorarse de que esas preguntas tienen una adecuada respuesta.

La clave para responder a muchas de esas cuestiones se encuentra en una capa gelatinosa que se dispone entre la capa de pinacocitos y la de los coanocitos del cuerpo de una esponja. Esta capa intermedia se llama *mesohilo* y en ella habitan un conjunto de células que cumplen funciones muy diversas. El principal tipo de estas células intermedias lo constituyen unas células que son capaces de modificar la forma externa de su cuerpo y de desplazarse en el seno del mesohilo: los *amebocitos*. Los amebocitos (o las células derivadas de ellos) son unas células muy atareadas y se dedican a funciones muy dispares. Por un lado son los responsables de sintetizar elementos esqueléticos, que sirven para mantener la forma del animal y evitar el colapso de las paredes de los canales. Estos elementos pueden ser espinas (llamadas *espículas*) o fibras de una sustancia flexible

rica en colágeno. Las esponjas de baño pertenecen a este último grupo y lo que nosotros empleamos es, en realidad, el *esqueleto* fibroso del animal. En el esqueleto de una esponja de baño natural (pueden adquirirse en droguerías y farmacias) se puede observar claramente la red de canalillos, así como los ostiolos y ósculos.

Los amebocitos también tienen a su cargo la distribución del alimento captado por los coanocitos. Estos les pasan, de célula a célula, las partículas que han tomado del agua y los amebocitos las distribuyen al resto de células de la esponja (como una especie de repartidores de *pizzas* en miniatura). La respiración y eliminación de desechos corre a cargo de cada una de las células, que toman el oxígeno directamente del agua y a ella liberan las sustancias de desecho. El que la esponja esté surcada de numerosas corrientes de agua asegura la adecuada renovación de la misma, con el aporte de agua nueva, oxigenada, y la retirada del agua cargada de sustancias de desecho. Por otra parte, las esponjas cuentan con sus espinas, algunas de gran tamaño, para tener a raya a muchos depredadores. A esta *línea de picas*, algunas esponjas añaden la capacidad de sintetizar sustancias urticantes o tóxicas.

Las esponjas cuentan con dos tipos de reproducción. Por un lado un mecanismo de tipo asexual, que consiste en la producción de pequeños abultamientos (o *yemas*) en su superficie, que contienen todos los tipos celulares y la organización de una esponja. Estas yemas crecen y pueden liberarse o permanecer unidas a su progenitora, llegándose a formar, por este procedimiento, masas de individuos unidos entre sí.

Además, las esponjas también son capaces de reproducirse sexualmente. Estos animales son hermafroditas pero nunca se autofecundan porque los espermatozoides

de una esponja siempre van a parar a otras esponjas. Las células reproductoras (*gametos*) se forman, según la especie, a partir de células del mesohilo (por lo general, amebocitos) o de los coanocitos. Los espermatozoides son liberados a los canales que recorren el cuerpo de la esponja y llevados así hasta el exterior, mientras que los óvulos permanecen dentro de la esponja. Los espermatozoides de una esponja entran en el cuerpo de otra a favor de la corriente de agua que penetra por los ostiolos. La fecundación tiene lugar dentro de la esponja y el embrión es retenido durante las primeras fases de su desarrollo dentro del cuerpo de la esponja *mamá* (que, recordemos, también actúa como esponja *papá*, ya que sus espermatozoides fecundarán a otras esponjas). En este periodo, la esponja adulta no sólo ofrece cobijo al embrión, además le alimenta a través de una membrana especial.

Quizá le recuerde algo eso de retener al embrión en el seno materno y alimentarlo activamente a través de una estructura generada exclusivamente para ese fin. Los mamíferos placentados (y otros muchos animales) también lo hacemos, aunque de una manera completamente distinta (y que nada tiene que ver con el modo en el que lo llevan acabo las esponjas). Como puede ver, la gestación (en sus diferentes formas) es un *invento* muy viejo en el reino animal.

Así son las esponjas, una solución tan simple como genial al problema de diseñar el animal más sencillo posible.

Pero intentemos ir algo más lejos en esta línea de armonizar sencillez estructural y complejidad funcional. A fin de cuentas las esponjas se limitan a filtrar el agua, pe-

ro si quisiéramos idear un animal que obtuviese su alimento devorando a otros seres vivos, como de hecho hacemos la inmensa mayoría de los animales, quizá nos veríamos obligados a complicar enormemente su estructura. El *oficio* de depredador (en un sentido amplio, que incluye como presas tanto a otros animales como a los vegetales), plantea nuevos desafíos, a los que la simpleza estructural de las esponjas no puede dar respuesta.

Para empezar hay que ser capaz de capturar a los organismos que serán convertidos en la próxima comida. Y en este punto se abre una disyuntiva: tomar como presas a otros animales, o bien centrarse en los vegetales. La primera posibilidad topa con el problema de que las víctimas pueden moverse libremente (con la excepción, claro, de las esponjas que en este aspecto se comportan como plantas) y por lo tanto escapar. Esta dificultad no existe en el caso de las plantas (y esponjas), el problema aquí es justamente el contrario: como las presas no se mueven, es el depredador el que tiene que ser capaz de desplazarse autónomamente para encontrar y recoger el alimento. O dicho de otro modo, la comida no viene sola a la mesa. ¿Cuál de los dos modos de vida, carnívoro o vegetariano, admite una solución más sencilla? La solución a este acertijo nos la proporciona otro grupo de animales fascinantes: los *cnidarios*.

En líneas anteriores hemos tenido la ocasión de presentar brevemente a los cnidarios, entre los que se encuentran las medusas, las anémonas de mar, y los corales. En realidad, las anémonas de mar y los corales son un tipo de animal muy similar conocido genéricamente como *pólipo*, por lo que podemos decir que los cnidarios incluyen a los pólipos y a las medusas. Estas últimas son animales que todos conocemos y cuya forma general podría describirse como la de *una bolsa con tentáculos*.

En cambio, la morfología de los pólipos es menos conocida. Pues bien, un pólipo también es una *bolsa con tentáculos*, aunque en este caso la bolsa está fijada al sustrato y los tentáculos se dirigen hacia arriba. Básicamente, una medusa no es sino un pólipo *puesto al revés* y que es capaz de flotar.

Como ya hemos dicho, un pólipo es, en esencia, una bolsita con una única abertura situada en su parte superior. Esta abertura se llama *peristoma*, y funciona como boca. La cavidad interna de la bolsa recibe el nombre de *celénteron*, y hace las veces de aparato digestivo. Las paredes de la bolsa están compuestas por sólo tres capas: una en la región externa (también llamada *ectodermo*) y otra en la parte interna (o *endodermo*) que está en contacto con el celénteron. También como ocurría en las esponjas, ambas capas (ectodermo y endodermo) están separadas por una capa intermedia gelatinosa que en el caso de los cnidarios se denomina *mesoglea*. Rodeando a la boca, se distribuyen los tentáculos, que no son más que delgadas prolongaciones de la *bolsa* o región central del cuerpo y tienen la misma estructura que ésta.

Tal como ya hemos dicho, la anatomía de una medusa es básicamente la de un pólipo en posición invertida, de modo que su parte superior, donde está la boca, queda dirigida hacia abajo y su parte inferior, por la que el pólipo se fija al sustrato, se sitúa ahora en la parte de arriba. En la región superior la capa de mesoglea está muy expandida produciendo la característica forma de campana de las medusas. Como la mesoglea es menos densa que el agua, esta región superior actúa como un flotador.

Hasta aquí no se advierten muchas diferencias entre la estructura básica de una esponja y la de un cnidario. Únicamente se puede destacar que la pared del cuerpo de las esponjas está perforada por numerosos canalillos,

algo que no ocurre en los cnidarios, y que la boca de éstos está rodeada de tentáculos, que no existen en las esponjas. No parece mucha diferencia. En realidad, lo que de verdad hace que unas y otros sean distintos, y lo que capacita a los cnidarios para ser depredadores, es un tipo especial de célula llamada *cnidoblasto*.

Los cnidoblastos se disponen, sobre todo, en la capa externa del cuerpo de los cnidarios y son mucho más abundantes en sus tentáculos. Existen muchos tipos diferentes de este tipo de célula, pero todos comparten una característica fundamental: son capaces de descargar un filamento que, en la mayoría de ellos, inyecta una sustancia tóxica al animal que los haya rozado. En la región del cnidoblasto que está en contacto con el medio externo se dispone una vesícula que contiene dicho filamento, arrollado como un muelle. Esta vesícula está conectada con una fina prolongación de la célula (o *cnidocilio*) que actúa de disparador. Si algo roza al cnidocilio, se produce la descarga del filamento que perfora la pared del cuerpo de la víctima y le inyecta la sustancia tóxica. De este modo, cualquier animal, grande o pequeño, que toque los tentáculos de un cnidario provocará la descarga de una nutrida batería de esas minúsculas ballestas celulares. El veneno de los cnidarios es lo suficientemente potente para paralizar o matar a sus presas, o para producir lesiones, e incluso la muerte, a animales mayores, tales como infortunados bañistas.

Pero para alimentarse de otros animales no basta con matarlos. Las esponjas captan del agua pequeños restos de materia orgánica que sus células son capaces de digerir para transformarlos en los nutrientes básicos (glúcidos, lípidos, proteínas, etc.). Pero un animal, por pequeño que sea, no puede ser deglutido por una célula, es preciso digerirlo primero. Y esta digestión no puede reali-

zarse en el medio externo, ya que la más suave corriente de agua se llevaría consigo lo que tanto trabajo le ha costado capturar al animal. Se hace preciso engullir la presa para poder digerirla. Ésa es exactamente la función del celénteron: servir de recipiente donde tiene lugar la digestión. Una vez transformada la presa en nutrientes sencillos, las células del endodermo pueden absorberlos y distribuirlos al resto de células del animal. Y aquellos restos de la víctima que no puedan ser digeridos serán expulsados al exterior a través de la propia boca.

Pero, como en el caso de las esponjas, no es suficiente con comprender cómo consigue un animal el alimento para estar seguros de que será viable. Nuevamente podemos formularnos numerosas preguntas referidas a la manera de respirar, de eliminar las sustancias de desecho, y de reproducirse. Y a estas cuestiones podemos añadir algunas otras nuevas: ¿cómo son capaces de tragarse las presas los cnidarios? ¿Hay diferencias entre el funcionamiento de los pólipos, de vida sedentaria, y el de las medusas, que viven flotando libremente?

Dejemos para el final la última pregunta y pasemos revista a las otras cuestiones. Como ocurre con las esponjas, la respiración y excreción las realizan cada una de las células independientemente, tomando el oxígeno y liberando los productos de desecho bien al agua que rodea al animal, o bien a la que rellena el celénteron.

La reproducción de los cnidarios es uno de los aspectos más sorprendentes del reino animal. Aunque existen diferencias muy marcadas en la reproducción en los distintos grupos de cnidarios, todos ellos pueden ser considerados como variantes de un patrón general que aún se encuentra en muchas especies. La principal y más extraordinaria característica de este tipo de reproducción estriba en un fenómeno conocido como *alternancia de*

generaciones, en el que una generación de pólipos da lugar a una prole de criaturas diferentes, medusas, que, a su vez, engendran una nueva *hornada* de pólipos. Y para que este modelo de reproducción resulte aún más peculiar, cabe añadir que los pólipos generan a las medusas de manera asexual, mientras que las medusas, que son machos o hembras, emplean la reproducción sexual en la generación de nuevos pólipos. ¿Se imagina un tipo de reproducción en la que sus hijos fueran un tipo de organismo diferente del suyo y que, a su vez, sus vástagos engendrasen una generación de nietos que fueran de nuevo como usted? Añada a ello el que mientras que usted tuvo que encontrar compañero (o compañera) para llevar a cabo la perpetuación de la especie, sus hijos producen las crías en solitario, a partir de abultamientos de sus cuerpos que crecen para dar lugar a seres como usted.

Este asombroso mecanismo de reproducción se ha simplificado en una buena parte de los cnidarios. Así, existen numerosas especies que han reducido (o eliminado) alguna de las etapas de la reproducción. En estas especies, los pólipos sólo producen pólipos y las medusas generan unos pólipos especiales, reducidos y de vida muy corta, cuya única función es generar nuevas medusas. Las grandes medusas que nos importunan en las playas, las anémonas de mar que descubrimos entre las rocas, o los pólipos formadores de arrecifes coralinos, pertenecen a estas especies con reproducción simplificada.

Con todo, la característica más notable de los cnidarios no es su peculiar forma de reproducción sino una capacidad que todos los animales tenemos y de la que las esponjas carecen: los cnidarios se mueven. Y lo hacen en las dos acepciones que reconoce el diccionario: son

capaces de agitar partes de su cuerpo y también de desplazarse. De nada le serviría a un cnidario el poder capturar una presa, mediante la descarga de sus cnidoblastos, si no fuera capaz de engullirla para digerirla y absorber los nutrientes. Este fenómeno tan simple, la deglución del alimento, requiere que el animal disponga de células musculares ordenadas en fibras (⁹) y que éstas trabajen coordinadamente, gracias a la acción de células nerviosas, dos de los componentes más característicos de los animales y que encontramos por primera vez en los cnidarios. Sus finos tentáculos contienen fibras musculares longitudinales (o sea, dispuestas a lo largo del tentáculo) cuya contracción provoca sus graciosos movimientos. Rodeando la boca, se encuentran otras fibras que permiten al animal cerrarla y abrirla a su conveniencia. Y también hay fibras en su cuerpo, dispuestas tanto longitudinal como anularmente (o sea, alrededor del cuerpo), que le permiten realizar movimientos que colaboran en la deglución del alimento, o que le facultan al animal para retraer el cuerpo ante un peligro. Y distintas combinaciones en la acción de las diferentes fibras permiten a los pólipos solitarios el realizar un amplio abanico de contorsiones, gracias a las cuales el animal puede desplazarse por el fondo.

La coordinación de todos estos movimientos corre a cargo de una red difusa de células nerviosas que se hayan dispersas por el cuerpo y los tentáculos.

La existencia de fibras musculares y células nerviosas ha facultado a determinados tipos de cnidarios a abandonar los fondos marinos, de donde no pueden escapar

⁹ Las fibras musculares de los cnidarios difieren de la musculatura del resto de los animales tanto en su estructura, como en su origen en el desarrollo embrionario.

las esponjas, y les ha permitido desplazarse libremente. Así, las medusas aprovechan su capacidad de alterar la forma del cuerpo para generar una corriente de agua que utilizan para impulsarse. Pero la libertad de movimiento de la que gozan las medusas las sitúa frente a una serie de problemas que son inimaginables para un pólipo que vive ligado al sustrato. Las medusas viven en un mundo tridimensional, mientras que el mundo de los pólipos sólo tiene dos dimensiones. Al desplazarse, las medusas sufren la acción de un fenómeno físico del que los pólipos, que no se mueven apenas, no tienen noticia: la *aceleración*. Además, una medusa necesita responder a una pregunta que no tiene sentido para un pólipo: «¿Cómo estoy situada, cabeza-arriba o cabeza-abajo?» (las medusas no tienen cabeza, pero permítanos esta licencia). ¡Qué complicado es ser móvil!

¿Cómo han resuelto las medusas todos estos problemas? La respuesta es sencilla: gracias a la presencia de órganos de los sentidos. Los órganos de los sentidos son exclusivos de los animales y nos proporcionan información capital sobre el medio ambiente y de nuestra relación con él. El órgano sensorial característico de las medusas recibe el nombre de *ropalia* y en realidad está constituido por la reunión de varias estructuras sensoriales. Por una parte, hay una pequeña foseta cuya pared está tapizada de células especiales capaces de analizar la composición química del agua de mar; se trata de un auténtico órgano del olfato.

En otra zona de la ropalia se encuentra un órgano muy peculiar llamado *estatocisto*, que consiste en una minúscula piedrecita de carbonato cálcico rodeada de células sensoriales. Cuando la medusa se desplaza, o es desplazada por el oleaje, en una dirección determinada, la piedrecilla de la ropalia, que no está unida rígidamente al

cuerpo de la medusa, se mueve más despacio por efecto de su inercia. Este distinto movimiento de la piedrecita la lleva a entrar en contacto con una zona determinada de la capa de células sensibles, que detecta la intensidad (aceleración) y dirección del movimiento. Gracias a esta información, la medusa *sabe* en todo momento cuál es su situación espacial y si está *cabeza-abajo* o *cabeza-arriba*, pudiendo corregir su posición.

El estatocisto de la medusa es un auténtico *sistema inercial de navegación*, muy similar al que permite conocer a los pilotos, en cualquier momento, la posición y velocidad de los modernos aeroplanos. He aquí un ejemplo de sistema inercial: imagínese de pie en el centro de un vagón de ferrocarril que no tiene ventanas. Usted sabrá inmediatamente cuándo se pone el tren en marcha porque, por efecto de su inercia, se verá lanzado hacia la parte posterior del vagón. Y también sabrá si el tren ha arrancado con mucha o poca aceleración según la fuerza con la que sea arrojado hacia atrás. Si el tren se detiene, se verá impelido hacia delante, de nuevo con una fuerza proporcional a la intensidad del frenazo. Y si el tren toma una curva irá a parar a la pared contraria al sentido del giro. Pues bien, en este ejemplo, usted está haciendo el mismo papel que la piedrecilla del estatocisto de una medusa, y las paredes del vagón, contra las que choca una y otra vez, son equivalentes a la capa de células sensoriales.

Pero no sólo las medusas y los modernos aviones están dotados de un sistema inercial: en el interior de nuestro oído disponemos de otro mecanismo muy parecido, que también nos permite saber si nos estamos moviendo, hacia dónde y con qué intensidad lo hacemos.

Además de estos órganos de los sentidos, muchas medusas son también capaces de percibir la luz mediante

unas células sensibles (*fotorreceptores*) que se agrupan, en el seno de la ropalia, en un órgano llamado *ocelo*. Puesto que en el mar la luz siempre viene de arriba, los ocelos son también muy útiles para que una medusa sepa hacia dónde va, o cómo está situada en el espacio.

Pero el colmo del asombro, en cuanto a órganos de los sentidos, nos lo proporciona un tipo especial de medusas llamadas, debido a su peculiar forma, *cubomedusas*. Estos animales tienen auténticos ojos, dotados de córnea, lente y retina, que les *permitirían* ver de una manera muy similar a como lo hacemos nosotros; es decir, formando imágenes del mundo exterior. Y decimos que les permitirían porque las cubomedusas, como el resto de los cnidarios, no tienen sistema nervioso central donde la información captada por sus ojos pueda ser procesada. ¿Cuáles la razón de que las cubomedusas tengan ojos, cuando no hay ningún cerebro que pueda ver las imágenes que ellos captan? La pregunta es realmente intrigante pero, hasta la fecha, no hay respuesta para ella.

Como puede apreciar, los cnidarios son unos animales apasionantes, capaces de dar soluciones, desde su sencillez estructural, a problemas muy complejos. Antes de abandonarlos, para dedicarnos a otros animales no menos fascinantes, no queremos dejar de mencionar algunas de sus glorias, que son realmente destacables. Por ejemplo, la especie *Cyanea arctica* es una aterradora medusa que puede llegar a pesar una tonelada y cuyos tentáculos pueden rebasar los tres metros de longitud, lo que la convierte en uno de los mayores invertebrados que jamás hayan habitado el planeta. Entre los cnidarios del tipo pólipo, los pertenecientes al género *Branchiocranthus*, que habitan en grandes profundidades de hasta tres mil metros, pueden alcanzar los tres metros de longitud. Tamaño nada despreciable para un pólipo solitario.

Aunque la hazaña más espectacular conseguida por los cnidarios se debe al trabajo en equipo de millones de individuos de especies de tamaño mucho más modesto: se trata de los pólipos formadores de arrecifes. Su obra más colosal es la Gran Barrera de Coral, situada a lo largo de buena parte de la costa oriental de Australia, que puede distinguirse desde la Luna. Sólo hay otra estructura construida por un animal de nuestro mundo que también sea visible desde nuestro satélite: se trata de la Gran Muralla de China.

Esponjas y cnidarios son los animales más simples que pueblan los mares de nuestro planeta, lo que, a primera vista, los convierte en los candidatos idóneos para ser también los animales más primitivos, puesto que es razonable que lo más simple anteceda a lo más complejo en la historia de la vida. De hecho, entre los organismos representados en los fósiles ediacarenses se encuentran diversas formas de cnidarios. Sin embargo, y a pesar de su sencillez estructural, las esponjas y los cnidarios están demasiado especializados, en su anatomía y forma de vida, para representar al tipo de animal que originó al resto.

Un tesoro en el fango

La mayor parte de los animales que forman parte de nuestra vida cotidiana, y también aquellos que conocemos a través de libros, documentales y museos, tienen una estructura general de su cuerpo que nos resulta muy familiar. Insectos, lombrices, cangrejos, pulpos, cangurros, peces, pájaros, ranas o dinosaurios, todos tienen *cabeza* y presentan *simetría bilateral*. La cabeza es fácil de distinguir porque está situada en la parte anterior del

cuerpo, incluye la boca y la mayor parte de órganos de los sentidos (como los ojos), y en su interior se alberga el encéfalo. Por simetría bilateral entendemos que los organismos están *construidos* de manera que una mitad del cuerpo es simétrica respecto de la otra mitad (o sea, como su imagen en un espejo). Por supuesto, la correspondencia entre ambas partes del cuerpo no siempre es exacta (todos tenemos una pierna levemente más larga que la otra, por ejemplo), pero es tan llamativa que los biólogos dividen a los animales en *bilaterales* (con simetría bilateral) y *no bilaterales*.

El conjunto de los no bilaterales es heterogéneo porque incluye animales sin ningún tipo de simetría (las esponjas, por ejemplo) junto a otros con simetría radial (los cnidarios). Y para complicar más las cosas, entre los bilaterales se encuentran casos como las estrellas de mar, que tienen simetría bilateral en su fase larvaria pero que cambian de tipo de simetría en el estado adulto.

El cuerpo humano sólo tiene un plano de simetría (como ocurre con todos los animales que tienen simetría bilateral), mientras que el círculo tiene muchos planos, que se cortan en su centro como los radios de una rueda (de bicicleta, por ejemplo). Este tipo de simetría, en la que el cuerpo de un animal puede cortarse en mitades iguales a través de muchos planos de simetría (que se cruzan en su centro), recibe el nombre de *simetría radial*.

Si cortamos un pólipo según un plano vertical que vaya desde uno de sus tentáculos hasta el tentáculo que se encuentra justo al otro lado del cuerpo, obtendremos dos mitades semejantes (simétricas) y, como el animal tiene muchos tentáculos, también presenta numerosos planos de simetría que se cortan en su centro.

El tipo de simetría es un concepto de una gran importancia porque, como ya hemos dicho, los animales se dividen en dos grandes grupos: los que presentan simetría bilateral y los que no la presentan. ¿Por qué unos animales están contruidos de un modo y otros de manera diferente? Y para hacer la cuestión aún más intrigante, cabe añadir que los animales bilaterales tienen (casi siempre ¹⁰) cabeza, mientras que los no bilaterales carecen de ella. ¿Existe alguna relación entre la presencia de cabeza y el tipo de simetría? Y puesto que la cabeza es la parte de nuestro cuerpo de la que nos sentimos más orgullosos los humanos, la respuesta a esas preguntas reviste para nosotros un especial interés.

La clave de todo ello reside en el tipo de vida de unos y otros. Los animales no bilaterales (esponjas y cnidarios) aguardan a su alimento, no se desplazan hacia él. Para una esponja o un pólipo, sólo hay una dirección del espacio que resulte importante: el eje *arriba-abajo*. Hacia abajo está el sustrato, al que hay que aferrarse para no ser arrastrado y desde donde no llega el alimento, mientras que hacia arriba se encuentran tanto el alimento como los depredadores. Por eso, estos animales tienen una parte inferior distinta de su región superior, cada una especializada en una tarea diferente (esta situación vale igualmente para las medusas, sólo que invirtiendo los términos: para ellas el alimento está hacia abajo y el equivalente al sustrato hacia arriba, ya que son organismos flotantes).

¹⁰ En biología, casi todas las normas tienen sus excepciones. Así, por ejemplo, los bivalvos, que son el grupo que incluye a mejillones, vieiras, berberechos, ostras y afines, constituyen un tipo de animal que presenta simetría bilateral pero no cabeza, aunque sus antepasados directos sí que la tenían. La reducción de ésta en los bivalvos es una adaptación a su modo de vida.

Aparte de la diferencia entre arriba y abajo, el resto de direcciones del espacio es similar desde el punto de vista de esponjas y cnidarios: el alimento puede llegar desde cualquier parte. Por ello las esponjas presentan poros por todo su cuerpo y los cnidarios tienen tentáculos dirigidos hacia todas partes: ninguna región del espacio es mejor que otra. Si usted estuviera pescando en una barca y tuviera varias cañas, seguramente las dispondría alrededor de la embarcación, porque los peces pueden venir desde cualquier lado.

Pero esperar el alimento no es la única forma de conseguirlo, sólo es el modo más sencillo de hacerlo. Evidentemente, también existe la posibilidad de buscar activamente el sustento. Para este tipo de vida la simetría radial no es la mejor solución, porque ahora no todas las direcciones del espacio son equivalentes. Además del eje arriba-abajo (que sigue siendo importante en los animales que se desplazan hacia la comida, porque, a fin de cuentas, el suelo no es lo mismo que el cielo), ahora aparece otro de capital importancia para la vida del animal: el eje *delante-detrás*. El animal ya no espera que la comida pueda venir desde cualquier parte, ahora se dirige hacia ella, por lo que siempre la encontrará hacia delante. Esta situación determina la necesidad de desarrollar una región anterior especializada en dos tareas principales: localizar y engullir el alimento. Para cumplir adecuadamente ambas, es necesario que en la región anterior se concentren los órganos de los sentidos (para dirigir al animal hacia el alimento) y que en ella se disponga la boca (para tragar la comida).

Y puesto que para llegar hasta el alimento es preciso analizar la compleja información procedente de los órganos de los sentidos y reaccionar en consecuencia, resulta de gran utilidad concentrar una parte del tejido nervio-

so en esta región anterior. Así, la búsqueda activa del alimento también determina la aparición de la cabeza (o proceso de *cefalización*) una región especializada del cuerpo, situada en su parte anterior, que incluye los órganos de los sentidos, la boca, y una concentración de tejido nervioso: el *encéfalo*.

Por su parte, la región posterior del cuerpo es el lugar idóneo para situar la salida del tubo digestivo, el ano, de manera que el alimento ya procesado no vuelva a entrar por la boca.

De modo que en el cuerpo de los animales que buscan su comida se han producido dos especializaciones en función de los ejes arriba-abajo y delante-detrás. Las regiones del espacio que no están debajo ni arriba, ni delante ni detrás, siguen siendo equivalentes para estos animales: el alimento puede estar hacia la derecha o hacia la izquierda indistintamente y, por ello, no se establecen diferencias entre ambos lados, que pueden ser contruidos de manera similar. Ha sido el tipo de vida activo, característico de la mayor parte de los animales, el que ha determinado la existencia de cabeza y de simetría bilateral, esos rasgos que nos son tan familiares.

Si se detiene un momento a pensarlo, verá que los animales no son los únicos objetos de nuestra vida cotidiana con simetría bilateral y *cabeza*. Casi todas las máquinas que hemos diseñado los humanos con el fin específico de desplazarse activamente (automóviles, camiones, autobuses, ferrocarriles, aviones, barcos...) están contruidas a lo largo de un eje delante-detrás, con una parte anterior diferente de la posterior y con sus lados derecho e izquierdo iguales. Y en la mayoría de los casos, la parte *inteligente* (donde va el conductor) está situada en la región anterior. Si nuestras máquinas también tienen simetría bilateral y casi siempre *cabeza* no es porque los

ingenieros que las diseñaron quisieron copiar a los animales, sino porque es el mejor diseño para desplazarse activamente hacia alguna parte.

Todavía hay otra característica que tenemos en común casi todos los animales, pero que es más difícil de percibir porque se refiere a nuestro interior. Se trata del hecho sorprendente de que, aparte del tubo digestivo, que nos atraviesa de parte a parte (en realidad, de boca a ano), nuestro cuerpo está socavado por numerosos conductos y cavidades, hasta el punto de que, en buena parte, estamos huecos.

Aunque, en realidad, lo sorprendente sería la situación inversa, es decir que los cuerpos de los animales fueran macizos. En ese caso, los órganos internos estarían aprisionados y se verían sometidos a fuertes compresiones cada vez que nos dobláramos. Además, no quedaría espacio libre para ubicar en el interior del organismo las redes de conductos que constituyen los sistemas respiratorios, vasculares, excretores y reproductores de los diferentes animales.

A decir verdad, no todos los animales necesitan espacios huecos en el interior de su cuerpo. En el caso de esponjas y cnidarios, su sencilla estructura, en sólo dos capas, les permite vivir sin necesidad de sistema respiratorio, vascular, ni excretor. Ya hemos visto de qué manera tan simple llevan a cabo las funciones que en otros animales más complejos desempeñan los órganos y sistemas internos. Por otro lado, ni esponjas ni cnidarios destacan en el mundo animal por su capacidad para doblar su cuerpo, y los limitados movimientos de ese tipo que realizan los pólipos y las medusas son convenientemente absorbidos por su capa gelatinosa intermedia, la

mesoglea. Sin embargo, esta ausencia de espacios interiores únicamente es posible en animales muy simples. Un aumento de la complejidad requiere la existencia de huecos en el interior del cuerpo.

En la mayor parte de los animales los conductos y cavidades están revestidos de un tejido especial y reciben el nombre general de *celoma* (o cavidades y conductos celomáticos). El celoma no es la única solución al problema de conseguir espacios huecos en el interior del cuerpo. Algunos grupos de animales (bastante simples en su anatomía) han encontrado soluciones alternativas, y los biólogos los nombran (según el tipo de solución) como *acelomados* (es decir, sin celoma) y *pseudocelomados* (o con falso celoma). La explicación de las alternativas representadas por los acelomados y pseudocelomados nos alejaría mucho de nuestro argumento central y complicaría innecesariamente este capítulo y, además, la mayoría de los animales son celomados.

Puesto que la mayoría de los animales somos celomados, tenemos cabeza y simetría bilateral, podemos suponer razonablemente que todos hemos heredado estas características de algún tipo concreto de animal, nuestro más remoto antepasado común. Y dado que, como ya hemos dicho, ni esponjas ni cnidarios son buenos candidatos para ocupar tal posición, ¿hacia dónde mirar? Y es aquí donde aparecen los *gusanos*.

Bajo el nombre de *gusanos* conocemos a un conjunto muy dispar de invertebrados que sólo comparten su aspecto exterior. La mayor parte de ellos (las orugas y los gusanos de seda, por ejemplo) son, en realidad, estados larvarios de algunos tipos de insectos como las moscas, las mariposas, o las polillas. También incluimos en esa denominación a otros muchos tipos diferentes de animales, entre los que los más conocidos son los *anélidos*

(como las lombrices de tierra y de mar) y los *platelmintos* (como las tenias o solitarias). Como ve, no todos los guisanos son iguales.

Los platelmintos son un grupo de animales muy interesante, porque aunque tienen simetría bilateral y, en mayor o menor medida, cabeza, carecen de celoma. Esta combinación de rasgos es muy primitiva y hace que muchos científicos opinen que el primer animal con simetría bilateral debió de ser muy parecido a alguno de los platelmintos actuales. Muchos de ellos (como la tenia) se han adaptado a vivir como parásitos en el interior de otros animales y su anatomía se ha simplificado extraordinariamente, por lo que no son buenos candidatos para representar al antepasado de los demás animales bilaterales. Pero hay un grupo de platelmintos que es de vida libre y puede ayudarnos a entender cómo pudo ser el animal bilateral ancestral; se trata de los *turbelarios*.

Los turbelarios son animales acuáticos, su cuerpo es cilíndrico o aplanado dorsoventralmente (es decir, de arriba hacia abajo) y su tamaño se sitúa en torno a los cinco centímetros de longitud, aunque algunas especies se quedan en el medio milímetro y otras alcanzan hasta los sesenta centímetros. La mayoría son carnívoros y persiguen activamente a sus presas. Para ello, cuentan con una amplia panoplia de órganos de los sentidos, que incluye *quimiorreceptores* (o sea, sentido del olfato), células táctiles (tacto) y ocelos. En la mayoría de ellos, los ocelos sólo distinguen sombras y luces pero en un pequeño grupo estos órganos son auténticos ojos que pueden llegar a formar imágenes imprecisas. Los turbelarios se desplazan de una manera peculiar: las células de la capa más externa del cuerpo, la epidermis, están dotadas de pequeñas prolongaciones, como diminutos pelos, que reciben el nombre de *cilios* (¿se acuerda del cnido-

blasto de los cnidarios?, también ese tipo de célula tenía un cilio, denominado cnidocilio). La acompasada vibración de los miles de cilios de la epidermis impulsa a los pequeños turbelarios, como si de los remos de una gale-
ra se tratase.

Para capturar la presa, los turbelarios disponen de órganos adhesivos en la cabeza y en la región posterior del cuerpo. Una vez localizada la presa, los turbelarios se adhieren a ella, por la cabeza, y al sustrato, por la región caudal. Entonces comienza una terrible lucha cuerpo a cuerpo en la que el depredador (según la especie) puede tragar entera a su presa, consumirla poco a poco, o inyectar en su interior sustancias digestivas. En algunas especies de turbelarios las hembras no presentan orificio copulador, por lo que el pene de los machos tiene una estructura endurecida, denominada *estilete*, dedicada a perforar la pared del cuerpo de las hembras e inyectarles el esperma. Incluso este estilete es empleado para acuchillar a las presas, una vez que éstas se encuentran adheridas a su agresor.

En los turbelarios podemos reconocer el modelo más sencillo de animal bilateral, perfectamente dotado para llevar una vida libre y desplazarse hacia el alimento. Pero, como ya hemos comentado, este tipo de animales carece de celoma, lo que nos lleva a preguntarnos cómo pudo aparecer el celoma a lo largo de la evolución. Sin duda, la presencia de cavidades y conductos es necesaria para que puedan existir animales más complejos que los turbelarios, pero ¿cuál fue la ventaja inicial de poseerlo?, ¿qué abrió el camino a la aparición de animales más complejos, entre los que nos encontramos? La evolución no es un proceso que actúe a largo plazo, las ventajas de una estructura tienen que ser evidentes en el mismo momento en que aparece, la selección natural

trabaja en el presente, no en el futuro. A fin de cuentas, a los turbelarios no les va nada mal, sin contar con el celoma, en el mundo actual.

Se han propuesto diferentes respuestas a la cuestión de cuál fue la ventaja que el celoma confirió a unos animales tan sencillos como los actuales turbelarios. Hay quien opina que disponer de cavidades permitió mejorar el transporte de oxígeno y dióxido de carbono entre las células interiores del cuerpo y el exterior. Esta hipótesis es muy razonable, puesto que los turbelarios consumen mucho más oxígeno (hasta diez veces más) que animales más simples y sencillos, como los cnidarios, y la existencia de un sistema circulatorio haría mucho más eficaz el transporte de este gas. Pero hay una hipótesis aún más sencilla para explicar la aparición del celoma: las ventajas de tener *esqueleto*.

Cuando hablamos de esqueleto solemos pensar en un conjunto de partes duras que cubren o sostienen a los animales. Sin embargo, la palabra esqueleto tiene un sentido más amplio en biología: se trata sencillamente de alguna estructura que sirva para sostener o conferir consistencia al cuerpo de los animales, esté compuesta, o no, por piezas duras.

En este contexto, tiene sentido hablar de *esqueleto hidrostático*; es decir, constituido por un líquido. Aunque a primera vista pueda parecer que los líquidos no son un buen material para conferir solidez a los cuerpos de los animales, lo cierto es que son ideales para tal fin. Si una estructura biológica se rellena de un líquido a la suficiente presión, alcanza una gran consistencia, e incluso dureza. Además de cumplir fielmente esta misión, el esqueleto hidrostático presenta la ventaja de que es fluido; es

decir, puede desplazarse de un lado a otro del cuerpo del animal, permitiéndole cambiar de forma o de consistencia.

Las lombrices marinas del grupo de los *nereidos* son las que habitualmente usamos como cebo para pescar en el mar. Se trata de animales carnívoros que capturan activamente a sus presas. Para ello se valen de su esqueleto hidrostático que les habilita tanto para desplazarse, como para atrapar a sus víctimas. Nadan o se arrastran por el fondo gracias a los movimientos ondulatorios (*serpentiniformes*) de su cuerpo, originados en cambios de la disposición del líquido que rellena las cavidades de su cuerpo.

Pero el uso más dramático que hacen los nereidos de la gran versatilidad de su esqueleto hidrostático está en la forma en que capturan y engullen sus presas. El tramo anterior de su tubo digestivo, la *faringe*, se encuentra habitualmente invaginada hacia el interior (como el dedo de un guante si lo empujamos hacia dentro del mismo). En el extremo de la faringe se dispone la boca, que está armada de un par de imponentes mandíbulas rígidas que, en situación de reposo, se ocultan en el interior del animal. Cuando el aparentemente inofensivo nereido quiere capturar una presa, la musculatura de la pared del cuerpo que rodea a la faringe se contrae y comprime al líquido que actúa como esqueleto hidrostático. Como resultado, el esqueleto hidrostático funciona como una pinza sobre la faringe y ésta sale violentamente hacia el exterior (como el dedo del guante cuando soplamos con fuerza dentro de él), con sus mandíbulas en el extremo. Una vez capturado el alimento, desciende la presión sobre el líquido y la faringe es retirada de nuevo hacia dentro por la acción de los correspondientes músculos, arrastrando la presa hacia el interior.

Por espectacular que parezca la estrategia cinegética de los nereidos, no debemos olvidar que también los turbelarios, que no tienen celoma (ni, por tanto, esqueleto hidrostático) se las apañan muy bien para desplazarse y capturar el alimento, por lo que la aparición del celoma debió de servir para algo diferente de aquello que los turbelarios son perfectamente capaces de hacer. Y aquí está el cabo del ovillo: ¿qué pueden hacer los anélidos, con su celoma (que recordemos es su esqueleto hidrostático), que esté fuera del alcance de los turbelarios? Y la respuesta es cavar.

Todos los tipos de animales que hemos visto hasta ahora son acuáticos y buscan su alimento en el agua, bien se encuentre éste flotando en ella o sobre la superficie del sustrato. Pero existe otra fuente potencial de comida en los ecosistemas marinos; se halla debajo del fondo, en el fango. Tanto las partículas orgánicas que se encuentran en suspensión en el agua, como todos los organismos que viven en ella (nadando, flotando, arrastrándose, o fijos al sustrato), acaban yaciendo en el fondo del mar. Y allí van siendo enterrados por una lluvia de sedimentos, que los ríos (y en menor medida el viento) arrastran hacia el mar. De este modo, una gran cantidad de materia orgánica va siendo acumulada bajo la superficie de los fondos marinos. Y este alimento está a disposición de quien pueda acceder a él.

La manera más eficaz de extraer la materia orgánica del cieno consiste en tragarlo y luego separar el alimento de la parte no asimilable por el organismo. Y el mejor modo de hacerlo es desplazarse dentro del fango, engulléndolo por la boca y expulsando los desechos por el ano. Evidentemente, esto requiere que el animal tenga forma alargada (o sea, un eje adelante-detrás y, por tanto, si-

metría bilateral) y que sea capaz de desplazarse activamente.

Los turbelarios cumplen estas condiciones, pero su peculiar modo de desplazarse, mediante movimientos de cilios, es inoperante para moverse en el interior del barro, que es mucho más denso que el agua. Y además, y esto es lo más importante, para perforar el fango hace falta que el cuerpo sea consistente; o sea, que tenga esqueleto. Los anélidos, con su esqueleto hidrostático, están perfectamente capacitados para horadar el sustrato y buscar en él su alimento. La lombriz de tierra, por ejemplo, se gana la vida exactamente de esta manera en el seno de nuestros campos y jardines. La aparición del celoma muy bien pudo ser, originalmente, una adaptación para cavar túneles en el fango marino y, de este modo, acceder a un nuevo tipo de recurso.

Así pues, entre los modestos *gusanos* podemos encontrar a buenos candidatos para ostentar el honor de haber sido los primeros en desarrollar las características básicas que caracterizan a la mayoría de los animales: cabeza, simetría bilateral, y celoma. Y si se confirmara el descubrimiento anunciado por Seilacher y sus colaboradores de que han hallado un túnel de gusano fósil, en rocas de hace 1.100 millones de años de antigüedad, estaríamos ante el indicio más antiguo de presencia de un animal con dichos atributos.

Unos tipos duros

Las reconstrucciones que se hacen de la fauna de la época de Ediacara nos hablan a menudo de un mundo *idílico*, más sosegado y pacífico que el de los tiempos que vinieron después. La ausencia de elementos defen-

sivos de cualquier tipo en la anatomía de los vendozoos, así como su limitada capacidad de desplazamiento, nos sugieren la existencia de un mundo libre de depredadores que pudieran inquietarlos. Por otra parte, ya hemos visto que tampoco parece que su modo de vida estuviera basado en devorar al prójimo. Es cierto que debían de existir animales carnívoros, del tipo de los cnidarios y de los turbelarios, pero sus capacidades predatorias estaban limitadas, al igual que hoy día, a presas de pequeño tamaño. El mundo de Ediacara también incluía a otros seres igualmente pacíficos, que buscaban su alimento filtrando el agua, trasegando el cieno del fondo, o *pasando* en los abundantes mantos microbianos formadores de estromatolitos (muy abundantes en aquella época).

Este mundo *apacible* desapareció abruptamente de la faz de la Tierra, hace cerca de 550 millones de años, con la extinción de los vendozoos. Los mantos microbianos aún siguieron floreciendo y produciendo estromatolitos unos pocos millones de años más, junto a cnidarios y animales cavadores, pero sus horas (o mejor, sus millones de años) también estaban contadas y pronto declinaron bruscamente hasta quedar reducidos a la situación actual. Y justo cuando esto ocurría, aparecieron nuevos tipos de animales, que disponían de una revolucionaria novedad: estaban pertrechados de *esqueletos mineralizados*.

Los esqueletos mineralizados están formados por piezas duras y rígidas, en cuya composición intervienen sales minerales como el carbonato y el fosfato cálcicos. Este tipo de esqueleto también es muy eficiente a la hora de dar consistencia a un animal, aunque, a diferencia del esqueleto hidrostático, no le permite modificar su forma. No obstante, esta limitación está compensada con cre-

ces por otras ventajas. En primer lugar, los esqueletos mineralizados permiten construir estructuras externas que aíslan al animal del medio externo y le protegen del ataque de eventuales depredadores. Además, las piezas rígidas ofrecen magníficas plataformas para la acción muscular, lo que permite a los animales realizar actividades muy diversas de una manera mucho más eficaz. Entre ellas se encuentra la locomoción y la capacidad de atrapar y procesar el alimento.

Los animales con esqueletos rígidos entraron en escena de una manera tímida hace alrededor de 545 millones de años (a partir de ahora, y salvo mención expresa, denominaremos a los *esqueletos mineralizados* simplemente *esqueletos*). La primera evidencia de este nuevo tipo de animales consiste en unos minúsculos conos de naturaleza calcárea, denominados *Cloudinia*. Apenas cinco millones de años después, a comienzos del Cámbrico (en el periodo conocido como *Tommotiense*), los animales con esqueleto se habían diversificado algo más. Entre ellos se encontraban las *Aldanella*, unas diminutas conchas arrolladas en espiral como las de los caracoles.

Aunque algo más variados, estos esqueletos seguían correspondiendo a animales de muy pequeño tamaño. Nada hacía presagiar el gran acontecimiento que estaba a punto de producirse. En apenas diez millones de años (un relámpago en la historia de la vida), los mares se poblaron de animales nuevos, mayores que los anteriores, y provistos de esqueletos muy variados. Surgieron entonces, entre otros, los equinodermos, nuevas formas de moluscos, los *braquiópodos*, y los *arqueociatos* (un grupo de animales afines a las esponjas y que fueron los primeros formadores de arrecifes). Un poco después (en el siguiente episodio del Cámbrico, denominado *Atdaba-*

niense), aparecieron los primeros artrópodos: los *ostrácodos* y los *trilobites*.

Cabe señalar que seguramente no fueran éstos (ostrácodos y trilobites) los primeros ni los únicos artrópodos de comienzos del Cámbrico. Todos los artrópodos comparten la presencia de un esqueleto endurecido, que cubre su cuerpo, pero en la mayoría de ellos no está mineralizado por lo que su fosilización es muy improbable. El esqueleto de los artrópodos está constituido por una sustancia de naturaleza orgánica, la *quitina*, que aunque puede ser muy dura (piensen en el caparazón de los escarabajos o de las cucarachas) se descompone fácilmente al no estar mineralizada. Sólo algunos artrópodos (como los trilobites, los ostrácodos o los actuales cangrejos) añaden sales minerales a su caparazón quitinoso, facilitando así su fosilización.

Los equinodermos de entonces eran muy diferentes de los que pueblan hoy día nuestros mares. Pero al igual que éstos, los pretéritos equinodermos tenían un esqueleto formado por placas de carbonato cálcico. Estas placas se sitúan por debajo de la epidermis del animal, por lo que se trata de un esqueleto interno.

Los braquiópodos tienen una concha externa formada por dos valvas, al igual que los *bivalvos* (berberechos y compañía), y son tan parecidos externamente a ellos, que aprender a distinguirlos es una de las primeras tareas de los estudiantes de paleontología. Con toda seguridad, los braquiópodos se ganaban la vida filtrando el agua marina y, muy probablemente, ése era también el modo de vida de la mayor parte de los primeros equinodermos.

Pero los auténticos protagonistas de los mares cámbricos fueron los trilobites. Estos animales recuerdan en su

anatomía externa a los actuales cangrejos-cacerola. Su cuerpo estaba cubierto de un esqueleto articulado (algo así como las armaduras medievales), en la cabeza tenían antenas y ojos compuestos (como los de los insectos actuales), y, lo que es más importante, tenían *patas* (o, si prefieren, apéndices articulados). En la historia de la vida sólo han aparecido dos tipos de animales con patas: los artrópodos y los vertebrados terrestres. Las patas son apéndices que están sostenidos por la presencia de un esqueleto rígido (externo o interno), dividido en segmentos articulados entre sí.

Ya hemos comentado que el esqueleto ofrece una magnífica plataforma de sustentación a los músculos para ejercer su actividad, lo que facilita la realización de movimientos vigorosos. La ventaja de que el esqueleto de las extremidades esté articulado estriba en que permite la movilidad relativa de sus partes. Si usted ha tenido alguna vez la pierna escayolada, conoce bien la diferencia entre un esqueleto articulado (nuestros huesos) y uno rígido (la escayola). No es casualidad que los dos grupos de animales con esqueleto articulado (artrópodos y vertebrados) sean los únicos que hayan podido adaptarse plenamente a la vida en tierra, donde la presencia de patas es fundamental para desplazarse.

Los apéndices articulados convirtieron a los trilobites en unos animales *todo terreno*, diestros en la tarea de desplazarse por la superficie del sustrato y también plenamente capacitados para penetrar en su interior. Aparentemente, los primeros trilobites aprovecharon su gran capacidad de movimiento, sobre todo, para buscar su alimento en el fango. Es posible, además, que algunos de ellos también se sustentaran de algas e, incluso, que hubiera formas depredadoras, aunque el estudio de la ana-

tomía de su región bucal indica que estaban limitados a presas de pequeño tamaño y sin partes duras.

El advenimiento de los esqueletos mineralizados constituye uno de los episodios más enigmáticos de la historia de la vida. Su aparición fue casi súbita, en unos pocos millones de años, y aconteció en varios grupos distintos de animales casi al mismo tiempo. Como si de un crimen se tratara, los científicos se preguntan por el *móvil* (es decir, la ventaja que determinó su aparición) y por la *ocasión* (o sea, por qué ocurrió cuando ocurrió y no antes o después) de la aparición de los esqueletos mineralizados.

El móvil es fácil de comprender. Ya hemos comentado que este tipo de esqueleto confiere dos grandes ventajas: la capacidad de aislarse del medio, incluida la defensa contra los depredadores, y la potenciación de la acción muscular. Resulta sencillo entender por qué la selección natural favoreció a aquellos organismos capaces de dotarse de esqueleto. Y mucho más intensamente aún si los competidores, los depredadores, o las presas, también disponían de esta adaptación. Es concebible que la aparición de esqueleto mineralizado en algún grupo concreto aumentara la presión de selección en favor de estas estructuras y catalizara así su aparición en otros tipos de animales.

Pero si esto fue así, si el móvil es tan evidente, el problema de la ocasión se hace aún más intrincado. Si es cierto que el poseer esqueleto mineralizado es tan ventajoso, si su presencia en un grupo determinó su aparición en muchos otros, ¿por qué no ocurrió antes? La respuesta que encuentran los paleontólogos a esta pregunta es que los esqueletos aparecieron en cuanto las condiciones físico-químicas de los océanos lo permitieron. Si

no ocurrió antes fue, sencillamente, porque no era posible.

Una de las razones que se aducen para explicar por qué los animales no pudieron desarrollar esqueletos hasta comienzos del Cámbrico es la insuficiente cantidad, hasta ese momento, de oxígeno en la atmósfera del planeta. Ya hemos comentado anteriormente que la atmósfera primitiva de la Tierra carecía de oxígeno libre y que éste se fue acumulando lentamente como consecuencia de la actividad fotosintética de unas diminutas *heroínas*, las cianobacterias. Aunque es relativamente sencillo constatar el aumento gradual de este gas en la atmósfera terrestre a lo largo de miles de millones de años (a partir del estudio de las rocas y minerales de origen sedimentario), es mucho más difícil conocer con precisión cuánto oxígeno hubo en cada momento en nuestra atmósfera. Existen distintos modelos sobre el incremento de oxígeno en la atmósfera que sustentan diferentes puntos de vista acerca de cuánto oxígeno había en cada momento. Algunos de estos modelos predicen que la cantidad de oxígeno atmosférico no fue lo suficientemente alta como para permitir la aparición de los esqueletos mineralizados hasta comienzos del Cámbrico.

La relación entre el nivel de oxígeno en la atmósfera y la presencia de esqueletos mineralizados está en la respiración. La cantidad de oxígeno disuelto en el agua marina, lugar donde vivían todos los animales en aquella remota época, depende directamente de la cantidad de este gas presente en la atmósfera. Si los niveles de oxígeno (atmosférico y, por ende, del agua de mar) son muy bajos, los animales necesitan emplear una gran superficie para realizar con eficiencia el intercambio gaseoso con el medio externo (captar oxígeno y ceder dióxido de carbono). De hecho, emplean toda la superficie corporal

para este menester: respiran a través de la piel. En estas condiciones, el animal no puede revestir la superficie de su cuerpo con una cubierta aislante (concha, placas o escamas), so pena de morir sofocado. Únicamente cuando la cantidad de oxígeno disuelto en el agua supera un valor crítico es posible cubrir la superficie corporal con elementos esqueléticos, traspasando la misión de respirar a una parte concreta del cuerpo, especializada en tal menester.

Según los defensores de la *hipótesis del oxígeno* la cantidad de oxígeno presente en la atmósfera no habría rebasado ese valor crítico hasta comienzos del Cámbrico. Esta explicación es brillante pero desgraciadamente, como ya hemos comentado, no existe consenso sobre los niveles de oxígeno en la atmósfera de aquella época.

Otra hipótesis que se ha presentado para responder al *problema de la ocasión*, atiende a la composición química de los océanos. Diversas investigaciones realizadas en el último cuarto del siglo XX han puesto de manifiesto que a finales del Precámbrico la composición química del agua marina sufrió fuertes alteraciones, con cambios marcados en las proporciones de algunas sales minerales, entre las que destacan el magnesio, el calcio y el fósforo. Estas perturbaciones, unidas a la mayor cantidad de oxígeno disuelto en el agua, pudieron favorecer los procesos bioquímicos formadores de esqueletos (el coste energético de producir y mantener un esqueleto mineralizado en condiciones químicas adversas es prohibitivo para cualquier animal). Así, la gran cantidad de calcio disuelto en los mares de finales del Precámbrico pudo favorecer que algunos organismos desarrollaran mecanismos para precipitar esta sal en forma de carbonato cálcico y no morir intoxicados.

Y aún queda otra explicación, ésta puramente biológica, para aclarar la multiplicación de los esqueletos mineralizados en los albores del Cámbrico. Se trata de la acción de los depredadores. Los defensores de este punto de vista arguyen que la presencia de nuevos y más letales depredadores impulsó la proliferación de esqueletos duros como elementos defensivos. Este planteamiento choca con dos inconvenientes. En primer lugar, no resuelve satisfactoriamente el *problema de la ocasión*, ya que no explica por qué esas condiciones no se dieron anteriormente. Por otra parte, y siguiendo con la terminología policial, entre los sedimentos de comienzos del Cámbrico no aparecen animales sospechosos de ser los terribles depredadores que propone esta hipótesis. Ya hemos visto que ni los braquiópodos, ni los equinodermos, ni los trilobites se ajustan a ese perfil. No obstante, hay indicios (conchas perforadas y fósiles de trilobites con marcas de haber sido atacados) de que en aquellos remotos mares hubo depredadores que no han quedado fosilizados.

Desgraciadamente ésta es una situación frecuente en la paleontología. No todos los organismos que vivieron en el pasado han quedado registrados en forma de fósiles. Y para empeorar más las cosas, ni tan siquiera sabemos cuántos, ni cuáles, de aquellos animales nos faltan. El propio Darwin aducía la imperfección del registro fósil para explicar por qué éste no contenía la totalidad de formas de transición que su visión de la evolución predecía: se trataba de *eslabones perdidos* (es decir no conservados en el registro fósil).

Sin embargo, desde Darwin hacia acá el trabajo de generaciones de paleontólogos ha ido incrementando extraordinariamente la documentación fósil y muchos de aquellos eslabones perdidos han ido apareciendo en los

estratos de rocas sedimentarias. A veces, los descubrimientos paleontológicos son más amplios que el hallazgo de algunos fósiles (por importantes que éstos sean). De vez en cuando, los paleontólogos encuentran yacimientos excepcionales, auténticas ventanas hacia el pasado que nos permiten conocer con precisión un momento concreto del tiempo, sin las limitaciones habituales del registro fósil. Uno de estos lugares maravillosos, declarado Patrimonio de la Humanidad en 1980, es el yacimiento canadiense de Burgess Shale.

Aunque hoy día se encuentra en las alturas de las Montañas Rocosas, en el Yoho National Park (Columbia Británica), a más de dos mil metros sobre el nivel del mar, las rocas y los fósiles de Burgess Shale son de origen marino. Hace aproximadamente 515 millones de años una próspera comunidad de invertebrados medraba en los fondos fangosos y tranquilos de un mar somero y cálido, al pie de un gigantesco arrecife. Periódicamente, parte del lodo se deslizaba por el empinado escarpe del arrecife hacia fondos más profundos, sepultando a sus habitantes. Los animales morían y eran cubiertos por el propio fango que constituía la avalancha submarina. El enterramiento súbito y la finura de los sedimentos que los sepultaron permitieron que las partes blandas de los cuerpos de los animales quedaran delicadamente impresas en su estuche de cieno. De este modo, quedó registrada una comunidad biológica completa de mediados del Cámbrico. Las posteriores convulsiones de la corteza terrestre hicieron retroceder el mar y elevaron aquellos terrenos hasta la cota que ocupan en la actualidad.

Los primeros fósiles de este yacimiento fueron hallados en las laderas del Monte Stephen en 1886. Estos primeros hallazgos consistían en varios ejemplares de trilobi-

tes y otros fósiles enigmáticos que fueron bautizados como *Anomalocaris canadensis* (que quiere decir algo así como *extraña gamba del Canadá*), un extraordinario animal sobre el que volveremos más adelante. A finales del siglo XIX la Canadian Pacific Railway construyó una línea férrea que discurría por esos mismos parajes. Los trabajadores del ferrocarril encontraban con frecuencia fósiles de trilobites y otros animales entre las rocas removidas por las obras y los bautizaron como *bichos de las rocas*. El tren facilitó el acceso a este pintoresco lugar y propició la afluencia de turistas que continuaron descubriendo fósiles. La noticia de estos hallazgos llegó hasta el mayor especialista en trilobites del momento, y uno de los más grandes paleontólogos americanos, Charles Doolittle Walcott (1850-1927), a la sazón secretario del Smithsonian Institute.

La carrera científica de Walcott fue realmente extraordinaria, si tenemos en cuenta que aunque no cursó estudios universitarios y, muy probablemente, ni siquiera acabó el bachillerato, llegó a ser presidente de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, director del Geological Survey de los Estados Unidos y secretario del Smithsonian Institute. Nacido en Utica, Nueva York, Walcott quedó huérfano de padre a los dos años de edad. Obsesionado desde pequeño con la búsqueda de fósiles, al cumplir los veinte años Walcott entró a trabajar como ayudante en la granja de William Rust, con quien compartía la afición a los fósiles. La recolección y venta de fósiles se convirtió en una tarea muy provechosa para Walcott y Rust, que llegaron a vender al eminente paleontólogo Jean Louis Rodolphe Agassiz (1807-1873) una colección de fósiles por el equivalente de algo más de setenta y ocho mil euros de nuestros días (trece millones de pesetas). Lo que Walcott no po-

día imaginar es que esta venta iba a cambiar su perspectiva sobre los fósiles y el rumbo de su vida.

En septiembre de 1873, mientras se encontraba en el Museo de Zoología Comparada de Harvard ayudando a desembalar y ordenar la colección que acababa de vender, Walcott quedó impresionado por la importancia que Agassiz (que moriría apenas dos meses después) otorgaba al estudio de los apéndices de los trilobites. En aquel momento no se conocía ningún apéndice fósil, que son de capital importancia en el estudio de estos artrópodos. De vuelta a la granja, Walcott descubrió restos fósiles que podrían incluir, precisamente, a los tan buscados apéndices de los trilobites. Intrigado por la importancia científica del hallazgo, más que por su faceta comercial, Walcott emprendió la tediosa tarea de realizar secciones seriadas de los fósiles para estudiar su anatomía. De este modo, en 1876, pudo demostrar fehacientemente la existencia de apéndices articulados en los trilobites. Ese mismo año empezó a trabajar como asistente del ilustre paleontólogo James Hall (1811-1898) y en 1879 ingresó en el Geological Survey de los Estados Unidos (en esas fechas él y Rust vendieron otra colección de fósiles al hijo de Agassiz, Alexander, por la bonita cifra de noventa mil euros, o quince millones de pesetas, de hoy). A partir de ese momento la carrera científica de Walcott fue vertiginosa, llegando a la dirección del Geological Survey en 1894. Para entonces, ya era uno de los máximos especialistas mundiales en fósiles cámbricos.

Atraído por las noticias de los hallazgos de fósiles, Walcott se llegó hasta las laderas del Monte Stephen en el verano de 1907. Allí encontró nuevos ejemplares que publicó al año siguiente. Sin embargo, el descubrimiento más extraordinario tuvo lugar el 30 de agosto de 1909.

Ese día, Walcott se había desplazado a inspeccionar las laderas del Monte Wapta, situado frente al Monte Stephen. Cuando se hallaba bajo la cresta que une las cimas del Monte Wapta y del Monte Field (en realidad, un promontorio del propio Monte Wapta), Walcott reparó en unas rocas que habían rodado desde lo alto de la ladera. Llevado por la costumbre de muchos años de búsqueda de fósiles, Walcott partió con su martillo de geólogo alguna de las peñas que acababa de remover. Delicadamente registrados en las entrañas de la piedra, aparecieron ante su vista unos fósiles maravillosamente preservados, incluyendo los tejidos blandos. Walcott intentó localizar el lugar de procedencia de aquellas rocas, pero el verano tocaba a su fin y en los pocos días que aún permaneció en aquellos parajes sólo pudo localizar una zona que mostraba indicios de ser el origen de los fósiles.

Walcott volvió al Monte Wapta al siguiente verano y pudo localizar, monte arriba, el lugar exacto del que procedían los peñascos desprendidos. Bautizó a este lugar como Burgess Shale, por la proximidad del Monte Burgess (nombrado así en 1866 en honor del político canadiense Alexander McKinnon Burgess), e inició las excavaciones (en justa contrapartida, uno de los picos del Monte Burgess fue bautizado en 1996 como Walcott Peak). A lo largo de siete veranos Walcott y su equipo, que incluía a su familia, recuperaron alrededor de 65.000 ejemplares.

Además de ese tesoro, de incalculable valor científico, Walcott nos legó una extensa obra científica sobre los fósiles cámbricos, de los que describió la tercera parte de todos los conocidos en aquella época. En opinión de George Gaylord Simpson, uno de los más grandes paleontólogos de todos los tiempos, el trabajo de sus colegas consiste en encontrar fósiles y estudiarlos. Desde

ese punto de vista, no cabe duda de que aquel niño que vagabundeaba por las afueras de Utica buscando fósiles llegó a convenirse en uno de los más grandes paleontólogos de la historia.

Con la excepción de campañas aisladas en 1930, 1966/67, y 1975, los trabajos sistemáticos de excavación en la zona de Burgess Shale se reanudaron en 1981, a cargo de un equipo del Royal Ontario Museum, dirigido por el paleontólogo Desmond Collins (y del que forma parte un joven paleontólogo español, Diego García-Bellido, que es el ilustrador de este libro). Gracias al trabajo del equipo del Royal Ontario Museum se han descubierto más de una docena de nuevos yacimientos en la zona, a cerca de veinte kilómetros del yacimiento excavado por Walcott. Pero los hallazgos de yacimientos de edad y estado de preservación de los fósiles similares a los de Burgess Shale no se han visto confinados a ese sector de la geografía canadiense, ni siquiera al continente americano. También se han encontrado yacimientos parecidos en Estados Unidos, Australia, y Groenlandia.

Aunque el yacimiento (o mejor, el conjunto de yacimientos) más importante fue hallado en 1984 en el municipio de Chengjiang, de la provincia china de Yunnan. Los fósiles de Chengjiang son aún más antiguos que los de Burgess Shale, alrededor de 530 millones de años de antigüedad, están tan bien preservados como los del yacimiento canadiense y, en ocasiones, más completos.

De manera similar a lo ocurrido con los fósiles de Ediacara, la interpretación de los fósiles de Burgess Shale ha variado desde los primeros estudios de Walcott. Para él, todas las formas representadas en los estratos de Burgess Shale correspondían a variantes, más o menos primitivas, de los tipos conocidos de animales: la fauna

de Burgess Shale constituía un antecedente de la actual, no una novedad. Sin embargo, este punto de vista iba a ser rebatido por los investigadores que sucedieron a Walcott en el estudio de los fósiles de Burgess Shale.

A comienzos de la década de los setenta del siglo XX, un equipo de científicos de la Universidad de Cambridge, formado por Harry Whittington y sus estudiantes de doctorado Derek Briggs y Simon Conway-Morris, reinició el estudio de la colección de fósiles de Burgess Shale. Los análisis realizados, a lo largo de catorce años, por Whittington y su equipo les llevó a proponer una revolucionaria interpretación de los fósiles de Burgess Shale. Según ellos, muchos de esos fósiles no podían atribuirse a ninguno de los grandes tipos conocidos de animales, sino que representaban formas de animales desconocidas hasta ese momento.

De golpe, nuestra visión de la historia de la vida se vio sacudida hasta sus cimientos. Hasta ese momento, se pensaba que la biodiversidad en formas básicas de animales (esto es, el número de filos diferentes) había permanecido constante (o se había visto levemente incrementada) desde los tiempos del Cámbrico, y lo que los estudios de Whittington y sus colegas proponían era exactamente lo contrario: que dicha biodiversidad había sido mucho mayor en aquellos remotos mares y que desde entonces hasta nuestros días sólo había decrecido. Esta idea fue recogida por el célebre paleontólogo americano Stephen Jay Gould, quien, en su famoso libro *La vida maravillosa*, la hizo llegar al público general. Se inició entonces una ardua polémica, que sigue hasta nuestros días, sobre la interpretación de esos fósiles problemáticos de Burgess Shale. Buenos ejemplos de esta controversia lo constituyen los casos de *Anomaloca-*

ris, *Opabinia* y *Hallucigenia*, algunos de los fósiles más emblemáticos de Burgess Shale.

Ya hemos visto que entre los primeros fósiles hallados en el Monte Stephen se encontraban algunos ejemplares de *Anomalocaris*. En realidad, no se trataba de especímenes completos, sino, como luego se demostró, de los apéndices alimentarios de un gran animal. En 1911, el propio Walcott descubrió un fósil peculiar que atribuyó a un cnidario debido a su simetría radial, y al que llamó *Peytoia nathorsti*. Los primeros en darse cuenta de que los fósiles de *Anomalocaris* y *Peytoia* correspondían, en realidad, a distintas partes del mismo animal (apéndices y aparato masticador, respectivamente) fueron Whittington y Briggs, quienes mantuvieron el nombre de *Anomalocaris* para el nuevo animal. Según estos autores, esta criatura no podía atribuirse a ninguno de los filos previamente conocidos del reino animal.

Las excavaciones dirigidas por Collins han proporcionado algunos ejemplares completos de este sorprendente animal, confirmando la reconstrucción hecha por Whittington y Briggs. Gracias a los nuevos fósiles sabemos que *Anomalocaris* fue el mayor de todos los habitantes marinos de su época, con una longitud de hasta sesenta centímetros (aunque en Chengjiang se han hallado ejemplares que superan el metro de longitud). Su cuerpo estaba flanqueado de prolongaciones aplanadas, poseía dos ojos prominentes y un par de largos y poderosos apéndices articulados a los lados de la boca, que contaba con la presencia de un potente aparato masticador.

A diferencia de Whittington y Briggs, Collins piensa que la presencia de apéndices articulados en *Anomalocaris* justifica su inclusión dentro del filo de los artrópodos. En lo que sí están todos de acuerdo es en aceptar que *Anomalocaris* fue un depredador, el mayor de los mares

cámbricos. Para acoger a *Anomalocaris* y a otros animales afines, todos ellos depredadores, Collins ha creado una nueva clase dentro de los artrópodos. Debido a su naturaleza de carnívoros, y dado el aterrador aspecto que debió tener *Anomalocaris* en vida, Collins ha bautizado a esta nueva clase, con fino sentido del humor, como *dinocáridos*, lo que traducido viene a ser algo así como *gambas terribles* (el término dinosaurio quiere decir *lagarto terrible*).

El más estrambótico morador de los mares de Burgess Shale recibe el nombre de *Opabinia regalis*. Se trata de un animal de más modestas dimensiones que *Anomalocaris* (alrededor de 10 cm de longitud). Como en éste, su cuerpo es alargado y en sus laterales aparecen expansiones aplanadas. Lo extraordinario de *Opabinia* reside en sus cinco ojos, dos pareados y uno en el centro de la cabeza, y, sobre todo, en la presencia de un largo apéndice, parecido a una trompa, situado sobre la boca y rematado por una corona de espinas a modo de órgano prensil. Muy posiblemente, *Opabinia* utilizaba su extraña probóscide para atrapar sus presas. Hoy día no existe consenso sobre la clasificación de *Opabinia*. Algunos lo consideran un artrópodo (de un tipo muy primitivo, tal como pensaba Walcott, o como parte de los dinocáridos, tal como opina Collins) y otros creen, junto a Whittington y Briggs, que no se trata de un auténtico artrópodo sino que pertenece a un filo nuevo.

Un caso en el que sí se ha alcanzado un alto grado de acuerdo sobre su interpretación es el de *Hallucigenia sparsa*, interpretado por Walcott (que lo nombró como *Canadia sparsa*) como un anélido del tipo de las lombrices marinas. Conway-Morris realizó el primer estudio detallado de este animal y fue él quien lo nombró como *Hallucigenia sparsa*. En su opinión, *Hallucigenia* no se tra-

taba de un anélido, tal como había aseverado Walcott, sino que pertenecía a un nuevo filo del reino animal desconocido hasta entonces. Verdaderamente, el aspecto del animal parecía justificar tanto el nombre como la interpretación de Conway-Morris. De modestas dimensiones (dos centímetros de longitud) el cuerpo de *Hallucigenia* aparece rematado, en uno de sus extremos, por una protuberancia. En uno de sus lados presenta una doble hilera de siete prominentes espinas, mientras que en el lado opuesto se disponen siete cortos tentáculos situados en una única fila. Según la reconstrucción de Conway-Morris, el animal caminaba sobre el fondo fangoso apoyándose en la doble hilera de espinas, mientras que conseguía el alimento a través de los siete tentáculos situados en una única fila sobre su espalda.

Sin embargo, esta interpretación comenzó a ser puesta en duda por el hallazgo en Chengjiang de un fósil, *Onychodictyon ferox*, similar a *Hallucigenia sparsa* y claramente asignable al filo de los *onicóforos*, que son un grupo de animales hoy día poco numerosos y restringidos a bosques tropicales, cuyo representante actual más conocido es el género *Peripatus*. Generalmente, los onicóforos se consideran como un tipo de animal evolutivamente intermedio entre los anélidos y los artrópodos. En su región dorsal (la espalda), *Onychodictyon* muestra una doble hilera de cortas espinas, algo muy parecido a *Hallucigenia*, lo que llevó a los autores del descubrimiento a sostener que, al colocar las espinas sobre el vientre del animal, Conway-Morris había reconstruido a *Hallucigenia* justo al revés. Esta nueva interpretación de *Hallucigenia* interpretaba la fila de tentáculos como apéndices locomotores, similares a los de los onicóforos. Sin embargo, esta hipótesis chocaba con el hecho de que los onicóforos no presentan una única fila de tentáculos en

su vientre, sino dos (que hacen las veces de *patitas* en estos animales): una fila derecha y otra izquierda.

Para salir de dudas, Lars Ramskold, uno de los descubridores de *Onychodictyon*, reestudió el fósil original de *Hallucigenia sparsa* de Burgess Shale y encontró la segunda fila de tentáculos, que había permanecido oculta en el interior de la roca que contiene al fósil. Hoy día, nadie duda que *Hallucigenia sparsa* sea otra cosa que un onicóforo primitivo.

Todavía queda otra especie fósil de Burgess Shale que merece nuestra atención. Se trata de un pequeño organismo, con aspecto de gusano, que puede considerarse uno de los primeros representantes de nuestro propio filo, los cordados.

Listos y feroces

Los seres humanos formamos parte de un grupo próspero dentro del reino animal, ya que en la biosfera actual se conocen alrededor de 50.000 especies de cordados (de las que la mayoría pertenecen a una de sus divisiones: los *vertebrados*), siendo el cuarto grupo más numeroso del reino animal. Por delante de nosotros, en cuanto a número de especies, están los moluscos, con cerca de 100.000 especies, los *nemátodos*, con alrededor de medio millón de especies, y los artrópodos, que sobrepasan largamente el millón de especies.

Dentro del filo de los cordados se incluye, además de a los vertebrados, a un conjunto, aparentemente muy heterogéneo, de animalillos marinos que se reparten en dos grupos: *urocordados* y *cefalocordados* (o sea, que el filo cordados está compuesto por tres subfilos: vertebrados,

urocordados y cefalocordados). Dentro de los urocordados, los animales más conocidos son las *ascidias* (o jeringas de mar), que viven fijos en el fondo y se dedican a filtrar el agua. Aunque los cefalocordados (*anfioxos* o peces lanceta) no son muy conocidos en nuestro país, son abundantes en mares de otras latitudes y son objeto de explotación por parte de los seres humanos. Los anfioxos tienen forma de peces de pequeño tamaño, carecen de ojos y viven semienterrados en el fango del fondo marino, en donde encuentran su sustento.

Si se comparan las ascidias, los anfioxos y cualquier vertebrado, es difícil advertir las características que esos animales tan diferentes tienen en común y que hacen que los biólogos los agrupen en el mismo filo. Estos rasgos, compartidos por todos ellos, son básicamente cuatro: presencia de *notocorda*; existencia de un cordón nervioso que recorre la región dorsal (la espalda) del animal (lo que se conoce técnicamente como *epineuria*); en la faringe (la garganta) del animal se aprecian una serie de aberturas que están conectadas con el exterior (*hendiduras faríngeas*); por detrás del ano se sitúa una prolongación muscular del cuerpo: la cola. Para comprender bien la morfología, e importancia, de estos caracteres merece la pena que nos detengamos un poco en cada uno de ellos.

La notocorda es algo así como una gran viga central, situada en la región dorsal, que sostiene el cuerpo de los cordados. En los urocordados y cefalocordados esta estructura es una varilla elástica constituida por un núcleo de células y líquido recubierto por una vaina de tejido fibroso. Esta misma situación se encuentra en los embriones de los vertebrados (y en los *mixines*, unos vertebrados relativamente parecidos a las *lampreas*), aunque a lo largo del desarrollo embrionario va siendo sustituida por

una serie de segmentos endurecidos (las vértebras) que dan lugar a la columna vertebral. La notocorda (o la columna vertebral, en nuestro caso) no sólo sostiene el cuerpo, además presta inserción a una poderosa musculatura que es la responsable de los movimientos ondulatorios, del cuerpo y de la cola, que impulsan al animal.

En muchos animales el encéfalo está conectado con un cordón nervioso que recorre su cuerpo para inervar los distintos órganos. En los animales que no son cordados (los que habitualmente reunimos bajo la denominación de *invertebrados*), este cordón nervioso discurre por la región ventral de su cuerpo, por debajo del tubo digestivo. Sin embargo, en los cordados el cordón nervioso se encuentra en la región dorsal, por encima del tubo digestivo (es nuestra médula espinal). Además de esta diferente situación en el cuerpo, el cordón nervioso de cordados e invertebrados difiere en otro aspecto fundamental: mientras que en los segundos (los invertebrados) se trata de un cordón macizo, en los primeros está hueco (por lo que en vez de cordón nervioso, se suele denominar tubo nervioso). Esta diferencia es capital porque deriva del diferente modo en que este cordón/tubo se origina durante el desarrollo embrionario en unos y otros.

Las hendiduras faríngeas se denominan con mucha frecuencia (y erróneamente) como *hendiduras branquiales*, en referencia a los órganos respiratorios que, en muchos vertebrados, tienen aquí su emplazamiento. Estos animales hacen pasar una corriente de agua por la boca hasta su faringe, desde donde es expulsada de nuevo al exterior a través de las hendiduras faríngeas. El objeto de esta circulación es hacer pasar el agua a través de las branquias situadas en estas hendiduras. No obstante, en los cordados no vertebrados (y en muchas formas primitivas de éstos) las hendiduras faríngeas no están rela-

cionadas con la respiración sino con la alimentación: a su paso por las hendiduras faríngeas el agua se encuentra con estructuras que la filtran y extraen de ella las partículas alimenticias.

Si se está preguntando en dónde están nuestras hendiduras faríngeas, la respuesta estriba en que estas estructuras aparecen en las primeras fases de nuestro desarrollo embrionario y luego se cierran. Todas excepto una. A partir de la primera hendidura faríngea de nuestros embriones se desarrollan los conductos y cavidades del oído externo y medio. A fin de cuentas, nuestro oído medio está conectado con nuestra garganta a través de un finísimo tubo llamado *Trompa de Eustaquio* y con el exterior por el conducto auditivo externo.

La cola musculosa es un carácter aparente de la anatomía externa de los cordados y constituye un espléndido apéndice impulsor. En los vertebrados pisciformes (los peces), la cola sigue desempeñando la función primitiva, pero en los vertebrados terrestres este órgano ha sufrido múltiples adaptaciones a las más variopintas funciones, llegando incluso a reducirse casi por completo. En los seres humanos, la cola ha quedado reducida a un conjunto de diminutas vértebras, el *coxis*.

La mayoría de los urocordados (las ascidias) sólo presentan algunas de estas características durante la fase larvaria y las pierden en el estado adulto, mientras que otros (el grupo de los *larváceos*, por ejemplo) las mantienen durante toda su vida.

Los cefalocordados y los vertebrados compartimos, además, un carácter que no presentan los urocordados: la presencia de músculos segmentarios (*miómeros*) unidos a la notocorda (o a la columna vertebral). Este tipo de musculatura recibe el nombre de segmentaria porque

está constituida por una serie de paquetes musculares repetidos en serie. El mejor ejemplo de esta disposición lo puede encontrar usted la próxima vez que coma pescado (la trucha resulta ideal para este propósito). Observará entonces que la carne del animal se desprende en lascas. Cada una de ellas es un miómero y el conjunto de todas ellas forma la musculatura segmentaria.

Finalmente, los vertebrados nos distinguimos de los cefalocordados en otros rasgos. Una buena parte de los vertebrados presenta esqueleto mineralizado, debido a la formación de hueso (aunque hay muchos vertebrados, como los mixines, las lampreas, los tiburones, o las rayas, que no producen hueso sino cartílago). Este esqueleto (sea de hueso o cartílago) tienen dos estructuras características. En primer lugar, tal como ya hemos mencionado, las vértebras (de ahí, el nombre de vertebrados) y en segundo lugar (pero igual de importante) un conjunto de piezas que recubren el encéfalo y los principales órganos de los sentidos de la cabeza: el cráneo (muchos biólogos prefieren emplear el término *craneados* para referirse al conjunto formado por los vertebrados menos los mixines, que no tienen vértebras). La presencia de cráneo delata otra característica muy importante de nuestro grupo biológico: el gran desarrollo de la cabeza y de sus órganos asociados: encéfalo y órganos de los sentidos (como los ojos). Finalmente, también es importante destacar que los vertebrados tenemos corazón mientras que los cefalocordados carecen de él.

Una vez familiarizados con los distintos tipos de cordados y con sus características básicas, podemos pasar a ocuparnos de su origen y, para ello, hemos de volver a los yacimientos de Burgess Shale y Chengjiang.

Durante mucho tiempo, el origen de los vertebrados, y de los cordados, ha sido una espina clavada en el costado de los zoólogos, en general, y de los paleontólogos, en particular. A comienzos de la década de los setenta del siglo XX, el registro fósil conocido de los principales filos del reino animal se remontaba a los comienzos del Cámbrico (o incluso antes, desde el Precámbrico). Sin embargo, y contrastando con esa situación, los cordados aparecían mucho más tarde en el registro fósil, a finales del Cámbrico, de la mano de unos fósiles enigmáticos, denominados *conodontos* (en realidad, nos referimos a los *euconodontos*), que algunos interpretaban como los primeros cordados.

Los conodontos son fósiles de muy pequeño tamaño, hace falta una potente lupa o un microscopio para estudiarlos, y consisten en pequeñas piezas esqueléticas que recuerdan (unas más que otras) a los dientes de los vertebrados. Pero no es su forma, sino su composición química, lo que movía a muchos paleontólogos a relacionar a los conodontos con los cordados. Durante décadas, los conodontos constituyeron uno de los mayores enigmas de la paleontología, y como tal se explicaban en las aulas. La opinión que gozaba de más defensores era la de interpretar a los conodontos como piezas del aparato bucal de un cordado primitivo, cuyo cuerpo, al no tener ninguna otra parte mineralizada, no se conservaba fósil. Sin embargo, también había quien pensaba que esa interpretación era demasiado aventurada y carecía de fundamento.

El enigma se resolvió definitivamente en 1983, cuando un equipo encabezado por Briggs anunció el descubrimiento, largamente esperado, del primer fósil completo de un animal de conodontos, al que nombraron como *Clydagnathus windsorensis*. Se trata del fósil de un ani-

mal de cerca de cuatro centímetros de longitud que cuenta con una serie de conodontos situados en la región anterior del cuerpo (en donde se suponía que debían estar si, como muchos suponían, formaban parte del aparato alimentario del animal); también presenta una serie de estructuras que han sido interpretadas como notocorda, miómeros y cola, y se ha sugerido que *Clydagnathus* tiene dos grandes ojos laterales. Todos estos caracteres apuntan claramente a que *Clydagnathus* (y por extensión todos los conodontos) es un cordado y, quizá, un vertebrado. Esta última posibilidad se basa, sobre todo, en la presencia de ojos laterales, algo sobre lo que no existe consenso. Los descubrimientos de nuevos animales de conodontos se han sucedido desde entonces, encontrándose algunos de ellos en épocas posteriores como el Silúrico y el Carbonífero.

No obstante, la confirmación de la pertenencia de los conodontos a los cordados llegó tarde al debate sobre el origen del grupo. Para entonces, Conway-Morris ya había propuesto a unos fósiles de Burgess Shale (y por tanto mucho más antiguos que cualquiera de los conodontos) como candidatos al título de *primer cordado*. Estos fósiles habían sido reunidos originalmente por Walcott en la especie *Pikaia gracilens*, que él interpretaba como un anélido. Sin embargo, el nuevo estudio efectuado por Conway-Morris reparó en una serie de rasgos de gran importancia: sobre la tenue impresión del cuerpo del animal se podían distinguir marcas de lo que Conway-Morris interpretó como musculatura segmentaria y notocorda, caracteres que, ya hemos visto, son típicos de algunos cordados (en concreto, de cefalocordados y vertebrados).

La nueva interpretación de *Pikaia* fue bien acogida por la mayoría de los investigadores y esta especie pasó a ser

generalmente considerada como el cordado más antiguo. Para algunos, se trataba del primero de nosotros. Ahora bien, nadie veía en los fósiles de *Pikaia* otra cosa que un cefalocordado primitivo, por lo que la pregunta que aún quedaba en el aire era ¿cuándo aparecieron los primeros vertebrados? Algunos opinaban que ese puesto debía ser ocupado por los animales de conodontos, como *Clydagnathus*, pero otros no estaban tan seguros.

En el último lustro de la centuria pasada se han sucedido hallazgos de fósiles extraordinarios, que nos permiten acercarnos con más precisión a nuestro propio origen. El escenario de estos descubrimientos está muy lejos de Burgess Shale, tanto en el espacio como en el tiempo; el foco de atención se ha desplazado a China y ha retrocedido cerca de quince millones de años, a los tiempos del Cámbrico inferior que quedaron registrados en las rocas de Chengjiang. En 1995, un equipo de científicos chinos, encabezado por Chen Jun-Yuan, anunció el hallazgo del fósil más antiguo atribuible a un cordado: *Yunnanozoon lividum*.

Antes de continuar, y debido a lo enrevesado que pueden parecer algunos de los nombres de las especies que vienen a continuación, conviene que nos detengamos un momento en la cuestión de cómo ponen los científicos nombre a las especies. Nombrar una especie nueva es algo muy serio para un científico naturalista. Con frecuencia, se establecen acalorados debates entre científicos sobre cuál es el nombre correcto de una especie y quién fue su descubridor (o sea, el que le dio nombre por primera vez). Por ello, se han establecido unas normas internacionales para determinar cómo y en qué condiciones deben nombrarse las especies nuevas. Esta serie de normas recibe el nombre de *Código Internacional de Nomenclatura Zoológica* (para los animales) y existe un

comité internacional que vela por su correcta aplicación. Como ven, nombrar una especie nueva no es cosa de broma.

Este código exige que los nombres sean latinos o latinizados y pueden hacer referencia a múltiples motivos, como el lugar donde fue hallada la especie, el nombre de una persona, o determinadas características de la especie denominada. A lo largo del texto, hemos ido facilitando el significado de algunos de los nombres de las especies mencionadas, con el fin de hacer más inteligible la *jerga* de los científicos. Como muchos de los fósiles a los que nos vamos a referir a continuación tienen nombres que hacen alusión a lugares concretos de la geografía china, merece la pena que nos detengamos un momento en ella. En realidad, el nombre de Chengjiang no hace referencia a un único yacimiento, sino que se refiere a un conjunto de ellos, en los que se encuentran rocas de la misma edad y que contienen el mismo tipo de fósiles. Ya hemos comentado anteriormente que estos yacimientos se encuentran en la provincia china de Yunnan (de ahí *Yunnanozoon*: animal de Yunnan), cuya capital es Kunming. La ciudad más importante de la región en la que se enclavan los fósiles es Haikou, aunque hay otras poblaciones más pequeñas, como la propia Chengjiang (que da nombre al conjunto de yacimientos) y Ercaicun. Una vez pertrechados de estos conocimientos sobre toponimia china podemos continuar con los fósiles.

Decíamos que la especie *Yunnanozoon lividum* (el animal lívido de Yunnan) había sido propuesta por Chen y sus colegas como el cordado más antiguo conocido. Esta afirmación encendió una apasionante polémica, puesto que otro equipo de investigadores, liderado por Shu Degan (y del que forma parte Conway-Morris), atribuía esta especie a otro grupo de animales cercano (pero no

igual) al de los cordados: los *hemicordados* (o dicho en castellano, los *mediocordados* o *casicordados*). Una tercera opinión es la del paleontólogo español Patricio Domínguez, especialista en estas faunas, que sostiene que *Yunnanozoon* es un vertebrado muy primitivo.

En pleno debate sobre la naturaleza de *Yunnanozoon*, Shu y sus colegas anunciaron, en 1996, el hallazgo de otro fósil procedente de Chengjiang y que, en su opinión, era mejor candidato que *Yunnanozoon* para ser considerado como el cordado más antiguo. El fósil en cuestión fue bautizado por los científicos con el lindo nombre de *Cataymyrus diadexus* (que quiere decir, en griego, anguila china, *Cataymyrus*, de la buena suerte, *diadexus*). Las características de este fósil (musculatura segmentaria y notocorda) permitían asignarlo, con bastante seguridad, al grupo de los cefalocordados. Con su mención a la buena fortuna (*diadexus*), Shu y sus compañeros expresaban su deseo de encontrar más y mejores fósiles de este tipo de animal.

Y así fue, puesto que apenas tres años después publicaron el hallazgo de dos nuevas especies de cordados fósiles: *Myllokunmingia fengjiaoa* (que es una mezcla de vocablos griegos y chinos que significa: el hermoso, *fengjiaoa*, pez de Kunming, *Myllokunmingia*) y *Haikouichthys ercaicunensis* (de difícil traducción, pero quiere decir algo así como el pez de Haikou, *Haikouichthys*, encontrado en Ercaicun, *ercaicunensis*). Esta vez Shu y su equipo fueron más lejos, puesto que su interpretación de estos fósiles es que se trata de los primeros vertebrados auténticos. Su afirmación está basada en que, en su opinión, en estos fósiles es posible distinguir características propias de los vertebrados, como son restos de cráneo (en *Haikouichthys ercaicunensis*) y de la cavidad donde se aloja el corazón (en ambos).

Pero la buena suerte decidió sonreír también al equipo de Chen ya que apenas un mes después de la publicación sobre esos fósiles, apareció un artículo suyo en el que presentaban otra nueva especie (nombrada como *Haikouella lanceolata* en honor, nuevamente, de la ciudad de Haikou y por su forma lanceolada) cuyas características (presencia de corazón, ojos laterales y encéfalo desarrollado) le convertían también en uno de los primeros vertebrados. Y si el hallazgo de Chen y sus colegas no podía batir al de Shu y sus compañeros en antigüedad (ambos proceden de los mismos estratos de Chengjiang), sí, al menos, en calidad y cantidad, ya que su descubrimiento no se ceñía a un único ejemplar sino ¡a más de trescientos!, treinta de los cuales están completos.

Todavía es demasiado pronto para valorar en profundidad la importancia y significado de estos hallazgos (los de unos y otros) pero lo que sí parece claro es que ya había cordados a comienzos del Cámbrico. Y si tuviéramos que apostar nuestro dinero sobre si alguno de estos fósiles (o todos) representan al primer vertebrado, y a juzgar por el material publicado, pondríamos nuestras fichas en la casilla de *Haikouichthys ercaicunensis*.

No cabe duda que desde los tiempos de *El origen de las especies* los paleontólogos se han ganado el sueldo. A lo largo del último siglo se han sucedido los hallazgos de yacimientos y fósiles extraordinarios que nos han ayudado a llenar el tremendo vacío que tenía el registro fósil en tiempos de Darwin. Cumpliendo sus expectativas, se han explorado aquellas regiones de las que no se conocía su geología, y los frutos obtenidos han sobrepasado todas las previsiones. Al mismo tiempo, los paleontólogos han llevado a cabo exhaustivos estudios sobre los nuevos

fósiles descubiertos. Ha llegado el momento de preguntarnos en qué punto se halla la vieja polémica sobre la aparición de la mayoría de filos de animales. ¿Se han cumplido las esperanzas de Darwin y contamos hoy con un rico registro de animales precámbricos que atestigüe que la diversificación del reino animal fue un proceso gradual, que se dilató a lo largo de mucho tiempo, o se ha reforzado la idea de que se trató de un acontecimiento súbito y explosivo?

Aunque no existe consenso, parece que la mayor parte de las investigaciones sobre el material genético de los animales actuales se alinean en la dirección de lo propuesto por Darwin: la diversificación del reino animal tuvo lugar hace mucho tiempo. Sin embargo, en el campo de la paleontología la cuestión no parece tan clara. Algunos opinan que, ahora que conocemos bien los estratos de finales del Precámbrico, ha quedado demostrado que la mayor parte de los filos del reino animal no tienen raíces largas que se hundan profundamente en el tiempo. Para los que mantienen esta opinión, los fósiles de la fauna ediacareense nos dicen claramente que en aquella época aún no existían la mayoría de los filos de animales de la biosfera actual y que, por tanto, debieron originarse en el corto lapso de tiempo comprendido entre el final de las faunas de Ediacara y los tiempos de Chengjiang, en donde encontramos ya diversificados a la mayoría de estos filos (incluidos los cefalocordados y vertebrados).

Otros paleontólogos mantienen la opinión contraria y no creen que los fósiles de Ediacara puedan usarse como argumento para negar la existencia de los distintos filos de animales mucho más allá del Cámbrico. En su opinión, los primeros representantes de los diferentes filos carecerían de esqueletos mineralizados, lo que haría muy difícil su fosilización. Además, cuanto más retroce-

damos en el tiempo, cuanto más viejas sean las rocas, cabe esperar que estén más alteradas por los procesos geológicos, internos y externos, por lo que sólo un milagro haría posible el encontrar los fósiles de los auténticos primeros animales.

Como ven, un siglo y medio después de Darwin, y tras el descubrimiento de cientos de miles de fósiles nuevos, las posturas se mantienen casi en el mismo lugar entre los que piensan que el registro fósil es lo suficientemente completo como para conocer las fases más antiguas de la historia de la vida y quienes opinan lo contrario.

En cualquier caso, lo que sí parece claro a día de hoy es que cuando el reino animal irrumpió de manera decidida en el registro fósil, los cordados, y muy probablemente también los vertebrados, ya estábamos en este mundo. La combinación de eje rígido dorsal (la notocorda), musculatura bien desarrollada, y órgano propulsor (la cola), que presentan nuestros remotos antepasados nos permite saber que estuvieron entre los más ágiles nadadores de los mares cámbricos; lo que les serviría, sin duda, para eludir a depredadores tan eficaces como *Anomalocaris*.

A finales del Cámbrico, los vertebrados ya contaban entre sus filas con formas depredadoras, como algunos euconodontos y, quizá, los antepasados remotos de las actuales lampreas. En esa misma época o poco después, a comienzos del Ordovícico, les llegó a los vertebrados el tiempo de *descubrir* el esqueleto mineralizado y comenzaron a sintetizar huesos, que emplearon para cubrirse con espesas corazas óseas. Fue la época de los *ostracodermos*, o *peces acorazados*.

Aunque la adaptación crucial en nuestra historia evolutiva tardó un poco más en llegar: a finales del Ordovícico,

hace alrededor de 450 millones de años, aparecieron los primeros vertebrados con mandíbula. Con anterioridad, los vertebrados carecían de piezas móviles en la boca con las que procesar el alimento, lo que limitaba el tipo de recursos al que podían acceder. La mayor parte de los vertebrados sin mandíbula sólo podían encontrar su alimento filtrando el agua o el barro del fondo. Esta situación cambió radicalmente con la aparición de la mandíbula. Los vertebrados mandibulados (técnicamente, *gnatostomados*) disponen (disponemos) de un instrumento muy eficaz en las tareas de capturar y tragar las presas. A partir de ese momento, y pertrechados con sus viejas adaptaciones que los convertían en espléndidos nadadores, los vertebrados comenzaron a explotar intensamente su nueva capacidad de depredación. Los mares se llenaron de nuevas y muy diversas formas de vertebrados que se perseguían unos a otros (y a los otros animales) en una animada danza de depredadores y presas. En este contexto, se acentuaron las presiones selectivas que promovieron el desarrollo y perfeccionamiento de otras dos de las características primigenias de los vertebrados: los órganos de los sentidos y el sistema nervioso central (el encéfalo). La necesidad de percibir y procesar la mayor cantidad de información posible se hizo perentoria y, como consecuencia, los comportamientos se volvieron cada vez más complejos. Había comenzado el proceso que, cientos de millones de años después, alumbraría la *inteligencia*.

CAPÍTULO VIII

El reloj de la reina Cristina

En los primeros cordados el sistema nervioso central se reducía a un cordón hueco, el origen de nuestra médula espinal, situado en la parte dorsal del cuerpo, al que llegaban fibras sensitivas (o *aferentes*) y del que salían fibras motoras (o *eferentes*). Entre las neuronas sensitivas, que informan acerca del propio cuerpo (desde los músculos y tendones) y del exterior (desde la piel y los órganos de los sentidos), y las neuronas motoras, que transmiten impulsos a las fibras musculares y a las glándulas, generalmente se interponen en el sistema nervioso central unas neuronas que se llaman *de asociación* o *interneuronas*.

La función primordial del cordón nervioso es permitir el *arco reflejo*, es decir, la respuesta inmediata frente a un estímulo, como cuando nos pinchamos un dedo. Pero no sólo intervienen tres neuronas en un arco reflejo, ya que las terminaciones de las neuronas pueden dividirse en varias ramas, lo que hace que el número de combinaciones posibles entre neuronas sensitivas y motoras a través de las neuronas de asociación se haga muy grande; de este modo, un único estímulo sensorial le llega a muchas neuronas motoras, y una neurona motora es estimulada por muchas neuronas sensitivas.

Los cordados del tipo del anfioxo aún mantienen como sistema nervioso central un cordón simple, sin que se aprecie en su región anterior más que un ligero ensanchamiento; sus órganos de los sentidos están apenas

desarrollados. Pero en los vertebrados, incluso los peces, la respuesta a la información que procede del ambiente se elabora mucho más en el encéfalo, que se sitúa en el extremo anterior del cordón nervioso porque ahí están los órganos de los sentidos. Precisamente la función del encéfalo es la misma que la de la médula espinal, sólo que mucho más exagerada: se trata de interponer una cantidad mayor de neuronas entre la neurona que recibe el estímulo sensorial y la que activa la fibra muscular, de modo que la respuesta sea más elaborada y tenga también en cuenta las experiencias pasadas. Surge por ello una serie de centros en el encéfalo que van progresivamente asumiendo el control del comportamiento, que es cada vez menos automático. Finalmente aparecen los centros de asociación con funciones de aprendizaje, memoria, y en nuestra especie también consciencia.

En los peces, anfibios y reptiles (los llamados vertebrados *inferiores*), el encéfalo puede dividirse fácilmente en tres partes, *anterior*, *media* y *posterior*, cada una de las cuales se asocia a un sentido (olfato, vista y oído, respectivamente). En los mamíferos, que son los animales con el cerebro más desarrollado, aún puede reconocerse la estructura tubular de la parte más antigua del encéfalo, que recibe el nombre de *tallo* o *tronco cerebral*. En posición dorsal (¹¹), las tres partes del encéfalo desarrollan una excrescencia con una corteza de materia gris, formada por cuerpos de células neuronales estratificados (dispuestos en capas).

¹¹ En la orientación de las estructuras anatómicas seguimos el modelo de un animal cuadrúpedo, en el que la cabeza es anterior (y no superior, como en las personas, que somos bípedos), la espalda es superior (y no posterior, como en los humanos) y el vientre es inferior (y no anterior).

El encéfalo posterior (o *romboencefalo*) es una importante región que atraviesan, o en la que terminan, las fibras sensoriales (o aferentes) que suben desde la médula espinal, y las fibras motoras (o eferentes) que se dirigen a los músculos del cuerpo, de cuello para abajo. Además, controla en parte la actividad pulmonar. Todos los nervios craneales, menos los dos primeros (que van a la nariz y ojos), arrancan del encéfalo posterior o de la parte contigua del encéfalo medio; los doce pares de nervios craneales son nervios sensitivos, motores, o las dos cosas, y se corresponden con diferentes regiones de la cabeza y de la faringe.

El encéfalo posterior contiene al *bulbo raquídeo*, que es la prolongación de la médula espinal, pero engrosada. Los núcleos nerviosos que hay en él son esencialmente la prolongación de las cuatro columnas de materia gris que recorren toda la médula espinal a cada lado, dos columnas sensitivas arriba y dos motoras abajo. Pero por encima de todos los núcleos se encuentra un área muy interesante, que recibe estímulos del oído, y en los peces también de la línea lateral (que es un sistema sensorial compartido con las larvas acuáticas de los anfibios y que registra vibraciones del agua).

En los mamíferos, el bulbo se hincha en su parte anterior formando la *protuberancia* o *punte*. El bulbo y el puente corresponden al tallo o tronco cerebral, y por encima se desarrolla el *cerebelo*. El cerebelo puede alcanzar un gran tamaño en aves y mamíferos (los vertebrados más móviles), y es un órgano fundamental para la coordinación motora y para la conservación del equilibrio, que se realiza de forma automática. La conexión entre el oído y el encéfalo posterior puede resultar chocante, pero tiene una explicación evolutiva: en los peces el oído interno informa básicamente de la posición del cuerpo; la

información que le llega al cerebelo procede de los músculos y tendones (lo que se conoce como sensaciones *propioceptivas*) y del oído interno y de la línea lateral, pasando por la mencionada área acusticolateral de la parte alta del bulbo. En los mamíferos llegan también impulsos desde la corteza cerebral pasando por el puente. En términos militares el cerebelo puede compararse con el estado mayor de un ejército, que asiste al general en jefe informándole de la posición y estado de todas las unidades y haciéndoles llegar a éstas las órdenes del mando.

El encéfalo medio (o *mesencéfalo*) es el que menos ha cambiado en la evolución. Está asociado en los vertebrados inferiores con la visión. Las fibras de los nervios ópticos van a parar a dos bultos, los *lóbulos ópticos*, situados en el techo del cerebro medio (o *tectum*). También llega información del oído, de la línea lateral (en los peces), de la nariz y de las regiones sensitivas somáticas (o del cuerpo), y se originan respuestas motoras. El techo es el principal órgano de coordinación nerviosa en los peces y anfibios, su verdadero *cerebro*, pero en los reptiles tiene que competir con unos hemisferios cerebrales algo desarrollados, que en las aves ya son más importantes en el control de la actividad del cuerpo que el *tectum*.

Difícilmente puede considerarse a peces y anfibios, sin apenas hemisferios cerebrales, como otra cosa que autómatas biológicos. En los mamíferos, las fibras de los nervios ópticos van a parar a los hemisferios cerebrales, y en lugar de los lóbulos ópticos hay cuatro tubérculos (llamados *cuadrigéminos*), los dos anteriores relacionados con reflejos oculares (ya no llegan sensaciones visuales); los dos posteriores son estaciones de relevo pa-

ra los estímulos auditivos en ruta hacia los hemisferios cerebrales.

Quizá valga la pena señalar aquí que la naturaleza de la sensación experimentada, auditiva, visual, propioceptiva, olfativa, del equilibrio, táctil, etc., no depende de las fibras que la transmiten, sino del centro nervioso superior al que llegan, que es donde se convierten los impulsos en sensaciones; en esos centros se pasa (de alguna manera) de la química a la psicología, y se produce la experiencia subjetiva, que en nosotros puede ser, además, vivencia consciente.

No todos los autores, empezando por el filósofo Descartes, han admitido que los animales *experimenten* nada en su sistema nervioso central; podrían ser únicamente máquinas con sistemas de control del movimiento que responden a estímulos externos o del interior del cuerpo (hambre, sed, impulso sexual, calor, frío, una presa, un depredador, etc.). No es fácil encontrar el modo de averiguar si los animales experimentan sensaciones y emociones, porque el mejor método sería hablar con ellos, exactamente igual que cuando le preguntamos a otra persona: ¿Te duele?, ¿estás contento?

Sin embargo, cuando Descartes afirmaba que los animales son meros autómatas sin sensibilidad, a diferencia del hombre que entraría en una categoría completamente diferente, se ignoraba el hecho de la evolución. El descubrimiento de nuestro origen a partir de especies extinguidas que podríamos calificar de *animales* lo cambia todo. Nos parece ahora difícil de admitir que exista un abismo tal entre el *Homo sapiens* y el resto de los mamíferos que haga que ellos sean puras máquinas y nosotros criaturas con experiencias subjetivas. A fin de cuentas, sólo nos separa entre el uno y el dos por ciento de nuestros genes de chimpancés y gorilas, y no mucho

más de orangutanes y demás primates cercanos. Hace sólo seis millones de años que nuestro camino evolutivo se separó del de los chimpancés, que es poco tiempo comparado con los 3.800 millones de años compartidos. Y aunque en esos últimos pocos millones de años el encéfalo cambió mucho, como veremos, sigue siendo en gran parte el mismo que en el resto de los mamíferos. En resumen, puede usted pensar, en contra de Descartes, que su gato o su perro doméstico tiene experiencias subjetivas (pero nada le autoriza a creer que el animal en cuestión sabe que las tiene).

La nueva envuelta pensante

El encéfalo anterior (o *prosencefalo*) se divide en dos partes: el *telencefalo*, la más adelantada, y el *diencefalo*, por detrás. En la porción dorsal del diencefalo se desarrolla la *epífisis* o *glándula pineal*, que en los vertebrados inferiores es sensible a la luz al estar conectada a un auténtico tercer ojo (con cristalino y retina). Por eso tiene la función de regular los cambios fisiológicos noche/día. En nosotros segrega una hormona, la *melatonina*, que también controla los ritmos circadianos (el ciclo vigilia/sueño); por eso se ha puesto de moda recientemente para paliar el *jet lag*.

Gracias a Descartes, la glándula pineal tiene un sorprendente protagonismo en la historia de la filosofía. Descartes era un filósofo dualista, que pensaba que la mente era una sustancia no material y pensante (*res cogitans*) de naturaleza completamente diferente de la sustancia del cuerpo (*res extensa*), que ocupa espacio; ésta sería la única que tendrían los animales. Pero en el ser humano la información que entra por los sentidos se

convierte en representaciones mentales conscientes, y nuestros deseos son obedecidos por el cuerpo. ¿Cómo se comunicaría entonces la mente con el cuerpo? Para Descartes era en este pequeño órgano impar del encéfalo, la glándula pineal, donde se producía el encuentro: a través de la epífisis los estímulos del cuerpo producían sensaciones conscientes en la mente, y las órdenes originadas en la mente eran transmitidas al cuerpo y se convertían en movimiento.

En la base del diencefalo se sitúa la *hipófisis* o *glándula pituitaria*, que es la principal glándula de secreción interna; produce hormonas tan importantes como la del crecimiento o la prolactina. En las paredes del diencefalo se desarrolla el *tálamo*, en cuya parte dorsal hacen relevo las vías sensitivas que ascienden hacia los hemisferios cerebrales. Su importancia aumenta al desarrollarse mucho la corteza cerebral en los mamíferos; los estímulos procedentes de la piel y del oído hacen relevo en los núcleos talámicos dorsales, y las fibras del nervio óptico que atraviesan en los demás vertebrados el diencefalo rumbo al techo del encéfalo medio, en los mamíferos han sufrido un cortocircuito en su gran mayoría y se relevan en el tálamo para dirigirse a la corteza cerebral. En resumen, toda la información sensorial que llega a la corteza cerebral, salvo la olfativa, lo hace a través del tálamo.

El telencefalo tiene un gran desarrollo en los mamíferos y particularmente en el hombre y consiste en los hemisferios cerebrales y los *bulbos olfativos*; es lo que llamamos en español propiamente cerebro. Lo más anterior del prosencefalo de los vertebrados son los bulbos olfativos, a donde llegan los nervios olfativos con las fibras de las células sensitivas de la nariz. Los bulbos olfativos son una estación de camino hacia los hemisferios cerebrales,

cuya función en peces y anfibios es exclusivamente olfativa.

En los reptiles, sin embargo, aparece una nueva región en la superficie de los hemisferios cerebrales, destinada a funciones cognitivas superiores. Se conoce como *neopalio* y terminará por constituir en los mamíferos la mayor parte de los hemisferios. La envuelta antigua (*paleopalio*) forma el llamado lóbulo olfatorio (o *piriforme*) y existe todavía en nosotros, pero está oculta en el suelo de los hemisferios cerebrales.

El resultado es que pensamos con un órgano, el telencéfalo, que surgió en relación con el sentido del olfato, lo que no debería extrañarnos porque el olfato es el sentido más importante de los mamíferos y el que más información les aporta sobre la realidad del mundo exterior, aunque los primates lo hayamos abandonado un tanto; en las ramas de los árboles donde se desarrollaba la vida de nuestros antepasados es mucho más importante el sentido de la vista que el del olfato, tanto para comer y no ser comido como para calcular con precisión la posición del asidero que aguarda al final del salto. Nos hemos convertido en mamíferos audiovisuales.

Aparte del *paleopalio* y del *neopalio* existe otra porción de la materia gris de los hemisferios llamada *arqueopalio* (situada en posición dorsal y media, es decir, en la parte alta e interna de los hemisferios) que es extensa en los anfibios y reptiles; en los mamíferos se transformó en una estructura interna, el *hipocampo*, implicada en los aspectos emocionales de la conducta. Un último elemento importante del cerebro son los *núcleos basales*, que forman el *cuerno estriado* de los mamíferos, y están unidos al tálamo en los dos sentidos por haces de fibras.

En las aves los hemisferios cerebrales son más grandes que en los reptiles, pero ello se debe sobre todo a los núcleos basales, que son muy importantes en ellas como centros de asociación. En cambio, en los mamíferos los núcleos basales se encuentran en el interior de los hemisferios; la corteza gris del neopallio ha asumido las funciones directrices que tienen los núcleos basales o el techo del encéfalo medio en los otros vertebrados.

En la neocorteza de los hemisferios de los mamíferos se reconocen áreas especializadas, llamadas centros primarios sensoriales y motores: uno relacionado con la percepción visual se localiza en la parte occipital o posterior, hay una zona auditiva en el lóbulo temporal, y en el centro se sitúan dos regiones juntas: la anterior es motora somática y envía haces de fibras a los músculos del cuerpo; la posterior es sensitiva somática y recibe estímulos desde la piel y los músculos del cuerpo. Hay en estas dos regiones sendas representaciones detalladas del cuerpo humano, aunque no guardan la proporción real: unas partes ocupan más superficie que otras.

Pero no se puede dividir toda la corteza cerebral en áreas especializadas. Aparte de los mencionados centros primarios hay mucha superficie que se ha venido llamando *de asociación*. Su función es la de relacionar las excitaciones sensitivas entre sí y con los centros motores; de un modo general podríamos decir que es el soporte de las funciones cognitivas superiores y en los humanos de la inteligencia. Se sabe que la parte anterior (o *prefrontal*) del cerebro, sin que se le asigne una función única muy específica, es importante para la planificación, la motivación, la iniciativa y otras capacidades mentales que nos hacen humanos.

Precisamente estas regiones no especializadas son las que han ampliado su superficie en la evolución que des-

de los primeros mamíferos condujo al ser humano a lo largo de muchos millones de años. Las modernas técnicas de análisis funcional del cerebro nos están permitiendo conocer qué parte de la corteza se activa cuando la persona realiza una tarea mental concreta. Los apasionantes resultados que se van obteniendo confirman a veces lo que se había deducido de los sujetos con lesiones cerebrales: por ejemplo, que la mayoría de los humanos tenemos centros en el hemisferio izquierdo que son cruciales para la producción y comprensión del lenguaje, oral o escrito. Otras funciones cognitivas aparecen en cambio menos localizadas de lo que se pensaba antes.

Los primeros mamíferos tenían encéfalos bastante similares a los de los lémures actuales de Madagascar, aunque más pequeños. En estos primates el lóbulo olfativo y el bulbo olfativo son proporcionalmente más grandes que en los primates antropoideos, el grupo que incluye a los monos platirrinos o de América y a los catarrinos o del Viejo Mundo, Además en los lémures el *neocórtex* (o neocorteza: la corteza del neopalio) es bastante más liso. Con la expansión del neopalio en los catarrinos aumentó la complicación de la corteza, que se fue cubriendo de surcos y circunvoluciones. Entre los surcos destacan la *cisura de Silvio* y la *cisura central* o *de Rolando*, que permiten delimitar tres lóbulos cerebrales: el *frontal*, por delante de la cisura de Rolando, el *parietal*, por detrás, y el *temporal*, por debajo de la cisura de Silvio. Precisamente la cisura de Rolando separa las mencionadas áreas sensitiva somática (por detrás) y motora somática (delante). El *lóbulo occipital* ocupa la región posterior del cerebro y lo delimita por delante la *cisura perpendicular*. El crecimiento en volumen condujo a que los hemisferios cerebrales cubrieran por completo el diencéfalo, el encéfalo medio y en gran parte también el cerebelo, que está

completamente por debajo del lóbulo occipital en el cráneo humano.

En la mayor parte de la evolución humana, que duró seis millones de años o poco más, no hubo mucho progreso en la *encefalización*. Hace dos millones y medio de años nuestros antepasados tenían un encéfalo apenas mayor que el de un chimpancé, lo que no es poco porque nuestros parientes más cercanos destacan por su gran encéfalo en el reino animal. En esa época comienza la talla de la piedra, y el encéfalo aumenta de tamaño, como si la cultura y los genes estuvieran «coevolucionando» (en expresión de Edward O. Wilson). Un nuevo aumento se produce hace algo menos de dos millones de años, pero como también crece el cuerpo (hasta las proporciones actuales) no hay apenas aumento relativo del encéfalo (nuestros antepasados anteriores no eran mucho mayores que los chimpancés).

Si comparamos el tamaño de nuestro encéfalo con el que tendría un catarrino o platirrino cualquiera que hiciéramos crecer (o menguar) hasta nuestro mismo peso, resulta que nuestro encéfalo es unas tres veces más pesado que el de ese mono teórico (y unas siete veces si la comparación la hacemos con un mamífero estándar de nuestro mismo peso). Pues hace algo menos de dos millones de años el cerebro de nuestros antepasados no llegaba a ser dos veces más pesado. En el último medio millón de años se ha producido una gran aceleración en el ritmo de crecimiento encefálico, con el resultado de que aparecieron dos formas humanas muy encefalizadas, o mejor muy telencefalizadas, es decir, con enormes hemisferios cerebrales; esas dos clases de humanos eran los neandertales (extinguidos hace apenas nada, sólo 30.000 años) y somos nosotros. La parte más anterior del sistema nervioso central, en un principio des-

tinada a la identificación de moléculas en el agua o en el aire nos ha llevado a la tecnología y a la consciencia.

Con esta breve descripción de la anatomía del sistema nervioso central, especialmente del encéfalo, nos hacemos una idea de cómo la evolución dotó a los vertebrados de la capacidad de regular su comportamiento, y en el caso del hombre, de hacerlo conscientemente. Pero hay una forma distinta de abordar este mismo problema que se presentará en las páginas que siguen de este capítulo y del siguiente: desde la perspectiva de la conducta animal; es decir, investigando la evolución del comportamiento y las leyes que lo regulan.

La conducta como adaptación

Ya hemos dicho que en la *Suma teológica*, Santo Tomás de Aquino desarrollaba cinco vías para demostrar la existencia de Dios. La quinta es la que nos interesa más, porque se refiere a la finalidad interna que existe en la naturaleza: «Vemos, en efecto, que cosas que carecen de conocimiento, como los cuerpos naturales, obran por un fin, como se comprueba observando que siempre, o casi siempre, obran de la misma manera para conseguir lo que más les conviene; por donde se comprende que no van a su fin obrando al acaso, sino intencionadamente. Ahora bien, lo que carece de conocimiento no tiende a un fin si no lo dirige alguien que entienda y conozca, a la manera en que el arquero dirige la flecha. Luego existe un ser inteligente que dirige todas las cosas naturales a su fin, y a éste llamaremos Dios.»

En los animales no sólo tienen finalidad las estructuras o las funciones fisiológicas. Podemos preguntarnos ¿para qué sirve? lo mismo ante un pico, un diente, un ala o un

colmillo que ante un órgano interno como el riñón o el cerebro. De hecho, el trabajo del biólogo consiste, como señala Daniel Dennett, en hacer un ejercicio de ingeniería inversa. Del mismo modo que en el espionaje industrial o militar el aparato diseñado por una compañía rival o por un poder enemigo se desmonta para ver cómo funciona, y para qué sirven sus partes, los biólogos *deconstruyen* los organismos para poder entenderlos, tanto al nivel estructural como al funcional. En otras palabras, desandan el camino de la evolución. Debemos llevar cuidado, de todos modos, en esta investigación porque no todas las *piezas* de los seres vivos sirven para algo; no todas son adaptaciones. La razón es que los organismos no son máquinas perfectas recién salidas de la mesa de dibujo de un taller de ingeniería. Como ya hemos comentado anteriormente, la selección se parece mucho más a la labor de un aficionado al bricolaje que a la de un ingeniero, como nos enseña el premio Nobel François Jacob. La bombilla no desciende de la vela, ni el avión a reacción del aeroplano a hélice, porque los ingenieros crean nuevos diseños sin contar para nada con los anteriores. En cambio, la selección natural actúa modificando lo anterior para producir nuevas funciones en viejos órganos retocados; hay por eso muchos aspectos de los organismos que sólo pueden ser entendidos conociendo su historia. En este trabajo de ingeniería inversa no sólo interesan los elementos constituyentes aislados y estáticos, que son el objeto de las ciencias morfológicas, sino cómo funcionan en el ser vivo, y éste es el cometido de la fisiología. Por eso el biólogo tiene que tratar de estudiar la complicada *maquinaria* biológica sin que se detenga su funcionamiento. Esta investigación se lleva a cabo en varios niveles de organización: el de las estructuras, el de las células y el de las moléculas.

Pero la mayor parte de los animales son activos y se mueven, y sus comportamientos también realizan prestaciones, también están dotados de propósito, y ante ellos también podemos preguntarnos ¿para qué sirven? En sus múltiples variantes todos los comportamientos (exactamente igual que los órganos corporales) están encaminados a asegurar la supervivencia del individuo y la de su descendencia, pero para conseguirlo realizan muchas funciones diferentes, especialmente en los grupos con un sistema nervioso central bien desarrollado. El comportamiento también está parcialmente planificado en los genes, y también es teleonómico, es decir, adaptativo y producto de la evolución. Si no fuera así ningún animal podría sobrevivir de forma autónoma.

El comportamiento animal puede descomponerse en una serie de categorías. Cualquier máquina que se mueva de forma autónoma (a diferencia del coche o del tractor, que por muy complejos que sean necesitan de un conductor, o la nave espacial teledirigida), tiene que ser sensible a la información que procede del medio en el que se desenvuelve. Como mínimo necesitará distinguir entre el ambiente favorable y el ambiente desfavorable, y disponer de medios mecánicos de respuesta para quedarse/avanzar (en el primer caso), o para huir en sentido contrario (en el segundo). También cualquier forma de vida móvil (es decir, que se desplaza por sí misma y no es arrastrada pasivamente) necesitará de este dispositivo elemental para explorar el espacio, valorarlo y actuar consecuentemente (*tomar decisiones*), ya que los animales no se limitan simplemente a observar.

Así pues, los animales (y el ser humano entre ellos) nacen dotados de algunos conocimientos del mundo exterior esenciales para su supervivencia. No es cierto que, como afirmaban los filósofos empiristas, vengamos al

mundo como una hoja en blanco, cual *tabula rasa*, sin ningún dato sobre el mundo. Según esta filosofía todo conocimiento procede de los sentidos (de la experiencia). Muchos científicos han creído también que el hombre era la única especie que carecía de instintos, excepto algunos instintos elementales en los primeros momentos de la vida, relacionados sobre todo con la lactancia.

Por el contrario, los animales y el hombre nacen sabiendo. ¿Cómo han alcanzado ese conocimiento, y dónde se guarda la información? La información se almacena en el sistema genético, el *genoma*, que es, según François Jacob, uno de los tres sistemas de memoria con los que cuentan los animales (los otros dos son el sistema inmunitario y el sistema nervioso central). Así que, en realidad, cuando el animal se enfrenta por primera vez en su vida al estímulo se podría decir que lo *reconoce* y actúa con sentido (de otro modo no serviría de nada el *reconocimiento*). El genoma es la memoria de la especie porque es consecuencia de las vicisitudes por las que han pasado los antepasados, aunque no por la vía directa de la herencia de lo aprendido, como pensaba Lamarck, sino al modo de Darwin, o sea, por la vía de la selección natural.

El genoma almacena, en efecto, información sobre el mundo exterior, que se ha ido acumulando por el lento mecanismo de la selección natural. No se trata, en rigor, de un verdadero proceso de aprendizaje, porque no se produce durante la vida del individuo y no se basa en su experiencia, sino que el individuo nace ya con el conocimiento, o sin él. De hecho, la utilidad del conocimiento en cuestión no se puede apreciar hasta la siguiente generación. Todo esto parece muy complicado, pero no lo es tanto. Quiere decirse que aparecen modificaciones en las estructuras y en los comportamientos de los seres

vivos como consecuencia de mutaciones al azar, por errores de copia en la transmisión de genes entre generaciones. Las variantes génicas favorables son, por definición, las que hacen que los sujetos que las portan (los *mutantes*) se reproduzcan más. Por eso, hasta la segunda generación (y siguientes) no se sabrá si la mutación ha sido o no un éxito. Ese razonamiento vale tanto para las estructuras como para los comportamientos.

Lo importante ahora es destacar dos cosas: la primera, que los individuos tienen mecanismos innatos (nacieron con ellos) de reconocimiento de señales, y la segunda, que la experiencia del individuo no se transmite por la vía de los genes a sus descendientes.

¿Hay alguien ahí fuera?

En el caso más simple posible, el animal sólo percibe y sólo reacciona ante un determinado tipo de estímulo (sea de temperatura, luz, humedad, acidez, etc.). Un solo tipo de señal y un solo tipo de respuesta. Sin embargo, los animales dotados de un sistema nervioso central bien desarrollado (en particular, algunos moluscos como los pulpos, los artrópodos y los vertebrados) son capaces de reaccionar ante muchos tipos de señales diferentes, y con comportamientos muy variados. Para ello, disponen de órganos de los sentidos que les proporcionan una visión muy rica (muy compleja) del mundo. ¿Cómo se las arreglan para seleccionar en cada caso el estímulo apropiado y responder con un comportamiento coherente (que llamaríamos *lógico*)? Podría contestarse que con la experiencia (como harían los empiristas), pero hay multitud de observaciones que demuestran que la asociación estímulo/respuesta es a menudo innata. También noso-

tros dotaríamos de programaciones de este tipo a una máquina que pretendiéramos que fuera autónoma (y no quisiéramos que fuera destruida antes de llegar a adquirir suficiente experiencia).

Así, un pollo de pato criado por una gallina correrá hacia el agua nada más salir del cascarón, para desesperación de su madre adoptiva, y nadará, buscará en el fango su comida y se engrasará las plumas como un patito normal empollado por una pata. De nada le servirá el ejemplo de sus hermanos adoptivos que picotean los granos alrededor de la gallina. Y esos comportamientos fijos, anteriores a toda experiencia, no son exclusivos de animales que podrían parecerse *inferiores* (o con sistemas nerviosos centrales más simples) como las aves. También se dan entre los mamíferos. En el otoño, una ardilla saciada almacenará las nueces que encuentre a partir de ese momento enterrándolas al pie de un árbol. Podemos hacer el experimento de criar una ardilla en una jaula, en condiciones de aislamiento total, y alimentarla tan sólo con líquidos. La primera vez que se le dé una nuez intentará escarbar y enterrar el fruto bajo un barrote de su jaula. Y así podríamos poner infinidad de ejemplos de comportamientos innatos. Algunas aves canoras nacen sabiendo estrofas completas del canto del adulto, como se ha comprobado en experimentos de aislamiento; tampoco los patos necesitan aprender los rituales de cortejo, que se manifiestan espontáneamente cuando el animal alcanza la madurez sexual.

Los *etólogos* (estudiosos de la conducta animal) han señalado la necesidad de admitir la existencia de un aparato, una maquinaria fisiológica, que realice el filtrado de los innumerables estímulos que llegan hasta el organismo desde el mundo exterior. Este aparato es el denominado *Mecanismo Desencadenador Innato* (MDI) y su

función consiste en disparar una determinada pauta de conducta en presencia de un estímulo clave (en el supuesto más sencillo) o de una compleja combinación de estímulos que le llegan por múltiples canales.

En realidad, más que desencadenar un comportamiento, sería más propio hablar de liberarlo, porque los etólogos creen que los comportamientos surgen directamente del propio sistema nervioso central de forma endógena (espontánea), aunque normalmente están inhibidos. Sólo cuando se producen determinadas situaciones estimulantes, el MDI libera esos comportamientos reprimidos. La selectividad del MDI reside, según los experimentos, tanto en los órganos de los sentidos como en el sistema nervioso central.

Se entiende aquí por comportamiento, en su acepción más fisiológica, una determinada secuencia fija de gestos, un movimiento instintivo. Los animales que poseen esqueleto endurecido, es decir los vertebrados, con esqueleto interno de hueso, y los artrópodos, con esqueleto externo de quitina, están muy limitados en sus movimientos, que no son infinitos porque estos organismos no son de goma: es muy difícil poner de acuerdo a las diez patas de un cangrejo, coordinar el vuelo de un ave o el galope de un caballo, y los animales no tienen que pensar a cada paso qué van a hacer a continuación (también nuestros vehículos, pese a sus increíbles prestaciones de velocidad y carga, están muy limitados en sus posibilidades de movimientos, como descubrimos cada vez que tenemos que estacionar el coche en fila si el hueco es pequeño). Por eso, el comportamiento se estructura por medio de cadenas de gestos que son fijas e innatas (están programadas genéticamente) y han sido adquiridas a lo largo de la evolución. Estas cadenas son denominadas coordinaciones hereditarias o movimientos ins-

tintivos. El más importante de todos los etólogos, el premio Nobel Konrad Lorenz (1903-1989), consideraba el descubrimiento de la coordinación hereditaria, verdadero *esqueleto del comportamiento*, como la primera piedra de todo el edificio teórico de la etología.

Una consecuencia importante de todo lo expuesto es que desautoriza tanto a la filosofía empirista como a la idealista. El idealismo proclama que toda la realidad es básicamente subjetiva, es decir, que es un producto de nuestra mente, y que no hay forma de saber qué es lo que hay ahí fuera. El empirismo es su rival: la experiencia es para los empiristas la única fuente de conocimiento; toda sabiduría verdadera es, en consecuencia, posterior a la experiencia.

Esa duda mortificante sobre lo que es verdad y lo que es ilusión en lo que nos rodea y en nuestra propia existencia es un tema recurrente de la literatura y el cine, pero lo trató mejor que nadie don Pedro Calderón de la Barca (1600-1681) en su profundo drama *La vida es sueño*. En unos celebérrimos versos el pobre Segismundo está confundido y no sabe cuándo está despierto y cuándo está soñando, es decir, si lo que ve está dentro de su mente o fuera:

*¿Qué es la vida? Un frenesí.
¿Qué es la vida? Una ilusión,
una sombra, una ficción,
y el mayor bien es pequeño,
que toda la vida es sueño,
y los sueños sueños son.*

Sin embargo, la teoría de la evolución sostiene que los órganos de los sentidos y el sistema nervioso están adaptados a la realidad extrasubjetiva, la que existe *ahí*

fuera (vemos tanto con los ojos como con el cerebro, que elabora la información que, en forma de impulsos nerviosos, le llega desde la retina por medio del nervio óptico). La selección natural ha hecho que los organismos dispongan de formas de captar información exterior, si no toda, al menos la que es relevante para la supervivencia del individuo. El MDI propio de cada especie selecciona luego una serie de señales que tienen que existir por fuerza (objetivamente), porque si no fuera así las pautas de comportamiento que libera carecerían de sentido y conducirían al desastre. Como dice Segismundo:

*¿Que quizá soñando estoy,
aunque despierto me veo?
No sueño pues toco y creo
lo que he sido y lo que soy.*

Así que el viejo debate filosófico entre idealismo y empirismo encuentra su superación gracias a la teoría de la evolución: cada especie tiene su propia *visión del mundo*, que depende de unos mecanismos biológicos con los que se nace y que tienen que ser anteriores a toda experiencia, precisamente para que sea posible cualquier experiencia. Este aparato biológico de captación de la realidad objetiva constituye las *gafas* que definen la manera en que nosotros *vemos* el mundo, y se corresponden bastante bien, al decir de Konrad Lorenz, con el planteamiento del importantísimo filósofo alemán Immanuel Kant (1724-1804). Este filósofo pensaba que el conocimiento humano era el resultado de una mente activa que convertía las experiencias sensoriales (las *intuiciones*, como él las llamaba) en ideas; para ello la mente contaba con una serie de formas y categorías apriorísticas (es decir, previas a la experiencia), como las de espacio y tiempo (las dos *formas de intuición*), cantidad,

cualidad, relación y modalidad (las *categorías*), que permitían elaborar la información sensorial (dar forma a lo informe).

Como dice François Jacob, «si la representación que se hace el mono de la rama sobre la que quiere saltar nada tuviera que ver con la realidad, dejaría de haber monos. Y si lo mismo nos ocurriese a nosotros, ya no estaríamos aquí para hablar de ello. Percibir algunos aspectos de la realidad es una exigencia biológica. Algunos aspectos tan sólo, pues es evidente que nuestra percepción del mundo exterior sufre un filtrado masivo».

Los etólogos realizan muchos experimentos con los animales simulando los estímulos llave y combinándolos de diferentes maneras: a veces sus efectos se suman, otras se restan. Criando a los animales en condiciones de aislamiento se aseguran los investigadores de que las reacciones son innatas, siempre que se produzcan ante la primera aparición del estímulo en la vida del animal. Incluso se puede conseguir una reacción más intensa del animal exagerando el estímulo, es decir, con un estímulo artificial más potente que el natural.

Los machos de los petirrojos son muy territoriales y si introducimos un pájaro disecado en el territorio de un macho, éste recibirá inmediatamente picotazos. Pero no es necesario un pájaro entero para desencadenar el ataque, sino que el comportamiento agresivo del propietario del territorio se dispara igualmente ante un penacho de plumas rojas, y, por el contrario, no habrá disputa si el animal disecado es un joven sin las plumas rojas del pecho características del adulto (y que dan nombre a la especie). Podría decirse que el objeto de la agresión no es propiamente el pájaro rival, sino, literalmente, las plumas rojas de su pecho. Ellas son, y no por ejemplo el pico, las

que excitan la agresividad. Las plumas rojas son un *desencadenador*.

Los peces gasterósteos machos también son muy territoriales. El macho se distingue de la hembra porque tiene un abdomen de color rojo, mientras que el de la hembra es abultado. En los experimentos de laboratorio los machos no atacaban a modelos (simuladores) de machos de gasterósteos que eran en todo réplicas perfectas, pero que no tenían el abdomen rojo, mientras que atacaban casi a cualquier modelo, por burdo que fuera, siempre que tuviera la parte ventral roja, aunque careciera de aletas y cola; pero si se invierte el modelo y pasa a tener la parte dorsal roja, ya no se desencadena la agresividad del macho. Y por el contrario, un modelo también muy sencillo, pero con la parte inferior abultada, estimula al macho al cortejo.

Hablando de los estímulos supernormales, se puede comprobar que algunos pájaros prefieren incubar un huevo cuatro veces mayor que los suyos propios, pese a que no pueden literalmente ponerse encima por su enorme tamaño.

En el hombre también actúan, sin duda, los mecanismos desencadenadores innatos ante determinados estímulos *desencadenadores* que están perfectamente sintonizados con ellos, y éste es un hecho que conoce a la perfección la industria. Los animales que se utilizan como juguetes para los niños, lo mismo que los personajes de los dibujos animados, tienen proporciones infantiles: cabezas grandes en relación con el cuerpo, hocicos cortos y orejas reducidas, ojos enormes, frente abombada, etc. Despiertan estas figuras simpatía en nosotros por la misma razón que lo hacen los cachorros de los perros y gatos y nuestros propios niños: porque estamos programados para amarlos y protegerlos, del mismo modo que

los hocicos largos y las enormes orejas y colmillos del peludo *Lobo feroz* lo convierten en el malo de los cuentos.

Solemos hacer un experimento muy sencillo en clase (tomado de Konrad Lorenz) que ilustra hasta qué punto estímulos muy simples son inmediatamente comprendidos (instintivamente, podríamos decir). Si dibujamos un círculo que contiene dos puntos y debajo una arco abierto hacia arriba, todo el mundo lo interpreta como una cara sonriente, pero si el arco se abre hacia abajo la cara nos parece triste. Por asociación con expresiones de la cara humana el camello nos resulta altanero y el águila noble. Lorenz ha denunciado también cómo la publicidad consigue hacernos atractiva una droga mortal, el tabaco, asociándola a la imagen de lo joven y de lo vital, o sea, paradójicamente de lo sano.

Los estímulos clave pueden proceder de individuos de otras especies, que son sus depredadores o sus presas, y también de la misma especie, porque los animales se reproducen sexualmente y necesitan contar al menos con otro ejemplar de diferente sexo a la hora de procrear. En aquellos animales que cuidan de la prole y en los animales sociales, la necesidad de filtrar los estímulos que proceden de los demás es muy importante. De este modo se desarrollan órganos que funcionan como emisores de señales (ópticas, acústicas u olfativas) que son captadas por otros individuos; el propio comportamiento es también una señal. Es un problema (mejor: un desafío) para la teoría evolutiva el que se hayan llegado a establecer estas asociaciones entre emisores y receptores: la hembra del urogallo que responde ante el pavoneo del macho; los padres que ceban al pollo que les muestra su roja garganta; el petirrojo que ataca al macho invasor; el lobo dominante que frena su furia cuando el lobo de ran-

go inferior esconde el rabo entre las patas y agacha las orejas, o en pleno paroxismo de la pelea, le ofrece su cuello o se tumba boca arriba; el mono tota que sube al árbol cuando otro miembro del grupo emite la señal de ¡peligro, serpiente!; el chimpancé macho que reconoce en la roja hinchazón perineal de la hembra su receptividad para la cópula, etc. El comportamiento específico de respuesta no se habría producido (o al menos no con la misma intensidad) si el urogallo macho no se hubiera exhibido, si los pollos no tuvieran la garganta roja o el petirrojo adulto el pecho rojo, si el lobo derrotado no hubiera ofrecido sumisamente el cuello, si la señal acústica del mono hubiera sido la de ¡peligro, un águila!, o si la hembra de chimpancé no tuviera la conspicua hinchazón. ¿Qué fue antes, el huevo (el emisor de señales) o la gallina (el receptor)?

Cabe razonablemente pensar que todo organismo viviente medianamente complejo, sea de este planeta o de cualquier otro, ha de estar dotado de un MDI y de coordinaciones hereditarias. Incluso una máquina autónoma que nos propusiéramos construir tendría que tener selectividad ante los estímulos y unas pautas fijas de movimientos de sus estructuras, que podemos imaginar más o menos rígidas y articuladas. Como los artrópodos y los vertebrados, las máquinas dotadas de movilidad que fabricamos los humanos (los robots) tienen también limitados sus movimientos, precisamente para ser más útiles.

Pero si no añadimos ningún mecanismo más, la máquina permanecerá estática hasta que se cruce por delante un estímulo clave para desencadenar un movimiento. Si lo que queremos es que la máquina haga algo, tendremos que decirle: ¡Espabila, muévete y vete a buscar el estímulo!

Las pulsiones

Los animales están efectivamente impulsados, *desde dentro*, para buscar los estímulos que permitan desencadenar los comportamientos que hace tiempo que no se ejercitan. Algunos mecanismos internos de impulsión son bien conocidos: el hambre, la sed, las hormonas. El organismo tiene sensores internos para reconocer que sus niveles de líquido o de glucosa son bajos, o para detectar una elevada tasa de determinada hormona en sangre. Movidos por estos resortes, los animales se muestran inquietos y tensos y no se relaja la tensión hasta que se ha satisfecho la pulsión. De hecho, conforme pasa el tiempo, la intensidad del estímulo necesario para desencadenar la pauta (el llamado *umbral*) va siendo cada vez menor (el umbral baja), hasta que la pauta se dispara sin que haya ningún estímulo presente, como si el animal se lo imaginara. Esta motivación del animal, que lo lleva a buscar activamente el estímulo, se denomina *comportamiento de apetencia*. Hay además prioridades entre los instintos, según la situación: puede prevalecer la necesidad de beber, o la de comer, o la de cortejar, o la de agredir, o la de proteger a las crías, o la de huir.

Es interesante observar que cada comportamiento despierta en su debido tiempo, madurando como si fuera un órgano más: hay pautas de conducta infantil y otras que sólo son propias de los adultos, como las relacionadas con el territorio, el cortejo, el cuidado de la prole, etc.

Pero los etólogos descubrieron además algo sorprendente: parece existir una fuente interna de impulsión de las conductas que radicaría directamente en grupos de células motoras del sistema nervioso central que acumulan tensión (en forma de *inquietud motora*) hasta que se

Lleva a cabo la actividad que coordinan esas células. En efecto, muchos de los comportamientos que realizan los animales: buscar el alimento, esconderlo o almacenarlo, construir la madriguera o el nido, cortejar a la pareja y aparearse, cuidar de las crías, defender el territorio, etc., más las conductas sociales, podrían funcionar de esta manera. La forma más dramática de demostrarlo es observando que los animales depredadores que viven en cautividad necesitan satisfacer periódicamente sus necesidades de cazar, aunque nunca les falte la comida, y por eso buscan *desesperadamente* una presa, sea real o imaginaria.

Un estornino que criaba Konrad Lorenz y que estaba bien alimentado, aunque nunca tenía la oportunidad de cazar, daba un corto vuelo de vez en cuando, realizaba el movimiento de capturar un insecto, volvía a su palo, hacía como si lo matase y se lo tragase, y se quedaba luego más tranquilo.

Y aún hay más. Para cazar una rata, el gato acecha, rastrea, persigue, ataca y mata a su presa, y cada una de estas actividades es en cierto modo independiente, aunque normalmente se desarrollen encadenadas, de modo que si el gato pasa largo tiempo sin ejercer alguno de esos movimientos instintivos desarrollará un *comportamiento apetitivo*, que consiste en la búsqueda de un estímulo desencadenador específico para tal acto: acechar, perseguir, matar o lo que sea; la misma rata puede servir para liberar cada uno de esos comportamientos por separado. Esa producción de excitación nerviosa central que genera la necesidad de movimiento parece diferente según los hábitos de vida de cada una de las especies, de donde se deduciría que es una adaptación producto de la evolución. Por ejemplo, los leones, que normalmente no necesitan perseguir durante mucho

tiempo a sus presas en la naturaleza, son bastante tranquilos en cautividad, mientras que los lobos, zorros o mustélidos del tipo de la garduña, o comadreja, que necesitan ser muy activos para conseguir el alimento, muestran una gran necesidad de moverse en un zoológico, y eso aunque no tengan hambre.

Bien mirado es ésta una forma muy eficaz de programar la conducta de un animal y asegurar su supervivencia y la de sus genes. En vez de explicarle todo lo que tiene que hacer a lo largo de su existencia, con pelos y señales, sus genes programan al animal para buscar determinados estímulos, muy específicos, que desencadenarán las conductas apropiadas para vivir y reproducirse. Además, cada una de estas conductas tiene su propio ritmo: hay que alimentarse varias veces al día, pero basta con hacer el nido una vez al año. También nosotros programaríamos así a un autómata que quisiéramos que hiciese algo: el autómata es un objeto teleológico que no tiene fines propios (sino los del constructor), por lo que podríamos simplemente indicarle que buscarse determinada señal y que una vez que diera con ella liberase el movimiento programado, y que hiciera esto, digamos, dos veces al mes; entretanto podría buscar otras señales y realizar otras actividades que también nos interesa que haga (acumular energía para futuras acciones, por ejemplo).

El problema de la regresión infinita

La diferencia fundamental entre el autómata y el ser vivo no estaría tanto en sus actividades, y el tipo de mecanismo que las promueve, sino en el hecho de que los autómatas no se reproducen, y por lo tanto no evolucionan.

Pero forzando la imaginación podríamos soñar con un autómatas que estuviera programado para obtener materiales del medio y construir copias de sí mismo. De este modo multiplicaríamos el número de máquinas circulando a su aire por ahí, y este truco nos podría servir si las enviáramos a otro planeta, donde nosotros no podemos ir a construir réplicas. Los nuevos autómatas sustituirían además a los que se hacen viejos por el uso y van funcionando cada vez peor hasta que se vuelven inoperantes y *mueren*.

Pero en esta atrevida hipótesis se tendría que dotar al autómatas de un medio de transferir a su propia réplica la información acerca de cómo crear otra copia. De otro modo la cadena se terminaría con el primer *descendiente*. Si en el proceso de copiado de esa información (el programa de generación de réplicas) existiera la posibilidad de que se produjeran errores, tendríamos algo parecido a una mutación.

Entre las variantes de autómatas que surgirían por *mutación* a lo largo de enormes periodos de tiempo podría actuar la selección natural, ya que llegados a un cierto grado de multiplicación del número de individuos tal vez no hubiera recursos para que todos obtuvieran la energía necesaria para funcionar o los materiales que se precisan para hacer más réplicas. Se establecería entonces una competencia por los recursos para la que no todas las variedades estarían igualmente preparadas, y unas prevalecerían sobre otras.

Tendríamos entonces todos los requisitos precisos para una evolución de esos autómatas. El modelo propuesto es de reproducción asexual, y cabe preguntarse para qué sirve la reproducción sexual, que hace necesario que se pongan de acuerdo dos individuos para producir un tercero. La respuesta es que no sirve para nada, en el

sentido de que la reproducción sexual no persigue ningún objetivo; simplemente ocurre que las líneas evolutivas que se reproducen sexualmente, al menos en el planeta Tierra, han tenido a la larga más éxito que las que se reproducen asexualmente, aunque haya organismos de los dos tipos. Explicar este hecho, o intentar hacerlo, nos llevaría muy lejos, pero se sabe que la reproducción sexual produce más variación que la asexual, y la variación es la materia prima con la que trabaja la selección natural. Cuanta más variación, más posibilidades tiene la selección natural de dar con nuevos diseños que supongan una mejora importante.

Los autómatas descritos obtienen la energía y los materiales que precisan del medio y podrían, por comparación con los organismos, ser llamados *autótrofos*, como las plantas. Pero podría surgir una variedad de autómatas que obtuviera la energía y los materiales de otros autótrofos, a los que les arrebataría la *vida* (los desmontaría) y los podríamos considerar *heterótrofos*, como a los animales.

Algunos autores de ciencia ficción adelantan que el de los autómatas autorreplicantes será el único medio a nuestro alcance de explorar, y explotar, el resto del Universo, dadas las enormes distancias que existen comparadas con la brevedad de cada generación humana. Más aún, éste es un argumento en contra de que haya otras inteligencias, como la nuestra o superiores, en nuestra galaxia o más allá. Si existieran, ¿cómo es que no nos han llegado todavía sus autómatas autorreplicantes? Tal vez sólo sea una cuestión de tiempo, aunque, por otro lado, las distancias interestelares marean. Es cierto que hay miles de millones de galaxias donde podría alentar la vida, pero la mayor parte del Universo está vacío, con pavorosos espacios de soledad entre un sistema solar y

otro. Las galaxias tienen diámetros de decenas de miles de años luz, y se suelen agrupar en racimos con distancias entre unas y otras de un millón o más de años luz. La separación entre los racimos es muchísimas veces mayor.

La sonda *Voyager 1* ha salido ya al espacio exterior, fuera de nuestro sistema solar, pero su velocidad es escasa (17,24 kilómetros por segundo). Al ritmo al que viaja, una nave tardaría unos 600 millones de años en llegar hasta nuestro planeta desde el centro de la Galaxia, situado a unos 33.000 años luz (el diámetro de la Vía Láctea es de 100.000 años luz). Si por el camino se detuvo en alguna escala, el viaje aún sería más largo. Hace 600 millones de años en la Tierra empezaban a emerger los organismos complejos, constituidos por muchas células. Tal vez la evolución fue más rápida en otros planetas, de otros sistemas solares. Una inteligencia superior a la nuestra podría acortar el viaje, desde luego, o tal vez habite más cerca, por ejemplo en el sistema de tres estrellas Alfa Centauri; la más próxima al Sol de las tres, llamada Próxima Centauri, está a tan sólo 4,3 años luz (el *Voyager 1* tardaría unos 77.500 años en llegar allí). Se sabe ya que hay, además del Sol, otras estrellas con planetas describiendo órbitas a su alrededor en nuestra galaxia. Pero, en definitiva, el caso es que tampoco por esa vía de los autómatas autorreplicantes nos han llegado pruebas de que haya *alguien más*.

Hemos pasado muy deprisa por la capacidad de autorreplicación (o autorreproducción) de un autómata creado por el hombre, como si fuera algo sencillo de hacer. La realidad es que todavía no hemos conseguido producir ninguno que destaque.

El filósofo natural René Descartes era un hombre de amplísimos saberes. Sus últimos cuatro meses los pasó

en Estocolmo, donde murió como consecuencia de una neumonía en 1650. Había ido allí invitado por la reina Cristina de Suecia (1626-1689), un personaje histórico que ha dado mucho que hablar. El capitán del barco que lo llevó a Estocolmo en septiembre de 1649 se asombró de los conocimientos náuticos del gran filósofo. Como hemos visto, Descartes pensaba que los animales eran meros autómatas, y se dice que un día la reina Cristina le mostró un reloj y le dijo: «Haga que esto se reproduzca.» Y es que, en efecto, la capacidad de autorreplicación es un atributo exclusivo de la vida, que aún no nos ha sido posible imitar.

El problema es que para que un autómata construya otro igual a sí mismo, necesita de una descripción a la que atenerse. Un plano de ingeniería o de arquitectura es una descripción de una máquina o de un edificio, y sin ese modelo esquemático de lo que se desea obtener no hay forma de que los operarios se pongan manos a la obra para fabricar la máquina o construir la casa, porque no saben lo que tienen que hacer. De hecho, los robots han sustituido a los humanos en las cadenas de montaje de las fábricas de automóviles y otras máquinas complejas, pero los brazos automatizados que actúan responden a una programación previa; el vehículo que resulta no contiene en ninguna parte una *autodescripción*, por lo que no puede reproducirse a sí mismo (¡qué más quisiéramos que los automóviles se multiplicaran en los garajes como los caballos en las cuadras!). También podríamos programar robots para hacer otros robots, pero éstos serían incapaces de hacer nada si no los volvemos a programar.

La dificultad de los autómatas autorreplicativos es precisamente la de la autodescripción: ¿cómo puede una máquina contenerla y traspasársela a otra máquina para

que a su vez construya una tercera? Sería necesario para ello que la autodescripción de la máquina incluyera también una autodescripción, es decir, que describiera las partes de la máquina y además describiera una autodescripción. Sería como si dispusiéramos de unos planos para hacer una máquina con autodescripción (es decir, una máquina con los planos de sí misma dentro). Los operarios podrían seguir sin dificultad las instrucciones para fabricarla. Estos operarios imaginarios no tienen ninguna idea en la cabeza y necesitan instrucciones, pero como la máquina hija contiene una autodescripción (sus propios planos) sería posible producir una tercera basándose en ella. Ahora bien, a partir de la máquina nieta no hay forma de producir una máquina bisnieta, porque ésta ya no contiene una autodescripción. Para que pueda haber una máquina bisnieta la primera máquina (la bisabuela) tiene que tener una autodescripción de la autodescripción de la autodescripción. Y por cada generación que añadamos se necesita una autodescripción más en la máquina inicial. Esta dificultad lógica se conoce como el problema de la *regresión infinita*.

Pongamos otro ejemplo. Supongamos que un arquitecto quiere que los obreros le construyan un estudio igual al suyo en todo. Hará entonces unos planos que le servirán al constructor como descripción de lo que desea. Pero una vez construido el nuevo estudio, nadie podrá hacer otro igual basado en él, porque no contiene un arquitecto dentro que haga planos. La solución sería que el arquitecto hubiera hecho un plano de su estudio que contuviera todos los elementos del mismo incluyendo un plano del propio estudio. Los obreros construirían entonces un nuevo estudio que tendría mesas, sillas, lámparas... y un plano dentro; este plano podría ser la base de un tercer estudio, pero ahí se terminaría la cadena.

La solución a este enrevesado asunto se le ocurrió al famoso matemático John von Neumann (1903-1957); consistía en que la autodescripción tuviera una doble función. Por una parte la de servir como instrucciones para reproducir una máquina, es decir, que pudiera ser interpretada, o traducida. Y por otro lado que pudiera ser copiada sin interpretación, o sea, transcrita literalmente. Poco tiempo después, en 1953, James Watson y Francis Crick descubrieron la estructura de la molécula de la herencia biológica, el ADN, que goza de esas dos propiedades. Para producir las proteínas el ADN de nuestras células es transcrito en ARN mensajero (ARNm), y éste a su vez traducido en proteínas. Además, cuando se produce la *mitosis* o división celular el ADN se replica. Los errores de copia en la replicación son precisamente las mutaciones que hacen posible la evolución.

Con este tipo de autodescripciones bivalentes será posible producir algún día eficazmente máquinas (robots) autorreplicantes, y hay quien se pregunta si no tendremos que enfrentarnos entonces a un enemigo mortal. ¿Luchará algún día nuestra especie contra legiones de robots mutantes? ¿Se volverán contra nosotros nuestras máquinas? Pero en vez de asustarnos por el daño que podrían hacer en el futuro lejano nuestros hijos artificiales más nos valdría preocuparnos por el que somos capaces de hacer nosotros los humanos.

El buen salvaje

La existencia de pulsiones espontáneas e innatas es una hipótesis de los etólogos que no se habría asomado fuera del circuito científico si no fuera porque entre las pulsiones animales hay una que sólo con mencionarla se

nos ponen los pelos de punta: la pulsión agresiva. Si la hipótesis de la pulsión es cierta, entonces la agresividad no es una mera consecuencia del ambiente, sino que es innata en los animales, incluyendo (al menos en principio) al hombre. No se trataría, en consecuencia, sólo del resultado de una educación represiva y frustrante, como opinan algunos filósofos, psicólogos, pedagogos o sociólogos (y proclaman muchos políticos, ya que la hipótesis contraria, la de que los hombres no son precisamente ángeles, no es popular).

Incluso admitiendo que existieran unas pautas de agresión innatas, si sólo se desataran frente a determinadas señales, como si fueran actos reflejos, bastaría con eliminar los estímulos desencadenantes de nuestro entorno para suprimir la agresión del futuro de la humanidad. Sin embargo, estas teorías tan optimistas se han estrellado siempre con la cruda realidad: si es verdad que no hay agresividad alguna en la naturaleza humana, ¿cómo es que nos resulta tan difícil erradicarla en la práctica? ¿Por qué hay un premio Nobel de la Paz? ¿Sería suficiente con suprimir la frustración de la educación? ¿Concederles a los niños todo lo que piden no los volverá luego más intolerantes ante las frustraciones inevitables de la vida adulta? ¿Es verdad que la solución a la violencia es la de prohibir los juguetes bélicos? ¿Hacen los juguetes bélicos agresivos a los niños o, más bien, a los niños les gustan los juguetes bélicos porque desfogan con ellos su agresividad natural?

La hipótesis de la pulsión da una respuesta a todos estos interrogantes: la pulsión agresiva (como todas las demás pulsiones) es innata en los animales y surge *desde dentro*; no necesariamente viene del exterior. Nada puede, en consecuencia, hacer que desaparezca totalmente. Puede ser controlada hasta cierto punto, como la

pulsión sexual, pero nunca reprimida por completo. Al menos no sin pagar un alto precio: ya el famoso psiquiatra austríaco Sigmund Freud (1856-1939) mostró los trastornos que produce la represión de las pulsiones que pugnan, desde el inconsciente, por aflorar y realizarse, y sin embargo son devueltas al inconsciente.

Konrad Lorenz se ganó muchas críticas por admitir la pulsión agresiva en nuestra especie, una pulsión que ha reiterado un discípulo suyo especialista, precisamente, en etología humana. El discípulo es Irenäus Eibl-Eibesfeldt y copiamos a continuación un párrafo suyo, esclarecedor por la rotundidad con que extiende los principios de la etología al ser humano: «Muchos ejemplos indican que el hombre también está sometido, en muchos aspectos de su comportamiento, a una producción de excitación que difícilmente puede controlar, ya que su origen es central e inconsciente, y que esta producción de excitación, junto con otros factores motivadores, determinan decisivamente su disposición interna a la acción. Probablemente esto es lo que ocurre con el instinto de agresión, que normalmente encuentra muy pocas ocasiones de descargarse en la sociedad humana actual.»

Esta implicación tan desagradable de la etología ha hecho que muchos la miren con antipatía, como si la hipótesis (o sus valedores) tuviera la culpa de la agresividad humana. ¿Debe la ciencia, para eludir críticas, dejar de lado este campo de investigación sólo porque sus conclusiones no gusten, y convertir las raíces biológicas de la violencia en un tema tabú (o dejarlo en manos de los que especulan sin base científica alguna)? Seguro que no, ya que si la ciencia soslaya las cuestiones fundamentales, ¿cuál es entonces su papel?

Entre los pensadores que a lo largo de la Historia han sostenido que el hombre es por naturaleza bueno destaca el francés Jean-Jacques Rousseau (1712-1778). Este filósofo reacciona frente a las ideas de la Ilustración francesa, que achacaba a la ignorancia todos los males de los hombres y propugnaba su salvación por la ciencia y el progreso. Rousseau, por el contrario, creía que la educación *ilustrada* en vez de hacer a los hombres más felices los corrompía, y por eso reclamaba una vuelta a la naturaleza; su lema sería: lo primigenio es lo auténtico.

No pensaba igual Freud después de haber conocido la Primera Guerra Mundial. Además, Freud era judío, y conoció en sus propias carnes hasta dónde puede llegar la maldad humana (tuvo que emigrar por causa de sus compatriotas nazis y murió en Londres). En su libro *Más allá del principio del placer* propuso un nuevo mecanismo impulsor de la conducta humana. El inconsciente no sólo busca el placer, como había sostenido hasta entonces, sino que en esos sótanos de la mente habita también el *instinto de muerte*, que persigue la disolución de la vida, la vuelta a lo inanimado. Aunque no se puede sostener científicamente que la materia tenga la voluntad de abolir la vida, podemos quedarnos con la idea de que Freud creía que había algo siniestro en la naturaleza del ser humano.

Hay una forma de averiguar cuál de estas dos posturas, la de Freud y Lorenz, o la de Rousseau, es la más correcta. Podemos estudiar a los pueblos que han llegado hasta nuestros días practicando la caza y la recolección de productos animales, sin poseer bienes ni haber sido *ilustrados* y corrompidos por la educación, en plena armonía con la naturaleza. Quizás encontremos entre ellos al *buen salvaje*, pacífico y feliz. También podemos estudiar el pasado de la humanidad, para tratar de descubrir

cuándo apareció la violencia, y si ya existía en la Prehistoria. Por último, echaremos un vistazo al comportamiento de nuestros más próximos parientes, los grandes monos, para ver si existe la violencia en sus vidas.

Es un tema de discusión casi eterno entre los antropólogos culturales el de si la violencia se da en todas las culturas conocidas, independientemente de su tipo de economía; entendemos aquí por violencia la *agresión intra-específica*, es decir entre humanos. Se ha defendido que algunos pueblos *primitivos* no han conocido la violencia, como los esquimales (o inuit, en su propia lengua) y los bosquimanos (también conocidos como San, aunque éste es un nombre despectivo puesto por sus vecinos los nama). Como vimos más arriba, Konrad Lorenz e Irenäus Eibl-Eibesfeldt parecen pronunciarse por la universalidad de la pulsión agresiva en el ser humano, o al menos consideran que nadie ha demostrado que haya un solo grupo humano donde no se produzca ninguna forma de agresión.

Es difícil, no obstante, manifestarse rotundamente sobre este punto, porque una cosa es la agresividad como pulsión y otra las formas en las que ésta puede manifestarse, que van desde la ofensa de palabra hasta la de obra. La más directa, desde luego, es la de causar daño físico a otra persona y la verdad es que hay muy pocos estudios de tipo estadístico en los pocos pueblos de economías no productivas que han llegado mal que bien casi hasta nuestros días; las economías no productivas son las que no producen el alimento, sino que lo recolectan o cazan. Tenemos algunos datos, no obstante, de los ache del Paraguay, de los !kung del Kalahari (el grupo más conocido entre los bosquimanos) y de los indios yanomamo o yanomami, aunque éstos son además de cazadores y recolectores pequeños horticultores y cultivan

parcelas de selva que luego abandonan. Los bosquimanos, como se ha comentado, son considerados muy pacíficos, y los yanomamo, por el contrario, muy agresivos.

En los ache y los yanomamo se conocen numerosos casos de muerte por asesinato, aunque, sorprendentemente, los indios yanomamo, tenidos por muy agresivos, presentan frecuencias de homicidios bastante más bajas que las de los ache. Para los bosquimanos las estadísticas de muerte violenta no distinguen entre muerte accidental y por agresión, pero la suma de ambas categorías da un número aún inferior al de los yanomamo: de haber homicidios nunca serían muchos. En cifras, cuando los ache vivían aislados en el bosque, antes de ser *contactados* en 1971, el 70 por ciento de las muertes se producía por causas violentas: asesinato o accidente; entre los yanomamo la cifra era el 20 por ciento y tan sólo el 11 por ciento entre los !kung.

De todos modos, hay que tener presente que muchos de los homicidios entre los ache son infanticidios, muertes de lactantes producidas por cualquiera de los dos padres o por otros adultos (generalmente con la intención de acompañar a un adulto en la tumba); el infanticidio de origen paterno o materno es una práctica que también es conocida entre los yanomamo, aunque quizá no se registró suficientemente en los cómputos de estos indios. Además, más de la mitad (el 60 por ciento) de los muertos por mano humana entre los ache fue producida por sus vecinos agricultores y ganaderos. Los ache han vivido a lo largo del siglo XX en permanente conflicto armado con sus vecinos paraguayos, que invadían sus tierras para cultivarlas; ésta es una situación que se ha dado casi inevitablemente entre todos los pueblos cazadores y recolectores y sus vecinos con economías productivas. Con estas dos consideraciones las cifras de asesi-

natos intragrupal de los ache y los yanomamo se acercan mucho más. De todos modos, eran muchos los ache que morían a manos de otros ache: el 22 por ciento de todas las muertes eran asesinatos internos, una cifra que parecería espeluznante incluso en el barrio más marginal de cualquier gran ciudad occidental.

Respecto de los bosquimanos, Eibl-Eibesfeldt, uno de los autores que más profundamente ha estudiado su comportamiento, llegó a la conclusión de que se trata de un pueblo realmente pacífico, aunque la violencia no les es desconocida. Aparentemente, los bosquimanos tienen las mismas pulsiones agresivas que los demás seres humanos pero han aprendido a controlarlas.

Canibalismo prehistórico

Entre los fósiles humanos se encuentran ejemplos de traumatismos, que podrían ser resultado de accidentes de caza o de otro tipo, y también producto de agresiones de otros humanos, incluso de humanos de otras especies. Sin embargo, en la colección del yacimiento de la Sima de los Huesos, en la Sierra de Atapuerca, que contiene los restos de una treintena de individuos, sólo se conoce un caso de fractura de hueso que luego se haya soldado y dejado un callo óseo como señal. Tal vez la frecuencia de huesos rotos no fuera tan alta como se había supuesto. Pensamos que nuestros amigos de la Sima de los Huesos formaron parte de una misma colectividad, y es posible que vivieran juntos y murieran casi al mismo tiempo (hace unos 350.000 años). Por ese motivo la muestra fósil de la Sima es excepcional para hacer estudios de poblaciones muy antiguas. Sin llegar a la fractura, hay en los fósiles humanos de la Sima muchos pe-

queños golpes que han dejado marcas en el cráneo. En el caso de un niño, el golpe fue muy fuerte y deprimió parte del frontal a la altura de la ceja izquierda. Tal vez el pobre chico quedara tuerto, pero sobrevivió un tiempo porque hay trazas de regeneración del hueso. Desgraciadamente, en este caso, como en los demás fósiles humanos, es imposible saber si el golpe se lo propinó otro humano. Hay, sin embargo, un tipo de señales en los huesos que no dejan dudas sobre su autor: se trata de las marcas de canibalismo.

El paleontólogo estudia acontecimientos que no ha presenciado, por lo que basa sus conclusiones en indicios, como los detectives. En su diversidad, los paleontólogos se ocupan de muchos aspectos de la vida en el pasado, generalmente nada relacionados con las pesquisas de los policías. Sin embargo, cuando el paleontólogo es especialista en fósiles humanos y se interesa, además, por los casos de muerte y canibalismo en la prehistoria, se convierte en detective por partida doble.

Y hablando de paleontólogos y de detectives, viene a cuento un lema que se atribuye a la policía francesa, y que dice que sólo se ve aquello que se mira, y sólo se mira aquello que ya se conoce. Lo que en nuestro particular caso, se traduce en que a la hora de identificar casos de canibalismo en yacimientos prehistóricos, conviene preguntarse primero qué tipo de pistas, reveladoras de esa práctica, deben buscarse. Para ello es útil analizar también qué motivaciones (*móviles*) pueden impulsar a unos seres humanos a comerse a otros. Así el canibalismo podría dividirse, a grandes rasgos, en: a) canibalismo ritual, cuando se trata de una práctica funeraria de carácter simbólico, que consiste en consumir respetuosamente los cuerpos de los miembros fallecidos del grupo (en una especie de *comuni3n* más o menos mística);

b) canibalismo alimenticio, que consiste en matar y comer a los miembros de otros grupos, con propósitos meramente alimenticios (es decir, como si se tratara de presas animales); c) canibalismo de miembros del propio grupo, vivos o muertos, en circunstancias excepcionales de extrema necesidad. En cuanto a los indicios, éstos pueden encontrarse en los propios fósiles o en su contexto (evidencia directa o evidencia circunstancial en el lenguaje de las películas policíacas).

En muchas ocasiones, las pruebas que se han aducido para presentar un caso de canibalismo se basan en la forma en que aparecen rotos los huesos humanos. Pero estas fracturas pueden obedecer a múltiples causas, de origen humano o naturales. Por ejemplo, los cráneos de los famosos *Homo erectus* de Zhoukoudian (cerca de Pekín, en China) o de Java, presentan rota la base del cráneo, lo que se interpretó como prueba de la extracción del cerebro por otros humanos. Sin embargo, hoy está claro que la pérdida de la base del cráneo se debe a que es una región frágil, que muy raramente se conserva. Otras causas de rotura de huesos pueden ser las actividades de los animales antes del enterramiento natural de los fósiles (pisoteo, dispersión o consumo), el peso del sedimento sobre los fósiles o la caída de rocas (en cuevas), el transporte por el agua, y otros muchos agentes no biológicos.

Un tipo de indicio a primera vista concluyente sería encontrar sobre restos humanos marcas de corte como las que se encuentran sobre los herbívoros comidos por los humanos. Para separar la carne de los huesos, los hombres prehistóricos utilizaban el filo de sus utensilios de piedra, que se aplicaban en lugares determinados, especialmente en los tendones, dejando marcas de descarnamiento sobre los huesos. Marcas muy similares a és-

tas pueden producirse también naturalmente, por lo que sólo es convincente un conjunto de tales huellas que reflejen un trabajo sistemático en las inserciones musculares oportunas. Y ni siquiera en este caso quedaría probado el canibalismo, porque el descarnamiento podría tener otro objetivo, por ejemplo algún tipo de rito de preparación o limpieza de esqueletos.

Un magnífico ejemplo de los problemas con los que nos tropezamos en la búsqueda de remotos caníbales es el ofrecido por el yacimiento de Krapina (Croacia). Es éste un abrigo donde se acumularon hará unos 130.000 años restos de más una veintena de neandertales, excavados entre 1889 y 1905. A su descubridor, Dragutin Gorjanovic-Kramberger (1856-1936), le pareció que los huesos humanos procedían de festines caníbales a juzgar por el tipo de fracturación que presentaban, el que algunos huesos estuvieran quemados y la existencia de marcas de carnicería, entre otros aspectos. Aunque algunos autores modernos están de acuerdo, otros atribuyen las fracturas a causas naturales o a los métodos de excavación de la época (con personal local contratado, y utilización de técnicas tan expeditivas como picos, palas y explosivos). No obstante, hay, parece, genuinas marcas de descarnamiento de origen humano en Krapina, que no necesariamente implican canibalismo, como ya se ha comentado (pueden deberse a preparación ritual de huesos).

Otros casos de descarnamiento los proporcionan el cráneo de Bodo (Etiopía) de hace unos 600.000 años y un resto craneal más fragmentario de Klasies River Mouth (Sudáfrica) de hace entre 60.000 y 85.000 años.

Particularmente instructivo es el caso del cráneo neandertal Engis 2, que muchos autores creyeron víctima de los caníbales, pero cuyas supuestas marcas de descar-

namiento fueron en realidad producidas en el laboratorio por los preparadores del fósil, e incluso algunas por los investigadores con sus instrumentos de antropología.

El autor que más rigurosamente ha estudiado cómo quedan los huesos después de un banquete caníbal es Tim White, de la Universidad de California en Berkeley, quien ha investigado esqueletos de grupos de indios norteamericanos precolombinos que habían sido consumidos por otros indios, y no precisamente de forma ritual. El mismo patrón se da en el yacimiento francés en cueva de Moula-Guercy de hace 100.000 años, donde al menos seis neandertales (uno era un niño de seis años y los demás adultos) fueron pasto de los caníbales.

Pues bien, las características observadas por White se encuentran en los fósiles humanos de la Gran Dolina, en la Sierra de Atapuerca, con una antigüedad de alrededor de 800.000 años. Numerosos restos presentan marcas de corte y patrones de desmembramiento y fracturación similares a los de los herbívoros consumidos allí mismo. No parece que se tratara de una práctica ritual, porque los huesos fueron abandonados después del banquete junto con los restos óseos de las presas habituales. Más bien parece un caso de canibalismo alimenticio, y es muy posible que los antropófagos no consumieran cadáveres humanos abandonados, ni a los congéneres muertos por otras causas, sino que los mataran para comerse. Entre las víctimas, seis por lo menos, hay dos niños de unos cuatro años, otro de diez y otro de unos catorce años.

Todo esto parece muy negativo, y da la impresión de que los seres humanos somos realmente muy malos, más que cualquier otra especie animal. ¿En verdad somos tan violentos los humanos? Empecemos por distinguir entre violencia intraespecífica (dentro de la misma

especie) y violencia interespecífica (entre especies). Existe la falsa creencia de que los animales vegetarianos, que no matan a los animales de otras especies para comérselos, son pacíficos con sus semejantes, y de ahí deducen algunos que los humanos vegetarianos también lo serán. Pues no es así. Los animales vegetarianos, empezando por la paloma, el símbolo de la paz, pueden ser muy intolerantes con sus semejantes, llegando a causarles la muerte, mientras que habitualmente no detectamos mucha agresividad en un grupo de leones tumbados tranquilamente al sol.

Para no irnos tan lejos en el reino animal, observemos a nuestros parientes más próximos: los otros monos. Algunos, como los gibones, forman unidades sociales mínimas constituidas por un solo macho y una sola hembra, que conviven en perfecta armonía y fidelidad mutua ejemplar junto con sus crías; eso sí, las parejas son territoriales y defienden muy agresivamente su espacio vital contra otras parejas. Otras especies, caso de los gorilas, viven en grupos formados por un solo macho y muchas hembras. También ahí reina la armonía, aunque el macho impide violentamente que cualquier rival se aproxime. Ni uno ni otro son nuestro caso, porque los humanos vivimos en grupos formados por muchos machos y muchas hembras.

En este tipo de grupos se establecen a veces rígidas jerarquías entre los machos, que se pasan todo el día amenazándose y agrediendo. Mucha gente se para en el foso de los papiones del zoológico de Madrid, porque hay escaramuzas constantes entre machos y también entre hembras (que tienen su propia jerarquía), además de las agresiones de los machos a las hembras. Entre los chimpancés las agresiones no son tan frecuentes, aunque también las hay.

Si nos comparamos con los papiones del zoológico, nuestro comportamiento es muy amigable. Todos los días convivimos en la calle y en el trabajo hombres y mujeres, y la violencia, e incluso la amenaza, es muy rara. De hecho, si hubiera que definir socialmente al *Homo sapiens* diríamos que es una especie extraordinaria que forma grupos muy amplios de machos y de hembras que conviven sin apenas roces, y eso que muchas veces se reúnen individuos que no se conocían antes entre sí. Además nos juntamos en parejas para reproducirnos y cuidar de las crías: la nuestra es una sociedad con dos niveles, el familiar y el grupal.

Cuando Konrad Lorenz y los otros etólogos empezaron a estudiar científicamente el comportamiento animal observaron que en el seno de los grupos la agresividad tenía frenos: los individuos más débiles y los vencidos emiten señales de apaciguamiento que impiden que los más fuertes y los vencedores en los combates acaben con su vida. A menudo basta con adoptar una postura infantil para inhibir la agresividad, porque las crías no suelen ser atacadas. Lorenz y sus compañeros se preguntaban qué ha pasado en la evolución humana para que las agresiones se consumen y se produzca tan a menudo la muerte. ¿Habremos perdido nuestros rituales de apaciguamiento? Estudios recientes han demostrado dos cosas que contradicen las observaciones de los etólogos; primero, el presenciar en los animales un acto de agresión con daño sólo es cuestión de horas de observación: antes o después terminan por producirse; segundo, cuando se hace una verdadera estadística de agresiones cruentas y de crímenes, la proporción por número de habitantes es menor en los peores barrios de Nueva York que en las manadas de lobos o en los bandos de las palomas.

Hay sin embargo una trampa en ese razonamiento, que tal vez el lector haya advertido. La estadística de muertes por habitante es baja en periodos normales, pero se dispara hasta el infinito si contamos las guerras. Todos los animales sociales y territoriales defienden su casa frente a otros grupos, tanto si se trata de las especies carnívoras como de las vegetarianas. Les va en ello mucho porque el territorio contiene los recursos. Los machos de chimpancés, inocentes comedores de frutas y hojas, son feroces hasta el exterminio con los machos de las comunidades vecinas.

Pero en los conflictos entre animales se sigue la regla de la sangre, o de los genes, y los parientes se unen entre sí tanto más cuanto más próximos están. Nuestra especie es en esto claramente un caso especial, porque en las grandes confrontaciones ideológicas los que no se conocen se unen entre sí para matar a los hermanos carnales. Somos una especie que elabora símbolos, que forma grupos que basan su identidad en símbolos compartidos, más que en los genes compartidos, y que se vincula emocionalmente a esos símbolos. Así nos ha hecho la evolución, y el resultado es que somos demasiado fáciles de manipular: quien mueve los símbolos también maneja nuestras emociones.

El aprendizaje

El filósofo empirista escocés David Hume (1711-1776) encontró que había una distancia insalvable entre el sentido común y la lógica. El primero nos permite establecer relaciones entre dos acontecimientos cuando a uno de ellos le sucede inmediatamente el otro. Sabemos que el Sol saldrá de nuevo después de la noche, y que la piedra

que enviamos al aire volverá a caer. Es previsible que una bola de billar lanzada contra otra la ponga en movimiento al recibir el golpe. Más aún, además de asociar eventos, somos capaces de establecer relaciones causales en algunas ocasiones, siempre que dos hechos se den en el mismo lugar y cercanos en el tiempo, y uno (la causa) preceda inmediatamente al otro (la consecuencia).

Pero, por mucho que se repitan esas secuencias de acontecimientos, y estemos hartos de verlas, no hay ninguna razón lógica, pensaba Hume, para estar seguros de que a la noche le seguirá necesariamente el día, de que la piedra caerá inevitablemente o de que la bola que recibe el golpe saldrá despedida. Tendemos, por costumbre o hábito, a establecer asociaciones entre hechos que se presentan sucesivamente en el mismo lugar, y eso es todo. No se trata de *verdades de razón*, como las deducciones matemáticas que se hacen a partir de unos axiomas, sino *verdades de hecho*. No es imposible, en pura lógica, que mañana no salga el Sol; por el contrario, dos más dos son necesariamente cuatro. La consecuencia es que lo que afirmamos conocer es sólo una creencia, porque no es fruto de la lógica sino de la intuición basada en las repeticiones que observamos con nuestros sentidos. Las verdades matemáticas son innegables, pero por desgracia se refieren a un mundo abstracto que no es la realidad. Esta dependencia de los sentidos, que no de la razón, a la hora de conocer el mundo que nos rodea es muy grave, porque los sentidos son la puerta necesaria al entendimiento. Para los empiristas británicos como John Locke (1632-1704) y David Hume la mente de un recién nacido es como una hoja en blanco o *tabula rasa*, por lo que no hay nada en la mente que no haya sido previamente percibido por los sentidos («*Nihil est in intellectu quod non antefuerat in sensu*»). De este

modo, al igual que el idealismo más radical termina por negar la posibilidad de alcanzar un conocimiento verdadero de la realidad, con Hume el empirismo también acabó cayendo en la profunda sima del escepticismo.

Frente a este escepticismo de Hume, Konrad Lorenz se rebela diciendo que, gracias a la evolución, los organismos vienen al mundo con un conocimiento verdadero de lo que les rodea, ya que de otro modo no habrían sobrevivido sus antepasados. No nacemos cual *tabula rasa*. Ese conocimiento está grabado en los genes. François Jacob, como vimos, se refería al genoma como un sistema de memoria, y Lorenz lo considera un aparato para la adquisición de conocimiento, un aparato cognitivo. El perfecto ajuste entre los organismos y su medio (que incluye también a los demás organismos), es decir, la adaptación, hace que exista una correspondencia exacta entre el ojo y la luz, el tímpano del oído y las ondas sonoras, el ala y el aire, la aleta y el agua, la espiritrompa de la mariposa y el cáliz de las flores que liba.

Sin embargo, ese conocimiento innato, anterior a toda experiencia, no puede prever todas las circunstancias de la vida de un animal. Es muy conveniente que el animal acumule experiencia para no repetir sus errores, pero el genoma ya no se puede cambiar una vez que un nuevo ser ha sido concebido. El método del genoma para aprehender conocimiento no se basa en modificarse durante la vida, sino que, al contrario, la información adquirida es el resultado de la selección natural: los organismos que se comportan adecuadamente sobreviven, los que no lo hacen mueren, del mismo modo que los que disponen de estructuras útiles tienen éxito y los que nadan, vuelan o digieren mal tienen menos hijos. A diferencia del individuo, que aprende tanto de sus errores como de sus éxitos, el genoma sólo aprende de sus éxitos.

Pero hay una cosa que los genes sí pueden hacer por el individuo: le pueden dotar de la capacidad de acumular temporalmente conocimiento en su sistema nervioso. Ese conocimiento no será transmitido en los genes, pero ayudará al individuo a transmitir sus genes. En el hombre, el conocimiento viaja de una generación a otra por la vía de la cultura, de modo que no muere con el individuo, y en algunos animales hay también cierta transmisión de información por esta vía extragenética. Los chimpancés, por citar a nuestros parientes más próximos, tienen tradiciones locales, que pasan de padres a hijos, en el uso de instrumentos, y también en algunas especies de aves canoras se conocen dialectos regionales en el canto.

Pero estas culturas animales se diferencian de las humanas en que no se transmiten por la vía del lenguaje, es decir, de la comunicación por medio de símbolos, y por eso son incomparablemente más pobres. Como dice Lorenz, mientras que en el ser humano es mucha más la información que se hereda por la vía cultural que la que nos llega por la vía genética, en todos los animales, sin excepción, sucede exactamente lo contrario: hay muchos más *bits* en los genes heredados que en los comportamientos aprendidos de los padres.

En algunas ocasiones, las instrucciones para adquirir conocimiento son muy rígidas en los animales. Cuando un ganso viene al mundo está programado para reconocer como madre a cualquier objeto grande que se mueva cerca de él, aunque se trate de una persona o de una pelota. Este tipo de programaciones son sencillas y muy útiles, y evitan complejas descripciones. También nosotros los humanos dotaríamos de instrucciones del mismo tipo a unos hipotéticos autómatas autorreplicantes que lanzáramos a la conquista del espacio. Si el objeto que se encuentra normalmente cerca de un ganso cuando

sale del cascarón es su madre, ¿qué necesidad hay de inscribir genéticamente en el pollo un patrón complejo de reconocimiento de una gansa adulta?

Fue Konrad Lorenz quien descubrió estos procesos innatos de aprendizaje, que se parecen a impresiones fuertes grabadas durante la infancia, y los llamó *improntas*. A veces se produce la impronta de un objeto, como le sucede al ganso recién nacido. Esa estampación tiene lugar durante un periodo sensible concreto, y es además irreversible. Un pato macho criado con gallinas, con gansos o con patos de otras especies y liberado luego, preferirá como compañero sexual a un miembro de la especie con la que ha crecido antes que a uno de la suya propia. Es curioso observar que la impronta es bastante concreta: sólo actúa como desencadenadora de determinada reacción; una hembra de grajilla criada por Lorenz lo prefería a él como padre o como *partenaire* sexual, pero no como compañero social, y se asociaba para volar con otras grajillas de su especie.

Además de un objeto la impronta puede ser de una pauta motora, es decir, una secuencia de movimientos como los que producen el canto. Aunque se aisle a los pinzones del año en el mes de septiembre, es decir, mucho antes de que empiecen a cantar, les basta con lo que ya han oído de pollos para reproducir sin problemas el canto de la especie en la siguiente primavera. La impronta del canto ya no se les borrará nunca.

Si bien los ejemplos de impronta comentados proceden de especies de aves, donde se conocen muy bien y además son muy patentes, también se da el aprendizaje por la impronta en los mamíferos, incluyendo los primates y posiblemente incluso el ser humano. Ya Freud apreció las consecuencias que pueden tener en las eda-

des primeras y más sensibles de la vida todo lo que rodea al niño, empezando por sus padres.

La impronta no necesariamente determina quién puede ser el compañero sexual el día de mañana, sino también quién no puede serlo. Edward O. Wilson, el sociobiólogo, encuentra precisamente en el tabú del incesto la prueba más concluyente de que también en los humanos existen los instintos, aunque no necesariamente en forma de programas rígidos de comportamiento que no admiten modificación, sino más bien como predisposiciones innatas. La aversión al incesto, que sería un sentimiento natural, habría sido reforzada culturalmente por medio de leyes que lo prohíben y elevan su evitación a la categoría de norma moral.

¿Qué explicación natural tiene el rechazo del incesto? La de evitar el riesgo de tener descendientes con graves problemas a causa de la consanguinidad. Según algunos cálculos los humanos somos portadores, por lo general, de uno o más genes letales recesivos en cualquier lugar de nuestros veintitrés pares de cromosomas. El hecho de que estemos vivos se explica porque en nuestro genoma tenemos dos juegos de genes, heredados de cada uno de nuestros padres. Los genes letales recesivos sólo producen la muerte cuando se juntan dos, uno por cada vía. Si sólo heredamos uno (de la madre o del padre, da igual), el gen letal recesivo no se expresa. Pues bien, como compartimos la mitad de nuestros genes, en promedio, con cada uno de nuestros hermanos, hay un riesgo cierto de que si nos reproducimos con cualquiera de ellos en alguno de nuestros hijos se junten dos genes letales y el niño muera. Esa probabilidad es de un octavo, si hablamos de un gen letal en un único sitio de los veintitrés pares de cromosomas, pero sube a un cuarto si portamos dos genes letales (en dos sitios diferentes). La

misma probabilidad se da en las relaciones padre/hija y madre/hijo, donde también se comparte la mitad de los genes, y por eso también se extiende el tabú del incesto a esas situaciones, que no son consideradas moralmente aceptables en la generalidad de las culturas. Por supuesto, hay excepciones, como por ejemplo en los egipcios clásicos donde el matrimonio entre hermanos estaba prescrito, no proscrito, para conservar la pureza de la sangre en la familia de los faraones (pero también se daba en el pueblo); y es que dada la enorme diversidad de las culturas humanas pasadas y presentes es difícil, quizá imposible, encontrar algún rasgo universal.

¿Cómo habría podido evolucionar y hacerse dominante la evitación del incesto? En el comportamiento instintivo, como en cualquier otro rasgo con una base genética, hay variaciones individuales. Los sujetos que fueran menos dados a mantener relaciones sexuales con consanguíneos se verían menos castigados en su descendencia, y así habría llegado a extenderse a toda la población el instinto de aborrecer el incesto.

La aversión instintiva al incesto se ha podido constatar en situaciones donde niños no emparentados conviven como hermanos desde muy jovencitos. Un hombre y una mujer no se sienten, por lo general, atraídos sexualmente si uno de los dos tenía menos de trece meses cuando se conocieron. Es como si nació con la instrucción de no reproducirnos con alguien con quien hayamos convivido desde que era muy pequeñito, y cuya impronta quedará estampada para siempre en nosotros; esa marca ya no se podrá borrar jamás. Un caso bien estudiado en el que esto sucede es el de los *kibbutz* de Israel, en los que los niños son educados en común, y donde no se producen matrimonios entre compañeros pese a que los padres no se oponen a esas relaciones (no tendrían ningun-

na razón para hacerlo). Hay ejemplos parecidos en otras clases de culturas.

Curiosamente, Freud sostenía un punto de vista diametralmente contrario, ya que basaba el edificio de su teoría en el llamado *complejo de Edipo*, que consiste en que el niño se enamora de su madre en su más tierna infancia, y mira a su padre como un rival desde entonces. La razón por la que hay leyes que prohíben el incesto es, argumentaba Freud, precisamente porque es un deseo latente contra el que la sociedad se protege. ¿Es el incesto algo a lo que tendemos con todas nuestras fuerzas o algo que aborrecemos? No puede haber dos hipótesis más incompatibles. A ellas podríamos añadir la de que el incesto está prohibido porque los humanos sabemos, racionalmente y no por instinto, que no es conveniente (aunque lo cierto es que muchas culturas que prohíben el incesto no parecen ser conscientes de sus consecuencias perniciosas).

Sin embargo, el incesto se evita también en los animales, incluidos los monos, donde no es corriente, en condiciones naturales, que las madres copulen con sus hijos, o que lo hagan los hermanos entre sí. Además, en los mamíferos sociales es frecuente que los hijos o las hijas abandonen el grupo cuando llegan a la madurez sexual (las hembras lo hacen en el caso de los chimpancés). Todo esto hace pensar que la aversión al incesto responde a una predisposición genética a evitar el contacto sexual con las personas con las que convivimos desde que son muy pequeñas... y por lo tanto Freud estaba aquí equivocado.

Pero los animales también disponen de la capacidad de establecer asociaciones entre acontecimientos, es decir,

de apreciar las regularidades de la naturaleza. La lógica humana, no es, después de todo, más que otra manera (análoga) de crear nexos causales entre hechos. Podemos confiar, a pesar de Hume, en esa capacidad de establecer asociaciones entre eventos que tienen los animales, porque ha sido la selección natural la responsable de que exista.

En las excavaciones de Atapuerca tuvimos un año un zorro joven que se acercaba a vernos (los individuos inmaduros siempre son más curiosos, más exploradores, que los adultos). Empezamos a echarle sobras de comida a la hora del bocadillo, y conseguimos en seguida que nos visitara precisamente en ese momento del día. Varias semanas después de acabada la campaña volvimos al yacimiento casualmente a la hora del bocadillo, y allí nos esperaba el simpático zorrillo. Es evidente que el animal *sabía* que a esa hora podía conseguir comida en ese lugar, igual que *sabía* explotar otras fuentes de alimento en diferentes momentos y lugares (caza, carroñas, basura, etc.). ¿Pero cómo, es decir, por qué mecanismo, lo habría aprendido?

En un famoso experimento el fisiólogo ruso Ivan Pavlov (1849-1936) descubrió que los animales realizan asociaciones entre estímulos. La presentación de comida a un perro hambriento (o a una persona) le hace producir saliva y estimula la actividad de los jugos gástricos. Pavlov hacía sonar una campana a la vez que le ponía la comida al pobre perro del laboratorio. Así consiguió que la reacción fisiológica que prepara al animal para recibir la comida se produjera con el solo sonido de la campana, sin necesidad de alimento alguno. Esta asociación entre dos estímulos, uno la comida y otro el tañido de la campana, se conoce como reflejo condicionado.

Los dueños de animales domésticos (y más aún los profesionales que los adiestran) saben muy bien que una conducta determinada se puede favorecer por medio de la recompensa o, al contrario, suprimir a base de castigo. Este tipo de mecanismo, llamado *condicionamiento instrumental*, sería para el psicólogo americano Burrhus Frederic Skinner (1904-1990) la clave para entender el comportamiento animal y también el humano. Los animales, según Skinner y la escuela *behaviorista* o *conductista* que encabezó, no *sabrían* en realidad nada, ni *entenderían* nada. Simplemente, la frecuencia con que se repite una pauta de conducta aumenta con la recompensa y, al revés, la probabilidad de que se produzca disminuye con el castigo.

La moderna *psicología cognitiva*, que ha sustituido a la psicología behaviorista de Skinner cree, por el contrario, que los animales se forman, de algún modo desconocido, representaciones internas de eventos. Estos eventos pueden ser, bien los estímulos que reciben (premio, castigo o un estímulo neutro), bien sus propias pautas motoras o respuestas. Cuando perciben que en el mundo exterior hay una relación de dependencia entre dos estímulos, o entre un estímulo y una respuesta (o, al revés, entre un comportamiento y un estímulo), forman de algún modo asociaciones entre las representaciones internas de esos eventos. O sea, saben que una actividad determinada producirá una recompensa o un castigo, y que determinado estímulo anuncia algo bueno o algo malo.

Nos adentramos ya en un terreno mucho más complejo que el de las improntas, y nos resulta muy difícil imaginar cómo podríamos dotar a una máquina autorreplicativa de algo parecido a esas representaciones internas, así como de la posibilidad de establecer asociaciones entre ellas. Sin embargo se encuentran tales capacidades en

animales con sistemas nerviosos realmente muy simples. Y aún hay más cosas sorprendentes que saben hacer.

CAPÍTULO IX

Las maravillosas aventuras del barón de Munchausen

La fulguración

Konrad Lorenz observó que en los animales se dan una serie de facultades asombrosas, cada una de las cuales está presente en el hombre, pero que en nosotros se integran para producir la mente racional. Esas capacidades que, en menor o mayor grado, tienen los animales, constituyeron en la evolución una condición necesaria para que en un momento de la historia de la vida surgiera, como una fulguración, el pensamiento humano. Fueron las raíces del pensamiento abstracto. Aunque las facultades en cuestión se expliquen necesariamente una detrás de otra, no forman una secuencia histórica, ya que no aparecieron sucesivamente sino que surgieron independientemente y funcionaron de forma separada hasta que se unieron en los primeros pensadores. De su asociación emergió algo mucho más importante que su mera suma; aparecieron propiedades nuevas que no existían en el nivel inferior: una mente consciente y simbólica, y un lenguaje. He aquí esas facultades animales sobre las que se asienta el pensamiento humano.

Los animales son, sorprendentemente, capaces de separar lo sustancial de lo accidental en los objetos que forman su mundo. No nos llama la atención que los animales distingan a sus enemigos, o a sus congéneres, o

su alimento, pese a que pueden presentarse de muchas formas distintas. Imaginemos que queremos crear un dispositivo para que una máquina reconozca un tipo de animal, por ejemplo un perro, en las múltiples posturas y vistas diferentes que se pueden dar, y bajo la enorme gama posible de iluminaciones. Resulta realmente difícil, en la práctica, conseguir tal proeza, porque de lo que se trata es ni más ni menos que de dotar a la máquina de la capacidad de reconocer la esencia del perro, la que se encuentra siempre en todos y cada uno de los perros. Sin embargo, es ésta una capacidad de abstraer, de objetivar, de crear categorías que (aunque no sea conscientemente) tienen multitud de animales. La encontramos también en los niños más pequeños cuando ante cualquier perro, de cualquier raza (mastín, galgo o caniche), dicen «guau-guau».

Muchos animales tienen, asimismo, una capacidad muy llamativa para orientarse en el espacio gracias a la visión. Esta facultad está más desarrollada en las especies donde el espacio presenta más complejidad, por ejemplo en los mamíferos arborícolas. Entre ellos destacan los primates, que deben aferrarse a las ramas de los árboles con precisión cuando se mueven por sus copas. En los monos del Viejo y del Nuevo Mundo (*catarrinos* y *platirrininos*), los ojos se han situado en posición anterior, proporcionando así al animal un amplio campo de visión tridimensional (o *estereoscópica*). Esta visión binocular (con los dos ojos) heredada de nuestros antepasados arborícolas hace que tengamos también los humanos una rica percepción del espacio.

Resulta difícil aceptar que hubiera podido aparecer el pensamiento abstracto en una especie que no se representara el mundo en imágenes, sino que lo hiciera, como la mayoría de los mamíferos, en olores. La prueba la te-

nemos en la cantidad de veces que utilizamos en el lenguaje, para expresar cualquier idea, los adverbios y otras palabras que indican posición o movimiento en el espacio (como cuando se dice que el pensamiento abstracto es una capacidad *superior* que adquirimos cuando *ascendimos* en la evolución, y que no tenían los antepasados que dejamos *atrás*).

Nuestro familiar gato doméstico se ha subido a lo alto de un armario. Desde allí contempla el resto de la habitación, dirigiendo la mirada de una parte a otra; la ventana, la mesa, la silla, el aparador, la cama, el suelo, etc., son objeto de su investigación. Parece meditar sobre el siguiente salto que va a dar, calculando la distancia que le separa de los posibles destinos. Finalmente clava la mirada en un punto: ya se ha decidido; podemos predecir a dónde va a ir a parar mientras sus músculos se contraen como un resorte y la vista no se desvía ni un milímetro de su objetivo.

Cuando algunos tipos de animales observan a su alrededor antes de ejecutar alguna acción se diría que tantean con la mirada el espacio, reuniendo información suficiente antes de actuar. Konrad Lorenz imagina que en los mamíferos «probablemente se consuma una "acción interna" en el "espacio imaginado", es decir, el espacio representado como modelo dentro del sistema nervioso central. Todo pensamiento humano como tal sólo puede ser concebido cual un "acto en el espacio imaginado" cuyo desarrollo tiene lugar en el sistema nervioso central». Antes de lanzarse a la acción, el animal dotado de tales capacidades (como también hace el hombre), lleva a cabo una simulación interna de lo que ocurriría en las diferentes opciones que se le ofrecen. Es decir, realiza experimentos mentales. Imagina posibles futuros, y elige uno de ellos.

Para François Jacob justamente en el *espacio imaginado* está una de las claves para entender al ser humano. La facultad de representarse la realidad en forma visual permite que «las imágenes memorizadas de acontecimientos pasados puedan fragmentarse en sus distintos componentes para ser posteriormente recombinadas y producir representaciones hasta entonces desconocidas y situaciones nuevas; de ahí la capacidad no sólo de conservar las imágenes de acontecimientos pasados, sino de imaginar acontecimientos posibles y, por ende, de inventar el porvenir».

Se desprende de todo lo dicho que el aprendizaje y la memoria constituyen una base insoslayable para el pensamiento abstracto, y así lo considera Konrad Lorenz. Esas *imágenes memorizadas* de las que habla François Jacob tienen que almacenarse en algún lugar para poder ser luego recombinadas y así crear proyectos de futuro. En el delicioso *Libro de la selva* de Rudyard Kipling (1865-1936), los monos (los *Bandar-log*) son objeto del desprecio de los animales *juiciosos*, como Baloo, el oso, o Bagheera, la pantera. Intentan parecerse a los humanos, y formar sociedades con jefes, pero no lo consiguen porque son incapaces de mantener una idea en la cabeza. Empiezan muchos proyectos con grandes pretensiones, pero cualquier nimiedad, como la caída de un coco, los distrae y les hace olvidar su plan. La cabeza no debe estar *hueca*, sino que debe conservar la información, al menos durante cierto tiempo.

En un medio lleno de obstáculos de nada serviría la capacidad exploratoria de la visión binocular si no fuera acompañada de una gran variedad de movimientos, de una enorme flexibilidad motora. En cambio, los animales que viven en medios despejados no la requieren. En la inmensidad del mar el capitán de un barco sólo necesita

graduar la velocidad (frenar o acelerar) y manejar el timón (trazar el rumbo). Las canoas del descenso del Sella precisan, justamente al contrario, de una gran maniobrabilidad para sortear los obstáculos y los remolinos del río.

Un caballo, animal adaptado a la ancha estepa, puede caminar al paso, al trote o al galope, pero hace falta una gran paciencia para que realice los sencillos movimientos de los concursos de doma clásica. Incluso las portentosas exhibiciones de las escuelas de equitación de Viena o de Jerez se quedan en nada comparadas con la versatilidad del mono. Volvemos, otra vez, a encontrarnos con el mono.

La curiosidad, el comportamiento inquisitivo, es otra de las condiciones para el pensamiento abstracto. Nadie sabe qué produce esa apetencia de información que supone el afán explorador, pero está claro que sólo es posible cuando el animal está *relajado*, es decir, cuando no está sometido a una tensión más seria en relación con la caza, la huida, la reproducción, el cuidado de las crías, etc. En esas circunstancias no se está *para bromas*, pero luego, cuando pasa la urgencia, cabe la búsqueda de cosas nuevas y también el juego. Los mamíferos en general, y desde luego los monos, son muy *cotillas*, especialmente en sus épocas más tempranas, y el hombre lo es toda la vida. En ese sentido somos permanentemente niños. La tendencia a investigar cuando puede hacerse, es decir, cuando no hay una preocupación más perentoria, supone una forma enormemente eficaz de acumular información sobre el mundo que nos rodea. Esa base de datos permanece como dormida, en estado latente, y sólo se recurre a ella en los momentos de crisis. La información que acumula sobre los secretos de su territorio un animal durante sus vagabundeos sin objeto fijo le

puede salvar la vida cuando en un momento determinado tenga que huir, sin tiempo para *pensar*, acosado por un depredador.

El juego, si se mira bien, es lo contrario del condicionamiento operante. En éste se prueba un movimiento sencillo (una coordinación hereditaria simple) con diferentes objetos, hasta que se produce el refuerzo por la recompensa o la aversión por el castigo. Sólo con el movimiento de arañar con una pata, la rata en una jaula de Skinner puede casualmente abatir un pedal y obtener al momento comida o una descarga eléctrica. Esa acción de bajar el pedal será a partir de entonces repetida con mucha frecuencia o abandonada. También puede la rata aprender a encontrar el premio que se esconde al final de un laberinto simplemente moviéndose por él. Pero en el juego se practican muchos tipos de coordinaciones hereditarias complejas en rápida sucesión y ante el mismo objeto, como cuando un gato simula primero la conducta de la caza, luego la de la lucha con otro gato, más tarde la de defensa frente a un perro, etc. Es por lo tanto el juego algo diferente del condicionamiento operante, y supone un *entrenamiento* muy importante (y por eso lo practican sobre todo los individuos más jóvenes) para las situaciones serias de la vida adulta. En nuestro caso, nunca abandonamos por completo las ganas de jugar.

Pero en los monos, siempre en los monos, la exploración no se limita al mundo exterior, sino que incluye el propio cuerpo, y se convierte en autoexploración. ¿Cómo puede ser eso? Pues porque el primate tiene la mano situada dentro del campo visual cuando se aferra a una rama o maneja un objeto. Y tanto Konrad Lorenz como François Jacob razonan que ver la mano prensil junto al objeto, y recibir tanto las sensaciones de la mano como las imágenes que la muestran junto con aquello, una fru-

ta por ejemplo, cuyo tacto le llega, es lo que permitió a un antepasado nuestro identificar a su propio cuerpo como un objeto más del mundo real. Y cuando el mono coge entre sus manos la del congénere aprecia hasta qué punto son iguales, y de esta manera se ve reflejado en el otro y se descubre a sí mismo como si estuviera frente a un espejo. De este modo vislumbraron nuestros antepasados su propia existencia, su realidad como un objeto más de su medio ambiente.

El descubrimiento de la naturaleza objetiva del propio cuerpo fue otra premisa para el pensamiento abstracto, y al parecer también la cumplen los chimpancés que, de acuerdo con ciertos experimentos, se reconocen a sí mismos ante el espejo. La conciencia de uno mismo, considerado como un objeto, le proporciona al ser humano la posibilidad de imaginarse dentro de su propio *espacio imaginado*, de verse *desde fuera*. E incluso le abre la posibilidad estremecedora de *no verse*, de imaginar un tiempo anterior o posterior a nuestra existencia.

Otra base necesaria para que surgiera el lenguaje sería la capacidad de imitación, que tan desarrollada está, una vez más, en los monos, pero que también se encuentra en algunas aves que han de adquirir por imitación su canto (totalmente o a partir de una pauta innata).

Y por último, Konrad Lorenz señala también como pre-requisito para la fulguración de la que nació el pensamiento abstracto, la existencia de tradición, es decir la posibilidad de transferencia de información de una generación a otra. Se dan entre las aves que tienen que aprender a cantar ejemplos de dialectos regionales, y de nuevo conocemos entre los primates, y en particular en los macacos japoneses y en los chimpancés, espléndidos casos de cultura, entendida en el sentido amplio de transmisión de hábitos por una vía diferente de la de los

genes (en el sentido restringido de perpetuación de ideas, la cultura sólo existe entre nosotros, porque se necesita para ello comunicación simbólica, es decir, lenguaje).

Entre los chimpancés salvajes se conocen treinta y nueve patrones de comportamiento (que se refieren al uso de herramientas, al aseo y al cortejo) que son habituales en unas comunidades y están completamente ausentes en otras de la misma especie. Esas diferentes costumbres no pueden ser explicadas por las circunstancias ecológicas propias de cada comunidad, sino que se deben simplemente a que de cuando en cuando surge una pauta de comportamiento nueva y los miembros de la comunidad la practican y transmiten el hábito de padres a hijos.

Ya lo dijo Darwin

En cuestión de evolución es frecuente encontrarse con que, más o menos elaboradas, las ideas que se le ocurren a uno ya las había pensado antes Darwin. Entonces, alguien que lo ha leído recientemente cae en la cuenta y nos lo recuerda: ¡Eso ya lo dijo Darwin!

Como Darwin se ocupó del origen del hombre en un libro de 1871 (con ese título), resulta que algunas de las ideas de Lorenz también pueden encontrarse ahí, concretamente en el capítulo titulado «Comparación entre las facultades mentales del hombre y de los animales inferiores».

Darwin señala la comunidad entre el hombre y los animales en los instintos de «conservación, el amor sexual, el afecto de la madre al recién nacido, la propensión de

la cría a mamar, y así otros», pero también en las emociones elementales como el placer y el dolor, la felicidad y la desgracia, e incluso en otras más complejas que Darwin aprecia en forma de rudimentos en los animales, como los celos, la vergüenza, el amor propio, la vanidad y el sentido jocoso o ganas de jugar (en cuya existencia, por humanas que parezcan, muchos dueños de animales domésticos estarían bastante de acuerdo).

A continuación, Darwin pasa a ocuparse de «emociones y facultades más intelectuales, que forman la base del desarrollo de las aptitudes mentales superiores». Un planteamiento, como puede verse, muy similar al de Konrad Lorenz. Entre estas aptitudes mentales superiores se cuentan la curiosidad y el afán de investigación que caracterizan a muchos mamíferos, el espíritu de imitación, la atención y capacidad de concentración (y pone como ejemplo al gato que va a saltar sobre su presa), la memoria, la imaginación y el raciocinio. Respecto de la imaginación, Darwin escribe en términos muy similares a los de François Jacob, que hemos visto más arriba: «La imaginación es una de las prerrogativas más elevadas del hombre. Une por esta facultad, independientemente de la voluntad, imágenes e ideas pasadas creando así nuevos y brillantes efectos. [...] El valor de los productos de nuestra imaginación depende desde luego del número, precisión y claridad de las impresiones que tengamos, de nuestro juicio y gusto en elegir y rechazar las combinaciones involuntarias y, hasta cierto punto, de nuestra habilidad y fuerza para combinarlas voluntariamente.»

Darwin se pregunta sobre las más elevadas facultades mentales: la abstracción, las ideas generales, la conciencia propia, la individualidad mental. Piensa que es muy difícil saber hasta qué punto existen indicios de ellas en los animales, pero argumenta de manera parecida a la

de Lorenz en relación con la abstracción en los animales: «La mayor parte de los estudios recientemente publicados por diversos autores suponen carencia total en los animales de la facultad de abstracción, esto es, de la aptitud para formar conceptos generales. Pero bien claro resulta que cuando un perro ve a otro perro a distancia se apercibe en lo abstracto de que la figura que divisa es la de un congénere suyo, y cuando llega cerca de ella cambia repentinamente todo su aspecto si es un perro amigo. Dice un escritor que en semejantes casos apenas es otra cosa que una suposición aseverar que el acto mental no es de la misma naturaleza en el animal que en el hombre.»

Respecto al raciocinio, que considera, de todas las facultades mentales, la primera sin discusión, se trataría de la capacidad de asociar acontecimientos, que encuentra muy desarrollada en los mamíferos, pero que también existe en otros vertebrados *inferiores*.

De llaves y cerraduras

De una forma independiente por completo, el filósofo Daniel Dennett ha elaborado algunas ideas sobre el origen de nuestra mente que tienen muchos puntos en común con el pensamiento de Konrad Lorenz (y con el de Darwin). El modelo de Dennett es una torre de complejidad ascendente, en la que unos tipos de mentes son pisos que se construyen sobre otros inferiores menos eficaces.

El piso más bajo es el que ocupan las que Dennett llama *criaturas darwinianas*, que muestran las formas de comportamiento más simples, y que fueron las primeras. Estas criaturas darwinianas tienen diferentes tipos de com-

portamiento ante un problema dado; es como si fueran *llaves* distintas que intentan abrir una misma *cerradura*. Unas y otras versiones de *llave* aparecieron por el mecanismo ciego de la mutación y recombinación de genes. La selección natural favoreció una de las variantes, y ésta se multiplicó. Las criaturas darwinianas sólo tienen un tipo de respuesta (una llave cada una) ante un problema (la cerradura): unas aciertan y otras no, pero no existe ninguna plasticidad en el comportamiento, que no se puede modificar en absoluto durante la vida del individuo; la llave con la que uno nace permanece siempre igual.

Con el tiempo aparecieron criaturas con un comportamiento (un *fenotipo* en definitiva) más flexible. Se podría decir que esas criaturas no estaban completamente terminadas en el nacimiento, sino que eran susceptibles de ser modificadas por las circunstancias de la vida. Ante el mismo problema (la cerradura) estos seres ensayarían ciegamente diferentes tipos de respuestas (distintas llaves) hasta que una funcionara (abriera la cerradura).

Estos organismos no suponen mucho avance en la torre de complejidad ascendente, pero algunas de estas formas disponían además (como siempre por pura casualidad, es decir, por simple mutación y recombinación) de un mecanismo que reforzaba los comportamientos que tenían éxito (las llaves que abrían cerraduras) y, por el contrario, ese mecanismo hacía que los movimientos que conducían al fracaso (al desastre más o menos completo) se repitieran poco o nada. En otras palabras, la próxima vez que una de esas criaturas se encuentre ante la misma cerradura, lo más probable es que pruebe primero con la llave que tuvo éxito la vez anterior.

Esos organismos aprenden de sus experiencias, y Dennett los denomina *criaturas skinnerianas* porque su conducta es el resultado del mecanismo de refuerzo o aver-

sión por el premio o castigo que según Skinner está en la base de todo proceso de aprendizaje: es lo que él llamaba el *condicionamiento operante* o *instrumental*. Esta forma de aprender, como se recordará, es diferente de la de los genes; éstos sólo aprenden de sus éxitos (las criaturas darwinianas que tienen las llaves que abren cerraduras sobreviven, las otras mueren), mientras que las criaturas skinnerianas también aprenden de sus fracasos: las llaves que no abren la cerradura son eliminadas sin que muera el organismo que las produce.

Los seres humanos somos *criaturas darwinianas* a veces, y también podemos ser *criaturas skinnerianas*, pero disponemos de un tercer sistema para dar con el comportamiento adecuado. Somos *criaturas popperianas*; éste es el nombre del tercer piso en la torre de Dennett, que hace honor al famoso filósofo Karl Popper, para quien nuestro diseño «permite que mueran nuestras hipótesis en vez de nosotros». En otras palabras, es maravilloso (casi mágico) que las múltiples pruebas ante una cerradura de las diferentes clases de llaves no se hagan en el espacio real, donde cada fracaso es un golpe recibido y tal vez la muerte. Si hay mala suerte una criatura skinneriana puede tardar mucho antes de dar con la llave correcta, ya que las va probando todas en cualquier orden. La siguiente vez todo será más fácil gracias al condicionamiento operante, pero el animal puede salir tan mal librado de la experiencia que es posible que no haya una próxima vez.

En lugar de experimentar en el espacio exterior, el hombre y también otras especies animales tienen la capacidad de experimentar en un espacio imaginado, que es un espacio interior donde se pueden probar las diferentes llaves sin riesgo. El primer intento de una criatura skinneriana ante un problema (cerradura) es una opción

cualquiera, elegida al azar, entre las diferentes posibilidades (llaves) de que dispone. En cambio, la criatura popperiana prueba en primer lugar la opción que ha tenido éxito en su simulación cerebral y que por eso ha sido preseleccionada. Para ello se necesita una cierta capacidad de reproducir internamente, y con suficiente fidelidad, el medio externo y de crear así una especie de ambiente interno.

En otras palabras, en contra de los filósofos que argumentaron que venimos al mundo sin conocimiento alguno del mundo real (como una hoja en blanco), e incluso que no tenemos capacidad de adquirirlo, la realidad es que las criaturas popperianas nacen con un modelo interno, bastante exacto por la cuenta que les trae, de lo que hay más allá de sus cerebros. Y además cuentan con la posibilidad de adquirir conocimiento e ir mejorando y completando durante la vida esa representación interior del mundo exterior con la que nacen. No hace falta explicar que el mundo interior no es una casa de muñecas, no es una maqueta del mundo real. Como dice Dennett, no se trata de imaginar que tenemos dentro de la cabeza una estufa imaginaria tan caliente que quema el dedo imaginario que ponemos encima. Pero así y todo hay suficiente información en esa representación interior como para que cumpla con su función de evitarnos que nos quememos el dedo real en la estufa real del mundo real.

Según Dennett sólo los invertebrados, y quizás no todos, podrían ser criaturas puramente skinnerianas. Los vertebrados son, sin excepciones, criaturas popperianas.

Esa representación interna del mundo externo puede mejorarse añadiendo las experiencias que se van acumulando durante la vida, y, a ser posible, las experiencias acumuladas por otros. La forma en la que se apropian unos animales del conocimiento de otros es la imi-

tación, y gracias a ella existe la tradición. La cultura, entendida en su sentido más amplio como una forma no genética de transferir información de una generación a otra, sigue el mecanismo de Lamarck en lugar del mecanismo de Darwin; es decir, gracias a la cultura se transmiten los conocimientos adquiridos, que no van en los genes.

Por medio de la cultura heredamos las herramientas que fabricaron personas que han muerto hace mucho tiempo, y lo mismo hacen los animales que las usan, como los chimpancés. En las simulaciones cerebrales de cómo resolver problemas se pueden incluir también las herramientas, de manera que una llave real puede ser probada con una cerradura dentro de nuestra cabeza. De este modo se incorpora al modelo interno de la realidad no sólo el mundo de los objetos naturales, sino también el de los objetos fabricados, es decir, el *espacio diseñado*.

Las criaturas que tienen tradición son llamadas por Daniel Dennett *criaturas gregorianas*, esta vez en honor del psicólogo británico Richard Gregory. Este autor observó que un par de tijeras no sólo son resultado de la inteligencia, sino que proporcionan inteligencia adicional a quien las usa. Las herramientas son *inteligencia potencial*. Cuanta más inteligencia se puso en el diseño del útil, más *inteligencia potencial* se confiere a quien la use. Los grupos de chimpancés que no saben preparar palitos para *pescar* termitas (porque no está en su tradición) se pierden esta importante fuente de proteínas. Por el contrario, los homínidos que aprendieron a fracturar un hueso con una piedra accedieron al rico tuétano que contiene. Mucho mayor es la diferencia entre quienes disponen de armas de fuego y quienes usan lanzas de madera. El fusil tiene más diseño, más inteligencia incorporada, que un palo aguzado en su extremo.

Es evidente que sólo una criatura gregoriana podía convertirse en un ser humano, pero eso no quiere decir que sea fácil saber cómo lo hizo. Dennett piensa que la clave la da el propio Gregory: entre las más importantes herramientas están las *herramientas mentales*, es decir, las palabras. El resultado de incorporar las *herramientas mentales* a nuestro *espacio imaginado* y de *jugar* con ellas combinándolas de infinitas formas diferentes fue, con el tiempo, la mente humana. Y también gracias a esta poderosa herramienta, esta vez al servicio de la comunicación, fue posible aprender no sólo de los errores propios, sino también de los errores de los demás.

Emergencias

El barón de Munchausen (Karl Friedrich Hieronymus Baron von Münchhausen) fue un personaje histórico que vivió entre 1720 y 1797 y combatió en el ejército del Zar contra los turcos, alcanzando el grado de capitán de caballería. Munchausen alcanzó en vida una gran fama como contador de historias fantásticas, que finalmente se publicaron en diversos libros. En el de Gottfried August Burger de 1788 (*Las aventuras del barón de Münchhausen*) se cuenta la siguiente historia. Una vez quiso salvar el barón un pantano de un salto, pero descubrió hacia la mitad del viaje que había calculado mal, por lo que, estando ya en el aire, se volvió al punto de partida para tomar nuevo impulso. En su segundo salto se quedó también corto y se hundió en el pantano hasta el cuello, no muy lejos de la otra orilla. Afortunadamente su fuerza y su ingenio le salvaron una vez más de un mal trago. «Allí hubiera acabado irremisiblemente si la fortaleza de mi brazo no me hubiera sacado tirando de mi propia coleta,

juntamente con mi caballo, al que sujeté firmemente entre mis piernas.»

Los dos grandes problemas de la historia de la vida son la aparición del primer ser y el nacimiento de la mente racional. Una reflexión común es la de que algo no puede salir de la nada, es decir, que de donde no hay no se puede sacar (y los olmos no dan peras). Tal cosa parece lógicamente imposible. Alguien, o algo, desde fuera, tuvo que crear la inteligencia y la vida, porque sería impensable que la materia no viva se autoorganizara para producir la vida, o que un ser no racional tuviera un hijo que lo fuera. ¿Cómo podrían las letras juntarse para escribir *El Quijote* o las notas encadenarse en una sinfonía? En otras palabras, sólo una Inteligencia podría producir la *inteligencia*. Lo contrario sería pensar que es posible levantarse en el aire como lo hacía el imaginativo Munchausen: tirándose uno mismo hacia arriba del pelo; sería elevar las maravillosas (pero fantásticas e irreales) aventuras del barón de Munchausen al rango de paradigma científico.

No es necesario sin embargo recurrir a un agente sobrenatural para explicar científicamente el origen de la vida y de la consciencia, porque sí es posible concebir que ambas propiedades surgieran solas a partir, en un caso, de moléculas orgánicas, y, en el otro, de animales no conscientes. El filósofo Daniel Dennett lo explica así: hay gente que prefiere creer que existen *ganchos celestes* que permiten elevarse a los organismos en la torre de la complejidad creciente a la que nos hemos referido antes. Cada salto de nivel, desde el origen de la vida hasta la mente humana, requeriría de la intervención de uno de estos ganchos celestes. Pero hay un mecanismo alternativo para subir: se trata de las grúas. Una grúa no es una solución mágica comparable a la del barón de Munchau-

sen de tirarse de la coleta. Utilizamos grúas todos los días en la construcción, pero no ganchos celestes.

Por grúa entiende Dennett la aparición de una propiedad nueva (por el mecanismo darwiniano ordinario de la selección natural) que, aunque no haya aparecido para ser utilizada como grúa, sin embargo hace que la evolución se acelere y conquiste espacios nuevos de diseño. El lenguaje, por ejemplo, sería una grúa que habría acelerado la evolución de la mente humana. Y la cultura es una grúa para fabricar grúas. En la sociedad contemporánea estamos asistiendo a la aparición de grúas (como el *chip* de silicio) que, casi por arte de magia, aceleran la *evolución tecnológica* y crean nuevas máquinas antes impensables. También fue una grúa biológica, hace mucho tiempo, la reproducción sexual. No apareció, por supuesto, para hacer avanzar más deprisa la evolución, y además a los organismos no les importa nada el futuro a tan largo plazo. Pero el caso es que los linajes que siguieron por esa vía terminaron diversificándose y multiplicándose más que los que mantuvieron el sistema primitivo de reproducción asexual.

La solución que propone Konrad Lorenz para explicar los cambios de nivel es algo diferente. En efecto, tanto la vida como la reflexión representan saltos cualitativos, que entrañan la aparición de propiedades nuevas de la materia, hasta ese momento desconocidas por completo en el planeta. Pero esas *fulguraciones*, en expresión feliz de Konrad Lorenz, no son milagrosas, ya que resultan de la integración de elementos pre-existentes (Lorenz prefería el término *fulguración* a *evolución*, porque en origen *evolución* significaba desarrollo previsible, y la *fulguración* es siempre algo inesperado). O sea, vida y conciencia no representan simplemente la suma de los elementos anteriores a su aparición, sino algo más. Dos más

dos a veces suman cinco, o cinco mil. Ahora bien, por ese *algo más* no se entiende ninguna clase de fuerza misteriosa, intangible y etérea. La moderna biología ha renunciado a cualquier forma de animismo o de vitalismo. Cada propiedad nueva, por espectacular que sea, emerge de la reorganización de los elementos disponibles en el nivel de organización inferior: es una *propiedad emergente*. Este paradigma científico, que ha permitido a la biología prescindir en sus explicaciones de las *fuerzas oscuras*, se llama *organicismo*.

Hay por lo tanto manera de encajar la emergencia de la vida y de la mente simbólica en el marco de la ciencia moderna, de la que se ha ido eliminando, desde la revolución del Barroco, toda pretensión de finalidad. Pero ambos acontecimientos son tan raros que han ocurrido una sola vez en la Tierra, y no estábamos allí entonces para observarlos. Sin duda fueron sucesos muy singulares.

Todo lo que podemos hacer en este momento es tratar de conocer cada vez mejor en qué circunstancias y a partir de qué bases surgieron la vida y la conciencia; estamos muy lejos, hoy por hoy, de ser capaces de producir una vida artificial o una inteligencia artificial que puedan considerarse verdaderamente análogas a la vida e inteligencia del mundo orgánico. Es muy dudoso que se consiga algún día, pero no a causa de ninguna imposibilidad metafísica, sino porque no van por ahí las investigaciones. No es interesante en absoluto construir un robot que imite al ser humano: ¡para eso ya nos tenemos a nosotros mismos! Lo que merece la pena desarrollar es máquinas que simulen algunas propiedades útiles (para los humanos) de la vida y de la inteligencia humana, incluso en un grado más alto que las criaturas naturales. Es decir, máquinas especializadas, muy eficaces en lo

suyo, y no seres artificiales que saben hacer un poco de todo como los organismos, que en realidad para lo que están dotados por la naturaleza es para vivir y reproducirse, no para realizar alguna función rentable para el hombre. Sí es posible, y se está haciendo, fabricar artefactos que tomen decisiones y que resuelvan problemas por nosotros, porque lo hacen mejor y más rápido. Pero, por supuesto, los criterios de decisión los ponemos los humanos.

CAPITULO X

¿Libres o esclavos?

El cuarto golpe

Sigmund Freud se consideraba el autor del golpe definitivo que había derribado al hombre del pedestal en el que creía estar. El primer golpe lo propinó Copérnico cuando afirmó que la Tierra no era el centro del Universo. El segundo fue el descubrimiento por Darwin de que descendemos *del mono*, y el tercero, el golpe que habría asestado el propio Freud, había sido bajar a los sótanos de la conciencia para descubrir que allá abajo, en el subconsciente, es donde se cuecen (sin que lo sepamos) nuestros deseos más inconfesables, los que de verdad nos impulsan en la vida.

Pero aún faltaba otro golpe, esta vez un golpe bajo, y se produjo en los años 1975 y 1976. En la primera fecha Edward O. Wilson publicó el libro titulado *Sociobiología: la nueva síntesis*, y en la segunda apareció el libro de Richard Dawkins *El gen egoísta*. La esencia de ambos planteamientos es ésta: las relaciones con nuestros semejantes están reguladas por el grado de parentesco; cuanto más consanguíneos seamos mayor será nuestra disposición a ayudar a otras personas. Wilson cree que sobre esta base tan sencilla se puede construir toda una ciencia del comportamiento social: la sociobiología. Las abejas y otros insectos himenópteros sociales, como las hormigas, y también las termitas (que están evolutivamente más alejadas), viven en colonias (colmenas, hor-

migueros, termiteros) donde sólo se reproduce un individuo, que es la reina. Las obreras renuncian a tener hijos propios, y a cambio se sacrifican (hasta la muerte) por las otras hijas de la reina, sus hermanas, o, en definitiva, por la colonia entera. Cuando una abeja nos pica y muere por ello está comportándose, en apariencia, de la forma más contraria a sus *intereses* (y a los de sus genes) que se pueda imaginar.

La explicación de tan absurdo comportamiento (por muy admirable que nos parezca una abeja kamikaze) está en el tipo de reproducción de estos insectos, donde las hembras tienen dos juegos de genes (son *diploides* como nosotros, con un juego de cromosomas procedente del padre y otro de la madre). En cambio, los machos sólo tienen un juego (son *haploides*). Como resultado de este singular sistema de herencia genética resulta que una abeja obrera comparte más genes con su hermana (las tres cuartas partes), que con sus propios hijos (la mitad), o que con su hermano (la cuarta parte). Por eso, en lugar de tener hijos las obreras *tienen* hermanas.

En el caso de estos insectos sociales (que son la especialidad de Wilson) parece que todo cuadra. En realidad fue el genético William D. Hamilton el verdadero autor de este razonamiento, pero Wilson va más lejos y sostiene que esta regla del parentesco también sería aplicable a los demás animales, e incluso en una posible sociobiología humana. Se cumpliría así el sueño de integrar las ciencias sociales en la teoría de la evolución (versión neodarwinista).

Pero si lo que hace que practiquemos el altruismo con nuestros parientes es que tenemos muchos genes en común, ¿por qué no olvidarnos directamente de los individuos y razonar sólo en términos de genes? Podemos elaborar entonces, como hace Richard Dawkins, la metá-

fora del *gen egoísta*: son en realidad los genes quienes tienen *intereses* e *intenciones*. Por eso van a veces en contra de la conveniencia de los individuos que los portan, y les obligan a prestar favores a otros individuos, o incluso a dar la vida por ellos. Este aparente altruismo es en realidad forzado, y no una auténtica libre elección. Es *como si* los genes manipularan nuestros deseos en sus propios beneficios. Es *como si* nos usaran. Es *como si* nosotros sólo fuéramos los vehículos que los transportan en su viaje eterno a través del tiempo. Es *como si* se sirvieran de nosotros para producir copias de sí mismos, o para favorecer a sus copias que son portadas por otros cuerpos, incluso con sacrificio de nuestras vidas si fuera necesario. ¿Qué padres no darían su vida por sus hijos? Y finalmente: ¿por qué no suprimir el *como si* y afirmar directamente que estamos al servicio de nuestros genes? El golpe bajo de la sociobiología y de la metáfora del gen egoísta al orgullo humano consiste en suponer que son los genes, y no la mente, quienes tienen el control. El capitán del barco cree que está al mando de la nave porque ordena las maniobras, pero el rumbo lo trazan otros: los genes, unos pasajeros muy, muy pequeños.

Edward O. Wilson y Richard Dawkins son neodarwinistas puros, porque están convencidos de que es la selección natural el motor (único) de la evolución y la responsable de las adaptaciones de los seres vivos. Para los neodarwinistas la mayor parte de las características de los organismos son adaptaciones. Como el comportamiento es también una forma (y muy importante) de adaptación, la conducta también habría sido objeto de selección en los animales. Desde que se conoce la existencia de los genes se sabe que ellos determinan en una gran parte el fenotipo de los individuos, incluyendo en el fenotipo no sólo la apariencia física, sino también el

comportamiento. ¿Pero pueden tratarse los rasgos de la conducta humana como si fueran características anatómicas, rasgos físicos? ¿Debemos hablar del comportamiento humano como de un todo o podemos descomponerlo en unidades de comportamiento cada una de ellas determinada (o co-determinada) por un gen distinto? ¿Hay genes concretos para cada una de nuestras aficiones, o inclinaciones, o vocaciones, o capacidades, o preferencias sexuales? Frente a la tendencia de los sociobiólogos a contestar afirmativamente a esta última pregunta, otros científicos, como Richard C. Lewontin, Steven Rose y Leon J. Kamin gritan a voz en cuello: ¡¡¡NO!!!

Pero todos los que tenemos mal oído o poca maña para las manualidades estamos convencidos de que es algo genético y de que no hay nada que hacer por mucho que vayamos al Conservatorio o a la Facultad de Bellas Artes. Muchos piensan que hay personas más dotadas que otras para el aprendizaje de los idiomas, como se comprueba a diario en clase, o para los deportes. Esa desmedida afición al bricolaje, o a la cocina, o a la caza, o al coleccionismo, o al fútbol, o al baile, o a las mujeres, o a los hombres, etc., etc., etc., que observamos en nuestros conocidos (y en nosotros), ¿cuánto tiene de innato? ¿Es verdad que a los niños les gustan, de forma natural, los soldaditos y las niñas prefieren las muñecas? ¿Qué hay de cierto en que los hombres se manejan mejor con los mapas y planos? Si esto es así, ¿estaremos más seguros si el avión lo pilota un hombre que si lo hace una mujer? ¿Son las mujeres generalmente mejores en el trato y en la comunicación verbal, es decir, en los trabajos de cara al público?

Los óvulos de los mamíferos son mucho más valiosos que los espermatozoides, por la sencilla razón de que en una población la proporción de unos y de otros está tre-

mendamente desequilibrada. Además, tiene que pasar un largo periodo de tiempo hasta que una hembra de mamífero portadora de un óvulo fecundado (o varios en las especies con múltiples crías) vuelva a estar en condiciones de ser fecundada de nuevo. Por ese motivo los comportamientos sexuales de machos y de hembras de mamíferos responden a *intereses* distintos, y se estudian desde el punto de vista del distinto *valor* del óvulo y del espermatozoide. ¿Es también ésa una óptica adecuada para los humanos? ¿*Tiende* el varón a fecundar el mayor número de mujeres posible, mientras que la mujer en cambio *aspira* a la estabilidad y la seguridad (independientemente de que luego ambos actúen, más o menos a regañadientes, de acuerdo con las convenciones de su cultura)?

Entre los mamíferos sociales hay con frecuencia una relación muy directa entre el estatus jurídico del macho y el tamaño de su progenie; cuanto más alto esté un macho en la jerarquía del grupo más probabilidades tendrá de acceder a hembras con óvulos preparados para ser fecundados. En muchas culturas humanas también se da o se ha dado esta regla. ¿Quiere eso decir que el hombre busca, por instinto, el poder y la mujer al poderoso? Si no es verdad que el varón sea por naturaleza más promiscuo que la mujer, ¿cómo se explica que la clientela de la prostitución y de la pornografía sea, universalmente, masculina? ¿Es simplemente una cuestión de educación y de cultura? No se trata con estas preguntas, por supuesto, de justificar el machismo, sino de ver si tiene una base biológica, sea grande o pequeña; pero en todo caso, y esto debe quedar muy claro, la biología no será nunca la diosa que decreta nuestra escala de valores.

Cada uno tiene su respuesta a estas y otras preguntas por el estilo, pero muchos piensan que por lo menos al-

gunos rasgos de la personalidad se heredan. También sabemos que, desgraciadamente, también son hereditarias en algún grado ciertas enfermedades mentales, como la esquizofrenia. Y la pregunta de auténtico significado moral es ésta: si es verdad que hay genes específicos detrás de muchos de los rasgos de nuestra personalidad, y dado que se avanza a toda velocidad en el conocimiento del genoma, ¿se llegará algún día, quizá no muy lejano, a conocer qué genes son éstos? Si es así, ¿serán los seres humanos clasificados, y algunos discriminados, por su constitución genética? Éstas son graves cuestiones, que merecen que les dediquemos un poco de atención.

El darwinismo social

Los que se oponen a la sociobiología temen ver resucitado el fantasma del darwinismo social, esto es, la idea de que por el bien de la especie se justifica la lucha entre clases sociales, o entre pueblos. Y dándole la vuelta al argumento, los ricos (personas y pueblos) serían, en virtud de haberse impuesto a los débiles, los más fuertes, los mejor adaptados. Y si los rasgos de la conducta humana están tan rígidamente programados, ¿serán los socialmente triunfadores los mejores en inteligencia, temperamento y moralidad? El darwinismo social se preocupaba por las *nefastas* consecuencias que tendría para la especie el que se relajara la selección natural, y se permitiera que los peor dotados se reprodujeran tanto o más que los miembros superiores de la raza humana. Ni que decir tiene que ayudar a los perdedores en la lucha por la vida sería oponerse a la acción de la selección natural, y por lo tanto significaría ir *contra natura*.

Pero el darwinismo social era en realidad una trampa. Proclamaba la igualdad de oportunidades y el *laissez faire* como doctrina política. Anunciaba que de la lucha entre los individuos saldrían los mejores, los líderes que deberían guiar a la sociedad en beneficio de todos. Pero en realidad no se deseaba que se produjera esa selección natural en igualdad de oportunidades, por ejemplo en el terreno de la educación. No se trataba de que todos los niños tuvieran el mismo ambiente para desarrollar sus aptitudes y ver quién era mejor, sino que se daba por hecho que esa competencia ya había ocurrido en el pasado, y que las clases y pueblos dominantes ya habían demostrado suficientemente su aplastante superioridad.

La supuesta diferencia natural entre unos humanos y otros no sólo era de orden intelectual, sino también moral. Los alumnos de Oxford y de Cambridge eran, ya antes de entrar en la universidad, los mejores y los más virtuosos. Un caballero no era únicamente más listo que su criado o que un *salvaje*, sino que también era, por naturaleza, más valiente, más justo, más honrado y más decente. La vida de las clases y pueblos inferiores estaba más gobernada por sus desordenadas bajas pasiones, sin apenas freno moral, que por su razón. Como la inteligencia, la moral también había evolucionado, y no todos (los pueblos, las personas, los sexos) habían alcanzado el mismo nivel. El producto de tan larga y beneficiosa actividad de la selección natural no podía echarse a perder en poco tiempo con igualitarismos antinaturales que podrían poner en peligro el futuro de la humanidad. Si nos llegaran a gobernar los menos evolucionados en moral e inteligencia, ¿qué sería de nosotros?

En su primera edición de *El origen de las especies*, de 1859, Charles Darwin definía la selección natural como

«la lucha por la vida». Más adelante completó la definición de la selección natural con la frase «la supervivencia de los mejor adaptados» acuñada en 1864 (en *Principles of Biology*) por el sociólogo y filósofo inglés Herbert Spencer (1820-1903), con lo que quedó como «la lucha por la vida o la supervivencia de los mejor adaptados». Fue esta expresión de Spencer («*survival of the fittest*») la que permitió trasladar el darwinismo a la sociología, por lo que debería hablarse de spencerismo social mejor que de darwinismo social [por cierto que Spencer defendió la evolución de las especies antes que Darwin, pero su pensamiento era lamarckista; después de *El origen de las especies*, Spencer aceptó igualmente la selección natural como (otro) mecanismo explicativo de la evolución].

Hubo un importante filósofo inglés y teórico político muy anterior a Darwin que también interpretó las sociedades humanas como resultado de las luchas entre los individuos. Se trata de Thomas Hobbes (1588-1679), autor del libro *Leviatán* (1651). Hobbes estaba impresionado por el método de Galileo (a quien trató en 1636 en Arcetri) de reducir un sistema a sus elementos y de explicarlo mecánicamente en términos de movimientos de los cuerpos, y así lo quiso hacer con la sociedad humana, que descompuso en individuos para luego poder entender el conjunto; es decir, la máquina social podía ser estudiada del mismo modo que la física estudiaba la máquina celeste. Al adoptar un punto de partida matemático, Hobbes se apartaba del método de Bacon, que (como vimos) consistía en la experimentación y en la inducción sin modelo previo.

El punto de vista de Hobbes es similar al razonamiento mecanicista que utiliza Galileo para explicar los sistemas naturales, porque para Hobbes las manifestaciones so-

ciales son simplemente una consecuencia de las interacciones entre los individuos; no están en la naturaleza de los propios individuos, tomados de uno en uno, sino que resultan de sus relaciones. Los individuos no tienen en principio interés en vivir en sociedad (y carecen de conceptos morales), pero se ven forzados a ello a causa de la limitación de los recursos, ya que todos aspiran a las mismas cosas y no hay suficiente cantidad disponible. Entonces nace la agresión, la inseguridad, la desconfianza y el odio. Eso hace que forzado por las circunstancias el ser humano se convierta, en estado natural (*status naturae*), en un lobo para los demás humanos (*homo homini lupus*), aunque no sea por sí mismo competitivo.

El propio padre de Thomas Hobbes, un párroco anglicano, era un hombre violento que mató a puñetazos a otro eclesiástico a la puerta de la iglesia, por lo que se vio obligado a marcharse abandonando a sus tres hijos al cuidado de su hermano. Thomas nació prematuramente por la impresión recibida por su madre al ver entrar tropas enemigas en el pueblo, y una parte importante de su vida la pasó en el destierro a causa de la Revolución Inglesa. Hobbes, al parecer, no estaba en buenas relaciones con ninguna de las dos partes en el conflicto: el rey Carlos I y los constitucionalistas (el primero perdió su cabeza en 1649). Todas estas manifestaciones de la violencia humana pudieron influir en su pensamiento.

Hobbes parte de la supremacía del derecho (*jus*) del individuo, es decir, su libertad, sobre la ley (*lex*), o sea, la obligación; pero para poder vivir con seguridad, los hombres deciden vivir en sociedad (*status civilis*) y para ello llegan libremente al acuerdo de transferir sus derechos al estado absoluto, que se convierte así en un monstruo de poderes ilimitados comparable al Leviatán, una bestia bíblica. El Leviatán de Hobbes es un superorganismo,

una máquina compuesta por todos los individuos agrupados. El Leviatán (la *commonwealth* en inglés, *civitas* en latín, o Estado) es como un hombre artificial, aunque de mayor tamaño y fuerza para que pueda prestar las funciones de protección y defensa para las que fue creado. La Corona sería como un alma artificial, que le da vida y movimiento al cuerpo social.

En la naturaleza el *bellum omnium contra omnes* (la lucha de todos contra todos) de Hobbes es inevitable, no por inclinación de los individuos, sino por la escasez de los recursos. Así es como se produce la selección natural de Darwin, y como se garantiza la supervivencia de los mejor adaptados que defendía Spencer.

Si en el origen de las teorías evolucionistas hay influencia de filósofos y sociólogos como Hobbes y Malthus, el darwinismo o spencerismo social parece haber hecho el camino a la inversa, y trasladar los principios de la biología a la sociología. El filósofo socialista alemán Friedrich Engels era darwinista, pero ello no le impidió observar el peligro de este razonamiento de ida y vuelta, en el que determinadas teorías políticas individualistas son convertidas en leyes de obligada aplicación a las sociedades humanas después de su paso por las ciencias naturales.

Intentemos despojar de toda ideología a nuestra empresa científica de buscar las bases biológicas en la conducta humana. Empecemos para ello por preguntarnos: ¿existen?

Los circuitos integrados del cerebro

Para los psicólogos conductistas, con Skinner a la cabeza, todo lo que hay que investigar en los animales y en los humanos son los acontecimientos que modifican la

probabilidad de las respuestas. El comportamiento de un individuo sería para esta escuela ambientalista sólo el resultado de los refuerzos o debilitamientos de las respuestas voluntarias que ha experimentado el sujeto a lo largo de su vida a causa de los premios y castigos que ha recibido. Somos únicamente el producto de nuestras biografías, porque nacemos sin ninguna programación de la conducta: es la vida misma la que nos programa, y la educación basada en la recompensa y en el castigo (o en la ausencia de recompensa).

El extremo opuesto (del que se acusa a algunos sociobiólogos radicales) sería el de que todos los aspectos relevantes de la conducta animal, y de la *personalidad* en el caso de las *personas*, están condicionados en mayor o menor medida por los genes. Vendríamos así al mundo con unas programaciones bastante rígidas de la conducta; estaríamos básicamente pre-programados.

Un poco entre ambos extremos se sitúan los etólogos. Para éstos existen pre-programaciones en la forma en la que los animales conocen el mundo. Los datos de la realidad extra-subjetiva (el mundo llamado real) les llegan filtrados, de modo que sólo son percibidos aquellos que tienen interés para el sujeto. Algunos estímulos motivadores desencadenan reacciones inmediatas en el individuo, pero también existen impulsos internos (pulsiones) que los llevan a buscar los estímulos necesarios para que se produzcan determinados comportamientos (sobre todo cuando éstos llevan largo tiempo sin ejecutarse). Además, existen programas genéticos que permiten el aprendizaje y lo encauzan. No todo se asimila, sino sólo lo oportuno para la supervivencia y la reproducción del individuo. En algunos casos muy llamativos el aprendizaje toma la forma de una estampación, y el animal

queda marcado para siempre por una especie de impronta que recibe en un momento sensible de la vida.

Pero, ¿cómo saber si todas estas pre-programaciones existen también en el ser humano? Eibl-Eibesfeldt ha estudiado los universales humanos, es decir, las pautas que se dan en todas las culturas, incluso en aquellas tan remotas que nunca habían sido *contactadas* por los occidentales. Algunos de estos comportamientos se encuentran también en lactantes y en niños sordomudos y ciegos, que desgraciadamente apenas pueden relacionarse con otras personas. Además, a veces se observan también en otros primates. Estas pautas universales son, probablemente, innatas: se nace con ellas.

Según las investigaciones de los etólogos humanos existen pre-programaciones en el ser humano no muy diferentes de las de los animales que nos son más cercanos. Para empezar, muchas de nuestras expresiones (el lenguaje del cuerpo) son innatas, como ya había observado el propio Darwin. Hay también un componente genético en la agresividad humana, especialmente frente al extraño. La jerarquía y el territorio son, como en otras especies de animales sociales, fuente de conflicto.

Pero en modo alguno quiere esto decir que la agresión sea inevitable y se deba aceptar con fatalismo como una lacra permanente y eterna. Por el contrario, somos una especie por lo general bastante poco agresiva excepto, como ya se ha comentado, cuando intervienen las ideologías. De hecho, existen inhibiciones muy fuertes en los humanos en contra del asesinato. Igual que disponemos de un repertorio de gestos agresivos, se dan en nuestra especie, como en otras especies sociales, gestos de saludo y de apaciguamiento que bloquean al agresor (pero que, naturalmente, no pueden actuar cuando se mata a tanta distancia que no se llega a ver a la víctima).

Por supuesto, no hay nada mejor para acabar con la agresión que la educación para la convivencia basada en el conocimiento mutuo; así es como el extraño (por extranjero o por diferente) deja de producir miedo o ira, y se rompe la igualdad extraño = enemigo. Como decía el genético J. B. S. Haldane, si no podemos evitar preferir al hermano y desconfiar del forastero, lo mejor será predicar la fraternidad universal, como hacen las religiones. Si nos convencemos de que todos somos hermanos será más fácil que nos llevemos bien. Y hay un experimento muy reciente que alimenta nuestras esperanzas de conseguirlo.

Los investigadores que lo han llevado a cabo son Robert Kurzban, John Tooby y Leda Cosmides, del Centro de Psicología Evolucionista de la Universidad de California en Santa Bárbara. La psicología evolucionista es una rama de la psicología que aplica la lógica de la teoría de la evolución como herramienta para abordar los problemas. Los investigadores californianos estaban interesados en las categorías básicas en las que los seres humanos clasifican, de manera automática e imperativa, a sus semejantes cuando se encuentran con ellos por primera vez. Tradicionalmente se consideraba que las tres dimensiones *primitivas* o *primarias* que usamos para categorizar personas desconocidas eran sexo, edad y raza. Estas tres dimensiones serían independientes entre sí y suficientes, es decir, nuestra mente las computaría sin necesidad de añadir ninguna otra información; por ejemplo, nos servirían para recordar que la nueva vecina es una mujer joven negra.

Durante mucho tiempo se han buscado las condiciones en las que la raza no sea tenida en cuenta para categorizar (para codificar) a las personas, pero sin éxito. Si fuera una realidad innegable que la raza es una categoría

natural para nuestros cerebros habría razones para preocuparse, porque el simple acto de clasificar individuos en dos grupos (nosotros y ellos) predispone a los seres humanos en favor del grupo propio y en contra del ajeno. Aun así tendríamos la obligación moral de combatir con todas nuestras fuerzas el racismo, incluso en contra de nuestra maquinaria neurocomputacional. Pero, ¿seguro que es así de difícil?

Los mencionados psicólogos de la evolución se preguntaban por qué la raza es una dimensión primaria del ser humano. La razón por la que nuestra mente estaría pre-programada para establecer estas tres categorías es la de que son buenos indicadores para predecir el comportamiento de un extraño, y por lo tanto tienen valor adaptativo en el medio social en el que el ser humano tiene que valerse. En otras palabras, sabemos, más o menos, qué podemos esperar de un niño(a), de un adulto(a) o de un anciano(a), pero ¿qué valor predictivo tiene conocer la raza? Sobre todo teniendo en cuenta que nuestra especie es tan poco variable que no puede hablarse propiamente de razas, ya que la mayor parte de la variación genética se da *dentro* de las poblaciones y no *entre* las poblaciones. Y considerando además que esos ligeros cambios que existen en la apariencia humana se suceden de una manera muy gradual en la geografía (la pigmentación, por ejemplo, no pasa bruscamente del blanco de los escandinavos al negro de los subsaharianos, sino que hay tonos intermedios en las tierras situadas entre una y otra región). Finalmente, dado que la movilidad de las poblaciones prehistóricas sería necesariamente limitada, ¿qué probabilidad tendría entonces una persona de encontrarse con otra de aspecto realmente distinto?

En consecuencia, estos autores plantearon la hipótesis de que ninguna parte de la arquitectura cognitiva humana estaba adaptada para codificar la raza, y que las observaciones que anteriormente parecían indicar que la raza era una categoría que se codificaba automáticamente, querían decir en realidad otra cosa. Los cazadores y recolectores prehistóricos vivían en bandas, y las bandas entrarían en conflicto unas con otras con cierta frecuencia (algo que se ha observado en poblaciones humanas modernas con este tipo de economía y que también les ocurre a los chimpancés). Tendría por ello mucho valor adaptativo la capacidad de detectar las alianzas, y así habría surgido por evolución una maquinaria neurocognitiva que computa la pertenencia de un extraño a una u otra alianza en orden de predecir su comportamiento. En consecuencia, sería el grupo y no la raza la categoría a codificar. Los resultados obtenidos en los experimentos clásicos que apuntaban a que la raza era una dimensión primaria se debían a que en los diseños experimentales la raza coincidía con el grupo, algo que sin duda también ocurriría en la prehistoria en algunas regiones fronterizas en las que coincidieran dos poblaciones humanas diferentes (como los esquimales y los indios en la actualidad, por ejemplo), pero que no sería la situación más frecuente.

Si esta hipótesis fuera cierta se debería poder demostrar experimentalmente que la pertenencia a un grupo tiene más fuerza a la hora de catalogar a las personas desconocidas que las diferencias en el color de la piel u otros rasgos raciales.

Kurzban y sus colegas llevaron a cabo una serie de experimentos encaminados a probar su hipótesis, que en esencia consistían en hacer que unos sujetos presenciaran una discusión entre dos grupos de personas. En am-

bos equipos había blancos y negros, y la pertenencia a un equipo u otro se hacía explícita por señales inequívocas de varios tipos. A continuación se interrogaba a los observadores acerca de la discusión con preguntas del tipo «quién dijo qué». Si los observadores categorizaran por raza, los errores de atribución de una frase a una persona equivocada se producirían entre individuos de la misma raza, pero lo que se demostró fue lo contrario. Las confusiones se daban más frecuentemente entre personas del mismo equipo.

El resultado final del experimento fue que habían bastado menos de cuatro minutos para que las barreras raciales se borrarán y afloraran las identidades de grupo. El color de la piel y demás rasgos que diferencian a las poblaciones no establecen categorías naturales a la hora de clasificar a los seres humanos, como no lo es el color del pelo o la forma de la nariz entre españoles. El cerebro sí toma, en cambio, buena nota de quién (sea moreno, pelirrojo o rubio) va con quién en el juego de la vida. Sin necesidad de recurrir a refinados experimentos, creemos que los deportes de equipo demuestran que la rivalidad entre razas sólo existe cuando los equipos son homogéneos racialmente, pero en cambio nadie (afortunadamente) repara en el *color* de la piel del jugador que marca el gol si es de su equipo y lleva sus *colores*.

Hay como vemos argumentos que apuntan a que existen ciertas preprogramaciones en la categorización de extraños, pero, además, parecen existir pre-programaciones importantes en el aprendizaje humano, en particular en el del lenguaje. Según el lingüista Noam Chomsky todos los idiomas tienen una base común, porque existen unas reglas universales del lenguaje. Los niños nacen con estructuras neuronales en su cerebro que les permiten aprender muy temprano algo tan

difícil como un idioma, mucho antes de que sepan multiplicar, por ejemplo. Se diría que el lenguaje es algo natural en ellos y en cambio la aritmética no lo es. Pero esas programaciones están abiertas, y no codifican qué idioma en concreto hablará el niño; sólo determinan la estructura básica, que es, según Chomsky, común a todos los idiomas.

Darwin discurría, mucho antes, en términos no muy diferentes de los de Chomsky: «Observa Horne Took, uno de los fundadores de la insigne ciencia de la filología, que el lenguaje es un arte, lo mismo que la destilación de la cerveza o el cocimiento del pan; mejor hubiera sido compararlo con la escritura; pero ciertamente no es un instinto, porque el lenguaje tiene que aprenderse. Se aparta mucho, no obstante, de todas las artes ordinarias porque el hombre muestra tendencia instintiva al habla, como vemos en el balbucear de nuestros hijos, que, en cambio, no acusan ninguna tendencia instintiva a destilar cerveza, a cocer pan o a escribir.»

La teoría elaborada por el lingüista Chomsky en los años cincuenta del siglo XX recibió pronto apoyo por parte del neurólogo Eric Lenneberg, quien observó que en algunos niños que tenían deficiencias en el lenguaje parecía haber un componente notable de herencia, porque ciertos casos se repetían en determinadas familias. La importancia de estos estudios estaba en que sugerían la existencia de algo así como un *órgano para el lenguaje*, es decir, unas redes de neuronas que ya están formadas antes de que el niño empiece a hablar (precisamente para hacer posible que aprenda un idioma). Esta pre-programación sería innata o, dicho de otro modo, pertenecería al *hardware* y no al *software* del cerebro. La hipótesis contraria es la de que la capacidad para el lenguaje no es una facultad independiente sino que forma

parte de un conjunto más amplio de destrezas que podemos denominar *inteligencia general*, y que puede ser medida por tests psicológicos como el famoso *cociente de inteligencia* (CI).

Recientemente se han obtenido unos resultados que podrían darle la razón a Chomsky. En 1990 se descubrió una familia amplia en la que se presentaba, a lo largo de tres generaciones, un tipo especial de dificultad para el lenguaje, tanto a la hora de producirlo como a la de entenderlo. Los afectados parecen ser incapaces de aplicar algunas reglas elementales del lenguaje que un niño normal lleva a cabo sin pensarlo; no es sólo un problema de habla. En total se estudiaron genéticamente veintisiete individuos (de un total de treinta y siete) de los cuales quince presentaban trastornos lingüísticos.

La dificultad para el lenguaje de la familia en cuestión no puede ser tampoco la consecuencia de una inteligencia baja, porque algunos de los afectados obtenían puntuaciones en los tests de inteligencia que entraban dentro de la normalidad, y que eran superiores a las puntuaciones de otros miembros no afectados de la misma familia.

En 1998, los investigadores relacionaron el defecto en el lenguaje de esa familia con un pequeño segmento del cromosoma 7 (un cromosoma *autosómico* o no sexual), que nombraron como SPCH1. Finalmente, en octubre del año 2001 un equipo encabezado por Cecilia S. L. Lai y Simon E. Fisher hacía público el descubrimiento del gen responsable del problema lingüístico; la identificación se pudo hacer gracias a que el mismo problema lo tenía un miembro de otra familia que presentaba una alteración cromosómica que partía ese gen (una *translocación*). Se trata del gen FOXP2 y el trastorno se debe a una mutación que afecta a una base (adenina en lugar de guanina) de la cadena de nucleótidos del gen (y en

una sola hebra de la doble hélice del ADN). El resultado es el cambio en un elemento en la cadena de aminoácidos de la proteína para la que codifica el gen FOXP2, que posiblemente altera su función.

El gen parece expresarse fuertemente en el desarrollo fetal del cerebro (entre otros lugares) y se sabe positivamente que el gen homólogo de los ratones se expresa en el desarrollo de la corteza cerebral en embriones. La conclusión a la que llegan los investigadores es que los efectos de la mutación tienen lugar en un momento crucial de la embriogénesis, produciendo el desarrollo anormal de estructuras neuronales que son importantes para el lenguaje y el habla.

Hay por lo tanto razones para sospechar que la mutación no acarrea simplemente trastornos cerebrales *generales* que afectan *también* al lenguaje, sino que en realidad impide que se complete la formación del supuesto *órgano para el lenguaje* de Chomsky.

El Proyecto Genoma Humano empieza pues a dar sus frutos en el campo de la *genética cognitiva*. Pronto veremos hasta dónde es posible llegar por esta vía en el conocimiento de las bases biológicas de la mente humana.

Cómo freír un par de huevos

Cuando en un capítulo anterior nos ocupamos del asunto de la autorreplicación, hicimos referencia al problema principal que presenta, esto es, la autodescripción. Un organismo no puede construir otro igual a sí mismo si no cuenta con un plano sobre el que trabajar, en el que esté dibujado el diseño final hasta el último detalle. En lugar de un dibujo, la autodescripción podría estar contenida

en un texto, aunque entonces la cantidad de papel utilizado tendría que ser mayor, porque ya se sabe que una imagen vale por mil palabras. Esto es cierto para las posibles máquinas autorreplicantes del futuro, pero en el caso de los seres vivos con reproducción sexual, sean plantas o animales, el problema es bastante distinto. No se trata ahora de que un individuo albergue en su interior una descripción en la que se pueda basar para hacer una copia de sí mismo, sino que nos encontramos ante otra situación: una célula sexual masculina y otra femenina se unen para formar una célula huevo o cigoto que contiene en su núcleo toda la información necesaria para construir un adulto; es decir, el nuevo individuo se ensamblará a sí mismo a partir de su primera célula en un proceso que se denomina desarrollo.

¿Cómo es posible el milagro del desarrollo? Una antigua teoría que lo explicaba era la de la *preformación*, que consistía en que en el cigoto o célula huevo de un animal estaba contenido completo el individuo adulto con todas sus características, sólo que en versión microscópica; literalmente, el cigoto cobijaría una miniatura del adulto con todas sus partes. El proceso del desarrollo sería en realidad una simple expansión del cigoto, un mero cambio de escala (los preformacionistas llamaban *evolución* a este despliegue). A la doctrina de la preformación se enfrentaba la de la *epigénesis* que sostenía que el embrión no está preformado en el huevo, sino que se configura (partiendo de una masa informe) a lo largo de una serie de etapas en las que va tomando el aspecto del adulto. Ese desarrollo ordenado era producido por una fuerza llamada *vis essentialis*, que tenía que ser necesariamente distinta para cada especie. La moderna biología del desarrollo ha demostrado que ambas escuelas estaban en parte en lo cierto y también parcialmente equivocadas. Efectivamente, no había un *homúnculo* (una mi-

niatura de hombre) en nuestro cigoto, sino que nos fuimos formando a lo largo de la embriogénesis; en esto tenían razón los epigenetistas. Pero, en su contra, no existe una fuerza exterior o *vis* que encauce la embriogénesis para producir un adulto humano, o de mono, o de rana, sino que el desarrollo ordenado se debe a un elemento preformado, el programa genético del ADN.

El científico italiano Lazzaro Spallanzani estudió con mucho detalle el mundo de las células y, como ya hemos visto, fue un precursor de Louis Pasteur en su oposición a la teoría de la generación espontánea. A Spallanzani le interesaba entender el papel que tenían en la reproducción los espermatozoides, que habían sido descubiertos en 1677 por el holandés Antoine van Leeuwenhoek. Junto con su amigo el naturalista y filósofo suizo Charles Bonnet (1720-1793), Spallanzani elaboró una versión propia de la teoría de la preformación. Según ella, los gérmenes de todos los seres vivos pasados, presentes y futuros, fueron creados por Dios y encerrados en la primera hembra de cada especie. Los nuevos individuos que nacen se desarrollan a partir de un huevo que existe desde el principio de los tiempos (aunque el semen del padre proporciona, por contacto, un estímulo para el desarrollo). En otras palabras, cada hembra contiene dentro de sus células sexuales una serie infinita de individuos preformados, lo que garantiza la inalterabilidad de las especies en el futuro.

Bonnet y Spallanzani sorteaban así el obstáculo de la regresión infinita, que tan peliagudo nos resultaba cuando nos planteábamos cómo se podrían construir autómatas autorreplicantes. En los términos de Bonnet y Spallanzani, el autómata tendría que contener un huevo con otro autómata en miniatura dentro. Ese minúsculo autómata aumentaría de tamaño hasta hacerse un autómata

adulto; pero entonces ¿cómo podría haber una tercera generación de autómatas? La solución es ésta: el autómata hijo también contiene un huevo con autómata, y éste a su vez otro, etc. En otras palabras, como en las muñecas rusas, el primer autómata tiene que portar los huevos (encajados unos dentro de otros) de todos los autómatas que vayan a existir (tantos como generaciones estén previstas hasta el final de la serie de autómatas).

En el caso de los seres vivos ya se habría ocupado el Creador de que nuestro huevo estuviera dentro del huevo de nuestra madre, que a su vez estaba dentro del de nuestra abuela, que estaba dentro del de nuestra bisabuela, y así hasta Eva.

Sabemos ahora que el cigoto contiene tanto los genes del padre como los de la madre, pero en la base de la idea de que la personalidad se hereda en todos sus detalles, yace el modelo preformacionista, el de que en la primera célula está un adulto en miniatura. No por supuesto con una forma de adulto que pueda ser reconocida mirando por el microscopio, pero sí en forma de planos, que a fin de cuentas describen con todo detalle el diseño del edificio o de la máquina que se quiere construir; un plano es un proyecto de algo, como un cigoto lo es de un adulto. El desarrollo sería, por lo tanto, un proceso de lectura y ejecución de esos planos con la máxima fidelidad posible. Cada gen se correspondería con un rasgo, del mismo modo que cada detalle del plano se traduce en una parte del edificio o de la máquina. O dicho de otro modo: todo lo que está en el resultado está en el proyecto, y todo lo que está en el proyecto se hace realidad.

El gran genético ruso Theodosius Dobzhansky explicaba de otra manera el mismo erróneo concepto. Cuando se

afirma que heredamos del padre o de la madre determinado rasgo de nuestra personalidad o de nuestro físico estamos imaginando que la herencia biológica es del mismo tipo que la herencia de las leyes humanas, que regulan la transmisión de bienes de padres a hijos. En definitiva, desde que se constituye un nuevo ser, en el mismo cigoto, ya estarían presentes (*preformados*) e inalterables todos los rasgos, heredados, que van a configurar al adulto. Al heredar un gen del padre o de la madre estaríamos heredando, al mismo tiempo, el rasgo para el que el gen codifica. Si eso fuera así, nuestros rasgos de carácter y nuestros talentos estarían totalmente determinados desde la cuna (desde el cigoto, en realidad), y no podríamos ser libres. Pero, añadía Dobzhansky, las leyes de la herencia biológica no son como las leyes que regulan la herencia humana. No recibimos nuestras características como nos llega una silla o un cuadro que fueron del abuelo.

Un óvulo humano tiene un diámetro de 0,1 milímetros, y pesa 0,0015 miligramos. El factor por el que hay que multiplicar el peso de un óvulo para obtener el de una persona adulta normal es asombroso: unos cincuenta mil millones. H. J. Muller, citado por Dobzhansky, calculaba que todos los óvulos que dieron lugar a la humanidad completa existente (que era entonces de 2.500 millones de personas) cabrían fácilmente en un recipiente de un galón de capacidad (menos de cuatro litros). El número correspondiente de espermatozoides ocuparía un volumen mucho menor, ¡inferior al de una aspirina! En el cigoto, los espermatozoides y los óvulos, pese a su gran diferencia de tamaño, aportan la misma cantidad de genes. La suma de todos los genes de todas las células sexuales que han dado lugar a la totalidad de la población (los 2.500 millones de humanos de la época de Muller) cabrían ¡en una cápsula de vitaminas! Pues bien,

esa pequeñísima masa es el patrimonio genético de la humanidad, la herencia de unos 3.800 millones de años de evolución, y la base para el futuro de nuestra especie.

Para aumentar de peso cincuenta mil millones de veces, el cigoto tiene que fabricarse un cuerpo obteniendo los recursos del ambiente, y también la energía necesaria para crecer y para vivir. Ningún operario va a leer un plano contenido en el genoma para hacer un cuerpo, sino que los genes tienen que funcionar como un programa de desarrollo, es decir, un conjunto de instrucciones para el crecimiento. Por eso, el genoma no puede ser una autodescripción del tipo de un plano, sino que ha de parecerse más a una receta, es decir, un conjunto de instrucciones que dice cómo utilizar cosas que están en el ambiente para llegar a un resultado que está previsto sólo hasta cierto punto.

La receta para un par de huevos fritos con patatas no es lo mismo que una foto de un plato de huevos fritos con patatas, sino que es una descripción muy mecánica de una secuencia de movimientos (suponemos que no hace falta explicarlos...). El éxito del *plato* final depende de que se sigan adecuadamente los pasos que hay que dar, en la secuencia correcta y con los materiales apropiados, a pesar de lo cual no hay dos platos iguales de huevos fritos; el resultado varía con el tipo de huevos, de patatas, de aceite, la cantidad de sal, etc. (más otros muchos factores puramente aleatorios que afectan también al resultado). Aunque la *receta genética* encauza el desarrollo, y lo hace posible, no entra en los infinitos detalles que se refieren a los materiales que son necesarios para pasar del óvulo fecundado al adulto. Por ese motivo ni siquiera los gemelos que proceden del mismo óvulo y del mismo espermatozoide (y por lo tanto son clónicos) son iguales físicamente. La calidad del ambiente influye en el fenoti-

po que se construye a partir del genotipo. Y por *calidad del ambiente* no se entiende sólo el sustento material, sino también el espiritual. Tampoco los gemelos son psicológicamente clónicos.

La razón histórica de don José

Nuestro mejor filósofo, José Ortega y Gasset (1883-1955), escribió páginas profundas sobre el carácter del ser humano. Para él la vida nos es dada porque no nos la debemos a nosotros mismos, sino que nos encontramos un día ante ella. Pero la vida no nos es dada hecha, ya terminada, sino que tenemos que hacérsela cada uno de nosotros, por lo que la vida es quehacer. Tenemos que estar siempre haciendo algo (la vida se conjuga en gerundio), y nos vemos obligados a decidir continuamente. Lo que pasa es que cualquier decisión le es imposible al hombre si no posee algunas convicciones sobre lo que son las cosas, los otros hombres, y él mismo. Sólo a partir de esas convicciones puede el hombre preferir una acción a otra, y puesto que vivir es decidir, gracias a sus convicciones puede el hombre vivir.

Ortega pensaba en su tiempo que se había cerrado un largo ciclo de fe en la razón que se inició a finales del siglo XVI, y que a su vez cancelaba la fe religiosa que había caracterizado la Edad Media y que se fundaba en la creencia de que la revelación bastaba para entender el mundo. La fe en la razón del Barroco no conocía límites, y la solución a todos los problemas se consideraba a su alcance. El nacimiento de la Edad Moderna en los siglos XV y XVI no se produjo sin dolores de parto, y el siglo XX asistiría, según el maestro Ortega, a una crisis parecida.

¿Cuál sería la causa de esta desazón que contemplaba Ortega? Pues que las ciencias, tanto las naturales como las sociales, habían fracasado en su intento de comprender la naturaleza humana. El fundamento de la fe en la razón del Barroco está en que el hombre de Occidente cree que el mundo tiene una organización racional que coincide con la estructura del intelecto humano y que puede ser expresada matemáticamente. El método científico, que adoptaron la física, la química y más tarde la biología, se sustenta sobre esa base, que es la misma que asimilaron luego las llamadas ciencias del espíritu. Pero Ortega piensa que, como ocurriera antes con la razón religiosa, la razón física y la razón biológica tampoco tienen nada que decir sobre el hombre, por lo que se impone construir una razón vital e histórica. La causa para Ortega de que ninguna de las ciencias haya conseguido penetrar en la naturaleza humana es bien sencilla: el hombre no tiene naturaleza, sino que tiene historia. Nuestros comportamientos no están condicionados por nuestros genes, sino por el devenir histórico en el que se han ido fraguando las convicciones con las que ahora pensamos y que antes pensaron otros.

Ortega escribía en momentos de sufrimientos espantosos de la humanidad y la incapacidad de la ciencia para ponerles coto debía de atormentarle como a tantos otros pensadores del terrible siglo XX (sin que, por cierto, parece que vayan a cambiar mucho las cosas en este siglo XXI recién nacido). Si la fe en la ciencia fue desmedida, eso no quiere decir que no se haya avanzado mucho, muchísimo, en el conocimiento de la naturaleza humana que tiene, pensamos, una parte importante de biología. El ambientalismo radical de Ortega parece hoy excesivo, pero acertaba el maestro cuando decía que las ideas condicionan nuestra manera de percibir el mundo, de entendernos y de entender a los demás hombres.

Konrad Lorenz estudió a lo largo de muchos años cómo trabaja el aparato cognitivo con el que nacemos, que está formado por los órganos de los sentidos y el sistema nervioso central; ese sistema biológico es responsable de nuestra representación interna del mundo, que desde luego no es una copia del mundo real. Pero además Lorenz reconocía la existencia de otro filtro a través del cual vemos la realidad, otro aparato cognitivo que estaría formado por la cultura que adquirimos cuando nos socializamos. También la cultura, producto de la historia (como señalaba Ortega) nos hace ver unas cosas y nos oculta otras; también es un filtro de estímulos (superpuesto al biológico).

Y ésta es la realidad a la que tenemos que enfrentarnos: según Ortega el hombre tiene que *estar* siempre en alguna creencia; las creencias constituyen el suelo de nuestra vida. Solemos decir que *tenemos* determinadas ideas, «pero nuestras creencias, más que tenerlas las somos».

Richard Dawkins no sólo formuló la teoría del gen egoísta, que concede el protagonismo en la existencia de los individuos a unos *replicantes* (o *replicadores*), los genes, que anidan en el interior de sus células. Para nosotros, los humanos, Dawkins concibió otra metáfora no menos inquietante, que se refiere a unos replicantes que habitan en nuestros cerebros. Se trata de lo que este autor llamó los *memes* (palabra que es un híbrido entre *imitador* y *gen*). Por meme se entiende cualquier elemento cultural susceptible de ser imitado. Son ejemplos de memes que pone Dawkins las «tonadas o sonos, ideas, consignas, modas de vestir, formas de fabricar vasijas o de construir arcos».

La atrevida idea de Dawkins es que los memes se copian como los genes, y saltan así, igual que ellos, de

unos cuerpos a otros, perpetuándose. Los memes son, si se quiere, huéspedes de nuestros cerebros. Cuando alguien planta un meme en otro cerebro, literalmente lo *infecta*, convirtiendo ese cerebro en un vehículo de propagación del meme. Se trata de algo muy parecido a lo que sucede con los virus que parasitan las células, y que no pueden reproducirse sin ellas, o por poner un ejemplo más actual, los memes se comportan como los virus de los ordenadores. Si los organismos son según Dawkins meras «máquinas para la supervivencia de los genes», los humanos somos también (y esto es lo que nos hace diferentes) *máquinas para la supervivencia de los memes*.

De un cerebro a otro los memes pueden viajar de muchas maneras, empezando por la conversación y la observación; y por supuesto, los modernos medios de comunicación (escritos, audiovisuales, digitales) han ampliado enormemente su capacidad y rapidez de expansión. También pueden permanecer durmientes en muchos tipos de soportes, como el papel de los libros, la piedra de una inscripción, la cinta de video, la película fotográfica, el disco compacto, el ordenador; pero para replicarse tienen necesariamente que acceder a una mente humana. En realidad la duración de la existencia de un meme no depende tanto de su longevidad, es decir, de lo que resista inscrito en un mismo soporte, sea un papel, una piedra, un ordenador o un cerebro, sino de su fecundidad, o sea, de la eficacia a la hora de replicarse. Cuantas más copias produzca más fácil será que siga existiendo y reproduciéndose en más y más cerebros.

Pero lo realmente preocupante no es que los memes se introduzcan y se copien en los cerebros humanos, sino que puedan tener *intereses* diferentes de los intereses de las personas que colonizan. La analogía con el gen

egoísta es aquí clara, porque del mismo modo que los genes pueden servirse de los cuerpos para su propia supervivencia y proliferación, también los memes podrían resultar perjudiciales para las personas *infestadas*, y a pesar de eso propagarse (comportándose como verdaderos parásitos).

Ha habido ideas que han llevado a muchos humanos a inmolarsse, por diferentes causas (como estamos viendo estos mismos días en los atentados suicidas), o a morir antes que renegar de ellas (como en el caso de los primeros cristianos), o, simplemente, a no reproducirse. En todos estos casos, los genes (y las personas) se ven perjudicados por los memes, a pesar de que esos destinos (la muerte o el celibato) son elegidos libremente.

Lo que hace que un meme se replique es su expresión, el efecto que produce, tanto o más que el concepto que contiene; hablando en lenguaje biológico, lo que cuenta es su *fenotipo*, del mismo modo que un gen es una unidad de información que se materializa en el fenotipo. También los genes se seleccionan por su expresión y no por sí mismos, ya que obviamente la selección natural no puede *ver* la secuencia de nucleótidos que constituyen la sintaxis del gen. Ya vimos cómo el meme de *sacar las plantas por la noche del dormitorio* se viene multiplicando infinitas veces desde que fue creado, en este caso porque la expresión del concepto de que las plantas respiran oxígeno por la noche se reviste de un componente de temor que hace que la idea sea muy penetrante.

El problema con los memes es que los hay beneficiosos, perjudiciales y neutros. Si es verdad que las plantas representan un peligro para los niños, el meme de *sacar las plantas por la noche del dormitorio* es beneficioso, como también lo es el de vacunar a los niños contra la tuberculosis. Pero los memes perjudiciales se multiplican

a pesar de serlo porque su fenotipo es atractivo, o porque están asociados a otros memes que tienen buena *imagen*; ya se ocupan los fabricantes de alcohol o de tabaco de que sus productos se asocien mentalmente a la salud (precisamente lo que más sufre por su culpa).

Hay, de todos modos, una diferencia importante entre los genes y los memes: la de que, a fin de cuentas, los memes que entran en nuestra cabeza son aquellos que nosotros encontramos atractivos, y que dejamos pasar. Proliferan porque los apreciamos, no como los genes, que nos vienen dados en herencia cuando nacemos, y contra los que no podemos hacer nada (todavía, pero no por mucho tiempo). ¿Es ésta la salvación de nuestro libre albedrío?

Richard Dawkins termina su libro *El gen egoísta* con un canto en honor de la libertad humana. Su razonamiento es éste: los genes egoístas no calculan a largo plazo, sino que actúan en función de sus intereses al más corto plazo posible. Pero lo que los beneficia en un momento determinado puede ser su ruina al cabo del tiempo. Los memes, los otros replicadores, actúan generalmente igual, y tampoco son capaces de prever el futuro, porque son unos replicadores muy simples, inconscientes y ciegos. Dawkins espera que otra cualidad única de los humanos sea la posibilidad de que se pueda dar un altruismo verdadero, no sólo aparente, y totalmente desinteresado. Pero, poniéndose en lo peor, los humanos somos al menos capaces, gracias a nuestras capacidades mentales, de ser unos egoístas con visión de futuro, y de comprender que a veces es mejor renunciar al beneficio inmediato con el fin de obtener más tarde un premio mayor (o para evitar los efectos perniciosos de un posible bien momentáneo). Podemos, incluso, asociarnos y cooperar con otras *máquinas de supervivencia* para

compartir costes y beneficios. Gracias a la capacidad de *simular* en nuestra cabeza el futuro somos los únicos seres que podemos desobedecer a los replicantes (sean genes o memes).

Nosotros somos, en consecuencia, los únicos seres libres. Pero, dice Daniel Dennett, cuando Dawkins habla de que *nosotros* somos libres, ¿quiénes somos *nosotros*?: precisamente los memes que habitan nuestro cerebro y que han construido nuestra mente, que *son* nuestra mente. Estas reflexiones, que amenazan con hacernos perder el juicio, son las mismas que hace muchos años llevaron a Ortega y Gasset a afirmar que las ideas las tenemos, pero que en las creencias *estamos*.

Y es en este justo momento cuando volvemos la mirada desesperada hacia las bases biológicas de la conducta humana, tan denostadas por algunos autores en favor de la cultura. ¿No podremos confiar en que la evolución, que nos ha hecho humanos, nos haya dotado de la capacidad de separar lo beneficioso de lo perjudicial? Nosotros creemos que la respuesta es sí.

Es bueno que continúen las investigaciones sobre la genética del comportamiento humano (la genética cognitiva). Sabremos mejor cómo enfrentarnos a los trastornos de la convivencia cuando las conozcamos bien. Estas investigaciones llevarán años, y el resultado está aun por ver. Nuestra opinión es que no hay que tener miedo de lo que vayamos a encontrar. Pensamos que se descubrirá al final que los genes nos programan para ser libres. Eso quiere decir que nuestra manera de ser no está determinada de forma rígida por nuestros genes, y que si educamos a nuestros hijos para que sean autónomos, tolerantes, pacíficos y sabios, serán capaces de aprender a vivir en paz y prosperidad en un mundo más justo... más humano.

CAPÍTULO XI

Gaia

El químico británico James E. Lovelock y la bióloga americana Lynn Margulis percibieron que existía una estrecha relación entre la vida y el marco físico en el que se desarrolla, y elaboraron una hipótesis llamada Gaia (el nombre de la diosa griega de la Tierra), que ha alcanzado una gran popularidad, llegando a adquirir casi la condición de una *religión para ateos*. La idea esencial de la hipótesis gaiana es la de que la vida no ha evolucionado *en* la Tierra, sino que ha evolucionado *con* la Tierra; dicho de otro modo, a lo largo del tiempo vida y Tierra han co-evolucionado, influyéndose mutuamente. Según este modelo, la vida que alienta en nuestro planeta formaría con el aire, el suelo y el agua un único sistema, muy complejo, que puede ser visto como un único organismo que tiene la capacidad de hacer de nuestro planeta un lugar adecuado para la vida.

La hipótesis Gaia debe mucho a un científico ruso poco conocido por el gran público, un geólogo de San Petersburgo llamado Vladimir Ivanovich Vernadsky. Él fue quien acuñó el término *biosfera* y quien concibió por primera vez la totalidad de la vida como una unidad que forma una fina película en el exterior del planeta Tierra, aunque se condense en seres individuales físicamente separados, que era lo que hasta ese momento se había observado: los árboles no dejaban ver el bosque. Esa masa de vida que rodea el planeta aprovecha la energía y los nutrientes que encuentra a su alrededor.

La biosfera tiene relación con las otras esferas, por supuesto: la litosfera, la hidrosfera, la atmósfera. Por eso, la biosfera es más bien ecosfera, un concepto más amplio que incluye la totalidad de la vida del planeta (la *biota*) más partes de las otras esferas con las que es notorio que los organismos intercambian materiales, y ése es el principal mérito de la hipótesis Gaia: poner de manifiesto que Tierra, mar, aire y vida tienen una historia y un destino común. La palabra ecosfera posee además otro significado muy importante: es un sistema, un conjunto de elementos interrelacionados.

Los sistemas tienen propiedades emergentes (el propio adjetivo tiene resonancias inquietantes). Las propiedades emergentes no sólo dependen de los elementos que constituyen los sistemas, sino de cómo aquéllos se relacionan entre sí. Los sistemas biológicos se contienen unos a otros como las muñecas rusas: célula, tejido, órgano, sistema (otra vez), organismo (hasta aquí no hemos salido aún del terreno de la pura biología), y, por último, ecosfera (el más grande de todos los sistemas vivos del planeta, que también interesa a la Geología); nos saltamos a propósito el nivel del ecosistema porque sólo representa una región de la ecosfera.

Sabemos que los sistemas que están por debajo del nivel de individuo son partes de un todo, es decir, son a su vez elementos de un sistema superior organizado. ¿Por qué, entonces, no suponer que los individuos son partes de un sistema del mismo tipo que un organismo (aunque de nivel más alto)? ¿Y cómo llamaremos a ese sistema integrador de todo lo viviente y, al mismo tiempo, del medio físico que lo rodea?: superorganismo. ¿Y qué nombre pondremos a ese superorganismo? Lovelock y Margulis propusieron éste: Gaia.

Hasta aquí todos de acuerdo. Podemos ir incluso más lejos sin romper el consenso. Aceptemos que Gaia tiene una historia: no es el producto de las circunstancias que se dan en un momento determinado, sino que es algo que permanece a lo largo del tiempo. Para permanecer tiene que cambiar, o adaptarse, porque las circunstancias cambian. Un paso más y llegaremos al borde mismo del abismo: aceptemos que la vida no se ha limitado a adaptarse a los cambios del planeta, sino que ella misma es la fuente del cambio en ocasiones; dicho en otros términos: la vida es un agente geológico. Tenemos ahora una versión de Gaia que es en general bienvenida y no despierta polémica. Al contrario, todos los que aspiramos a una cada vez mayor comunicación entre las ciencias de la vida y de la Tierra les estamos reconocidos a Lovelock y Margulis por su ocurrencia.

El abismo empieza ahora. ¿Tiene Gaia, como buen organismo, *homeostasis*, es decir, se autorregula? ¿Ante un cambio del medio reacciona con un mecanismo de *feedback* (retroalimentación)? Si algo falta en el medio (para la vida, se entiende), ¿Gaia lo produce (*feedback* positivo)?; y si algo sobra, ¿lo reduce (*feedback* negativo)? Más aún, ¿mejora Gaia a lo largo del tiempo las condiciones para la propia vida? Quien conteste afirmativamente a estas preguntas puede considerarse en línea con la versión más radical o *dura* de Gaia, la de sus creadores.

Esas homeostasis se producen en ciclos tan largos temporalmente que no es fácil contrastarlas. Lo mismo, casi, le pasa a la noción de progreso en la complejidad de la biosfera. Los paleontólogos aún discuten si ha habido una tendencia de fondo (pero con altibajos) al aumento de la cantidad y diversidad de la vida marina desde, pongamos, el Cámbrico, hasta la actualidad.

Hay, sin embargo, un aspecto de Gaia que inquieta mucho más: ése es su posible carácter *teleológico*. ¿Tiene Gaia un *telos*, un propósito, un objetivo propio? ¿Cómo se siente usted al pensar que sólo es un elemento, entre muchos, de un organismo más amplio, algo así como si usted fuera una célula de su propio cuerpo, y que ese superorganismo que se llama Gaia va a lo suyo desde hace mucho tiempo y seguirá haciéndolo? En su cuerpo, el de usted, las células de los tejidos mueren y son reemplazadas (salvo, en general, en el sistema nervioso) por otras sin que usted se entere, porque su cuerpo se está reconstruyendo permanentemente para seguir vivo. Si pudiera pensar, una célula de su piel le consideraría inmortal comparado con su muy corta vida. ¿Esa especie de panteísmo, el sentimiento de formar parte de algo más grande y más duradero (Gaia) le consuela del hecho que está condenado a morir como lo están, una tras otra, las células de su cuerpo?

En principio Gaia no es un ser consciente (aunque luego lo discutiremos), pero eso no quiere decir que no pueda existir y tener sus propios intereses. Todos los organismos tienen un *telos*: mantenerse vivos (y transmitir la vida), sin que admitir eso suponga ninguna forma de *vitalismo*, ni tengan que ser por ello las plantas, los animales o las bacterias conscientes. El concepto importante no es el de teleología, sino el de teleonomía, una variante del término que ha sido utilizada por autores como Jacques Monod, Konrad Lorenz y muchos otros para referirse a las estructuras de los organismos que cumplen funciones, que son útiles. Esas estructuras realizan prestaciones, razón por la cual están adaptadas a sus fines. Al igual que nuestras máquinas artificiales (empezando por el hacha de piedra), las estructuras teleonómicas son objetos dotados de diseño, de proyecto, de *intención*. La gran revolución de Darwin fue la de mostrar cómo podían

surgir las estructuras teleonómicas en el curso de la evolución sin necesidad de que nadie las proyectara, gracias al mecanismo de la selección natural. Como Daniel Dennet ha escrito recientemente, lo que Darwin propuso fue un algoritmo que de una manera mecánica, y sin propósito alguno, realiza complicadísimas operaciones de cálculo (toda la *ingeniería* y *biotecnología* de los animales). Las estructuras teleonómicas son las que distinguen una abeja de una montaña. El relieve no se adapta, los picos y los valles no cumplen funciones, no tienen diseño ni proyecto. El pensamiento teleológico (intencional) no se aplica fuera de la biología. La Luna produce las mareas, pero a nadie se le ocurre pensar que ésa es su función; simplemente la Luna existe y las mareas son su efecto. Pero si Gaia es un superorganismo, ¿dónde están esas estructuras adaptativas, o teleonómicas, que caracterizan a todos los individuos que reconocemos como tales?

No es fácil reconocer en la biosfera la existencia de algo equivalente a las adaptaciones, porque aunque las adaptaciones tienen funciones, esas funciones están subordinadas al bien general del organismo. La estructura teleonómica que es el ojo no se puede concebir independientemente, no podría sobrevivir aislada; de hecho, ni siquiera vemos con los ojos: lo hacemos con el cerebro (una persona que tenga una importante lesión en el área visual primaria de la corteza cerebral, en el lóbulo occipital, es ciega, aunque su ojo no haya recibido el más mínimo daño). En otras palabras, el *telos* de la adaptación (su objetivo, su fin, su propósito, su sentido, su prestación) está supeditado al *telos* general del organismo (que es la perpetuación). ¿Existen en la biosfera partes de las que se pueda decir que su existencia sólo se entiende *al servicio* del bienestar del conjunto? En un sistema tan complejo como la biosfera unas partes no pueden existir

sin las otras, eso es cierto, ¿pero podemos decir con propiedad que las plantas existen *para* hacer posible que haya seres que no tienen la capacidad de la fotosíntesis como nosotros? ¿No supone Gaia la vuelta a una visión de un mundo inteligentemente ordenado como el que presenta Santo Tomás en su quinta vía? ¿Es Gaia una versión científica de la idea de la armonía natural?

Por otro lado, si Gaia es un superorganismo dotado de un *telos*, ¿cómo se habría constituido históricamente? Podríamos considerar que los organismos colaboran unos con otros en la homeostasis del sistema para mantener las condiciones de la vida constantes, y aun para mejorarlas; podríamos imaginar incluso que han evolucionado para cooperar más eficazmente, pero, ¿cómo podrían cooperar los organismos si la razón por la que han evolucionado es precisamente porque compiten entre sí en *la lucha por la vida*, según expresión de Darwin?

El altruismo que se le reconoce a las especies en favor de Gaia merece un comentario aparte, porque sí es verdad que se observan comportamientos llamados *altruistas* o cooperativos entre los individuos de determinadas especies. En un tiempo se dijo que tal altruismo se realizaba por el *bien de la especie*, noción que ha sido, como vimos, sustituida por la del bien de los genes (en una serie de teorías que comienzan con J. B. S. Haldane y siguen con William D. Hamilton, John Maynard Smith, Richard Dawkins y Edward O. Wilson). Si el *gen altruista* ha sido reemplazado por el *gen egoísta*, ¿cómo vamos a creer que todos los individuos de la biosfera reman en la misma dirección?

Con consideraciones como éstas la idea científica de Gaia se va *ablandando* y poco a poco desciende (o asciende?) al territorio de la metáfora. Y ya que pensamos en términos de esferas, ¿por qué no acudir a una metá-

fora aún más atrevida? El paleontólogo y jesuita francés Pierre Teilhard de Chardin inventó el concepto de *noosfera*, la envuelta pensante del planeta. Una esfera que, por cierto, se ha hecho realidad con *la Red*: miles de millones de cerebros conectados y trabajando juntos y conscientemente, que van convergiendo hacia una especie de mente universal omnisciente.

Chardin, el *descubridor* de la noosfera, y Vernadsky, el de la biosfera, se trataron e influyeron mutuamente, según cuenta el propio Chardin en una carta: «Vernadsky estaba en París en esa época y yo lo he visto con frecuencia.» Fue el geólogo padre Gaudefroy quien animó a Teilhard a que leyera la *Geoquímica* de Vernadsky, porque el ruso también aspiraba a hacer una sola ciencia de todos los fenómenos de la vida y de la Tierra. Chardin acuñó hacia 1925 la palabra y la noción de noosfera siguiendo el modelo de la biosfera de Vernadsky (la envuelta viva de la Tierra), y la empleó por primera vez en *L'hominisation* (París, 6 de mayo de 1925).

Así que dos científicos visionarios que soñaban con elaborar una síntesis total se frecuentaban en París hacia 1925. Vernadsky tenía entonces sesenta y dos años y Chardin cuarenta y cuatro años. De su relación no salió Gaia, pero ahora, tres cuartos de siglo después, podríamos pensar que puestas las dos esferas juntas (*superpuestas*) tendríamos una biosfera con noosfera, una auténtica Gaia consciente. En cierto modo ésa podría considerarse también la conclusión principal de la obra de Chardin: ¡Qué cerca quedan sus ideas de la mística que late en el fondo de la idea de Gaia, de la luz que brilla en la pupila de los gaianos!

Gaia es una bella metáfora, pero no es necesaria. En el párrafo final de *El origen de las especies* Charles Darwin intenta hacernos comprender que la idea científica de la

evolución es más maravillosa que cualquier mito o metáfora sobre nuestros orígenes: «Hay grandeza en esta concepción de que la vida, con sus diferentes fuerzas, ha sido alentada en un corto número de formas o en una sola, y que, mientras este planeta ha ido girando según la constante ley de la gravitación, se han desarrollado y se están desarrollando, a partir de un principio tan sencillo, infinidad de formas, las más bellas y portentosas.» A ese planeta que nos ha dado a luz los griegos lo sacralizaron como la diosa *Gaia*, que es la *Terra Mater* de los romanos; los vascos lo llaman *Amalur*, la Madre Tierra.

FIN

BIBLIOGRAFÍA

- Alexopoulos, Constantine J., y Mins, Charles W, *Introducción a la Micología*, Omega, Barcelona, 1985.
- Allègre, Claude J., y Scheneider, Stephen H., «*La evolución de la Tierra*», en: *Investigación y Ciencia* (diciembre 1994), pp. 36-45.
- Anguita, Francisco, y Arsuaga, Juan Luis, «Es Gaia una teoría adelantada a su tiempo o una broma vitalista?», en: *Documentos del XI Simposio sobre la Enseñanza de la Geología* (XI LE. G.), Santander, 2000, pp. 20-26.
- Arsuaga, Juan Luis, *El collar del neandertal. En busca de los primeros pensadores*, Temas de Hoy, Madrid, 1999.
- , *El enigma de la Esfinge. Las causas, el curso y el propósito de la evolución*, Areté, Barcelona, 2001.
- Arsuaga, Juan Luis, y Martínez, Ignacio, *La especie elegida. La larga marcha de la evolución humana*, Temas de Hoy, Madrid, 1998.
- Atkins, Peter, y Jones, Loretta, *Química. Moléculas, Materia, Cambio*, Omega, Barcelona, 1998.
- Ayala, Francisco J., Rzhetsky, Andrey, y Ayala, Francisco, «Origin of the metazoan phyla: Molecular clocks confirm paleontological estimates», en: *Proceedings of the National Academy of Sciences of U.S.A.*, 95 (1998), pp. 606-611.
- Bazzaz, Fakhri A., y Fajer, Eric D., «La vida de las plantas en un mundo enriquecido en CO₂», en: *Investigación y Ciencia* (marzo 1992), pp. 6-13.
- Bonner, William A., y Castro, Albert J., *Química orgánica básica*, Alhambra, Madrid, 1976.
- Chen, Jun-Yuan, Huang, Di-Ying, y Li, Chia-Wei, «An early cambrian craniate-like Chordate», en: *Nature*, 402 (1999), pp. 518-522.

- Childress, James J., Felbeck, Horsts, y Somero, George N., «Simbiosis en las profundidades marinas», en: *Investigación y Ciencia* (julio 1987), pp. 7885.
- Cohen, Richard, *History of Life* (2ª Edition), Blackwell Scientific Publications, Londres, 1990.
- Cuénot, Claude, *Pierre Teilhard de Chardin. Las grandes etapas de su evolución*, Taurus, Madrid, 1967.
- Darwin, Charles, *El origen de las especies por medio de la selección natural*, Calpe, Madrid, 1921.
- , *Diario del viaje de un naturalista alrededor del mundo*, Calpe, Madrid, 1921.
- , *El origen del Hombre y la selección en relación al sexo*, Ediciones Ibéricas, Madrid, 1966.
- , *Autobiografía y cartas escogidas*, Alianza Editorial, Madrid, 1997.
- Dawkins, Richard, *El gen egoísta*, Salvat, Barcelona, 1985.
- Deacon, J. W, *Introducción a la Micología moderna*, Limusa, México D.E, 1988.
- Delius, Christoph, Gatzemeier, Matthias, Sertcan, Deniz, y Wünsch, Kathleen, *Historia de la Filosofía. Desde la Antigüedad hasta nuestros días*, Könemann, Colonia, 2000.
- Dennett, Daniel C., *La peligrosa idea de Darwin*, Galaxia Gutemberg-Círculo de Lectores, Barcelona, 1999.
- , *Tipos de mentes*, Debate, Madrid, 2000.
- Dobzhansky, Theodosius, *The Biological Basis of Human Freedom*, Columbia University Press, Nueva York, 1956.
- Dubos, Rene J., *Louis Pasteur: free lance of science*, Little, Brown and Company, Boston, 1950.
- Eibl-Eibesfeldt, Irenäus, *Etología. Introducción al estudio comparado del comportamiento*, Barcelona, Omega, 1974.

- , *El hombre preprogramado*, Madrid, Alianza Editorial, 1977.
- Eldredge, Niles, *Reinventing Darwin. The great debate at the high table of evolutionary theory*, Wiley, Nueva York, 1995.
- Fernández Alvarez, Manuel, *Historia. La Universidad de Salamanca*, Universidad de Salamanca, Salamanca, 1991, pp. 9-44.
- Flammarion, Camille de, *L'atmosphère. Météorologie populaire*, París, 1888.
- , *La atmósfera. Los grandes fenómenos de la naturaleza*, Montaner y Simón, Barcelona, 1902.
- García-Alcalde, Jenaro L., «Evolución biótica y geográfica en el Paleozoico inferior y medio», en: *Registros fósiles e Historia de la Tierra*, Editorial Complutense, Madrid, 1997, pp. 119-142.
- Gillispie, Charles Coulston (editor), *Dictionary of Scientific Biography*, Charles Scribner's sons, Nueva York, 1980.
- González, Daniel H., Iglesias, Alberto A., Podestá, Florencio E., y Andreo, Carlos S., «Metabolismo fotosintético del carbono en plantas superiores», en: *Investigación y Ciencia* (abril 1989), pp. 76-83.
- Gould, Stephen Jay, *Desde Darwin: reflexiones sobre historia natural*, Herman Blume, Madrid, 1983.
- , *El pulgar del panda*, Hermann Blume, Madrid, 1983.
- , *La vida maravillosa*, Crítica, Barcelona, 1991.
- Govindjee y Coleman, William J., «Cómo producen oxígeno las plantas», en: *Investigación y Ciencia* (abril 1990), pp. 50-57.
- Hidalgo, F. Jorge, *La nueva Materia*, Servicio de publicaciones de la Universidad de Extremadura, Cáceres, 1991.
- Horgan, John, «En el principio...» en: *Investigación y Ciencia* (abril 1991), pp. 80-90.
- Huxley, Julian, y Kettlewell, H. D. B., *Darwin*, Salvat, Barcelona, 1994.

- Jacob, François, *El juego de lo posible*, Grijalbo Mondadori, Barcelona, 1982.
- Janvier, Philippe, «Catching the first fish», en: *Nature*, 402 (1999), pp. 21-22.
- Kardong, Kenneth V., *Vertebrados. Anatomía comparada, función, evolución*, McGraw-Hill, Madrid, 1999.
- Knoll, Andrew H., «El final del Eón proterozoico», en: *Investigación y Ciencia* (diciembre 1991), pp. 26-47.
- Kurzban, Robert; Tooby, John, y Cosmides, Leda, «Can race be erased? Coalitional computation and social categorization», en: *Proceedings of the National Academy of Sciences of U.S.A.*, 98 (2001), pp. 15.38715.392.
- Lai, Cecilia S. L., Fisher, Simon E., Hurst, Jane A., Vargha-Khadem, Faraneh, y Monaco, Anthony P., «A forkhead-domain gene is mutated in a severe speech and language disorder», en: *Nature*, 413 (2001), pp. 519-522.
- Lars, Borg, Connelly, James N., Nyquist, Larry E., Chi-Y., Shih, Wiesmann, Henry, y Young, Reese. «The age of the carbonates in martian meteorite ALH84001», en: *Science*, 286 (2001), pp. 90-94.
- Laskar, Jacques, «La Luna y el origen del hombre», en: *Investigación y Ciencia* (julio 1994), pp. 70-77.
- Lehninger, Albert L., *Bioquímica*, Omega, Barcelona, 1981.
- Levinton, Jeffrey S., «La edad de oro de la evolución animal», *Investigación y Ciencia* (enero 1993), pp. 44-53.
- Lewontin, Richard C., Rose, Steven, y Kamin, Leon J., *No está en los genes. Crítica del racismo biológico*, Grijalbo Mondadori, Barcelona, 1996.
- Lezcano, Antonio y Alexander I., «Oparin: apuntes para una biografía intelectual», *Orígenes de la vida. En el centenario de Aleksandr*

- Ivanovich Oparin*, editorial Complutense, Madrid, 1995, pp. 15-39.
- López Piñero, José María, *Ciencia y técnica en la sociedad española de los siglos XVI y XVII*, Labor, Barcelona, 1979.
- , «La ciencia en la España del Barroco», *Arte y Saber. La cultura en tiempos de Felipe III y Felipe IV*, Ministerio de Educación y Cultura, Valladolid, 1999, pp. 149-176.
- López Piñero, José María, Navarro Brotons, V., y Portela Marco E., *Materiales para la historia de las ciencias en España: S. XVI-XVIII* Pre-Textos, Valencia, 1976.
- Lorenz, Konrad, *Sobre la agresión: el pretendido mal*, Siglo XXI, Bilbao, 1972.
- , *La otra cara del espejo*, Círculo de Lectores, Barcelona, 1990.
- Macphail, Euan M., *The Evolution of Consciousness*, Oxford University Press, Oxford, 1998.
- Madigan, Michael T, Marlinko, Jonh M., y Parker, Jack., *Brock Biología de los Microorganismos* (8-edición), Prentice Hall, Madrid, 1998.
- Margaleff, Ramón, *Ecología* (50 edición), Planeta, Barcelona, 1992.
- Mayr, Ernst, *Así es la Biología*, Debate, Madrid, 1998.
- Meglitsch, Paul A., *Zoología de invertebrados*, Hermann Blume, Madrid, 1978.
- Miller, Stanley L., «The First Laboratory Synthesis of Organic Compounds under Primitive Earth Conditions», *The Heritage of Copernicus: Theories A Pleasing to the Mind*, The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1974, pp. 228-242.
- Monod, Jacques, *El azar y la necesidad*, Orbis, Barcelona, 1985.
- Montero, Francisco, «Evolución prebiótica. El origen de la vida», *Origen y Evolución: desde el Big Bang a las sociedades complejas*, Fundación Marcelino Botín, 1999, pp. 199-255.

- Montero, Francisco, y otros, *Evolución prebiótica: el camino hacia la vida*, Eudema (Ediciones de la Universidad Complutense de Madrid), Madrid, 1993.
- Oparin, Alexander I., *El origen de la vida*, Editores Mexicanos Unidos, México D.F., 1976.
- Orgel, Leslie E., «Origen de la vida sobre la Tierra», en: *Investigación y Ciencia* (diciembre 1994), pp. 46-55.
- Ortega y Gasset, José, *Historia como sistema*, Espasa-Calpe, Madrid, 1971.
- Pasteur, Louis, «Acerca de las generaciones espontáneas» (transcripción de la conferencia pronunciada el 7 de abril de 1864 en La Sorbona, traducida por Miguel de Asúa), en: *Ciencia Hoy*, 59 (octubre/noviembre, 2000).
- Peretó, Juli G., *Orígenes de la evolución biológica*, Eudema (Ediciones de la Universidad Complutense de Madrid), Madrid, 1994.
- Pinker, Steven, «Talk of genetics and viceversa», en: *Nature* 413 (2001), pp. 465-466.
- Prigogine, Ilya, y Stengers, Isabelle, *La nueva alianza. Metamorfosis de La ciencia*, Alianza Universidad, Madrid, 1983.
- Ron, Eugenia, y Sobota, Tomás (editores), *Manual de Botánica*, CD-Rom, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, 2001.
- Romer, Alfred S., *Man and the Vertebrates*, Penguin, Harmondsworth, 1954.
- , *Anatomía comparada. Vertebrados*, Interamericana, México, 1973.
- Rosnay, Joel de, *Orígenes de la vida*, Ediciones Martínez Roca, Barcelona, 1970.
- Sagan, Carl., «La búsqueda de vida extraterrestre», en: *Investigación y Ciencia* (diciembre 1994), pp. 62-69.

- Sceilaher, Adolf, Bose, P. K., Pflüger, F., «Triploblastic animals more than 1 billion years ago: trace fossil evidences from India», en: *Science* 282 (1998), pp. 80-83.
- Shapin, Steven, *La revolución científica. Una interpretación alternativa*, Paidós, Barcelona, 2000.
- Shen, Yanan, y otros, «Isotopic evidence for microbial sulphate reduction in the early Archaean era», en: *Nature*, 410 (2001), pp. 77-81.
- Shu, Degan G., Zhang, X.-L., y Conway Morris, Simon, «Lower cambrian vertebrates from South China», en: *Nature* 402 (1999), pp. 42-46.
- Sipper, Moshe, y Reggia, James A., «La autorreplicación de las máquinas», en: *Investigación y Ciencia*, octubre, pp. 14-23.
- Taylor, G. Jeffrey, «El legado del proyecto Apolo», en: *Investigación y Ciencia* (septiembre 1994), pp. 12-19.
- Vega, Lope de, *Rimas humanas y otros versos* (Edición y estudio preliminar de Antonio Carreño), Crítica, Barcelona, 1998.
- Wang, D. Y. C., Kumar, S., y Hedges, S. Blair, «Divergence time estimates for the early history of animal phyla and the origin of plants, animal and fungi», en: *Proceedings of the Royal Society of London. Part B Biological Sciences* 22 (1999), pp. 163-171.
- Wendt, Herbert, *Tras las huellas de Adán: la novela del origen del hombre*, Noguer, Barcelona, 1973.
- White, Tim D., «Prehistoria del canibalismo», en: *Investigación y Ciencia* (octubre 2001), pp. 50-57.
- Wilson, Edward O., *Sociobiología: La nueva síntesis*, Omega, Barcelona, 1980.
- , *Consilience. La unidad del conocimiento*, Galaxia Gutemberg/Círculo de Lectores, Barcelona, 1999.

Wilson, Jean D. (editor), Harrison. *Principios de medicina interna*, Interamericana-McGraw-Hill, Madrid, 1992.

Wray, Gregory, A., Levinton, Jeffrey, S., y Shapiro, Leo H., «Molecular evidence for deep precambrian divergences among Metazoanphyla» en: *Science* 274 (1996), pp. 568-573.

Yochelson, Ellis L., «From farmer-laborer to famous leader; Charles D. Walcott (1850-1927)», en: *GSA Today* 6 (1996), pp. 8-9.